

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE RIBEIRO VIEIRA

METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DO PORTFÓLIO DE OBRAS DE EMPRESAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CURITIBA

2023

FELIPE RIBEIRO VIEIRA

METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DO PORTFÓLIO DE OBRAS DE EMPRESAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Unsihuay-Vila

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Vieira, Felipe Ribeiro

Metodologia para otimização do portfólio de obras de empresas de distribuição de energia elétrica / Felipe Ribeiro Vieira. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Unsihuay-Vila

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Indicadores econômicos. 3. Eficiência Econômica. 4. Otimização. I. Unsihuay-Vila, Clodomiro. II. Aoki, Alexandre Rasi. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FELIPE RIBEIRO VIEIRA** intitulada: **METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DO PORTFÓLIO DE OBRAS DE EMPRESAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**, sob orientação do Prof. Dr. CLODOMIRO UNSIHUAY-VILA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 27 de Outubro de 2023.

Assinatura Eletrônica
30/10/2023 11:07:10.0
CLODOMIRO UNSIHUAY-VILA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
30/10/2023 10:08:22.0
ANA PAULA OENING
Avaliador Externo (INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O
DESENVOLVIMENTO)

Assinatura Eletrônica
30/10/2023 09:21:42.0
RICARDO SCHUMACHER
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
30/10/2023 09:39:50.0
THELMA SOLANGE PIAZZA FERNANDES
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Em memória de Victor Romano Pereira Lourenço

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida e criação do nosso fascinante e misterioso Universo.

Agradeço aos meu país Daniel e Eliane pelas oportunidades, amor e carinho.

Aos meus professores orientadores pela oportunidade, confiança e conhecimentos transmitidos.

*“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação.
Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.”*
(Mahatma Gandhi)

RESUMO

O cenário elétrico brasileiro está em constante crescimento, com o aumento gradual do consumo de energia (1% em 2022 e 3% em 2023) e das novas tecnologias e normas regulatórias. Portanto, a correta escolha dos investimentos necessários, para as distribuidoras do setor, na infraestrutura de sua rede elétrica é de importância primordial para que estas empresas permaneçam competitivas no mercado e sem repreensões regulatórias. As normas regulatórias incentivam a boa gestão dos ativos, com aumento da lucratividade da concessão, e não penalizam as companhias que conseguem manter os seus indicadores de qualidade dentro do esperado. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para priorizar as obras do portfólio de projetos de uma distribuidora de energia, otimizando os investimentos nas linhas de distribuição visando os melhores resultados nos indicadores escolhidos, sendo eles: Perdas Elétricas, Níveis de Tensão Econômica, Indicadores Regulatórios de Qualidade e Eficiência Econômica. Todas as melhorias foram analisadas do ponto de vista elétrico e econômico, sendo que a metodologia proposta combina informações resultantes de técnicas como o DEA (*Data Envelopment Analysis*), AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e otimização linear. Essas metodologias foram escolhidas, por serem amplamente utilizados na otimização de portfólios e possuem flexibilidade em sua aplicação. Através da aplicação da metodologia em sistemas de distribuição de energia conhecidos como o IEEE 33 barras e um sistema de distribuição real de 135 barras foi possível validar a metodologia proposta de otimização do portfólio de obras de investimentos em diversos cenários. Analisando-se os resultados dos modelos, foi possível concluir que o modelo possibilita a otimização portfólio de obras de distribuição atendendo aos mais diversos critérios e apresenta conclusões econômicas através da curva de eficiência apresentada pelo método DEA.

Palavras-chave: *Data Envelopment Analysis*. *Analytic Hierarchy Process*. Priorização de Portfólio. Otimização de Investimentos. Distribuição de Energia. Eficiência Econômica.

ABSTRACT

The Brazilian electrical scenario is constantly growing, with the gradual increase in energy consumption and new technologies, and regulatory standards. Therefore, the correct choice of necessary investments, for the sector's distributors, in the infrastructure of their electrical network is of paramount importance for these companies to remain competitive in the market and without regulatory representation. Regulatory standards encourage good asset management, increasing concession profitability, and do not penalize companies that maintain their quality indicators as expected. Therefore, the objective of this work is to present a methodology to prioritize the works in the project portfolio of an energy distributor, optimizing investments in distribution lines, transferring the best results in the chosen indicators, namely: Electrical Losses, Voltage Levels Economic, Regulatory Indicators of Quality and Economic Efficiency. All improvements were proven from an electrical and economic point of view, and the proposed methodology combines information resulting from techniques such as DEA (Data Envelopment Analysis), AHP (Analytic Hierarchy Process) and linear algorithms. These methodologies were chosen because they are widely used in portfolio optimization and have flexibility in their application. By applying the methodology to well-known power distribution systems such as the IEEE 33 bars and a real 135 bus distribution system, it was possible to validate the proposed methodology for optimizing the portfolio of investment works in different scenarios. Analyzing the results of the models, it was possible to complete the optimization of the portfolio of scope works, meeting the most diverse criteria and also validate the efficiency curve presented by the DEA method.

Keywords: *Data Envelopment Analysis. Analytic Hierarchy Process.* Portfolio Prioritization. Investment Optimization. Electricity Distribution. Economic Efficiency.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Investimentos Anuais no Setor de Distribuição	17
Figura 2 – Diferença entre as fronteiras de eficiência do modelo DEA, avaliando-se VRS e CRS	23
Figura 3 – Curva de eficiência do modelo Orientado a Saída	24
Figura 4 – Curva de eficiência do modelo Orientado a Entrada	24
Figura 5 – Curvas de eficiências dos modelos variados do VRS	27
Figura 6 – Etapas da aplicação do modelo AHP	28
Figura 7 – Esquemático do método AHP	28
Figura 8 – Fronteira de Eficiência para Diferentes Retornos de Escala	33
Figura 9 – Comparativo do Modelo Proposto com a Revisão da Literatura	37
Figura 10 – Sistema IEEE 33 Barras	39
Figura 11 – Sistema 135 Barras	40
Figura 12 – Metodologia Proposta	41
Figura 13 – Método AHP utilizado	46
Figura 14 – 3º Etapa	47
Figura 15 – Diagrama Esquemático do Sistema Teste com Obras	50
Figura 16 – Fronteira de Eficiência Aplicada nas Obras do Sistema IEEE 33 Barras	53
Figura 17 – Diagrama Esquemático do Sistema 135 Barras com Obras	60
Figura 18 – Fronteira de Eficiência 135 Barras	63
Figura 19 – Gráfico de Entradas e Saídas	82
Figura 20 – Comparação entre fronteira de eficiência e regressão linear	82

Lista de quadros

Quadro 1 – Possíveis Variações de retornos de escala	26
----------------------------------------------------------------	----

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de Eficiência	18
Tabela 2 – Sugestões de valores para priorização	29
Tabela 3 – Tabela IR	30
Tabela 4 – Tabela IR Donegan-Dodd	31
Tabela 5 – Tabela de ganhos no DEC/FEC por tipo de obras	43
Tabela 6 – Matriz Λ	46
Tabela 7 – Tabela de Parâmetros por Tipo de Obra	49
Tabela 8 – Parâmetros Elétricos e sua Influência nas Obras do Sistema	51
Tabela 9 – Tabela de Parâmetros por Tipo de Obra	52
Tabela 10 – Eficiência Econômica das Obras do Sistema IEEE 33 Barras	54
Tabela 11 – Matriz Λ para o Sistema IEEE 33 Barras — Enfoque Econômico	55
Tabela 12 – Ranking Preliminar (AHP) de Priorização das Obras do Sistema IEEE Barras	55
Tabela 13 – Ranking Geral de Priorização das Obras do Sistema IEEE Barras	56
Tabela 14 – Matriz Λ para o Sistema IEEE 33 Barras — Enfoque Elétrico	56
Tabela 15 – Ranking Preliminar de Priorização das Obras do Sistema IEEE Barras — Enfoque Elétrico	57
Tabela 16 – Ranking das Obras do Sistema IEEE Barras — Enfoque Elétrico	57
Tabela 17 – Ranking Preliminar de Priorização das Obras do Sistema IEEE Barras — Matriz Inicial	58
Tabela 18 – Ranking Final do Portfólio de Obras do sistema IEEE 33 Barras	59
Tabela 19 – Tabela com as características das linhas sugeridas	60
Tabela 20 – Parâmetros Elétricos e sua Influência nas Obras do Sistema 135 Barras	61
Tabela 21 – Tabela de Parâmetros por Tipo de Obra do Portfólio 135 Barras	62
Tabela 22 – Tabela da Eficiência Econômica	63
Tabela 23 – Método AHP — Enfoque Econômico	64
Tabela 24 – Ranking Geral — Enfoque Econômico	65
Tabela 25 – Método AHP — Enfoque Elétrico	66
Tabela 26 – Ranking Geral — Enfoque Elétrico	67
Tabela 27 – Ranking Geral — Análise de Sensibilidade	68
Tabela 28 – Ranking Geral	69
Tabela 29 – Entradas e Saídas do Modelo	81
Tabela 30 – Eficiência Relativa	83
Tabela 31 – Eficiência pelo Método DEA	84
Tabela 32 – Comparação entre os candidatos - Experiência	85
Tabela 33 – Comparação entre os candidatos - Educação	85

Tabela 34 – Comparação entre os candidatos - Carisma	85
Tabela 35 – Comparação entre os candidatos - Pontualidade	86
Tabela 36 – Comparação entre os candidatos - Educação	86
Tabela 37 – Matriz normalizada	86
Tabela 38 – Cálculo da Priorização dos candidatos pela Educação	87
Tabela 39 – Conjunto total de priorizações para as qualidades dos candidatos . . .	87
Tabela 40 – Conjunto total de priorizações para as qualidades dos candidatos . . .	87
Tabela 41 – Informações das Linhas IEEE 33 Barras	90
Tabela 42 – Informações das Barras IEEE 33 Barras	91
Tabela 43 – Informações dos Ramos 135 Barras 1	93
Tabela 44 – Informações dos Ramos 135 Barras 2	94
Tabela 45 – Informações dos Ramos 135 Barras 3	95
Tabela 46 – Informações das Obras 135 Barras	96

Lista de abreviaturas e siglas

<i>AHP</i>	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
<i>ANEEL</i>	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
<i>CCR</i>	<i>Constant Returns to Scale</i>
<i>DEA</i>	<i>Data Envelopment Analysis</i>
<i>DMU</i>	<i>Decision Making Units</i>
<i>DRS</i>	<i>Decreasing Returns to Scale</i>
<i>EPE</i>	<i>Empresa de Pesquisa Energética</i>
<i>GIS</i>	<i>Geographic Information System</i>
<i>IRS</i>	<i>Increasing Returns to Scale</i>
<i>IC</i>	<i>Índice de Consistência</i>
<i>IR</i>	<i>Índice de Consistência Randômico</i>
<i>NDRS</i>	<i>Non-Decreasing Returns to Scale</i>
<i>NIRS</i>	<i>Non-Increasing Returns to Scale</i>
<i>PHES</i>	<i>Pumped Hydro Energy Storage</i>
<i>RC</i>	<i>Índice de Consistência Lógica</i>
<i>VRS</i>	<i>Variable Returns to Scale</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativas e Contribuições	18
1.2	Objetivos	19
1.3	Organização da Dissertação	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	DEA - <i>Data Envelopment Analysis</i>	21
2.1.1	Introdução a técnica DEA	22
2.1.2	Variações do Modelo VRS	26
2.2	AHP - <i>Analytic Hierarchy Process</i>	27
2.2.1	Introdução ao método AHP	27
2.3	Referências Bibliográficas	31
2.4	Comparativo Com o Modelo Proposto	35
2.5	Considerações Finais do Capítulo	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Sistemas Testes	39
3.1.1	Sistema de Distribuição de Energia — IEEE 33 Barras	39
3.1.2	Sistema de Distribuição de Energia — 135 Barras	39
3.2	Modelo Proposto	40
3.2.1	Parâmetros escolhidos para priorização	41
3.2.2	Modelo de Priorização do Portfólio	43
3.2.2.1	Eficiência Econômica	43
3.2.2.2	Priorização do Portfólio	45
3.3	Considerações Finais do Capítulo	48
4	OTIMIZAÇÃO DO PORTFÓLIO DE OBRAS DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	49
4.1	Priorização do Portfólio de Obras — Sistema IEEE 33 Barras	49
4.1.1	Priorização do Portfólio com Enfoque Econômico	54
4.1.2	Priorização do Portfólio com Enfoque nos Parâmetros Elétricos	56
4.1.3	Priorização Final do Portfólio	58
4.1.3.1	Análise de Sensibilidade	58
4.1.3.2	Priorização Final do Portfólio IEEE 33 Barras	58
4.2	Priorização do Portfólio de Obras — Sistema com 135 Barras	59
4.2.1	Priorização do Portfólio com Enfoque Econômico	64

4.2.2	Priorização do Portfólio com Enfoque Elétrico	65
4.2.3	Priorização Final do Portfólio	67
4.2.3.1	Análise de Sensibilidade	67
4.2.3.2	Priorização Final do Portfólio 135 Barras	68
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICES	80
	APÊNDICE A – ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS	81
A.1	Exemplo da Aplicação do DEA	81
	APÊNDICE B – ANALYTIC HIERARCHY PROCESS	85
B.1	Exemplo da aplicação do método AHP	85
	APÊNDICE C – CONFIGURAÇÃO DOS SISTEMAS TESTE	89
C.1	Sistema IEEE 33 Barras	89
C.2	Sistema 135 Barras	92

1 INTRODUÇÃO

Em todos os países, a estrutura hierárquica do setor elétrico industrial é tida como um padrão (empresas distribuídas em geração, transmissão e distribuição), um setor da infraestrutura de redes do país e monopólio natural. O que diferencia a situação energética entre os países são aspectos internos do setor, como: propriedade elétrica dos ativos, estrutura da regulação econômica do monopólio natural e a matriz energética (MEGGINSON, 2005).

O setor elétrico é considerado um monopólio natural por se tratar de uma exceção na teoria econômica, ao ser um dos poucos casos em que o resultado econômico de uma empresa sozinha atuando no mercado é maior que em um cenário de competição (VALENTE et al., 2009).

O modelo brasileiro do setor elétrico era constituído por alta penetração de companhias estatais em modelos verticalizados, onde a mesma empresa que gerava a energia, também a transmitia e distribuía. Após a reforma institucional de 1990, o Estado brasileiro inseriu a competição em todos os níveis da cadeia de suprimento de energia, para o capital privado poder suprir a demanda crescente de investimentos que o setor precisava. Para isso, foi inserido a competição direta nas etapas de produção das quais era possível aplicar e, para as etapas classificadas como monopólios naturais, foi aplicado a regulação com incentivos (KESSLER, 2006).

Conforme o (EPE, 2022a), o Brasil é o oitavo país com a maior geração de energia. Esta alta quantidade de potência transmitida e a característica continental do país torna a gestão por parte do ONS uma tarefa árdua e extremamente complexa de ser realizada.

A geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia no Brasil é estruturada de forma desverticalização e regulada pela ANEEL. Sendo que, cada etapa relacionada à energia elétrica segue diretrizes e normas específicas que todos os *players* desde mercado devem seguir para ser garantida a competição e a modicidade tarifária.

As etapas de geração e transmissão de energia elétrica seguem procedimentos de contratação e construção de suas infraestruturas planejados e estabelecidos pela ANEEL em seus leilões. Estes leilões são balizados em estudos e pesquisas feitas pela EPE e apontamentos da ONS, para não ocorrer o racionamento ou falta de energia no país.

Entretanto, a atividade de distribuição de energia é realizada por empresas públicas ou privadas seguindo o modelo de concessão e regulada como um monopólio natural. Nesta etapa, a companhia que realiza a distribuição de energia possui um contrato de concessão com estados e municípios por tempo determinado. Portanto, ao contrário do que ocorre

na geração e transmissão de energia, as obras a serem realizadas pela distribuidora para a correta manutenção e expansão do sistema, devem ser planejadas pela própria companhia e aprovadas pela ANEEL.

