# PLANEJAMENTO DE REGULAÇÃO DE TENSÃO DO SETOR ELÉTRICO: UMA APLICAÇÃO BASEADA EM DECISÃO MULTICRITÉRIO

**Cristiane Perla Castro e Sant'Anna**
Universidade Federal de Pernambuco -Centro Acadêmico do Agreste / CAA
Br 104, Km 59, Nova Caruaru, Caruaru - PE
cristiane.perla@ufpe,br

**Aldsmythys Pinheiro da Costa Cruz**
Operador Nacional do Sistema - ONS
Rua da Aurora, 1343, Boa Vista, Recife-PE
Aldsmythys@gmail.com

**Lúcio Camara e Silva**
Universidade Federal de Pernambuco - Centro Acadêmico do Agreste / CAA
Br 104, Km 59, Nova Caruaru, Caruaru - PE
lucio.silva@ufpe.br

## RESUMO

A energia elétrica precisa obedecer a padrões de qualidade. Um dos indicadores de qualidade de energia é tensão de atendimento em regime permanente. A proposta desse trabalho é aplicar um método de decisão multicritério numa empresa do setor elétrico brasileiro, na qual 7 das suas 130 subestações apresentaram limites violados para tensão de atendimento em regime permanente, sendo necessário investir em equipamentos de regulação de tensão. Portanto, pretende-se auxiliar na tomada decisão para ordenação das subestações quanto criticidade da regulação de tensão. O método utilizado foi o PROMETHEE II. Os resultados obtidos foram o ordenamento das subestações com problemas de regulação de tensão e o decisor concordou com o ranking sugerido, determinando a viabilidade da aplicação do método.

**PALAVRAS CHAVE. Regulação de Tensão, PROMETHEE2, Decisão Multicritério.**

**Tópicos: PO na Indústria; Apoio à Decisão Multicritério; Aplicações em PO.**

## ABSTRACT

Electricity must comply with quality standards. One of the power quality indicators is the steady-state service voltage. The purpose of this work is to apply a multicriteria decision method in a company in the Brazilian electricity sector, in which 7 of its 130 substations had violated limits for the supply voltage in the steady state, requiring investment in voltage regulation equipment. Therefore, it is intended to assist in decision making for the ordering of substations regarding the criticality of voltage regulation. The method used was PROMETHEE II. The results obtained were the ordering of substations with voltage regulation problems and the decision maker agreed with the suggested ranking, determining the feasibility of applying the method.

**KEYWORDS. Voltage Regulation, PROMETHEE2, Multicriteria.**

**Paper topics : PO in Industry; Support for Multicriteria Decision; Applications in PO**

## 1. Introdução

A energia elétrica tem um papel fundamental para sociedade, mas para isto é necessário que as empresas do setor elétrico primem pela qualidade de energia atendendo aos padrões estabelecidos pelo Operador Nacional do Sistema – ONS, que identifica as causas de violações de limites de desempenho através dos indicadores de continuidade de serviço, frequência, tensão de atendimento em regime permanente, flutuação, desequilíbrio e distorção harmônica de tensão, segundo Submódulo 9.7 Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica - ONS [2020].

O indicador de tensão de atendimento em regime permanente será a ênfase desta pesquisa. As empresas do setor elétrico para atender a este indicador e as normas em vigência na ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica precisam investir recursos financeiros para compra de equipamentos de regulação para oferecer tensão controlada e obedecendo aos padrões de qualidade dos órgãos regulamentadores. [Lima e Clemente 2015]

O problema da regulação de tensão em regime permanente é vivenciado por empresas de transmissão de energia elétrica e penaliza consumidores residenciais e industriais devido aos danos que uma tensão não controlada provoca nas instalações elétricas. Com base nesta problemática, analisou-se os indicadores de qualidade de tensão para regime permanente em uma empresa do setor elétrico brasileiro e detectou-se que algumas subestações não atendiam aos indicadores de qualidade de tensão em regime permanente e para corrigir este problema será necessário investimento da empresa de transmissão do setor elétrico pesquisada e das distribuidoras de energia elétrica em equipamentos de regulação de tensão. A aquisição de equipamentos de regulação de tensão requer um investimento de custo elevado e por isso economicamente torna-se inviável investir em todas as subestações que não atendem aos indicadores da ANEEL ao mesmo tempo. Desta forma, é necessário que seja realizada uma priorização de quais subestações em situação de maior criticidade quanto aos problemas de regulação de tensão em regime permanente. Para que esta priorização das subestações quanto aos problemas de regulação de tensão seja realizada de maneira eficiente e assertiva levando em consideração critérios elétricos, normativos e econômicos. Utilizou-se nesta pesquisa das técnicas de Métodos de Decisão Multicritério - MCDM. Realizou-se entrevistas com o decisor e verificou-se que a sua racionalidade é não compensatória desta forma foi escolhido o método PROMETHEE que dentre outros métodos de sobreclassificação, possibilita a ordenação das prioridades, não demanda muito tempo do decisor e possui uma interface de software de visualização amigável.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver através da abordagem multicritério a ordenação das subestações mais críticas referente a regulação de tensão em regime permanente para planejar e priorizar áreas que mais precisam de investimento em regulação de tensão, avaliando os fatores envolvidos, considerando os parâmetros técnicos, econômicos e sociais que deverão ser atendidos pela empresa para que ela possa realizar o processo de decisão de forma assertiva.