Portanto, o processo de escolha das obras prioritárias para a concessionária é de suma importância, pois se não houver clareza na necessidade destes investimentos em prol dos indicadores de qualidade do serviço, como DEC e FEC, e do abastecimento de energia ao consumidor, a companhia poderá ser prejudicada durante a revisão tarifária da empresa. Este fato decorre da metodologia aplicada pela ANEEL (ANEEL, 2022c), mais especificamente pelo cálculo do Fator X. Este fator é determinante na tarifa por que transparece os ganhos de produtividade estimado da companhia e leva a eficiência ao setor de redes, também funcionando como um redutor de tarifa (MONTENEGRO, 2020). O Fator X beneficia empresas com maior eficiência na sua concessão e, portanto, empresas com eficiência na aplicação de seus investimentos possuem um redutor de tarifa mais benéfico durante seu processo de revisão tarifária.

Além do Fator X, outro ponto de atenção frente às concessionárias sobre seus investimentos está relacionado aos indicadores de qualidade do sistema elétrico. Segundo metodologia de análise de eficiência das empresas do setor elétrico para a revisão tarifária, apresentada por (MARQUES, 2016), os indicadores de qualidade (*outputs* do modelo) estão diretamente relacionados aos investimentos aplicados pela concessionária (*inputs* do modelo). Estes investimentos podem melhorar os indicadores de qualidade por três ações (PINTO, 2008):

- Obras: aumento da capacidade e robustez do sistema;
- Manutenção: aumento da confiabilidade do sistema, principalmente com as manutenções preventivas. Diminuindo assim a interrupção por causas climáticas;
- Operação do Sistema: aumento de funcionários ou aplicação de novas tecnologias que levarão a redução do tempo de ação da concessionária e, por consequência, redução do tempo de ressarcimento da energia aos consumidores.

Os indicadores de qualidade podem ser divididos em duas categorias, os indicadores de continuidade contínuos (Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor — DEC e Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor — FEC) e os indicadores de continuidade individuais (DIC, FIC e DIMIC). Estes indicadores são referenciados em normas internacionais e seguem as metas e diretrizes estipuladas em (ANEEL, 2022b).

O indicador DEC apresenta o espaço de tempo no qual, em média, cada consumidor do conjunto considerado ficou ausente do fornecimento de energia elétrica para um certo período. A fórmula [Equação 1.1](#) apresenta a formulação deste indicador (LOURENÇO, 2011).

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^n C_a(i)t(i)}{C_s} \quad (1.1)$$

Onde:

- i = número de interrupções variando de 1 a n ;
- $C_a(i)$ = número de consumidores atingidos nas interrupções (i);
- $t(i)$ = tempo de duração das interrupções (i) em horas;
- C_s = número total de consumidores do conjunto considerado.

O indicador FEC apresenta o número de interrupções que, em média, cada consumidor do conjunto sofreu no período [Equação 1.2](#) apresenta a formulação deste indicador ([LOURENÇO, 2011](#)).

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^n C_a(i)}{C_s} \quad (1.2)$$

Onde:

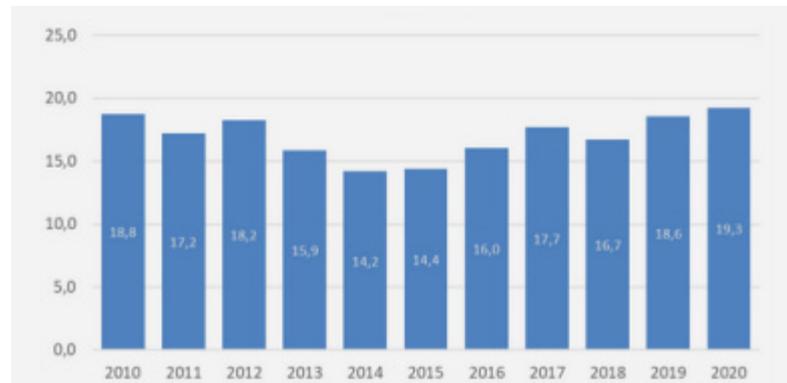
- i = número de interrupções variando de 1 a n ;
- $C_a(i)$ = número de consumidores atingidos nas interrupções (i);
- C_s = número total de consumidores do conjunto considerado.

A priorização do investimento em obras pela concessionária possui diversos vieses, mas pode-se aplicar conforme apresentado por [Pinto \(2008\)](#) e [Marques \(2016\)](#) o viés regulatório. O descumprimento dos limites regulatórios dos indicadores de qualidade pode levar a multas expressivas para a companhia, como, por exemplo, a multa aplicada em 2020 referente aos anos de 2014 a 2019 a RGE Sul (distribuidora de energia do estado do RS) que chegou a aproximadamente 35 milhões de reais ([AGERGS, 2022](#)).

Os valores investidos anualmente pelas distribuidoras do Brasil são significantes e devem ser planejados coerentemente para suprir as demandas da população e remunerar adequadamente as concessionárias. A COPEL, em 2023, irá investir aproximadamente 1,9 bilhões de reais no setor de distribuição e o conselho da companhia aprovou, em 14/11/2023, R\$2,09 bilhões de investimentos para 2024 ([MEGAWHAT, 2023](#)). Os investimentos estão divididos em diversos projetos, como a modernização da rede rural (programa Paraná Trifásico) e a implementação de redes elétricas inteligentes ([PR, 2023](#)).

Segundo a EPE, até 2020 as concessionárias brasileiras investiram 186 bilhões de reais no setor de distribuição e estes investimentos apresentam tendência de alta (EPE, 2022b). A Figura 1 apresenta os valores investidos anualmente em bilhões de reais.

Figura 1 – Investimentos Anuais no Setor de Distribuição



Fonte: EPE (2022b)

Com vista nas melhorias do sistema e enfoque nos resultados financeiros, as distribuidoras do setor elétrico brasileiro estão iniciando suas pesquisas em otimizações dos seus portfólios de obras. A CEMIG desenvolveu um *software* para priorização dos investimentos com enfoque na diminuição da manutenção do sistema elétrico a longo prazo CEMIG (2019).

A COELBA também prioriza seus investimentos em obras, utilizando-se da opinião dos seus engenheiros e de dados elétricos do sistema de distribuição. Para os circuitos primários e secundários, a COELBA análise os seguintes itens (VALENTE et al., 2009):

- Queda de tensão superior a 9%;
- Carregamento excessivo dos transformadores da rede de distribuição;
- Indicadores regulatórios;
- Idade dos ativos;
- Manutenções preventivas ou corretiva.

A preocupação das empresas do setor com a eficiência nos seus investimentos e custos pode ser explicada pela relação entre seu EBTIDA (Lucros antes de juros, impostos, depreciação e amortização) e o valor da parcela B (custos gerenciáveis) (CORREA, 2019). Esta relação apresenta o quanto a empresa consegue gerar de receita em relação à parte gerenciável (na qual ela consegue alocar eficiência) da tarifa que cobra dos consumidores. A Tabela 1 apresenta esta relação para 10 concessionárias brasileiras entre 2013 e 2017.

Tabela 1 – Parâmetros de Eficiência

Distribuidora/Ano	2013	2014	2015	2016	2017
Enel CE	64 %	70 %	55 %	54 %	53 %
Enel SP	29 %	48 %	38 %	31 %	44 %
CPFL SP	67 %	56 %	46 %	43 %	42 %
CELG	13 %	4 %	1 %	7 %	37 %
Light	46 %	42 %	33 %	25 %	37 %
CELESC	-26 %	36 %	16 %	15 %	35 %
COELBA	26 %	22 %	24 %	5 %	28 %
CELPE	39 %	28 %	18 %	22 %	25 %
CEMIG	33 %	30 %	30 %	17 %	16 %

Fonte: Fonte: [Correa \(2019\)](#)

É possível verificar que ocorre uma melhora ao longo do tempo na eficiência das distribuidoras, sendo que 70% das companhias conseguiram um indicador superior a 30% em 2017. O crescimento médio entre 2015 e 2017 foi de 13,1%, podendo ser observado uma retomada no indicador a parâmetros próximos dos encontrados em 2013. Portanto, é interessante para as companhias entender como fazer seus investimentos inteligentemente, levando a maiores receitas sem onerar os consumidores ou entrar em contradição com as normas regulatórias dispostas pela ANEEL. A realização de investimentos inteligentes pode aumentar o retorno financeiro das distribuidoras, pois a regulação atual beneficia as distribuidoras com ganhos em eficiência.

Neste contexto, o presente trabalho traz uma proposta de projeto de dissertação visando a elaboração de uma metodologia de priorização do portfólio de obras de distribuidoras de energia, bem como determinar os indicadores elétricos e os indicadores regulatórios de cada obra.

1.1 Justificativas e Contribuições

Uma ineficiente gestão dos investimentos aliada à má classificação de prioridades de obras pode levar a perdas financeiras pelas distribuidoras de energia. Estas perdas financeiras estão balizadas em reduções tarifárias e possíveis ações de penalidades a serem realizadas pela ANEEL.

Atualmente, a gestão do portfólio de obras da concessionária traz um viés não analítico para o problema de priorização dos investimentos, levando a não eficiências no processo e possíveis perdas econômicas.

É neste âmbito que o presente trabalho atuará, pois a proposta de metodologia auxiliará a concessionária de energia na escolha correta da prioridade de execução de suas obras, bem como determinará os ganhos nos indicadores e características elétricas no

sistema.

Os estudos sobre o tema de priorização de portfólio utilizam, em sua grande maioria, apenas a técnica AHP. Esta técnica é amplamente utilizada para este fim, por realizar a priorização utilizando *inputs* que podem ser adquiridos com pesquisas com especialistas e o esforço computacional é relativamente pequeno se comparado com técnicas de otimização clássicas e genéticas.

Este trabalho aplica a utilização do DEA em conjunto com outras metodologias (AHP e otimização linear), criando um modelo em três etapas para a otimização do portfólio de obras. O modelo proposto consegue criar diversos cenários de análise, possibilitando a entrada da opinião do gerente do portfólio. Além disso, o resultado do modelo apresenta a eficiência econômica de cada obra e utiliza deste parâmetro para otimizar o portfólio e não apenas os indicadores econômicos brutos como grande parte da literatura.

Assim, o presente trabalho traz como contribuições os seguintes pontos:

1. Modelagem dos resultados operacionais no sistema ocasionados pelas obras do portfólio;
2. Inserção de indicadores econômicos resultantes da análise das obras do portfólio;
3. Definição da técnica de priorização a ser aplicada ao portfólio de obras de modo a alcançar a maior eficiência na aplicação dos investimentos da distribuidora de energia;
4. Apuração de cenários para validação da metodologia aplicada e investigação das influências nas decisões da concessionária frente ao portfólio otimizado;
5. Utilização de modelos combinados para priorização e análise do portfólio.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia de otimização de portfólio de obras de uma distribuidora de energia elétrica, bem como determinar os indicadores econômicos e parâmetros elétricos que devem caracterizar as obras do portfólio.

Os objetivos específicos são:

- Analisar o estado da arte por meio de artigos, dissertações, pesquisas e teses que abrangem discussões relacionados à otimização de portfólios e sistemas elétricos de potência;
- Realizar a modelagem dos parâmetros elétricos (perdas elétricas, benefício de confiabilidade e níveis de tensões dos barramentos) do sistema da concessionária que

entraram na otimização, bem como os indicadores regulatórios (ganhos nos indicadores DEC/FEC) que impactará cada obra;

- Desenvolver o método de otimização do portfólio de obras de distribuição de energia elétrica;
- Desenvolver cenários e portfólios que se assemelham a realidade das distribuidoras brasileiras para aplicação de testes do modelo de otimização proposto;
- Implementar computacionalmente, através do Rstudio, Python e Excel o método de otimização proposto e analisar sua aplicabilidade.

1.3 Organização da Dissertação

O [segundo capítulo](#) traz a revisão da literatura acerca do problema e das metodologias aplicadas atualmente na otimização de portfólios e apresenta em mais detalhes conceitos discutidos neste trabalho e diversas análises sobre o tema.

O [terceiro capítulo](#) detalha a metodologia proposta pelo presente trabalho, baseada na priorização do portfólio de obras de uma empresa de distribuição do setor elétrico, apresentando as equações e códigos resultantes na metodologia proposta.

O [quarto capítulo](#) apresenta os testes e validações da metodologia aplicadas em sistema elétrico de *benchmarking* da literatura, o IEEE 33 barras e 135 barras ([MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2013](#)). Foram utilizados parâmetros econômicos retirados de uma distribuidora de energia elétrica do Brasil.

Por fim, o [quinto e último capítulo](#) possui o objetivo de apresentar as conclusões do trabalho, ressaltando os resultados obtidos pela metodologia proposta aplicada ao sistema elétrico de referência, bem como os futuros trabalhos.

2 Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

O objetivo deste capítulo é discorrer com maiores detalhes as metodologias utilizadas neste trabalho e apresentadas brevemente no segundo capítulo. Para isso, o capítulo foi dividido em quatro etapas, sendo a primeira uma breve apresentação da metodologia de cálculo de eficiência por análise de envoltória (DEA). A segunda é sobre o modelo de priorização de portfólios AHP e a última etapa é a revisão bibliográfica.

2.1 DEA - *Data Envelopment Analysis*

A análise DEA é a ferramenta analítica cujo objetivo é identificar as melhores práticas no uso de insumos em relação aos produtos gerados. É uma técnica baseada em Programação Linear com a capacidade de comparar os resultados obtidos pelas organizações avaliadas em relação aos recursos utilizados. Além disso, a técnica fornece a possibilidade de identificar a fronteira de eficiência das organizações que possuam características similares (JUBRAN, 2006).

A Análise de Envoltória de Dados teve seu início com base em trabalhos do (FARRELL, 1957) que, ao contrário das pesquisas anteriores, apresentava uma metodologia de eficiência de projetos que não se baseava em análises de eficiência através da comparação com um ideal intangível e sim, com eficiências calculadas através da comparação com os melhores projetos da análise.

O Cooper, Seiford e Tone (2007) expandiu a análise realizada por (FARRELL, 1957) para uma análise de projetos e empresas com diversas entradas e saídas. Além disso, o estudo de Cooper, Seiford e Tone (2007) conseguiu trazer a metodologia de criação de fronteiras apresentada por Koopmans (1978) para o modelo DEA.

De acordo com Cooper, Seiford e Tone (2007) o DEA é uma análise de envoltória de dados é capaz de analisar um conjunto dos chamados DMUs (*Decision Making Units*). Estes DMUs possuem insumos e produtos semelhantes, sendo que o DEA é utilizado para avaliar o desempenho destas unidades.

O DEA pode ser utilizado sempre que se desejar avaliar a eficiência produtiva relativa entre diversos DMUs, tendo os mesmos insumos e produtos e não possuindo necessariamente os mesmos níveis de escala. Ou seja, se deve partir do pressuposto que as unidades são semelhantes, possuem características distintas em gerenciamento e almejam resultados semelhantes (MOREIRA; SANT'ANNA, 2010).

Segundo [Melo \(2019\)](#):

"A vantagem do uso desta técnica consiste no fato dela utilizar a eficiência relativa, sem prejuízo às unidades de pequeno porte. Ainda, mais de uma unidade pode ser classificada como eficiente, compondo a fronteira de eficiência relativa..."

Além disso, as unidades ineficientes conseguem parâmetros para melhorias, sendo que os parâmetros que resultaram em seu baixo desempenho pode ser estratificados e se tornar pontos de atuação para melhorar sua eficiência ([MELO, 2019](#)).

2.1.1 Introdução a técnica DEA

Os modelos de DEA surgiram, em sua forma clássica, em meados da década de 70. Estes modelos podem ser separados em dois tipos ([PAIVA, 2000](#)):

- VRS (*Variable Returns to Scale*)
- CCR/CRS (*Constant Return to Scale*)

A diferença entre os dois modelos clássicos está relacionada com a eficiência técnica e a eficiência de escala.

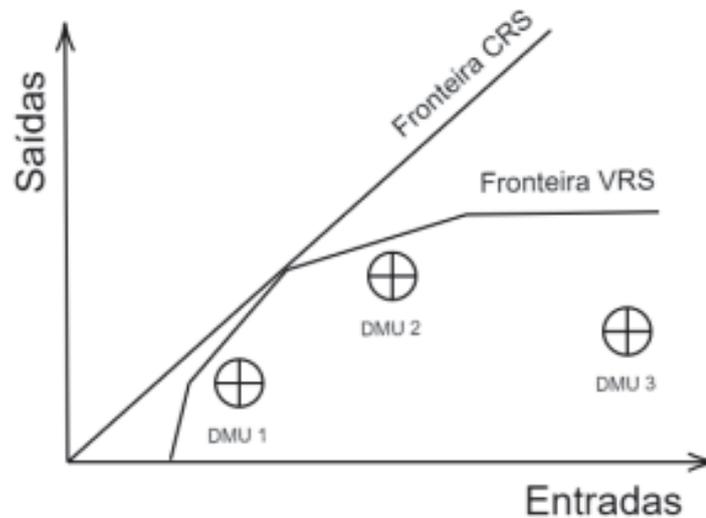
Uma DMU é considerada tecnicamente eficiente quando for minimizado os níveis de insumos utilizados para um determinado nível de produção. Para ser considerado eficiente em escala, a DMU deve ter de possuir uma relação direta entre o aumento de insumos empregados com o aumento de produtos gerados ([TUPY; ALVES; FERRERA, 2019](#)).

O modelo CCR não difere a eficiência dos DMUs entre eficiência técnica e eficiência de escala. Este agrupamento de eficiências pode levar a resultados que priorizem as DMUs com maiores relações de insumos e produtos. Portanto, para a utilização deste modelo se faz necessário analisar DMUs em uma escala ótima ([PAIVA, 2000](#)).

O modelo VRS, proposto por [Banker, Charnes e Cooper \(1984\)](#), considera que existem competições imperfeitas, diferenças financeiras e que agentes externos podem interferir nas eficiências da análise de DEA ([SATO, 2011](#)).

A [Figura 2](#) apresenta a diferenciação da fronteira de eficiência para os modelos VRS e CCR.

Figura 2 – Diferença entre as fronteiras de eficiência do modelo DEA, avaliando-se VRS e CRS



Fonte: Vieira, Unsihuay-Vila e Aoki (2022)

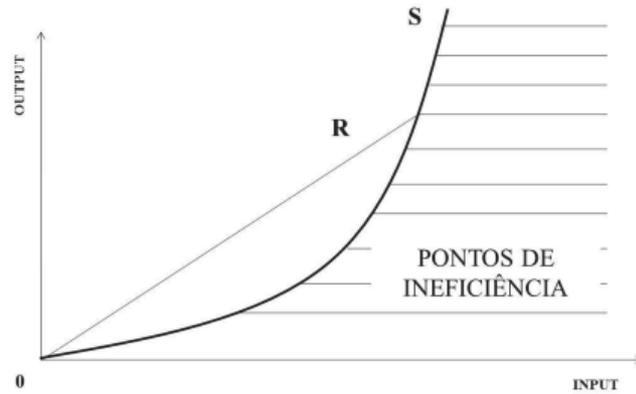
Além do modelo da curva de eficiência, a técnica do DEA para ser utilizada para dois objetivos distintos:

- Orientação a Insumo
- Orientação a Produto

A orientação da técnica visa verificar se a eficiência das DMUs será realizada com enfoque em maximizar os produtos, para um insumo constante (Orientação a Produto) ou minimizar os insumos, para produtos constantes (Orientação a Insumo) (SOMBRA, 2017).

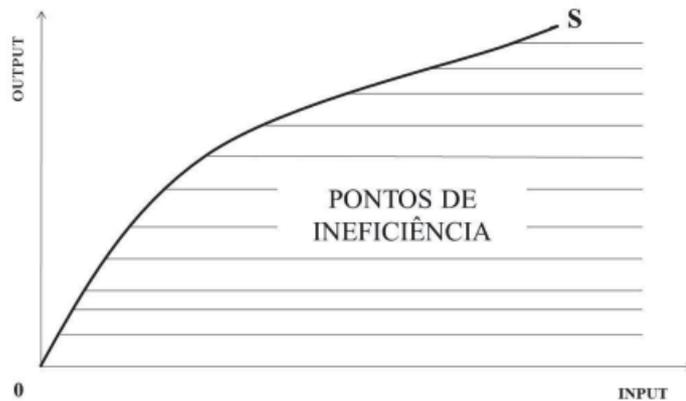
A escolha da orientação irá mudar a convexidade da curva de eficiência, mudando a região de ineficiência. As Figura 3 e Figura 4 apresentam as regiões de eficiência para ao modelo orientado a insumo e orientado a produto, respectivamente.

Figura 3 – Curva de eficiência do modelo Orientado a Saída



Fonte: Farrell (1957)

Figura 4 – Curva de eficiência do modelo Orientado a Entrada



Fonte: Farrell (1957)

A formulação matemática do modelo DEA CCR orientado a insumo, na forma de Problema de Programação Linear, está representada na [Equação 2.1](#) (CARLUCCI, 2012).

$$\begin{aligned}
 \max h_0 &= \sum_{j=1}^m \mu_j y_{j0} \\
 \text{sujeito a} \\
 \sum_{i=1}^n v_i x_{i0} &= 1 \\
 \sum_{r=1}^m \mu_r y_{rk} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ik} &\leq 0 \\
 k &= 1, \dots, s \\
 \mu_j, v_i &\geq 0 \quad \forall i, j
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Onde h_0 representa a eficiência da DMU, podendo variar entre 0 e 1, x_{i0} e y_{i0} são os dados de entrada e saída. As informações μ_i e v_j são os pesos para cada dado de entrada e saída no sistema. A constante k representa a quantidade de DMUs analisadas e m e n a quantidade de variáveis de saída e entrada, respectivamente.

O modelo orientado a produto, que visa a minimização dos insumos para o produto constantemente, esta representado abaixo: [Equação 2.2](#).

$$\begin{aligned}
 \min h_0 &= \sum_{j=1}^m v_j x_{j0} \\
 \text{sujeito a} \\
 \sum_{i=1}^n \mu_i y_{i0} &= 1 \\
 \sum_{r=1}^m \mu_r y_{rk} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ik} &\leq 0 \\
 k &= 1, \dots, s \\
 \mu_j, v_i &\geq 0 \quad \forall i, j
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

O modelo apresentado na [Equação 2.3](#) descreve a técnica DEA com retornos de escala variáveis e análise orientada a insumo. Este modelo traz convexidade a fronteira, através da variável u , mitigando assim a possível combinação entre a eficiência de escala e técnica.

$$\begin{aligned}
 \max h_0 &= \sum_{j=1}^m \mu_j y_{j0} - u \\
 \text{sujeito a} \\
 \sum_{i=1}^n v_i x_{i0} &= 1 \\
 \sum_{r=1}^m \mu_r y_{rk} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ik} &\leq 0 \\
 k &= 1, \dots, s \\
 \mu_j, v_i &\geq 0 \quad \forall i, j \\
 u &\in \Re
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

O mesmo modelo pode ser analisado observando a orientação a produto e pode ser descrito pelo modelo representado na [Equação 2.4](#) (PENA, 2008).

$$\begin{aligned}
 \min h_0 &= \sum_{j=1}^m v_j x_{j0} - u \\
 \text{sujeito a} \\
 \sum_{i=1}^n \mu_i y_{i0} &= 1 \\
 \sum_{r=1}^m \mu_r y_{rk} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ik} &\leq 0 \\
 k &= 1, \dots, s \\
 \mu_j, v_i &\geq 0 \quad \forall i, j \\
 u &\in \Re
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Os valores de eficiência, h_0 , podem variar de 0 a 1. Sendo que, as DMUs que possuem 1 estão na fronteira de eficiência e valores abaixo de 1 são considerados ineficientes.

2.1.2 Variações do Modelo VRS

O modelo da VRS permite diferenciações no retorno de escala. A variação é controlada pelos possíveis valores que a variável u pode atingir.

Estas variações permitem realizar as mais diversas análises de eficiência e modelar, da forma mais coerente, diversos cenários das DMUs (SOUZA, 2008). A Quadro 1 apresenta as possibilidades de retornos de escala para a análise DEA.

O Apêndice A apresenta a modelagem DEA aplicada em um modelo teste para exemplificar o conteúdo apresentado neste capítulo.

Quadro 1 – Possíveis Variações de retornos de escala

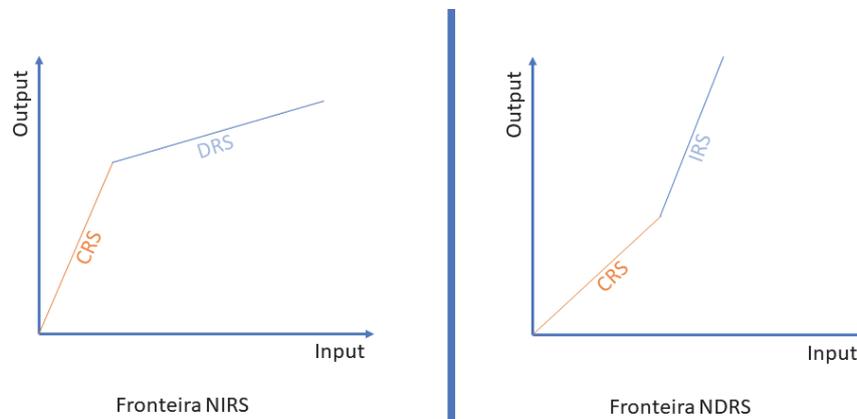
Tipo de Retorno	<i>Orientação</i>	<i>Sigla</i>
Decrescente	$u > 0$	DRS
Constante	$u = 0$	CRS
Crescente	$u < 0$	IRS
Não-Decrescente	$u \leq 0$	NDRS
Não-Crescente	$u \geq 0$	NIRS

Fonte: adaptado de Torres (2018)

A Figura 5 apresenta as diferentes curvas de eficiências que os modelos variados do DEA VRS podem apresentar. A utilização de diversos modelos do VRS tem por objetivo trazer diversas visões para o problema de eficiência. Por exemplo, no setor elétrico no momento da revisão tarifária, a ANEEL utiliza o modelo NDRS para representar a eficiência da distribuidora analisada frente as diversas companhias (MARQUES, 2016). O modelo NIRS pode ser utilizado para avaliar eficiências operacionais de atendimento aos órgãos públicos (RAMOS, 2020).

Portanto, para cada utilização do DEA deve ser aplicado a fronteira que melhor se adequa ao problema de eficiência estudado. Sendo que, para a segregação da eficiência técnica da eficiência de escala, utiliza-se o modelo VRS e suas variações.

Figura 5 – Curvas de eficiências dos modelos variados do VRS



Fonte: O Autor, 2023

2.2 AHP - Analytic Hierarchy Process

O método de priorização de portfólios, AHP, foi desenvolvido por Thomas Saaty na década de 70 e tem como principal característica a discretização do problema de tomada de decisão em um processo hierárquico, multinível e multicritérios (MUSSOI, 2013) (COSTA; PEREIRA; MADRUGA, 2020).

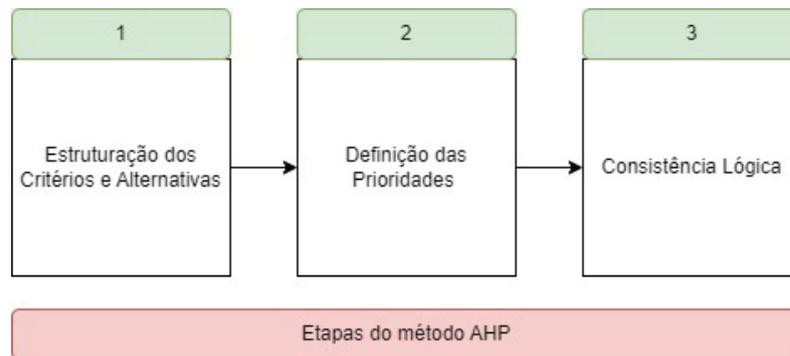
O método AHP realiza o tratamento do problema de priorização de forma genérica, aplicando teorias newtonianas e cartesianas, podendo decompor o método em diversas partes para se poder explorar cada etapa do problema principal de forma clara e objetiva. Estas características tornam o método AHP um dos mais utilizados para priorização de portfólios na atualidade (SOARES, 2014).

Segundo Ferret (2012), o método AHP trabalha o problema de forma multinível, utilizando de comparações em pares entre as características. Por se tratar de um método multicritério com parâmetros definidos pelo usuário, o AHP permite a decisão de como cada fator irá influenciar no objetivo final, tornando-se um método flexível.

2.2.1 Introdução ao método AHP

Santos e Viagi (2009) explica que o método AHP é composto pelas seguintes etapas (Figura 6).

Figura 6 – Etapas da aplicação do modelo AHP



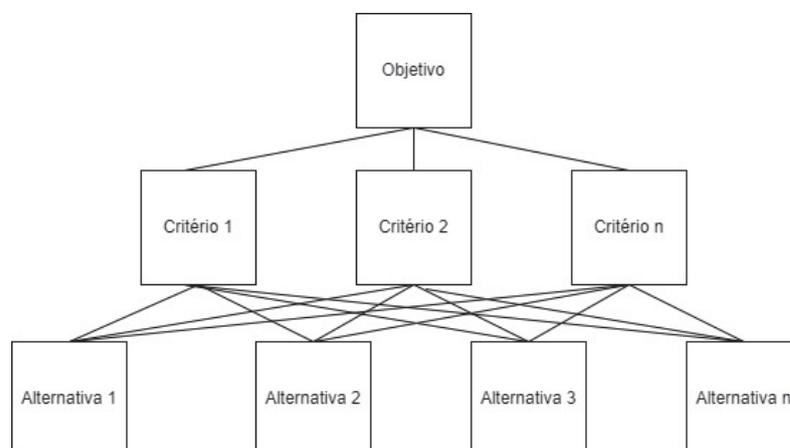
Fonte: adaptado do texto de Santos e Viagi (2009)

A primeira etapa, estruturação dos critérios, é composta pela análise do problema de priorização de portfólios a ser realizado e o planejamento da hierarquização dos critérios escolhidos. Cada critério escolhido pode ser subdividido em mais de uma variável, por se tratar de um método multicritérios de várias etapas (RIBEIRO; ALVES, 2016).

Não existe uma metodologia clara para a escolha dos critérios e objetivos na aplicação do AHP, é sugerido que se aplique as opiniões dos especialistas na área como também utilizar a bibliografia para auxiliar nestas decisões (SAATY, 1991). Contudo, a utilização de diversos critérios pode causar a julgamentos inconsistentes, então a literatura sugere a utilização de um número de critérios menor do que 10 (MILLER, 1956) (ALVES; ALVES, 2015).

A segunda e terceira etapa a estão relacionadas diretamente. A coleta dos julgamentos dos especialistas sobre a relação de prioridade de cada critério deve ser analisada e verificada para validar a consistência das análises paritárias (COSTA, 2002). A Figura 7 apresenta o método AHP de forma esquemática.

Figura 7 – Esquemático do método AHP



Fonte: O Autor, 2023

Sugere-se que os especialistas priorizem os critérios seguindo a metodologia a apresentada em [Tabela 2](#).