Esta pesquisa tem como objetivo específico elevar a qualidade do serviço de energia elétrica com tensão controlada e dentro dos padrões solicitados pela ANEEL, beneficiando a empresa pesquisada e os seus consumidores.

Neste trabalho realizou-se a fundamentação teórica na seção 2, abordou-se os conceitos de qualidade de energia com ênfase nos indicadores de tensão em regime permanente e a aplicação das ferramentas de decisão multicritério correlacionadas a energia elétrica e a importância do método não compensatório, PROMETHEE II. Na seção 3, foi apresentada a metodologia utilizada neste trabalho e serão descritos os critérios, alternativas, características do decisor e da empresa pesquisada e como foi configurado o método PROMETHE II dentro da problemática apresentada. Na seção 4, serão apresentados os resultados esperados que são a ordenação das subestações de acordo com a maior criticidade para regulação de tensão em regime

permanente e será realizada a análise de sensibilidade destes dados. Na seção 5, apresentou-se a conclusão da pesquisa analisando os resultados encontrados com a percepção do decisor e da gestão da empresa pesquisada. No final , será listada toda literatura utilizada para realização da pesquisa que compreende artigos e livros.

## 2. Fundamentação Teórica

### 2.1. Indicadores de Qualidade de Energia

Segundo o PRODIST-ANEEL [2021], para definição de qualidade de energia, três fatores precisam ser avaliados: a qualidade do produto, a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento das reclamações.

O módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica do PRODIST define a terminologia dos indicadores, caracteriza os fenômenos e define os valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativa à conformidade de tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão.

A qualidade do produto tem como objetivo tratar os seguintes fenômenos em regime permanente ou transitório. Os fenômenos para regime permanente são tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência. Para regime transitório há variações de tensão de curta duração – VTCD. O foco desta pesquisa é análise da tensão regime permanente.

### 2.1.2 Tensão em Regime Permanente

A tensão em regime permanente deve ser acompanhada em todo sistema de distribuição, sendo responsabilidade da distribuidora, os recursos e as técnicas para tal acompanhamento, atuando de forma preventiva para que a tensão em regime permanente se mantenha dentro dos padrões adequados.

Referente ao termo Conformidade de tensão elétrica é a comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos.

A avaliação da tensão em regime permanente deve ser realizada através de um conjunto de leituras obtidas de medição apropriada. A conformidade dos níveis de tensão deve ser avaliada dos pontos de conexão à rede de distribuição, nos pontos de conexão entre distribuidoras e nos pontos de conexão com as unidades consumidoras por meio de indicadores.

### 2.1.3 Indicadores de Tensão de Regime Permanente

São considerados pontos de observação da tensão, os pontos onde se localizam o Sistema de Medição para Faturamento – SMF dos agentes de distribuição, de geração, de importação/exportação e consumidores, conforme designados nos respectivos Contratos de Uso do Sistema de Transmissão – CUST, segundo Submódulo 9.7 Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica- ONS [2020].

Os indicadores DRP e DRC serão referentes a um mês civil. São considerados todos os conjuntos de 1008 leituras cujo período de medição tenha sido concluído no respectivo mês civil, onde o valor a ser considerado para o mês civil será a média das 1008 leituras válidas. Para acessantes da Rede Básica, os indicadores DRP e DRC deverão ser calculados de acordo com critérios estabelecidos no Procedimento de Rede.

O Operador Nacional do Sistema-ONS realiza a avaliação do desempenho da Rede Básica quanto à tensão em regime permanente através dos valores obtidos dos sistemas de medição e supervisão para os barramentos sob responsabilidade de concessionárias de transmissão.

A avaliação da tensão de atendimento em regime permanente é quantificada por indicadores que refletem o percentual de tempo, realizado mensalmente, em que a tensão de

leitura – TL, em relação à tensão contratada – TC, pode ser classificada como adequada, precária ou crítica. No caso dos pontos de observação da tensão da Rede Básica, TC é igual a tensão nominal – TN, ou seja, TC = TN. Para a obtenção de TL são utilizados os valores de tensão eficaz fase-neutro, de cada fase, integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos.
Para a avaliação da tensão de atendimento em regime permanente são utilizados os seguintes indicadores:
(a) Duração Relativa de Violação de Tensão Precária – DRP;
(b) Duração Relativa de Violação de Tensão Crítica – DRC.

Os indicadores da tensão de atendimento em regime permanente são apurados mensalmente. A avaliação do desempenho da tensão para barramentos sob responsabilidade de concessionárias de transmissão deve ser realizada com base nos valores dos indicadores DRP e DRC, conforme estabelecido no submódulo 9.7 Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica da Rede Básica- ONS.

O indicador DRP, em cada ponto de observação da tensão, é equivalente ao maior valor dentre os indicadores calculados para cada fase (DRPFase). O indicador DRC, em cada ponto de observação da tensão, é equivalente ao maior valor dentre os indicadores calculados para cada fase (DRCFase). Os indicadores DRPFase e DRCFase são calculados pelas seguintes expressões, aplicadas para cada fase do sistema elétrico, conforme as equações abaixo:

$$DRPFase(\%) = (nI_p\ Fase/nFase)\ x\ 100 \qquad (1)$$

$$DRCFase(\%) = (nI_C\ Fase/n\ Fase)\ x\ 100 \qquad (2)$$

Onde:
nlpFase = número de leituras da fase com tensão de atendimento precária, em base mensal;
nlcFase = número de leituras da fase com tensão de atendimento crítica, em base mensal;
e nFase = número de leituras da fase, em base mensal.

O contador nlpFase é incrementado quando a tensão da fase equivalente se localiza na faixa precária. Da mesma forma, o contador nlcFase é incrementado quando a tensão da fase equivalente se localiza na faixa crítica. Tais faixas são definidas em função da TN, conforme mostra a Tabela 1.

| **Tensão Nominal do Ponto de Observação de Tensão ( kV)** | **Classificação de Tensão de Atendimento em Regime Permanente** | | |
|---|---|---|---|
| | **Adequada** | **Precária** | **Crítica** |
| TN≥230 | 0,95TC≤TL≤1,05TC | 0,93TC≤TL<0,95TC ou 1,05TC<TL≤1,07TC | TL<0,93TC ou TL>1,07TC |
| 69≤TN<230 | 0,95TC≤TL≤1,05TC | 0,90TC≤TL<0,95TC ou 1,05TC<TL≤1,07TC | TL<0,90TC ou TL>1,07TC |
| 1<TN<69 | 0,93TC≤TL≤1,05TC | 0,90TC≤TL<0,93TC | TL<0,90TC ou TL>1,05TC |

Tabela 1 - Classificação da tensão de atendimento em regime permanente
Fonte: Submódulo 9.7 Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica – ONS [2021]

Na Tabela 1, temos a classificação da tensão de atendimento em regime permanente, em função da tensão nominal para barramentos sob responsabilidade de concessionárias de transmissão**.** Nota: TC = Tensão contratada (kV); TL = Tensão de leitura (kV); TN = Tensão nominal (kV). Na fronteira da Rede Básica, TC = TN.

Quanto aos pontos de observação da tensão será realizada de forma sistêmica, através de ponto de observação de tensão, agente de operação conectado, estado, região e sistema. Quanto ao período das medições serão mensais e anual. Referente a divulgação dos indicadores é mensal.

Diante destes indicadores de tensão em regime permanente, é necessário que cada transmissora análise e detecte se todas as suas subestações atendem aos padrões de qualidade de energia solicitado pela ANEEL e invista em novos equipamentos de regulação de tensão nas suas instalações para que os seus clientes não sejam prejudicados.

Para viabilizar a tomada de decisão de quais subestações devem ser investidos recursos de regulação diante de diversos critérios que precisam ser avaliados como: econômicos, elétricos, normativos e sistêmicos é de suma importância para otimizar e aumentar a acuracidade da decisão, o uso de ferramentas multicritério pois possibilita, auxiliada por várias metodologias que uma problemática com várias alternativas e vários critérios, se obtenha a decisão esperada com maior assertividade.

## 2.2. Decisão Multicritério

O processo de tomada de decisão direciona direta ou indiretamente a uma escolha, dentro de um universo de várias alternativas e todas com grande probabilidade de solucionar o problema. O processo de decisão se tornou cada vez mais complexo devido a rapidez com que ocorre as mudanças, aumento do índice de incerteza e dos elevados investimentos. É inviável determinar as escolhas estratégicas de uma organização com assertividade usando ferramentas tradicionais. [Araújo e Almeida 2009]. É imprescindível, a utilização de métodos multicritérios para auxiliar na tomada decisões das organizações.