Tabela 2 – Sugestões de valores para priorização

Escala	Valores Numéricos
Igual importância	1
Importância fraca	3
Importância moderada	5
Importância forte	7
Importância absoluta	9
Valores de importância intermediários	2, 4, 6 e 8

Fonte: adaptado de [Saaty \(2000\)](#)

A escolha da priorização é a segunda etapa do método AHP. A terceira etapa, a Verificação das Consistências do julgamento, consiste em validar o índice randômico da matriz de julgamentos Λ . A matriz de julgamentos é composta seguindo a [Equação 2.5](#) ([TREVIZANO; FREITAS, 2005](#)).

$$\begin{bmatrix} 1 & \dots & \alpha_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\alpha_{n1}} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \text{ onde : } \begin{array}{l} \alpha_{ii} \therefore \alpha_{jj} \\ \alpha_{ij} > 0 \\ \alpha_{ij} = \frac{1}{\alpha_{ji}} \end{array} \quad (2.5)$$

A quantidade de elementos da matriz Λ pode ser calculada na [Equação 2.6](#).

$$\text{Quantidade de Elementos} = \frac{n(n-1)}{2} \quad (2.6)$$

A consistência dos julgamentos, verificada através do índice RC (Índice de Consistência Lógica), é calculado através da fórmula da divisão do índice IC (Índice de Consistência) e o IR (Índice de Consistência Randômico). Sendo a [Equação 2.7](#) o método de cálculo de IC ([SAATY, 2000](#)). Sendo que, λ_{max} é o maior autovalor da matriz Λ .

$$IC = \frac{\text{Lambda}_{max} - n}{(n-1)} \quad (2.7)$$

O IR é composto por uma matriz de mesma ordem da Λ , constituídos por valores não negativos e randômicos. Pela bibliografia, usualmente se utiliza a matriz proposta em ([SAATY, 1991](#)) e apresentada pela [Tabela 3](#).

Entretanto, a matriz proposta por [Saaty \(1991\)](#) ([Tabela 3](#)) tem como maior abrangência um portfólio de 15 possibilidades. Para os casos com portfólios maiores é possível utilizar a matriz de [Donegan e Dodd \(1991\)](#). A utilização desta matriz aumenta o escopo para portfólios de até 100 possibilidades.

Segundo a bibliografia sobre o tema, $RC < 0,10$ são considerados valores razoáveis para a relação de consistências dos julgamentos.

Tabela 3 – Tabela IR

Ordem	Índices Randômicos
1	0
2	0
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49
11	1,51
12	1,48
13	1,56
14	1,57
15	1,59

Fonte: Saaty (1991)

Tabela 4 – Tabela IR Donegan-Dodd

Ordem	Índices Randômicos
1	0,000
2	0,000
3	0,489
4	0,805
5	1,059
6	1,179
7	1,252
8	1,373
9	1,406
10	1,421
11	1,497
12	1,508
13	1,515
14	1,526
15	1,531
⋮	⋮
20	1,537
⋮	⋮
30	1,577
⋮	⋮
50	1,610
⋮	⋮
80	1,628
⋮	⋮
100	1,634

Fonte: adaptado de [Donegan e Dodd \(1991\)](#)

2.3 Referências Bibliográficas

No contexto de otimização de portfólios, o conteúdo publicado é vasto e bastante difundido. É possível encontrar diversos projetos de otimização de portfólios de contratos de energia elétrica, porém pesquisas relacionadas a otimização de portfólios de obras da distribuição são mais escassas na literatura.

Um dos estudos mais conhecidos e difundidos no meio acadêmico no quesito de otimização de portfólios é o de [Markowitz \(2008\)](#). Este trabalho apresenta uma fronteira de eficiência, relacionando o risco com o retorno de uma carteira de investimentos. A metodologia permitiu a análise de maximização do retorno dado um certo nível de risco como também a minimização do risco com a padronização do retorno.

Na pesquisa de [Noronha e Lima \(2008\)](#), apresentou-se a metodologia de otimização

dos investimentos das distribuidoras de energia considerando-se a interdependência dos projetos do portfólio e aplicando-se uma análise nas variáveis econômicas para a metodologia ser balizada nas mais impactantes. Indicadores dos projetos como VPL (Valor Presente Líquido), IL (Índice de Lucratividade) e o próprio investimento de cada projeto foram indicadores escolhidos para a aplicação da otimização de Opções Reais utilizada no projeto.

Pinto (2008) utilizou da otimização em dois níveis e programação de metas para otimizar o portfólio de obras que impactarão os indicadores regulatórios da distribuidora em estudo (COPEL). Nesta análise, foi comparado esta otimização frente a outros modelos de otimização de portfólios como: PayOff, mínima penalidade, mínimos quadrados, etc.

Na dissertação de Moreira (2009) avaliou-se a eficácia da otimização de portfólios de obras do setor de distribuição em média tensão com a aplicação da otimização genética. Neste trabalho, utilizou-se o método AG para otimizar o portfólio, sendo que o critério de parada foi a 150ª geração. O diferencial deste estudo está na aplicação da Teoria do Conjunto de Pareto aplicada a partir da 2ª geração e determina subconjuntos de possíveis “dominados” e “não-dominados” para realizar os cruzamentos com a maior eficiência possível.

Duarte (2011) utilizou o *software* PROMETHEE para otimizar o portfólio de obras de geração que levem ao maior benefício sustentável. Os resultados obtidos levaram ao portfólio com preferências em usinas eólicas, PCHs e usinas de biomassa. O especialista e gestor do portfólio tem *inputs* dentro do modelo proposto.

Na tese de David (2013), foi analisado os benefícios de cada tipo de obra comum no sistema de distribuição, tanto benefícios elétricos quanto benefícios em indicadores regulatórios, sendo otimizado o método de seleção destas obras. Foi apresentado também o parâmetro mais comum utilizado pelas empresas de distribuição para a priorização das obras pré-escolhidas no portfólio, sendo ele o Método de *PayOff*. Este método compatibiliza os custos inerentes a obra com os benefícios econômicos auferidos pela mesma, resultando na informação econômica que apresenta a velocidade de pagamento do investimento, sendo esta informação muito importante na tomada de decisão frente aos investidores da empresa.

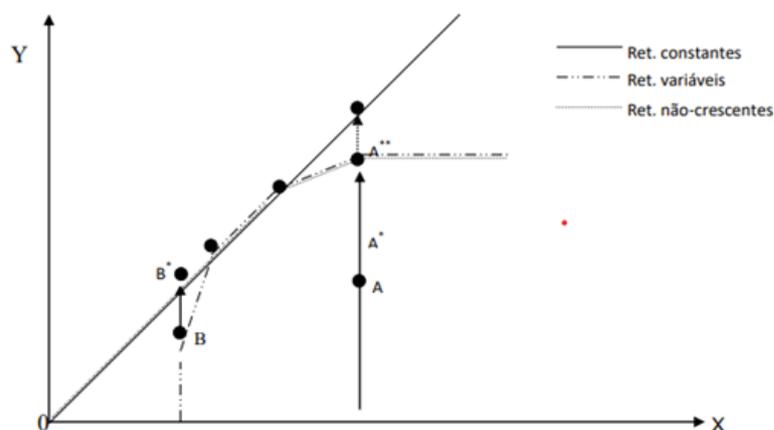
Soares (2014) aplicou uma combinação de métodos de otimização de portfólios como AHP e PROMETHEE, juntamente com uma análise da gestão da empresa para formular um método eficiência de priorização de obras para empresas de distribuição de energia. Em sua pesquisa, utilizou-se da separação da região de concessão da empresa em várias UMO (Unidades Mínimas Operacionais) que representam regiões da concessão da empresa com força e orçamento independentes para que houvesse uma priorização de obras baseada em cada UMO da distribuidora de energia. A observação da concessão da empresa trouxe ganhos significativos nas tomadas de decisão, sendo mais uma variável acrescentada no problema de otimização.

Fernandes (2014) apresenta a inclusão nas ferramentas de decisão da companhia RGE (distribuidora do estado do RS) o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para as obras da concessionária. O método foi desenvolvido em VBA (*Visual Basic Análise for Applications*) e possui completa customização por parte do gestor do sistema.

Os estudos de otimização de portfólio possuem diversos vieses, como o apresentado por Vargas (2015) que utiliza um estudo de planejamento da expansão da distribuição em média tensão para verificar as obras que devem constar em seu portfólio. Em seu estudo, foi estimado as obras necessárias nos religadores do sistema elétrico para o sistema poder atender a demanda projetada pela ANEEL em 5 anos. Foi utilizado o método AHP para auxiliar na escolha da melhor proposta de obras para atender o plano da ANEEL.

Marques (2016) propôs um novo modelo de análise de eficiência das empresas do setor elétrico para as revisões tarifárias. Atualmente, a ANEEL define que deve ser utilizado o DEA com retorno de escala não decrescente. A autora validou a utilização do retorno de escala constante utilizando-se do DEA em rede com três estágios. Os estágios referenciam a posição da empresa analisada na cadeia de suprimento de energia elétrica: geração, transmissão e distribuição. A Figura 8 apresenta as diferenças entre os retornos de escala na constituição da fronteira de eficiência.

Figura 8 – Fronteira de Eficiência para Diferentes Retornos de Escala



Fonte: Fonseca (2018)

Na dissertação de Martins (2016), a priorização das ações e investimentos da concessionária RGE foi desenvolvida utilizando-se do método de auxílio a tomada de decisão da escola francesa, o ELECTRE II. Este método quantifica a opinião de especialistas e traz uma abordagem de sobreclassificação entre as opções de ação utilizando-se, por exemplo, de critérios de imediatidade da ação frente a possíveis riscos a vida e segurança da população.

A abordagem utilizada por Pereira (2017), aplica a análise par a par (técnica semelhante a AHP), para criar critérios de significância entre os diversos indicadores

regulatórios e operacionais da concessionária, como: sobrecargas em alimentadores e perdas ôhmicas em linhas de distribuição, por exemplo. A soma da multiplicação do peso encontrado na análise e dos valores reais gera o Índice de Vulnerabilidade Sistêmico (IVSis) proposto pelo autor. Este índice é utilizado para se localizar na concessão da empresa as áreas críticas que necessitam de maior atenção e urgência de ação. O autor também propôs o indicador Relação Benefício Custo (RBC) para a priorização das obras por parte da companhia. A formulação deste indicador seguiu os mesmos passos do IVSis, porém foram utilizados como critérios a serem ponderados os benefícios elétricos, econômicos e regulatórios de cada obra normalizados pelo número de clientes atingidos por cada benfeitoria.

A aplicação da técnica de fronteira de eficiência (DEA) como metodologia de priorização de portfólio é amplamente utilizada na área econômica, com estudos de empresas e análises para o investidor (VOGT; DEGENHART; JUNIOR, 2017) (JUNIOR; CORSO, 2020). Atualmente, este método está sendo utilizado também para análise de obras (PWC, 2015).

O método AHP é uma das ferramentas mais difundidos e utilizados para otimização de portfólios (GOMES, 2007). Este método é utilizado para diversas tomadas de decisões em serviços públicos, como o estudo apresentado por Fernandes e Junior (2019) que propôs uma metodologia para priorização de obras do exército brasileiro. Esta metodologia utiliza o método *Structured Pair-wise Comparison*, também conhecido como AHP simplificado, para otimizar o portfólio de obras do Sistema de Saúde do Exército.

O artigo do Costa, Pereira e Madruga (2020) dispõe da aplicação da metodologia AHP na escolha dos religadores que devem ser priorizados para obras. Entretanto, os autores apresentam o modelo proposto por Vargas (2015) com um modelo computacional capaz de apresentar, por religador, os motivos de falhas e indicadores de qualidade de serviço. Outra vantagem do modelo é a flexibilização e customização do modelo no que tange faixa de tempo, equipamentos e causas de falhas a serem consideradas.

Com enfoque em obras de manutenção em sistemas de distribuição, o artigo de Costa et al. (2022) apresenta a otimização do portfólio de alimentadores do sistema de elétrica. A priorização apresentada demonstra em qual alimentador deve ser priorizado obras de manutenção, focando em melhorar os parâmetros de qualidade do sistema. O modelo proposto utilizou os seguintes parâmetros: DEC, FEC, custo da utilização do sistema de distribuição, número de ocorrências e número de consumidores. O modelo proposto utiliza a técnica AHP aplicado como parte do *Planning* do método PDCA (*Planning, Doing, Checking and Acting*).

A instalação de novas fontes de energia no sistema de distribuição e transmissão é um problema de portfólio a ser analisado, pois com o aumento da eficiência na alocação destas obras no sistema elétrico gera maiores benefícios a população local, além de diminui

emissões de carbono e melhorar os parâmetros elétricos do sistema (KOPONEN; NET, 2021). A literatura apresenta a otimização de portfólio de obras de alocação de energias renováveis de diversos tipos, como o artigo de Zahid et al. (2021) expõe a utilização do método AHP para alocação de parques eólicos em Gwadar. O estudo de Wang, Dodd e Ko (2022) apresenta a otimização do portfólio de obras de instalação de plantas solares em Taiwan. Foi aplicado o método AHP em conjunto com informações georreferenciadas, GIS (*Geographic Information System*), para a otimização do portfólio e, com a utilização de dados de localização de florestas de preservação e impactos nas comunidades locais, foi possível mostrar que é possível alcançar a meta de geração com instalação em locais de baixo impacto socioambiental.

O artigo de Ali et al. (2023) também apresenta a otimização do portfólio de obras com escopo em geração distribuída, com enfoque na instalação de plantas PHES (*Pumped Hydro Energy Storage*) na Austrália. Este estudo também utilizou de informações georreferenciadas e, para a priorização do portfólio, aplicou o método AHP. Os resultados apresentaram a possibilidade de instalação de parques em 14 locais diferentes e que reduziriam significativamente as emissões de CO₂ do sistema. A utilização do método AHP em combinação com outro modelo de otimização é vastamente utilizado, como no estudo de Abdullah et al. (2023) que apresenta a utilização deste método com lógica FUZZY para escolha do portfólio de instalação de plantas nucleares na Indonésia. Neste trabalho foi aplicado uma otimização multicritério que considera, além dos parâmetros elétricos e do tipo de usina nuclear, fatores socioeconômicos dos locais propostos para instalação.

Na literatura encontrada, as estratégias abordadas para otimizar os portfólios de obras das companhias não consideraram parâmetros elétricos, econômicos e regulatórios no mesmo estudo. Além disso, a metodologia proposta traz um viés de eficiência econômica das obras.

Assim, a importância deste trabalho para a literatura é trazer diversos parâmetros para o estudo, podendo ser observado cada um separadamente e trazendo uma possibilidade de priorização entre eles.

2.4 Comparativo Com o Modelo Proposto

O modelo proposto por este trabalho possui diferenciais frente às técnicas propostas pela literatura. Primeiramente, o modelo possui flexibilidade para realização de maximizações dos benefícios ou minimizações dos riscos e custos. Esta flexibilidade provém das etapas aplicadas pelo modelo, nas quais é possível redefinir parâmetros de priorização dos investimentos.

Outro diferencial do modelo proposto é a etapa da fronteira de eficiência antes da otimização do portfólio. Esta etapa informa preliminarmente ao gestor do portfólio a

informação da eficiência econômica das obras do portfólio, permitindo uma tomada de ação antecipada ou a mudança das obras pertencentes ao portfólio.

Além destes diferenciais, o modelo proposto é elástico no que tange variáveis de entrada e modelos de obras. Podendo o modelo ter como escopo diversos tipos de obras e realizar a adição de novos parâmetros com esforço reduzido.

A aplicação do método AHP como priorização preliminar permite que o modelo tenha duas etapas de otimização do portfólio, sendo a primeira com enfoque em reduzir o tempo computacional e também trazer informações preliminares ao gestor do portfólio. É possível verificar a comparação do modelo de otimização proposto com os trabalhos anteriores na [Figura 9](#).

A [Figura 9](#) apresenta a tabela comparativa entre os estudos analisados na revisão bibliográfica e o presente trabalho.

Figura 9 – Comparativo do Modelo Proposto com a Revisão da Literatura

	Noronha e Lima	David	PWC	WU et al	Zahid et al	Wang, Dodd e KO	Ali et al	Ade et al	Vargas	Pinto	Duarte	Moreira	Soares	Fernandes	Marques	Martins	Pereira	Costa et al	Costa, Pereira e Madruga	Proposta deste Trabalho
Objeto de Otimização																				
Obras	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X		X	X
Tipo de Otimização																				
Otimização dos Processos Gerenciais		X	X	X	X	X	X	X					X	X		X	X		X	X
Otimização Matemática	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X					X		X
Objetivo da Otimização																				
Minimização dos Riscos	X	X						X	X	X				X		X	X		X	X
Maximização dos Benefícios	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X		X	X
Minimização dos Custos		X			X	X	X	X	X				X			X	X		X	X
Parâmetros Otimizados																				
Parâmetros Elétricos				X			X		X	X		X	X	X		X	X		X	X
Parâmetros Econômicos	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X
Parâmetros Regulatórios					X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X		X	X
Informações Geográficas					X	X	X	X												
Métodos de Otimização																				
Genético									X			X								
Linear													X							X
AHP									X				X				X		X	X
ELECTRE II			X	X	X	X	X	X						X						
Multiobjetivo									X	X		X				X				X
FUZZY								X												
Promethee											X									
Estocástica													X							
Opções Reais	X																			
Análise de Eficiência																				
Aplicação do DEA			X												X					

Fonte: O Autor, 2023.

2.5 Considerações Finais do Capítulo

Existem diversos métodos para otimizações de portfólios, desde modelos matemáticos complexos até técnicas que se baseiam unicamente no gerenciamento de processos internos ou opiniões de especialistas. Portanto, parte do problema de otimização do portfólio é identificar o modelo a ser aplicado para a correta estruturação da priorização.

Por isso, este capítulo inicia com um resumo de obras relacionadas ao tema de otimização de portfólio de obras, abrangendo diversos autores e técnicas. É possível verificar que diversos autores apresentam a utilização do método AHP para otimização de portfólio, porém não se excluindo a combinação deste método com outros.

Como o problema de otimização do portfólio de obras para o setor de distribuição de energia é complexo, o modelo proposto é composto por três diferentes etapas de otimização, sendo elas: DEA, AHP e otimização linear. Cada uma das respectivas etapas possui suas respectivas bases teóricas e, portanto, este capítulo apresentou os principais conceitos destas técnicas.

O modelo de DEA utilizado no trabalho é o VRS, para distinguir a eficiência técnica da eficiência de escala.

3 Materiais e Métodos

O objetivo deste capítulo é apresentar os materiais e métodos aplicado neste projeto. Portanto, este capítulo será dividido em duas etapas. A primeira etapa é a apresentação dos sistemas elétricos no qual o modelo proposto será aplicado, como também as obras propostas. A segunda etapa visa discorrer sobre o modelo de priorização de obras proposto neste trabalho.

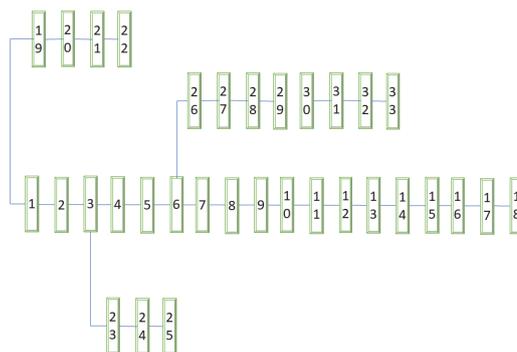
3.1 Sistemas Testes

3.1.1 Sistema de Distribuição de Energia — IEEE 33 Barras

O primeiro sistema escolhido para o testar o modelo foi o sistema *benchmarking* IEEE 33 barras. Os parâmetros elétricos completo do sistema podem ser verificados em [Baran e Wu \(1989\)](#) e seu resumo no [Apêndice C](#). A tensão de operação deste sistema é de 12,66 kV e possui cargas em todos os seus barramentos, exceto no barramento 0. A unidade geradora do sistema se encontra no barramento 0 e este mesmo barramento é utilizado como barramento de referência para o cálculo do fluxo de potência.

A [Figura 10](#) apresenta o sistema IEEE 33 barras na visão de barras.

Figura 10 – Sistema IEEE 33 Barras



Fonte: [Baran e Wu \(1989\)](#)

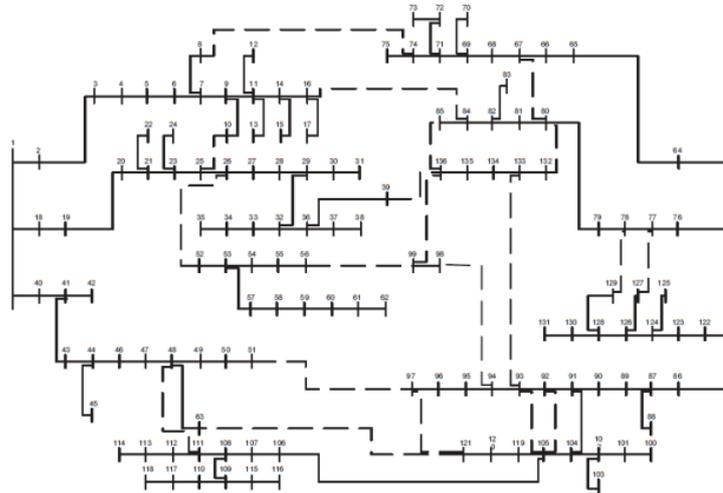
O [Apêndice C](#) apresenta os dados completos do sistema teste.

3.1.2 Sistema de Distribuição de Energia — 135 Barras

O sistema teste com 135 barras pode ter suas características avaliadas em [Mantovani, Casari e Romero \(2013\)](#). A tensão de operação do sistema é de 13,8 kV e sua subestação

de fornecimento de energia se encontra no barramento 135, que também é utilizado como barramento de referência. O sistema elétrico pode ser observado na [Figura 11](#) e suas informações técnicas no [Apêndice C](#).

Figura 11 – Sistema 135 Barras

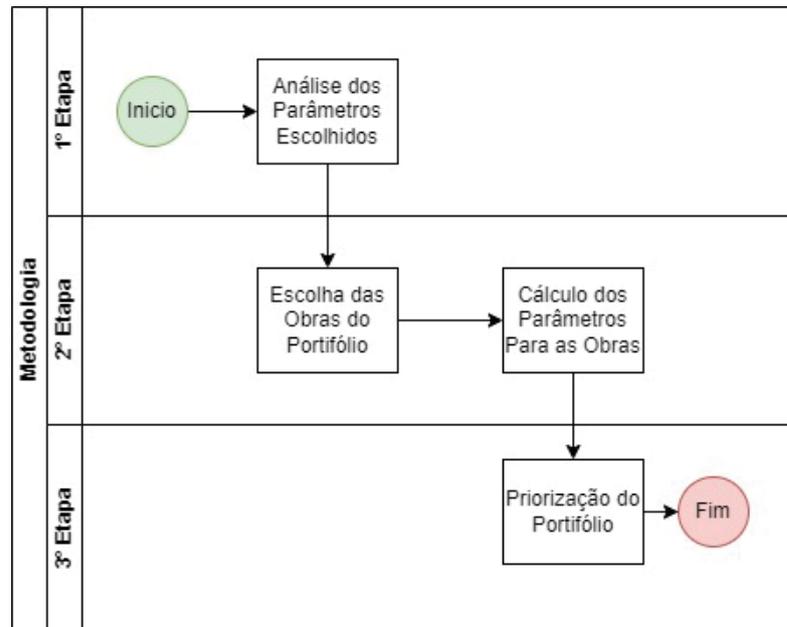


Fonte: [Oliveira \(2019\)](#)

3.2 Modelo Proposto

O modelo proposto por este trabalho segue as seguintes etapas apresentadas na [Figura 12](#). A primeira etapa se refere a análise dos indicadores que serão aplicados no processo de otimização do portfólio de obras da distribuição. A segunda etapa da otimização do portfólio se refere a caracterização das obras. Nesta etapa, o gestor da distribuidora deverá elencar as obras necessárias para o sistema e calcular os parâmetros de entrada para cada obra. Estes parâmetros foram escolhidos na etapa anterior. A terceira e última etapa é a otimização do portfólio utilizando o modelo proposto por este trabalho.

Figura 12 – Metodologia Proposta



Fonte: O Autor, 2023

3.2.1 Parâmetros escolhidos para priorização

Os parâmetros técnicos e econômicos que caracterizam as obras do portfólio são:

- Custo Financeiro;
- Tempo de Execução;
- Carga Atingida;
- Tensão nos Barramentos;
- Perda Elétrica Geral do Sistema;
- Ganhos de Qualidade (DEC e FEC).

O parâmetro Carga Atingida foi estimado utilizando-se a análise substantiva da quantidade de carga beneficiada pela execução da obra, sendo que cada tipo de obra beneficia a carga de formas distintas. Portanto, lista-se abaixo o método e cálculo por tipo de obra:

- Instalação do Banco de Capacitores: somatório da carga acoplada aos barramentos nos quais houve aumentos significativos no nível de tensão pela alocação do banco de capacitores;

- Construção de Rede: somatório da carga acoplada no ramo do sistema que era radial e, após a construção da rede, se tornou um circuito em anel;
- Instalação do Religador: somatório da carga acoplada aos barramentos pertencentes ao ramo que se beneficia da atuação do religador;

As obras do portfólio são benéficas ao sistema elétrico, auxiliando assim o aumento da confiabilidade do sistema como os seus parâmetros elétricos. Desta forma, é necessário estimar estes benefícios elétricos e aplicá-los no modelo de priorização de obras.

A estimativa dos benefícios elétricos ocasionados pelas obras podem ser calculadas através do fluxo de potência. O fluxo de potência estima a tensão e corrente elétrica do sistema, além da defasagem angular e os fluxos de potência entre os barramentos do sistema. O estudo do fluxo de potência é muito utilizado na verificação das alterações elétricas durante a adição ou retirada de equipamentos, mudança nas cargas e unidades geradoras do sistema, etc (PEREIRA, 2008).

Os níveis de tensão no sistema, até a chegada no consumidor, são regulados pela ANEEL. Portanto, é interessante para a Distribuidora no momento da priorização do portfólio considerar os benefícios atrelados ao aumento do nível de tensão em seu sistema. Atualmente, a ANEEL (2021) exige que a variação na tensão nominal nos consumidores não ultrapasse 5%.

As perdas elétricas no sistema não são benéficas às Distribuidoras, podendo levar a perdas financeiras ao longo do tempo. Por se tratar de uma característica elétrica calculada com o resultado do fluxo de potência, é um parâmetro importante a ser considerado durante a priorização dos portfólios.

A priorização do portfólio deve considerar as limitações financeiras das companhias, ao ser um parâmetro extremamente importante nas questões gerenciais. Além da despesa financeira da obra, outro ponto importante na escolha da obra a ser priorizada é o tempo de execução.

A estimativa de cálculo destes parâmetros é realizada através do documento de engenharia chamado: Razão de Obras. Este documento traz os lançamentos dos custos das obras do setor elétrico (ANEEL, 2022a). Utilizando este documento, é possível estimar o preço médio dos tipos de obras de uma Distribuidora. Utilizando o primeiro lançamento de custos de uma obra e o último lançamento, é possível estimar o tempo médio de uma obra.

A quantidade de carga atingida é diretamente proporcional a quantidade de consumidores conectadas ao barramento. Portanto, utilizou-se deste parâmetro para medir a atuação dos benefícios da obra.

O ganho nos indicadores de qualidade do sistema (DEC e FEC) gerados pelos investimentos são usualmente calculados após a realização da obra. Portanto, para se inserir os benefícios de cada obra, utilizaram-se os dados médios de ganho nos benefícios aplicados por diversos tipos de obras realizadas por uma distribuidora brasileira. Estas informações estão representadas na [Tabela 5](#). Estes valores podem ser replicados para qualquer distribuidora de pequeno porte e, caso se obtenha o Razão de Obras ou preços dos serviços e materiais para outra distribuidora, estes valores podem ser atualizados para contemplar melhor a análise do portfólio da distribuidora. Para a tipologia de obra de instalação de banco de capacitor, utilizaram-se os valores de benefícios da obra de instalação de para-raios. Esta comparação foi realizada por estar previsto, na instalação dos bancos de capacitores, a instalação também de para raios de distribuição.

Tabela 5 – Tabela de ganhos no DEC/FEC por tipo de obras

Tipo de Obra	Ganho
Instalação de Religador	0,7
Instalação de Religador de Interligação	0,8
Novo Alimentador	0,5
Nova SED/LD	0,6
Reforma de Alimentador	0,3
Reforma em Baixa Tensão	0,4
Interligação entre Ramais	0,7
Recondutoramento	0,7
Divisão de Ramal	0,6
Divisão de Alimentador	0,8
Recondutoramento	0,7
Instalação de Para-Raios	0,5
Instalação de Chaves	0,5

Fonte: [Sousa \(2022\)](#).

3.2.2 Modelo de Priorização do Portifólio

3.2.2.1 Eficiência Econômica

A primeira etapa do modelo proposto é o cálculo da eficiência econômica geral das obras. Esta etapa preliminar visa a inclusão da visão de eficiência no processo de priorização do portfólio para auxílio na tomada de decisão na escolha das obras.

Para o cálculo da eficiência econômica, utilizou-se da técnica DEA, mas especificamente o modelo VRS. Isso porque este método consegue desagrupar a eficiência de escala da eficiência técnica. Portanto, a utilização do VRS mitiga a distorções caso seja alocado obras de diferentes portes no portfólio, como a alocação de um banco de capacitores, que causará uma melhora local nos níveis dos barramentos, no mesmo portfólio de uma

obra de construção de barramentos e conexões (que levará a melhorias de forma geral no sistema).

O método DEA aplicado tem como *inputs* o custo médio do tipo de obra aplicado e como *outputs* o tempo médio gasto em cada obra e a carga beneficiada pela obra. Como o parâmetro de tempo médio gasto é inversamente proporcional ao que se deseja de uma obra, isso é, quanto mais ágil for a execução de uma obra mais benefícios ela trará a distribuidora, os valores devem ser tratados antes de adentrar ao modelo. Para que a coerência do parâmetro seja atendida, utilizou o tempo médio negativo como *output* do modelo.

A orientação do modelo DEA utilizado é voltada na minimização dos insumos dado os produtos constantes, portanto, a orientação do modelo é a Insumo. Esta escolha foi realizada para o modelo priorizar as obras que possuem maior eficiência na alocação dos seus custos.

Aplicando-se a [Equação 2.3](#) para o problema de otimização de portfólio deste trabalho, chega-se nas seguintes formulações [Equação 3.1](#).

$$\begin{aligned}
 \max h_0 &= \sum_{j=1}^1 \mu_j Saída_{j0} - u \\
 &\text{sujeito a} \\
 &\sum_{i=1}^2 v_i Entrada_{i0} = 1 \\
 \sum_{j=1}^1 \mu_j Saída_{jk} - \sum_{i=1}^2 v_i Entrada_{ik} &\leq 0 \\
 &k = 1, \dots, s \\
 &\mu_j, v_i \geq 0 \quad \forall i, j \\
 &u \in \Re
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Sendo:

- m = número de parâmetros de entrada;
- n = número de parâmetros de saída;
- k = número de obras do portfólio;
- *Saída*: vetor contendo o somatório do tempo médio de execução e a carga beneficiada de cada obra;
- *Entrada*: vetor que contém custo médio de execução da obra.

O modelo proposto visa minimizar os insumos da distribuidora (Investimento), produzindo a maior quantidade possível de produtos (tempo de execução e clientes

beneficiados). A primeira restrição, $\sum_{i=1}^2 v_i \text{Entrada}_{i0} = 1$, apresenta que o valor máximo de eficiência, h_0 , que uma obra pode resultar é 1. Isso por que o quanto menos eficiente for a obra, maior será o peso aplicado na variável μ . Pode-se verificar que a segunda restrição (subtração do somatório das saídas pelo somatório das entradas) esta limitada ao valor 0, sendo que as obras eficientes resultarão em valor próximos a este.

Esta etapa do modelo é realizada em linguagem R, (R Development Core Team, 2009), por se tratar de uma linguagem amplamente utilizada na análise de dados e com implementação gratuita. Utilizou-se o pacote [Bogetoft \(2022\)](#) para aplicação da técnica DEA.

3.2.2.2 Priorização do Portfólio

A priorização do portfólio é realizada aplicando o método AHP utilizando-se duas hierarquias. A primeira hierarquia trata do próprio cálculo dos parâmetros escolhidos para cada obra, sendo eles:

- Eficiência Econômica
- Perda Elétrica Geral do Sistema
- Tensão nos Barramentos
- Ganhos de Qualidade (DEC e FEC)

A segunda hierarquia se trata da preferência entre os quatro parâmetros acima. A consistência do método deve ser calculada após as preferências terem sido escolhidas para que o método apresente um resultado satisfatório.