O objetivo de todos os métodos multicritério é aumentar as dominâncias, ou seja, reduzir o número de incomparabilidades. Quando uma função de utilidade é construída, o problema multicritério é reduzido a um problema de critério único para o qual uma solução ideal existe. Parece uma visão hiperbólica porque depende de um sistema bastante forte de suposições e isso transforma completamente a estrutura da decisão do problema. Por esta razão, B. Roy propôs construir relações de superação, incluindo apenas enriquecimentos realistas da relação de dominância. Nesse caso, nem todas as incomparabilidades são retiradas, mas a informação torna-se mais confiável. [Brans e Smet 2016)]

Segundo Araújo e Almeida [2009], a problemática da decisão multicritério pode ser modelada com o auxílio de várias metodologias que analisam e escolhem alternativas de acordo com múltiplos critérios, muitas vezes conflitantes. Estão relacionadas com etapas a serem seguidas no processo decisório como definição dos critérios, modelagem das preferências, estruturação do problema e escolha do método de apoio a decisão que será adotado.

## 2.3. Métodos PROMETHEE

A utilização de métodos de decisão multicritério é de suma importância para tomada de decisão nas organizações que se deparam com vários objetivos e que seus decisores precisam decidir com assertividade. Vale ressaltar que o desempenho dos atores no processo decisório terá como consequência o lucro, a competitividade e o futuro desta empresa. Quanto a classificação relativa aos métodos: podem ser compensatórios e não compensatórios, isto deve ser considerada na análise do problema, quando se pretende a estrutura de preferência do decisor e a racionalidade que ele possui. Uma outra classificação para métodos multicritério, considera três métodos principais: métodos de critério único de síntese, métodos de sobreclassificação e métodos interativos. Nesta pesquisa a ênfase foi nos métodos de sobreclassificação.

Os métodos de sobreclassificação representam uma das principais escolas de métodos de decisão multicritério. Os elementos principais que distinguem essa abordagem são reputados e sua diferença dos precedentes. São conhecidas as famílias de métodos ELECTRE e PROMETHEE, que são os mais utilizados. As características gerais dos métodos de sobreclassificação são baseadas na comparação par a par ente as alternativas, focando em uma relação de sobreclassificação que tem algumas características que se diferenciam dos métodos de agregação por meio de critério único e simples. Os métodos de sobreclassificação apresentam avaliações não compensatórias, enquanto os métodos de agregação por meio de critério único de síntese são compensatórios. Dentre os métodos de sobreclassificação foi escolhido o PROMETHEE II, pois a ocorrência da condição para relação de indiferença é pouco provável, isto viabiliza uma ordem completa e aparentemente torna-se mais confiável. [Almeida, 2013]

### 2.3.1 Método PROMETHEE II

A extensão PROMETHEE II consiste na utilização das relações de preferência (P) e indiferença (I), utilizando o fluxo líquido de importância obtido pela equação 8, viabilizando a produção de um ranking completo. O fluxo líquido pode ser relatado como o equilíbrio entre os fluxos positivos e negativos dados pela equação 6 e 7, logo, quanto maior o valor obtido, melhor a alternativa de escolha. Com a obtenção das relações de preferência, a ordenação será construída de forma decrescente quanto aos valores obtidos no fluxo líquido respectivo a cada alternativa. [Moreira et al. 2019]

Segundo Brans e Vincke [1985], O método PROMETHE II utiliza uma função de preferência que possibilita a tomada de decisão entre a ação a em relação a ação b. Os valores desta função variam entre 0 e 1, vale ressaltar que será definida separadamente para cada critério. A função de preferência são os critérios específicos e as ações específicas de k são a e b.
A função de preferência P(a,b), a em relação a b, pode ser definida conforme a equação 3:

$$P(a,b) = \begin{cases} 0, & f(a) < f(b), \\ p[f(a), fb)], & f(a) > f(b). \end{cases} \quad (3)$$

Para casos reais, o ideal é escolher uma função do tipo da equação 4:

$$p[f(a), f(b) = p[f(a) - f(b)] \quad (4)$$

Para esta pesquisa foi utilizada a função de preferência para critério usual de acordo com a equação 5

$$p(x) = \begin{cases} 0, & \forall\ x < 0, \\ 1, & \forall\ x > 0. \end{cases} \quad (5)$$

Segundo Brans e Vincke [1985], O método PROMETHE II considera pré-ordem completa e é utilizado para tomada de decisão.

Pode-se considerar para cada ação a ϵ K o fluxo líquido:

$$\Phi^{+}(a) = \sum_{b \in a} \pi(a,b)/n - 1 \quad (6)$$

$$\Phi^{-}(a) = \sum_{b \in a} \pi(b,a)/n - 1 \quad (7)$$

$$\Phi(a) = \Phi(a)^{+} - \Phi(a)^{-} \quad (8)$$

Este fluxo pode ser utilizado para ordenações.

- a sobreclassifica b ( a P b ) , se $\Phi(a) > \Phi(b)$ (9)
- a é indiferente a b ( a I b ) , se $\Phi(a) = \Phi(b)$ (10)

Esta é a relação completa do PROMETHE II. Todas as ações de K são ordenadas completamente, mas esta relação é um pouco pobre nas informações e menos realísticas porque balanceia os efeitos entre as saídas e entradas dos fluxos.
O PROMETHE II provê uma total de ordenação que é aprazível para tomada de decisão, mas algumas informações uteis sobre incomparabilidade são perdidas.

Segundo Brans [2016], o PROMETHEE II consiste na classificação completa. Muitas vezes é o caso de tomador de decisão solicitar uma classificação completa. O fluxo líquido de superação pode então ser considerado conforme a equação 8. Quanto mais alto o fluxo líquido, melhor será a alternativa. Como o fluxo líquido produz uma classificação completa, pode ser comparado com uma função de utilidade. Uma vantagem é que ele é baseado em informações claras e simples, informações de preferência (funções de pesos e preferências) e que dependem em declarações comparativas em vez de declarações absolutas.

### 2.3.2 MCDM em Energia

A tomada de decisão em uma organização tem um papel importantíssimo para que toda empresa mantenha sua produtividade no mercado e para perspectivas no futuro. Claramente, a demanda envolve problemas de decisões nas organizações, envolvendo vários múltiplos objetivos. Este assunto está inserido na área de Ciência da Gestão e Pesquisa Operacional, de onde surgiu o campo que envolve os métodos multicritério de apoio a decisão. [Almeida, 2013].

Os métodos multicritérios são utilizados na área de energia elétrica para várias finalidades. Pesquisou-se na base de dados SCOPUS (Elsevier) que teve como resultado 245 artigos e destes 10 estavam mais correlacionados com esta pesquisa e possuíam maior número de citações. Foi utilizado o software Vosview para auxiliar na pesquisa bibliográfica que possibilitou detectar os principais autores, quais os mais citados e com mais artigos relacionados a este estudo.

Verificou-se dentre os artigos pesquisados a utilização dos métodos multicritério para planejamento e expansão de alternativas no setor de fornecimento e qualidade de energia elétrica, observou-se também temas como otimização da comercialização de energia nos artigos selecionados. Outra área de grande destaque é para alocação e escolha de melhores locais para instalação de fontes de energia renováveis tanto eólicas quanto fotovoltaica.

## 3. Metodologia

A pesquisa foi realizada em uma empresa do setor elétrico brasileiro que atua na área de geração e transmissão de energia elétrica. Quanto ao seu sistema de transmissão possui 130 subestações e 290 linhas de transmissão em corrente alternada nas tensões de 500, 230,138 e 69kV com extensão de 20.924,9kM. Quanto ao seu sistema de geração possui 12 hidrelétricas e dois parques eólicos em operação com um total de 61,1 MW de geração eólica. A potência total instalada do parque gerador da empresa estudada é de 10.323,43MW. O decisor é engenheiro eletricista com vinte anos de experiência e trabalha como gestor na Superintendência de Operação de Sistema Eletroenergético da empresa pesquisada e possui envolvimento direto no processo decisório.

Na pesquisa utilizou-se a metodologia multicritério para obter a ordenação das alternativas que são sete subestações que apresentaram as maiores variações de tensão em regime permanente durante o ano de 2020 e que não atenderam aos indicadores de qualidade de tensão especificados pela ANEEL, conforme a tabela 2.

| ÍTEM | ALTERNATIVAS | SIGLA | NÍVEL DE TENSÃO |
|---|---|---|---|
| 1 | Banabuiu | BNB | 69kV |
| 2 | Mossoró Dois | MSD | 69kV |
| 3 | Tauá | TAD | 69kV |
| 4 | Olindina | OLD | 13,8kV |
| 5 | Itabaiana | ITB | 69kV |
| 6 | Jaboatão Dois | JBD | 69kV |
| 7 | Santa Cruz Dois | STD | 69kV |

Tabela 2 – As alternativas que são sete subestações do sistema elétrico que apresentaram as maiores variações de tensão em regime permanente no ano de 2020 na empresa pesquisada.
Fonte: Elaborada pelos autores

Através de reuniões com o decisor, foram definidos os critérios para se obter a ordenação das subestações que apresentam o pior controle de tensão em regime permanente. Portanto, os critérios que serão utilizados, todos correspondem a escala de mensuração de razão e estão listados segundo a tabela 3.