A [Figura 13](#) apresenta o modelo AHP utilizado no modelo de priorização de obras de distribuição apresentado.

Os julgamentos paritários entre as obras não são aplicados conforme a opinião de especialistas e sim, calculados pela etapa anterior (eficiência econômica) ou pelo fluxo de potência do sistema analisado. Desta forma, ocorre a mitigação de possíveis incertezas na análise inicial.

Porém, o julgamento paritário entre as Perdas Elétricas, Nível de Tensão, Ganhos de Qualidade e Eficiência Econômica pode ser tratado como *inputs* do modelo. Desta forma, o modelo possui flexibilidade para que o operador da análise possa criar diversos cenários e estudos durante a priorização das obras do portfólio. Caso a concessionária entenda que os Níveis de Tensão devem ser prioridade na escolha das suas obras, é possível adentrar no modelo com este parâmetro com maior preponderância frente aos outros dois, por exemplo. O modelo AHP apresentado foi programado em Python.

Figura 13 – Método AHP utilizado



Fonte: O Autor, 2023

Os resultados obtidos pelo método AHP que apresentarem valores próximos de zero, ou seja, as obras que apresentaram prioridade baixa em relação as demais serão retiradas do problema de otimização de portfólio e não serão consideradas na próxima etapa do modelo. Portanto, o método AHP resulta na otimização do portfólio inicial do projeto e reduz em cerca de 70 % do esforço computacional exigido pelo método de otimização utilizado na próxima etapa (SOARES, 2014).

A matriz de correlações e prioridades entre as características do sistema foi retirada de Vargas (2015). Esta matriz apresenta a média de opiniões de especialistas no setor sobre quais características devem ter maior peso para a determinação da priorização do portfólio. A Tabela 6 apresenta a matriz utilizada.

Tabela 6 – Matriz Λ

	(1)	(2)	(3)	(4)
Nível de Tensão (1)	1	2,24	5,18	2,74
Eficiência Econômica (2)	0,45	1	2,06	0,67
Perda Elétricas (3)	0,19	0,49	1	0,38
Qualidade (4)	0,37	1,5	2,63	1

Fonte: adaptado de Vargas (2015)

Observa-se que a matriz proposta por Vargas (2015) considera os níveis de tensão a característica mais importante no processo de priorização. Para aumentar a confiabilidade da matriz e aplicação nos sistemas teste deste trabalho, realizou-se uma análise de sensibilidade nos parâmetros da matriz. Para isso, realizaram-se as seguintes alterações na matriz:

- Aumento em 1 grau na prioridade do Nível de Tensão frente as outras características;
- Redução em 1 grau na prioridade do Nível de Tensão frente as outras características;

- Aumento em 1 grau na prioridade das Perdas Elétricas frente as outras características.

Como a Eficiência Econômica e os Ganhos de Qualidade tem prioridades relacionadas entre si próxima de 1, não há necessidade de realizar a sensibilidade entre elas.

Utilizando-se das mesmas variáveis e pesos aplicados no método AHP, a aplicação da otimização linear visa maximizar a função objetivo [Equação 3.2](#) com restrições, sendo:

$$\max \sum_{n=1}^{n_{max}} p_n * (C1_n PC_1 + C2_n PC_2 + C3_n PC_3 + C4_n PC_4) \quad (3.2)$$

$$0 < p_n \leq n_{max}$$

Sendo $C1$, $C2$, $C3$ e $C4$ os parâmetros calculados nas etapas anteriores (Perdas Elétricas, Média das Tensões nos Barramentos, Qualidade e Eficiência Econômica, respectivamente) e PC_1 , PC_2 , PC_3 e PC_4 os pesos de cada parâmetro para o cálculo da otimização. Os pesos, PC são os mesmos utilizados na etapa de priorização AHP. Além disso, p_n é o peso de cada obra e n o número de obras pertencentes ao processo de otimização. Esta restrição visa impedir que o método classifique apenas a melhor obra e as demais sejam alocadas em segunda lugar empatadas.

A ordenação de prioridade do portfólio se dá pelo peso calculado para cada obra. A otimização visa maximizar a função objetivo, sendo o somatório dos resultados das etapas anteriores multiplicados por um peso, p_n . Portanto, a etapa de otimização linear calcula os pesos para resultar nos melhores parâmetros para a distribuidora. Se a obra for eficiente, o peso aplicado em sua função será maior que o peso calculado para uma obra ineficiente e, portanto, esta obra terá prioridade no portfólio.

A primeira restrição visa limitar o possível universo de possibilidades do processo de otimização, impossibilitando da otimização computacional entrar em *looping* infinito. A otimização linear foi aplicada em *Microsoft Excel*. A [Figura 14](#) apresenta a terceira etapa do método dividida em seus processos.

Figura 14 – 3° Etapa

3° Etapa	
1	Cálculo da Eficiência Econômica através da aplicação do DEA
2	Priorização do Portfólio através do método AHP
3	Otimização do Portfólio

Fonte: O Autor, 2023

3.3 Considerações Finais do Capítulo

O modelo proposto utiliza a combinação de técnicas de otimização de portfólio para a resolução do problema de escolha das obras. O modelo se inicia com a aplicação da técnica DEA para calcular a eficiência econômica das obras presentes no portfólio.

A técnica DEA proposta no modelo é o DEA VRS com a orientação voltada ao insumo. O parâmetro de entrada para a fronteira de eficiência é o custo financeiro das obras. Como parâmetros de saída, considerou-se o tempo de execução e a porcentagem de carga beneficiada pela obra. O resultado desta etapa é a eficiência econômica de cada obra. Esta eficiência corresponde a distância entre a obra e a fronteira de eficiência. Quanto maior a distância entre a fronteira e a obra analisada, maior a ineficiência da obra. Caso a obra esteja na fronteira de eficiência, ela é considerada uma obra eficiente. A eficiência é calculada em porcentagem, sendo o resultado 100% o máximo possível de ser alcançado.

A eficiência econômica em conjunto com os parâmetros elétricos (nível médio de tensão nos barramentos e perdas elétricas totais do sistema) e o parâmetro de qualidade na prestação do serviço (benefícios no DEC e FEC) são os dados de entrada da segunda etapa do método, a técnica AHP. A técnica AHP é amplamente utilizada nos processos de priorização de portfólio. Isso se deve a sua facilidade de adaptação para diversos cenários e estudos. A técnica multicritério realiza comparações paritárias utilizando *inputs* que podem ser definidos pelo operador do método.

O resultado da técnica AHP apresenta a prioridade preliminar do portfólio. Caso o resultado do método apresente prioridades extremamente reduzida para alguma obra do portfólio, o método AHP servirá como um redutor de obras para a etapa final do método. Sendo assim, o método AHP visa a redução do esforço computacional da última etapa da otimização e a realização da análise de sensibilidade da matriz de pesos dos parâmetros frente a otimização. O peso que contribuirá cada parâmetro na otimização do portfólio foi definido por uma matriz que corresponde a opinião de especialistas sobre a preferência que deve ser dada para cada parâmetro. Por se tratar de uma informação subjetiva, incluiu-se uma etapa de análise de sensibilidade para estudar as diferenças na priorização por pequenas variações nesta matriz e assim, definir a matriz de pesos que melhor se adequa ao portfólio estudado.

A etapa final do método é a otimização linear. Esta etapa visa a otimização do portfólio de obras através da maximização da função objetivo. As constantes da função objetivo, que definem os pesos de cada parâmetro na função objetivo, são as mesmas definidas pela análise de sensibilidade realizada na etapa anterior. O resultado da última etapa é o ranqueamento das obras por sua preferência de execução, trazendo a informação de quais obras devem ser prioritárias em sua execução pela distribuidora de energia.

4 Otimização do Portfólio de Obras dos Sistemas de Distribuição

Este capítulo visa apresentar a aplicação do método proposto em dois sistemas de distribuição teste: IEEE 35 Barras e o sistema de distribuição de 135 barras de [Mantovani, Casari e Romero \(2013\)](#). Será avaliado três cenários de otimização do portfólio, sendo o primeiro com enfoque na priorização dos parâmetros econômicos. O segundo cenário terá como objetivo a priorização dos parâmetros elétricos e o terceiro, e ultimo, cenário será aplicado a matriz de priorização proposta no modelo deste trabalho com a verificação de sensibilidade para cada sistema.

4.1 Priorização do Portfólio de Obras — Sistema IEEE 33 Barras

Primeiramente, iniciou-se a aplicação do modelo de priorização de obras para o sistema IEEE 33 Barras escolhendo uma seleção de obras a serem executadas no sistema.

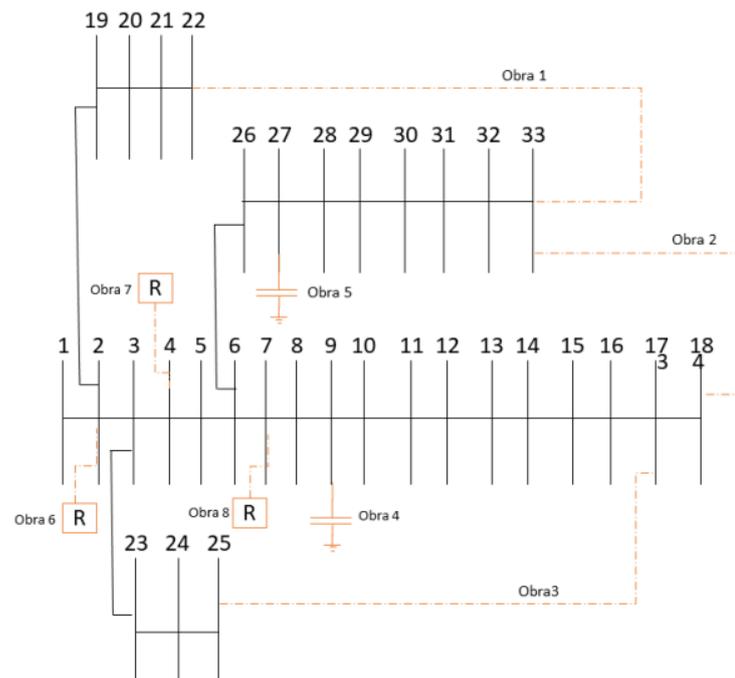
As obras escolhidas estão representadas na [Tabela 7](#) e sua representação no sistema elétrico na [Figura 15](#).

Tabela 7 – Tabela de Parâmetros por Tipo de Obra

Nº da Obra	Descrição
1	Construção de linha entre barra 22 e barra 33
2	Construção de linha entre barra 33 e barra 18
3	Construção de linha entre barra 25 e barra 17
4	Alocação de banco de capacitores na barra 9
5	Alocação de banco de capacitores na barra 27
6	Alocação de religador na barra 2
7	Alocação de religador na barra 4
8	Alocação de religador na barra 7

Fonte: O Autor, 2023.

Figura 15 – Diagrama Esquemático do Sistema Teste com Obras



Fonte: O Autor, 2023

As características elétricas podem ser adquiridas aplicando o fluxo de potência do sistema. Para isso, utilizou-se da linguagem de programação Python e do pacote, *toolbox*, chamado de PyPSA (BROWN; HÖRSCH; SCHLACHTBERGER, 2018). A *toolbox* realiza diversas simulações, como, por exemplo:

- Fluxo de Potência;
- Fluxo de Potência Linear Ótimo;
- Fluxo de Potência Linear Ótimo com restrições de segurança;
- Estudos de Geração Ótima.

Portanto, aplicou-se o fluxo de carga em todas as obras propostas no portfólio para se calcular os parâmetros elétricos do sistema após as obras. Os indicadores utilizados neste trabalho são a média geral de tensão em todos os barramentos do sistema e a porcentagem da carga total alocada no sistema que obteve benefícios ou melhorias após a execução da obra. Sendo assim, os resultados encontrados pela análise e o benefício aos indicadores de qualidade do sistema elétrico (indicador no modelo chamado de Qualidade) estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros Elétricos e sua Influência nas Obras do Sistema

—	Perdas Elétricas	Média das Tensões	Carga Beneficiada	Qualidade
Obra	p.u.	p.u.	% da carga total	%
1	0,1000	0,9644	35,66	70
2	0,0765	0,9726	65,38	70
3	0,1146	0,9623	71,22	70
4	0,1110	0,9641	40,77	50
5	0,1096	0,9615	17,94	50
6	0,1337	0,9523	100,00	70
7	0,1337	0,9523	90,41	70
8	0,1337	0,9523	44,11	70

Fonte: O Autor, 2023.

Os parâmetros econômicos das obras foram estimados utilizando valores reais do Razão de Obras de uma Distribuidora brasileira. Os valores considerados no item “custo da obra” se refere a todos os custos aplicados na obra, podendo ser dividido em 5 grandes grupos:

- EP: custos com os equipamentos principais;
- COM: custos com componentes menores necessários para instalação dos equipamentos principais;
- MOP: custos, em horas dos funcionários e despesas, com mão de obra própria da concessionária;
- ST: custos com serviços de terceiros contratados pela concessionária;
- JOA: juros sobre obras em andamento, parcela que representa a remuneração de capital da concessionária por estar alocando recursos na obra e ainda não sendo recompensada na tarifa.

Os valores, por tipologia de obra, estão presentes na [Tabela 9](#). Os valores apresentados são a média utilizada por uma concessionária de pequeno porte brasileira, sendo retirados do Razão de Obras desta concessionária. O Razão de Obras apresenta todas as obras de expansão e manutenção realizadas pela concessionária para um certo período, usualmente este período está relacionado com o ciclo de revisão tarifária.

Tabela 9 – Tabela de Parâmetros por Tipo de Obra

Tipo de Obra	Tempo de Execução (semanas)	Custo da Obra (R\$)
Banco de Capacitores	1,28	1584,78
Novas Redes de Distribuição	14,28	45787,40
Religador	7,14	71944,93

Fonte: O Autor, 2023.

Como exemplo da formação dos valores aplicados para a tipologia de cada obra, abaixo se encontra os valores descritos para a obra de instalação do banco de capacitores. Pontua-se que foi utilizado a média de valores encontrados no razão de obras.

- EP: R\$686,46 a R\$ 1485,66 (Banco de Capacitor 300kVar 13,8kV);
- COM: R\$ 500,00 a R\$ 2500,00;
- MOP: R\$ 234,00 a R\$ 2500,00;
- ST: a companhia utilizada como base para este trabalho não aplica de mão de obras de terceiros (contratação de empresa terceirizada) para instalação de banco de capacitores. Portanto, os valores referentes a mão de obra necessária para instalação do banco de capacitores esta todo alocado no MOP;
- JOA: R\$ 7,34 a R\$ 37,42.

Para a simulação elétrica das obras de conexões entre os ramos do sistema (obras 1,2 e 3), analisaram-se as impedâncias médias das linhas de distribuição existentes no sistema para que os valores aplicados como parâmetros de impedância para as obras não destoassem dos valores já existentes. Portanto, utilizaram-se os seguintes parâmetros de impedância:

- $r = 0,5302\text{Ohms}$;
- $x = 0,3410\text{Ohms}$.

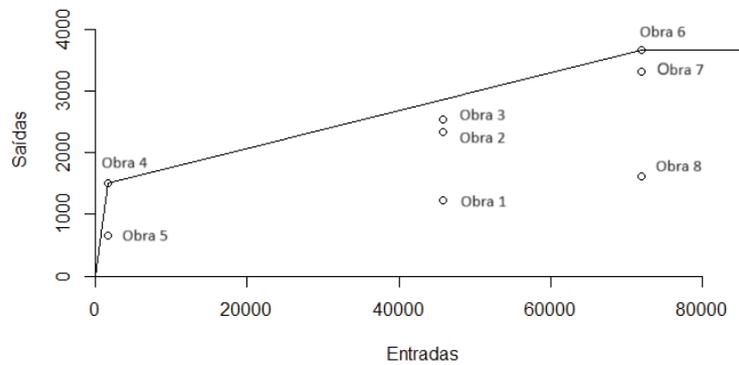
Com todos os parâmetros estimados, aplica-se a técnica DEA para calcular a eficiência econômica das obras do portfólio. Portanto, utilizaram-se as características encontradas na Tabela 9 como *inputs* e *outputs* no cálculo da fronteira de eficiência. O resultado está representado graficamente na Figura 16 e com os respectivos valores de eficiência na Tabela 10. Aplicando-se a Equação 3.1, é possível verificar a formulação matemática para o cálculo da eficiência da primeira Obra 1 na Equação 4.1. Dentro do modelo, o tempo é inserido negativamente, pois o benefício da obra é inversamente proporcional ao tempo gasto na implantação dela.