| ÍTEM | CRITÉRIOS | DESCRIÇÃO |
|---|---|---|
| 1 | **Demanda Instalada** | **Demanda Instalada:** é a demanda máxima coletada em dia útil de cada subestação, ou seja, a potência ativa máxima de cada instalação medida em MW. Os dados desse critério foram coletados utilizando o aplicativo Supervision, obtendo assim as demandas máximas para cada subestação para o ano 2020. A maximização do critério baseou-se na norma do Operador Nacional do Sistema – ONS, Manual de Procedimento da Operação. |
| 2 | **Controle Automático de Tensão Inoperante** | **Controle Automático de Tensão Inoperante:** Todas as subestações dispõem do controle automático de tensão que garante que as barras de 69KV e 13,8KV de cada subestação mantenha suas tensões conforme as respectivas faixas de tensão das concessionárias. Foi contabilizado para o ano de 2020 todas as indisponibilidades do controle automático de tensão para as sete subestações com potencial problema de regulação através do visor de alarmes do Sistema supervisório da empresa com o auxílio do aplicativo Supervision. Este critério foi maximizado pois quanto maior a indisponibilidade do controle automático de tensão mais precária será a regulação de tensão em regime permanente desta subestação. |
| 3 | **Índice de Controle Adequado** | **Índice de Controle Adequado:** Este indicador é segundo a norma Submódulo 9.7 Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica da Rede Básica - ONS de 01/01/2021, que descreve os indicadores para qualidade da tensão em regime permanente. Para faixa de tensão de 1KV a 69KV, a tensão de leitura deve ser maior que 0,93 vezes a Tensão Contratada e menor que 1,05 vezes da Tensão Contratada. Os dados foram coletados através do aplicativo Supervision que disponibiliza o índice de Controle Adequado Mensal e de posse deste valor foi possível obter a média anual para cada subestação para o ano de 2020. A minimização do Índice de Controle Adequado indicará uma subestação que opera fora dos padrões de tensão adequada. |

| | | |
|---|---|---|
| 4 | **Índice de Controle Precário** | **Índice de Controle Precário:** Este indicador é de acordo com a norma Submódulo 9.7 Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica da Rede Básica - ONS de 01/01/2021. Para a faixa de tensão variando de 1KV a 69KV, a tensão de leitura deve ser maior que 0,90 vezes a tensão contratada e menor que 0,93 vezes a tensão contratada. Os dados foram coletados através do aplicativo Supervision que disponibiliza o índice de Controle Precário Mensal e de posse deste valor foi possível obter a média anual para cada subestação para o ano de 2020. A minimização do Índice de Controle Precário indica uma subestação que opera com padrões de regulação de tensão precário. |
| 5 | **Índice de Controle Crítico** | **Índice de Controle Crítico:** Este indicador é de acordo com a norma Submódulo 9.7 Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica da Rede Básica - ONS de 01/01/2021. Para a faixa de tensão variando de 1KV a 69KV, a tensão de leitura deve ser maior que 1,05 vezes a tensão contratada ou menor que 0,9 vezes a tensão contratada. Os dados foram coletados através do aplicativo Supervision que disponibiliza o índice de Controle Crítico Mensal e de posse deste valor foi possível obter a média anual para cada subestação para o ano de 2020. A minimização do Índice de Controle Crítico indica uma subestação que opera com padrões de regulação de tensão crítico. |
| 6 | **Potência Reativa Capacitiva Disponível** | **Potência Reativa Capacitiva Disponível:** É o somatório da potência reativa disponível dos equipamentos de regulação capacitiva de cada subestação. Foi obtida através de consulta nos diagramas unifilares de cada subestação. A potência capacitiva disponível foi minimizada para se obter a subestação com a pior regulação em regime permanente. |
| 7 | **Potência Reativa Indutiva Disponível** | **Potência Reativa Indutiva Disponível:** É o somatório da potência reativa disponível dos equipamentos de regulação indutiva de cada subestação. Foi obtida através de consulta nos diagramas unifilares de cada subestação. A potência indutiva disponível foi minimizada para se obter a subestação com a pior regulação em regime permanente. |

Tabela 3 – Descrição dos critérios
Fonte: Elaborada pelos autores

Elaborou-se a matriz de consequência de acordo com os critérios sugeridos pela gestão da empresa pesquisada e em entrevista com o decisor conforme a tabela 4. Verificou-se que o decisor possui racionalidade não compensatória. De posse destas informações, o método que melhor se encaixa em nossa problemática é o PROMETHEE II.

| | **C1** | **C2** | **C3** | **C4** | **C5** | **C6** | **C7** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **PESOS** | 0,15 | 0,3 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,05 |
| **Alternativas** | **Demanda Instalada** | **Controle Autom T. I.** | **IC Adequado** | **IC precário** | **IC Crítico** | **Q.CAP.** | **Q. IND.** |
| BNB | 83,5 | 127 | 98,1 | 100 | 100 | 101 | 49,8 |
| MSD | 189,2 | 21 | 98 | 99,8 | 100 | 14,4 | 57,14 |
| TAD | 45,9 | 380 | 98,6 | 100 | 100 | 90 | 61,61 |
| OLD | 8,0 | 887 | 77,8 | 77,8 | 77,8 | 0 | 0 |
| ITB | 67,4 | 4 | 99,2 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| JBD | 79,3 | 3 | 99 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| STD | 36,3 | 649 | 86,6 | 99,9 | 100 | 0 | 10 |
| | **MAX** | **MAX** | **MIN** | **MIN** | **MIN** | **MIN** | **MIN** |

Tabela 4 – Matriz de Consequência
Fonte: Elaborada pelos autores

Em entrevista com o decisor foi realizada a ordem de importância dos critérios para gestão da empresa pesquisada e logo em seguida o decisor atribuiu pesos para os critérios sugeridos, conforme a tabela abaixo

| ORDENAÇÃO | CRITÉRIOS | PESOS |
|---|---|---|
| 1º | Controle Autom Tensão Inoperante | 0,3 |
| 2º | IC Crítico | 0,2 |
| 3º | Demanda Instalada | 0,15 |
| 4º | IC precário | 0,15 |
| 5º | IC Adequado | 0,1 |
| 6º | Q.Capacitivo | 0,05 |
| 7º | Q.Indutivo | 0,05 |

Tabela 5 – Ordenação dos Critérios e os seus respectivos pesos.
Fonte: Elaborada pelos autores

Devido as respostas do decisor terem mostrado que não havia dúvidas quanto à intensidade de suas preferências, na implementação do método PROMETHEE II foi adotado o critério usual, conforme o qual não há parâmetros a serem definidos. Com a finalização do levantamento dos dados com o decisor, os dados foram aplicados no software Visual PROMETHEE e nesta plataforma, realizou-se a aplicação do método multicritério PROMETHEE II e obteve-se a ordenação das subestações com maiores problemas de regulação de tensão em regime permanente. Em seguida, foi realizada a análise de sensibilidade com a alteração dos pesos de acordo com o conhecimento tácito do decisor.

## 4. Resultados e Discursões

De posse dos dados coletados na matriz de consequência conforme tabela 4, realizou-se a simulação no software Visual PROMETHEE para obtenção do método PROMETHEE II, que possibilita uma pré ordenação das alternativas através de uma avaliação de forma global. Obteve-se da plataforma PROMETHEE, a ordenação das subestações com maiores problemas para regulação de tensão em regime permanente, conforme a tabela 6.

A ordenação das sete alternativas foi viabilizada através do fluxo líquido para se obter o ranking final. Verificou-se que a subestação com maior problema de controle de tensão em regime permanente é Olindina pois apresenta o maior fluxo líquido, seguida da subestação de Santa Cruz Dois e Mossoró Dois. A subestação de Jaboatão Dois é a que apresenta o melhor controle de tensão em regime permanente, seguida pela subestação de Itabaiana referente as sete alternativas apresentadas.

Estes resultados foram apresentados ao decisor que concordou com a análise realizada e ratificou que os recursos financeiros disponíveis seriam utilizados em equipamentos de regulação de tensão, priorizando as subestações de Olindina e Santa Cruz Dois.

| POSIÇÃO | ALTERNATIVAS | SIGLA | Fluxo Líquido Φ |
|---|---|---|---|
| 1 | Olindina | OLD | 0,658 |
| 2 | Santa Cruz Dois | STD | 0,208 |
| 3 | Mossoró Dois | MSD | 0,100 |
| 4 | Banabuiú | BNB | -0,075 |
| 5 | Tauá Dois | TAD | -0,175 |
| 6 | Itabaiana | ITB | -0,350 |
| 7 | Jaboatão Dois | JBD | -0,367 |

Tabela 6 – Ordenação das subestações utilizando o método PROMETHEE 2
Fonte: Elaborado pelos autores

Realizou-se a análise de sensibilidade através da mudança dos pesos de preferência para os respectivos critérios com a seguinte faixa de variação: os critérios com pesos maiores foram decrementados de 10% e para os critérios com pesos menores foram incrementados 10%.

Com a mudança do valor dos pesos dos critérios, não houve mudança significativa no ranking das alternativas isto devido as variações no fluxo líquido que não foram sensíveis as mudanças dos pesos, mas as subestações de Olindina – OLD e Santa Cruz Dois - STD permaneceram como as mais desejáveis no processo de decisão para priorização no planejamento do problema de regulação de tensão em regime permanente. Verificou-se com o decisor a coerência dos resultados obtidos na pesquisa e que este estudo possibilitou a tomada de decisão da empresa de forma eficaz e com acuracidade.

## 5. Conclusão

Este trabalho tem como objetivo a ordenação das subestações mais críticas referente a regulação de tensão em regime permanente utilizando a abordagem multicritério para priorizar áreas que precisam de investimentos em novos equipamentos de regulação de tensão.