Os parâmetros da Obra 1 são:

- Custo da obra: R\$ 45787,40;
- O tempo de execução: -14,28;
- Porcentagem da carga beneficiada: 35,66%.

$$\begin{aligned}
 \max h_0 &= \sum_{j=1}^2 \mu_j \begin{pmatrix} -14,28 \\ 35,66 \end{pmatrix} - u \\
 &\text{sujeito a} \\
 &\sum_{i=1}^1 v_i [45787,40] = 1 \\
 &\sum_{r=1}^2 \mu_j \begin{pmatrix} -14,28 \\ 35,66 \end{pmatrix} - \sum_{i=1}^1 v_i [45787,40] \leq 0 \\
 &k = 1, \dots, 8 \\
 &\mu_j, v_i \geq 0 \quad \forall i, j \\
 &u \in \Re
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Figura 16 – Fronteira de Eficiência Aplicada nas Obras do Sistema IEEE 33 Barras



Fonte: O Autor 2023

Tabela 10 – Eficiência Econômica das Obras do Sistema IEEE 33 Barras

Obra	Eficiência Econômica	Ranking
Obra 6	1,00	1
Obra 4	1,00	1
Obra 7	0,84	2
Obra 3	0,82	3
Obra 2	0,67	4
Obra 5	0,43	5
Obra 8	0,07	6
Obra 1	0,03	7

Fonte: O Autor, 2023.

O resultado de eficiência apresentado pela técnica DEA não representa apenas a relação entrada e saída de cada obra e sim, a sua distância frente a fronteira de eficiência. É possível verificar na [Figura 16](#) que as Obras 4 e 5, alocação dos bancos de capacitores, possuem diferentes valores de saídas para a mesma entrada e as duas obras resultarem em eficiências diferentes, mostrando que a análise não tende a escolher apenas as obras mais baratas. Pode-se observar estes resultados na [Tabela 10](#). A análise de fronteira de eficiência visa avaliar todo o cenário do portfólio e gerar *insights* sobre a gestão de obras total (através da fronteira de eficiência) da companhia com enfoque na eficiência econômica.

Os resultados obtidos mostram que o DEA não apresenta apenas valores de eficiência para as obras com os menores custos de implantação. Isso se deve a posição alcançada pela Obra 6, que chegou à fronteira de eficiência. Mesmo a obra de implantação dos religadores possuindo o maior custo de execução, tendo a entrada para o modelo mais elevada, os seus resultados em tempo de execução e, para o caso da Obra 6, benefícios para a carga são expressivos. Portanto, o modelo apresentou que mesmo a Obra 6 possuindo um valor de investimento elevado, ela trará benefícios a distribuidora equivalentemente às obras mais baratas (como a Obra 4).

As Obras 1 e 8 resultaram em valores inferiores de eficiência econômica no estudo, próximas à 0. Isso por que a baixa porcentagem de benefício a carga que estas obras possuem, em paralelo aos custos mais elevados de implantação, levam a uma eficiência reduzida se comparado com as outras obras do portfólio. A obra 6, mesmo possuindo o maior valor de implantação, consegue beneficiar toda a carga do sistema e por isso alcançou a fronteira de eficiência.

4.1.1 Priorização do Portfólio com Enfoque Econômico

Após a estimativa da Eficiência Econômica, aplicou-se o método AHP sobre as obras em análise para validar a otimização do portfólio de obras. Para isso, estimaram-se as preferências entre os quatro parâmetros de entrada do método: eficiência econômica, perdas

Elétricas, nível médio de tensão e benefícios dos indicadores de qualidade. A Tabela 11 apresenta a matriz Λ que possui $RC < 10^{-1}$.

Tabela 11 – Matriz Λ para o Sistema IEEE 33 Barras — Enfoque Econômico

	(1)	(2)	(3)	(4)
Nível de Tensão (1)	1	0,50	2,00	1
Eficiência Econômica (2)	2,00	1	4,00	2,00
Perda Elétricas (3)	0,50	0,25	1	0,50
Qualidade (4)	1	0,50	2,00	1

Fonte: O Autor, 2023.

Para o cálculo do índice de consistência, RC , aplicou-se a matriz de índices randômicos de Saaty (1991) apresentada em Tabela 3. Portanto, o IR foi igual a 0,58. O cálculo do IC , conforme apresenta a Equação 2.7, esta representado abaixo pela Equação 4.2 sendo Λ_{max} o maior autovalor da matriz apresentada em Tabela 11.

$$IC = \frac{3 - 3}{(3 - 1)} = 0 \quad (4.2)$$

Portanto, dividindo-se o IC pelo IR se calcula o RC que no caso desta aplicação é igual a 0.

O resultado preliminar do método com a priorização do portfólio de obras para o sistema teste IEEE 33 Barras está apresentado em Tabela 12.

Tabela 12 – Ranking Preliminar (AHP) de Priorização das Obras do Sistema IEEE Barras

Obra	Resultado do Método	Ranking Preliminar
Obra 2	0,1818	1
Obra 4	0,1678	2
Obra 3	0,1534	3
Obra 6	0,1330	4
Obra 7	0,1185	5
Obra 5	0,1068	6
Obra 1	0,0902	7
Obra 8	0,0480	8

Fonte: O Autor, 2023.

Priorizando-se a eficiência econômica, observou-se que as Obras 1 e 8 continuam nas últimas posições, igual apresentado pelo *ranking* da eficiência econômica. Este resultado é esperado, pois o método AHP está priorizando os parâmetros da eficiência econômica.

Retirou-se a Obra 8 do modelo, sendo aplicado a otimização linear para a otimização do portfólio de obras. O resultado da otimização do portfólio está representado em Tabela 13.

Tabela 13 – Ranking Geral de Priorização das Obras do Sistema IEEE Barras

Obra	Resultado do Método	Ranking Geral
Obra 2	6,59	1
Obra 4	5,06	2
Obra 3	3,83	3
Obra 6	2,44	4
Obra 7	1,61	5
Obra 5	1,05	6
Obra 1	0,46	7

Fonte: O Autor, 2023.

O resultado obtido pela priorização do portfólio não apresentou diferenças entre o resultado preliminar da técnica AHP. A obra 2 possui eficiência econômica mediana, porém teve o maior acréscimo nos níveis de tensão dentre as obras do portfólio. As obras 3 e 4, mesmo possuindo valores maiores de eficiência econômica, não conseguiram um resultado geral superior à obra 2. Observa-se que a obra 6 não conseguiu atingir bons resultados, mesmo estando na fronteira de eficiência. Isso apresenta que mesmo no cenário com enfoque na eficiência econômica, apenas bons resultados neste âmbito não irão gerar posições altas. Caso o peso do cenário econômico fosse maior, a posição da obra 6 seria superior.

4.1.2 Priorização do Portfólio com Enfoque nos Parâmetros Elétricos

A matriz Λ visa definir o escopo da otimização do portfólio, sendo versátil e permitindo o modelo assumir diversas vertentes. A [Tabela 14](#) apresenta a matriz Λ com enfoque nos parâmetros elétricos.

Tabela 14 – Matriz Λ para o Sistema IEEE 33 Barras — Enfoque Elétrico

	(1)	(2)	(3)	(4)
Nível de Tensão (1)	1	2	0,5	2
Eficiência Econômica (2)	0,5	1	0,25	1
Perda Elétricas (3)	2	4	1	4
Qualidade (4)	0,5	1	0,25	1

Fonte: O Autor, 2023.

Aplicou-se esta priorização no processo AHP e na otimização linear. O resultado do processo AHP está apresentado em [Tabela 15](#).

Tabela 15 – Ranking Preliminar de Priorização das Obras do Sistema IEEE Barras — Enfoque Elétrico

Obra	Resultado do Método	Ranking Preliminar
Obra 2	0,1960	1
Obra 4	0,1408	2
Obra 3	0,1374	3
Obra 1	0,1342	4
Obra 5	0,1193	5
Obra 6	0,0989	6
Obra 7	0,0953	7
Obra 8	0,0777	8

Fonte: O Autor, 2023.

Com o enfoque elétrico no método AHP não ocorreram divergências significativas entre as Obras e, portanto, não é possível retirar obras do escopo do método de otimização. A [Tabela 16](#) apresenta os resultados da última etapa do método de otimização.

Tabela 16 – Ranking das Obras do Sistema IEEE Barras — Enfoque Elétrico

Obra	Resultado da Otimização	Ranking Geral
Obra 2	6,10	1
Obra 4	3,78	2
Obra 3	3,13	3
Obra 1	2,43	4
Obra 5	1,66	5
Obra 6	0,90	6
Obra 7	0,56	7
Obra 8	0,19	8

Fonte: O Autor, 2023.

Pode-se verificar que no enfoque elétrico a Obra 1, que não alcançou uma boa colocação na primeira análise, se encontra bem ranqueada na análise elétrica.

A obra 8 não alcançou colocações de destaque em nenhum dos enfoques testados. Isso decorre dos seus parâmetros, tanto elétricos quanto econômicos, não serem os melhores para estes enfoques de análise. Houve mudanças no ranqueamento entre os dois cenários apresentados, mostrando que a característica multicritério do método traz possibilidades de análises diversas para cada situação necessária pela distribuidora.

4.1.3 Priorização Final do Portfólio

4.1.3.1 Análise de Sensibilidade

Primeiramente, utilizou-se a análise de sensibilidade da matriz proposta por Vargas (2015) para encontrar a matriz de prioridade com os parâmetros com maior efetividade para o objetivo deste trabalho. Sendo assim, o resultado do método AHP para a matriz proposta está representado a seguir.

Tabela 17 – Ranking Preliminar de Priorização das Obras do Sistema IEEE Barras — Matriz Inicial

Obra	Resultado do Método	Ranking Preliminar
Obra 2	0,2301	1
Obra 4	0,1634	2
Obra 3	0,1513	3
Obra 1	0,1387	4
Obra 5	0,1214	5
Obra 6	0,0786	6
Obra 7	0,0726	7
Obra 8	0,0434	8

Fonte: O Autor, 2023.

Aplicando-se as alterações para a análise de sensibilidade do sistema, encontraram-se as seguintes observações na ordem apresentada pelo resultado Tabela 17:

- O aumento do nível de prioridade da característica nível de tensão não gerou alterações na priorização das obras.
- A redução do nível de prioridade da característica do nível de tensão não gerou alterações significativas na priorização das obras, apenas mudanças de obras com prioridade idênticas.
- O aumento da prioridade das perdas elétricas não trazem diferenças na priorização do portfólio.

Por não haver diferenças pela mudança nos parâmetros de priorização das perdas elétricas, utilizou-se a Tabela 6 como matriz de prioridades final para do método de otimização.

4.1.3.2 Priorização Final do Portfólio IEEE 33 Barras

Observa-se nos resultados apresentados pela Tabela 17 que o ranqueamento obtido é similar ao encontrado pela priorização com enfoque elétrico. A obra 8 não alcançou boas

posições em nenhuma priorização, o que mostra que é uma obra ineficiente frente aos aspectos analisados.

Houve divergências extremas entre os resultados do método AHP para cada obra, portanto a obra 8 foi retirada da análise final. A priorização do portfólio de obras finais do sistema IEEE 33 barras está representada na [Tabela 18](#).

Tabela 18 – Ranking Final do Portfólio de Obras do sistema IEEE 33 Barras

Obra	Resultado do Método	Ranking Preliminar
Obra 2	10,72	1
Obra 4	6,55	2
Obra 3	5,04	3
Obra 1	3,85	4
Obra 5	2,69	5
Obra 6	1,07	6
Obra 7	0,64	7

Fonte: O Autor, 2023.

A Obra 1 tem o segundo maior potencial de melhoria nas tensões do sistema, o que fez ela ser ranqueada em melhores posições nesta análise. As obras 2 e 3 continuam como prioritárias nesta análise, por possuírem bons benefícios em todos os parâmetros analisados. Observa-se a baixa posição da obra 6 na priorização, o que já era esperado considerando que seu benefício nos níveis de tensão tende a ser próximo de 0. Isso é, a obra não melhora expressivamente os níveis de tensões médios nos barramentos e sim, apenas os níveis próximos da localização da obra.

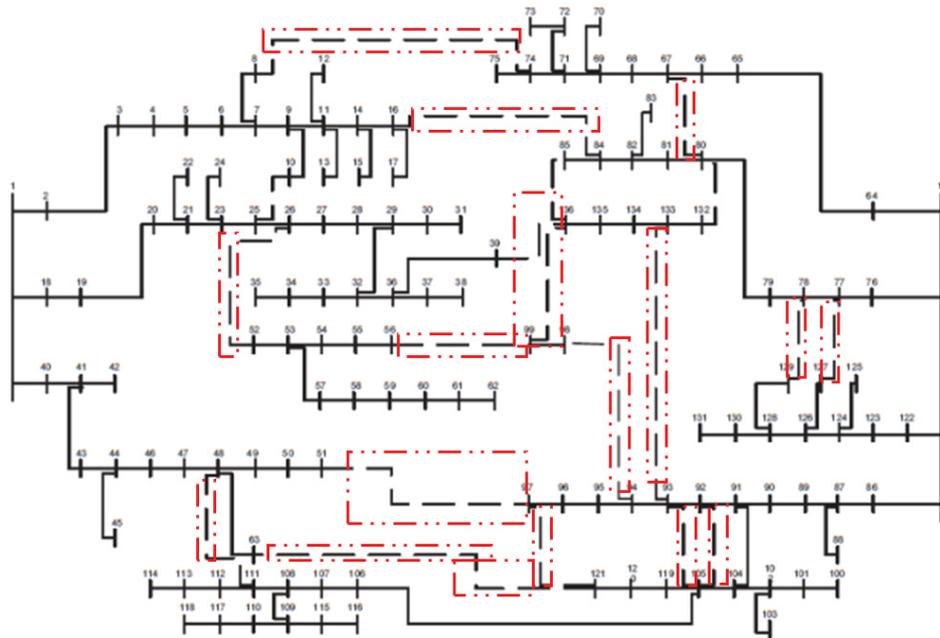
A obra 8 continuou em último lugar e isso se deve aos baixos índices que esta obra tem em todos os parâmetros.

4.2 Priorização do Portfólio de Obras — Sistema com 135 Barras

O portfólio de obras apresentado como escopo para a otimização do sistema teste de 135 barras é composto pela criação de linhas de distribuição que visa o aumento da confiabilidade do sistema em questão. Estas linhas de distribuição podem ser observada nos trabalhos de [Mantovani, Casari e Romero \(2013\)](#), [Oliveira \(2015\)](#) e [Zvietcovich \(2006\)](#).

A [Figura 17](#) apresenta o esquemático de barras do sistema com as obras em destaque e a [Tabela 19](#) descreve as obras que fazem parte do escopo de otimização do portfólio.

Figura 17 – Diagrama Esquemático do Sistema 135 Barras com Obras



Fonte: adaptado de Oliveira (2015)

Tabela 19 – Tabela com as características das linhas sugeridas

Nº da Obra	Barra Inicial	Barra Final
1	135	136
2	8	74
3	10	25
4	16	84
5	39	136
6	26	52
7	51	97
8	56	99
9	63	121
10	67	80
11	80	132
12	85	136
13	92	105
14	91	130
15	91	104
16	93	105
17	93	133
18	97	121

Fonte: O Autor, 2023.

Aplicou-se a mesma técnica do fluxo de potência utilizada no caso teste IEEE 33 barras para calcular os parâmetros elétricos de entrada do modelo de priorização de

portifólio. A Tabela 20 contém os resultados obtidos.