A obtenção das sete alternativas que são as subestações foi realizada através da análise de relatório anual referente ao ano de 2020 para os índices de controle de tensão adequado, precário e crítico para avaliação da regulação da tensão em regime permanente. Os critérios foram elencados de acordo com fatores financeiro, técnico, social e organizacional, realizando-se a análise da repercussão de cada critério para empresa estudada. Em seguida, após a avaliação da problemática existente e da característica não compensatória do decisor optou-se pela aplicação do método de sobreclassificação PROMETHE II para se obter a ordenação das alternativas.

Após a simulação dos dados foi obtido o *ranking* das alternativas com o ordenamento da melhor opção para pior opção, o decisor visualizou a ordenação das subestações quanto a criticidade para controle de tensão em regime permanente e concordou com os resultados obtidos comprovando desta forma exequibilidade do método aplicado e enfatizou que inicialmente serão investidos recursos financeiros para obtenção de equipamentos de regulação de tensão para as alternativas Olindina e Santa Cruz Dois , conforme o ordenamento obtido pela aplicação do método PROMETHE II.

A utilização da abordagem multicritério possibilitou o apoio ao processo de tomada de decisão levando em consideração características técnicas, econômicas, organizacionais e normativas para auxiliar na decisão referente a ordenação das subestações mais críticas referente ao controle de tensão em regime permanente, vale ressaltar que foi investido o menor tempo possível para se obter uma decisão gerencial de grande importância.

Para trabalhos futuros pode ser realizada esta mesma problemática de priorização de subestações para indicadores de tensão em regime permanente para um decisor de racionalidade compensatória.

## Referências

Almeida, A. T. de (2013), Processo de Decisão das Organizações, Editora Atlas, São Paulo.

Araújo, A. G. de e Almeida A. T. de (2009), Apoio à decisão na seleção de investimentos em petróleo e gás: uma aplicação utilizando o método PROMETHEE. Revista Gestão e Produção, São Carlos, v. 16, n. 14, p.534-543, out.-dez.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2021), Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.

Brans, J.P. e Vincke, P. (1985), A Preference Ranking Organisation Method: The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making. Management Science, V. 31, P. 647–656.

Brans ,J.P. e Smet, Y. de (2016). PROMETHEE Methods. Multiple criteria decision analysis, Springer, New York, P. 187-219.

Cavallaro, Fausto (2010), A Comparative Assessment of Thin-film Photovoltaic Production Processes Using the ELECTRE III Method, Energy Policy, V.38, Edição, P. 463-474.

Cunden , T. S.M. , Doorga , J., Lollchund , M. R. , Rughooputh , S. D.D.V (2020), Multi-level constraints wind farms siting for a complex terrain in a tropical region using MCDM approach coupled with GIS, Energy, Elsevier, V. 211(C).

Carvalho, V. D. H, Poleto, T. , Silva, L. C, (2015), Abordagem multicritério de apoio a decisões estrategicamente sustentáveis nas organizações. Revista Produção Online, Florianópolis, V.15, n. 3, p. 925-947.

G. Heinricha,, L. Bassonc , B. Cohena , M. Howellsd e J. Petriea, (2007), Ranking and selection of power expansion alternatives for multiple objectives under uncertainty, Energy, V. 32, E. 12, P. 2350-2369.

Janke, Jason R (2010), Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado, Renewable Energy, V. 35, Edição 10, P. 2228-2234.

Kaldellis, J.K., Chrysikos , T. (2019), Wave energy exploitation in the Ionian Sea Hellenic coasts: spatial planning of potential wave power stations, International Journal of Sustainable Energy, 38:4, P.312-332.

Lima, M. A. X de , Clemente, T. R. N. e Almeida, A. T. de (2016), Prioritization for allocation of voltage regulators in electricity distribution systems by using a multicriteria approach based on additive-veto model, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 77(), P.1–8.

Martinez , L. J., Lambert J. H e Karvetski , C W. (2011), Scenario-informed multiple criteria analysis for prioritizing investments in electricity capacity expansion, Reliability Engineering and System Safety 96(8), P.883–891.

Moreira , M. A. L, Santos , M. dos , Gomes ,C. F. S.(2019), Desenvolvimento de Ferramenta Computacional em Python: implementação e estudo de caso dos métodos PROMETHEE I, II e III, SPOLM, Rio de Janeiro. P.1-17.

Operador Nacional do Sistema – ONS (2020), Submódulo 9.7 Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica da Rede Básica

Rovisham, J., Doorga ,S., Rughooputh , S. D.D.V. e Boojhawon, R .(2018) , High resolution spatio-temporal modelling of solar photovoltaic potential for tropical islands: Case of Mauritius, Energy 169, P.972-987