Tabela 20 – Parâmetros Elétricos e sua Influência nas Obras do Sistema 135 Barras

—	Perdas Elétricas	Média das Tensões	Carga Beneficiada
Obra	p.u.	p.u.	MW
1	0,7223	0,9663	2,5230
2	0,7207	0,9663	4,1265
3	0,7203	0,9662	3,8545
4	0,7222	0,9663	4,2176
5	0,7223	0,9663	2,3498
6	0,7222	0,9663	2,1825
7	0,7218	0,9663	4,1123
8	0,7222	0,9663	1,6557
9	0,6824	0,9675	4,0262
10	0,7196	0,9663	1,0992
11	0,7223	0,9663	1,7883
12	0,7224	0,9663	2,7883
13	0,6891	0,9675	5,1957
14	0,7222	0,9663	3,5366
15	0,7201	0,9664	5,6543
16	0,6914	0,9674	5,6543
17	0,7223	0,9663	3,5853
18	0,7016	0,9670	5,6543

Fonte: O Autor, 2023.

Para realizar a estimativa dos parâmetros econômicos das obras, aplicaram-se premissas para criar variações nos parâmetros retirados da distribuidora brasileira. Como todas as obras são caracterizadas pela criação de linhas de distribuição, os parâmetros-base aplicados foram:

- Tempo de Execução: 100 dias;
- Custo da Obra: R\$ 45787,40 reais.

Como o portfólio a ser otimizado traz apenas um tipo de obra, utilizar os parâmetros de forma idêntica poderia trazer uma irrealidade para a análise. Além disso, a inserção de uma característica no modelo de otimização que não diferencie as obras do portfólio apenas traria complexidade para o modelo com informações que não são relevantes, por exemplo: caso todas as obras tenham a mesmo valor para uma variável como tempo de execução, haveria necessidade de utilizar deste parâmetro para priorizar as obras. Pois, esta variável resultaria na mesma prioridade para todas as obras.

Para trazer diversidade para a variável do tempo de execução entre as obras, aplicou-se uma variação aleatória de $\pm 50\%$ sobre o valor base de 100 dias. Para o parâmetro do

custo de obra, aplicou-se a diferença entre a perda resultante da obra e a perda média das obras como parâmetro para criar o índice de variação para o custo da obra. O resultado destes parâmetros, por obra, pode ser avaliado em [Tabela 21](#).

Para este sistema de teste, não foi utilizado a característica de benefício nos indicadores de qualidade (DEC e FEC). Pois, as obras são todas de mesma tipologia e a aplicação de variações nos parâmetros de benefícios de DEC e FEC não traria verossimilhança com a realidade de uma distribuidora de energia e com a metodologia proposta neste trabalho.

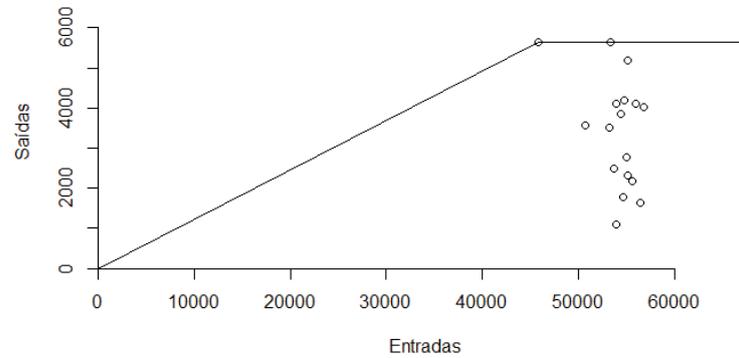
Tabela 21 – Tabela de Parâmetros por Tipo de Obra do Portfólio 135 Barras

Obra	Tempo de Execução (dias)	Custo da Obra (R\$)
1	147,1510	53670,75
2	72,7150	53974,20
3	70,2441	54367,34
4	112,4353	54809,08
5	129,2668	55195,38
6	140,2828	55588,96
7	56,6422	55994,41
8	95,90901	56435,29
9	85,6514	56812,25
10	65,2228	53932,32
11	83,7934	54612,15
12	72,6791	54994,96
13	53,6213	55141,98
14	145,335	53187,40
15	62,5770	53399,25
16	141,1890	53343,15
17	104,7473	50664,56
18	70,4597	45787,40

Fonte: O Autor, 2023.

A eficiência econômica, parâmetro do processo de otimização do portfólio, foi calculado através da técnica DEA para as obras do sistema 135 barras. A fronteira de eficiência está representada na [Figura 18](#) e o parâmetro de eficiência econômica por obra na [Tabela 22](#).

Figura 18 – Fronteira de Eficiência 135 Barras



Fonte: O Autor, 2023.

Tabela 22 – Tabela da Eficiência Econômica

Obra	Eficiência Econômica
1	0,4007
2	0,7656
3	0,7742
4	0,6231
5	0,4223
6	0,3871
7	0,9322
8	0,5462
9	0,6382
10	0,8405
11	0,6461
12	0,7397
13	1,0000
14	0,5384
15	1,0000
16	0,8583
17	0,5982
18	1,0000

Fonte: O Autor, 2023.

As Obras 18, 15 e 13 apresentaram eficiência máxima na fronteira de eficiência. Estas obras possuem uma grande abrangência nos benefícios de carga, todas superiores a 5 MW. Além do parâmetro da carga, o tempo de execução destas mesmas obras era inferior à média do portfólio.

4.2.1 Priorização do Portfólio com Enfoque Econômico

Utilizando-se do resultado da Eficiência Econômica, Nível de Tensão Médio e as Perdas Elétricas, calcula-se a priorização do portfólio através do método AHP. O resultado da aplicação está contido na [Tabela 23](#). A tabela de comparação entre os parâmetros é a mesma aplicada no sistema teste IEEE 33 barras ([Tabela 11](#)).

Tabela 23 – Método AHP — Enfoque Econômico

Obra	Resultado do Método	Ranking AHP
18	0,06991	1
13	0,06903	2
15	0,6866	3
7	0,06560	4
10	0,06196	5
16	0,06196	6
3	0,05852	7
2	0,05813	8
12	0,05695	9
9	0,05287	10
4	0,05174	11
11	0,05174	12
17	0,0505	13
8	0,04826	14
14	0,04791	15
5	0,04269	16
1	0,04174	17
6	0,04111	18

Fonte: O Autor, 2023.

O resultado do método AHP visa diminuir o escopo da otimização do portfólio, aplicando-se uma técnica paritária para priorizar preliminarmente o portfólio a fim de manter como escopo as obras mais relevantes. Ao contrário do resultado do método no sistema IEEE 33 barras, o resultado para o sistema 135 barras não apresenta uma possibilidade de diminuição do escopo da otimização. O resultado do último colocado desta etapa, obra 6, não está próximo de zero ou extremamente longe do primeiro colocado (Obra 18). Portanto, o escopo da otimização pelo método de otimização linear são as 18 obras do portfólio e o resultado está apresentado na [Tabela 24](#).

Tabela 24 – Ranking Geral — Enfoque Econômico

Obra	Resultado do Método	Ranking Geral
13	18,99	1
18	17,87	2
15	16,73	3
7	15,10	4
16	13,62	5
10	12,41	6
3	11,00	7
2	10,03	8
12	8,96	9
9	7,65	10
11	6,74	11
4	5,80	12
17	4,89	13
8	3,93	14
14	3,12	15
5	2,14	16
6	1,39	17
1	0,70	18

Fonte: O Autor, 2023.

A aplicação da otimização nas obras do escopo do portfólio resultou em um *ranking* entre as obras, podendo ser dividido em três grupos:

- Grupo de prioridade alta com as obras: 13, 18, 7, 15, 10, 16, 3 e 2;
- Grupo de prioridade média com as obras: 12, 9, 11, 4, 17, 8 e 14;
- Grupo de prioridade baixa com as obras: 5, 6 e 1 .

O método de otimização linear segregou mais as obras do que o resultado do método AHP, auxiliando de forma mais conclusivo o operador do método. Podemos observar que cerca de 16% do portfólio de obras possui baixa prioridade e não deve ser realizado de forma prioritária frente as obras com prioridade alta.

4.2.2 Priorização do Portfólio com Enfoque Elétrico

A otimização do portfólio com enfoque elétrico tem a matriz Λ desta forma que [Tabela 11](#). O método preliminar tem os resultados apresentados na [Tabela 25](#).

Tabela 25 – Método AHP — Enfoque Elétrico

Obra	Resultado do Método	Ranking AHP
13	0,0600	1
18	0,0596	2
15	0,0586	3
16	0,0580	4
7	0,0577	5
10	0,0586	6
9	0,0563	7
3	0,0560	8
2	0,0559	9
12	0,0556	10
11	0,0545	11
4	0,0543	12
17	0,0539	13
8	0,0534	14
14	0,0533	15
5	0,0520	16
1	0,0518	17
6	0,0516	18

Fonte: O Autor, 2023.

Observa-se que não é possível retirar as obras do portfólio para reduzir o tempo de processamento do método linear. Portanto, aplicou-se o método de otimização nas 18 obras do portfólio, resultando no seguinte *ranking* de obras (Tabela 26).

Tabela 26 – Ranking Geral — Enfoque Elétrico

Obra	Resultado do Método	Ranking Geral
13	22,47	1
18	20,97	2
16	19,60	3
15	18,18	4
9	16,86	5
7	15,61	6
10	14,28	7
3	12,97	8
2	11,78	9
12	10,55	10
11	9,27	11
4	8,09	12
17	6,916	13
8	5,72	14
14	4,57	15
5	3,38	16
1	2,24	17
6	1,12	18

Fonte: O Autor, 2023.

O resultado da otimização do portfólio resultou em três conjuntos de prioridade de obras a ser considerada pelo gestor do sistema, sendo elas:

- Grupo de prioridade alta com as obras: 2, 10, 13, 15, 18, 12, 3, 16 e 7;
- Grupo de prioridade média com as obras: 9, 17 e 4;
- Grupo de prioridade baixa com as obras: 8, 1, 11, 14, 5 e 6.

Pode-se observar que as obras 11, 14 e 6 estão classificadas no grupo de menor prioridade tanto na otimização com enfoque econômico quanto na otimização com enfoque elétrico. Isso mostra que mesmo mudando o escopo do portfólio, as obras ineficientes serão classificadas com baixa prioridade e mostrando ao gestor do portfólio os pontos que realmente necessitam de atenção.

4.2.3 Priorização Final do Portfólio

4.2.3.1 Análise de Sensibilidade

Primeiramente, utilizou-se a análise de sensibilidade da matriz proposta por [Vargas \(2015\)](#) para encontrar a matriz de prioridade com os parâmetros com maior efetividade

para o objetivo da otimização do portfólio do sistema 135 barras. Portanto, os resultados da priorização utilizando a tabela proposta está representado em [Tabela 27](#).

Tabela 27 – Ranking Geral — Análise de Sensibilidade

Obra	Resultado do Método	Ranking Geral
18	0,06	1
13	0,06	2
15	0,06	3
7	0,06	4
16	0,05	5
10	0,05	6
3	0,05	7
2	0,05	8
12	0,05	9
9	0,05	10
11	0,05	11
4	0,05	12
17	0,05	13
8	0,05	14
14	0,05	15
5	0,04	16
1	0,04	17
6	0,04	18

Fonte: O Autor, 2023.

A primeira análise realizada é a impossibilidade de exclusão de obras do portfólio para a última etapa de otimização. Aplicando-se as mudanças propostas para avaliar a sensibilidade das preferências entre os parâmetros, chegaram-se as seguintes conclusões:

- O aumento do nível de prioridade da característica nível de tensão não gerou alterações na priorização das obras.
- A redução do nível de prioridade da característica do nível de tensão não gerou alterações na priorização das obras.
- O aumento da prioridade das perdas elétricas não gerou alterações na priorização das obras.

Portanto, a matriz representa na [Tabela 6](#) foi considerada para a priorização final do sistema teste 135 barras.

4.2.3.2 Priorização Final do Portfólio 135 Barras

Observa-se nos resultados obtidos pelas análises anteriores que as obras 6,1 e 5 não obtiveram resultados significativos. Isso demonstra que os benefícios para a distribuidora

gerados por estas obras não são bons o bastante quando comparados com os benefícios das outras obras. Já as obras 18, 13 e 15 alcançaram boas posições em todas as análises efetuadas, mostrando que existem obras com excelentes benefícios para as distribuidoras. A Tabela 28 apresenta o resultado da otimização de portfólio para o sistema teste de 135 barras.

Tabela 28 – Ranking Geral

Obra	Resultado do Método	Ranking Geral
13	18,58	1
18	17,49	2
15	16,39	3
7	15,08	4
16	13,90	5
10	12,75	6
3	11,54	7
2	10,56	8
12	9,52	9
11	8,34	10
9	7,47	11
4	6,44	12
17	5,48	13
8	4,49	14
14	3,58	15
5	2,59	16
1	1,71	17
6	0,85	18

Fonte: O Autor, 2023.

O resultado da otimização do portfólio resultou em três conjuntos de prioridade de obras a ser considerada pelo gestor do sistema, sendo elas:

- Grupo de prioridade alta com as obras: 13, 18, 15, 7, 16, 10, 2 e 3;
- Grupo de prioridade média com as obras: 12, 11, 9, 4 e 17;
- Grupo de prioridade baixa com as obras: 8, 14, 5, 1 e 6.

Observa-se que o grupo de maior prioridade se assemelha com os resultados encontrados pela otimização com enfoque elétrico. Isso por que as obras que melhoraram as perdas no sistema, para este caso, também melhoraram os níveis de tensão de forma mais acentuada. Entende-se que o resultado utilizando estes parâmetros de otimização é a melhor decisão para a concessionária.

5 Conclusão e Sugestões de Trabalhos Futuros

Este trabalho teve como objetivo contribuir com a gestão do portfólio de obras de companhias de distribuição de energia elétrica, permitindo a otimização do portfólio de obras com múltiplos enfoques. Foram realizadas configurações de portfólios com diversos tipos de obras em dois sistemas testes (IEEE 33 barras e 135 barras apresentado por [Mantovani, Casari e Romero \(2013\)](#)), além do cálculo da eficiência econômica através do DEA.

Com a utilização do método DEA, aplicado em linguagem R, calculou-se a fronteira de eficiência e a eficiência econômica das obras apresentadas como escopo do portfólio para os sistemas teste. Esta eficiência é base para a otimização do portfólio e visa entregar uma visão ampla obras para a empresa de distribuição de energia. Os resultados obtidos nesta etapa também tem função estratégica para a companhia, podendo apresentar a eficiência na alocação dos recursos frente a qualidade dos seus resultados.

Após a etapa da análise da eficiência econômica, o método propôs a utilização da técnica AHP para priorização do portfólio em conjunto com a otimização linear. Esta etapa prioriza as obras da companhia considerando os resultados de eficiência da etapa anterior e adicionando os parâmetros elétricos.

Para testar a metodologia de otimização de portfólio proposta, foram realizados dois estudos de caso. O primeiro estudo de caso foi realizado no sistema teste IEEE 33 barras e possui em seu portfólio 8 obras. Estas obras podem ser classificadas em três categorias: expansão da rede de distribuição com enfoque na transformação do sistema em anel, instalação de religador automático para aumentar a confiabilidade do sistema e instalação de banco de capacitores para melhoria dos níveis de tensão. Através do fluxo de carga, utilizaram-se os benefícios elétricos causados pelas obras e utilizou-se destes parâmetros em conjunto com a eficiência econômica para otimizar o portfólio. O método de otimização possui duas etapas, a primeira é a aplicação do método AHP para reduzir o escopo da otimização. No caso deste sistema teste foi possível reduzir o escopo das obras para 7, reduzindo assim o desgaste computacional da última etapa do método. Por fim, otimizou-se o portfólio utilizando algoritmos de resolução de problemas lineares. Foi possível assim otimizar o portfólio de obras para o gestor conseguir tomar sua decisão assertivamente.

Os estudos de caso realizados neste trabalho tiveram três cenários, o primeiro realizando a otimização com enfoque na eficiência econômica e o segundo com enfoque na

eficiência elétrica. No primeiro estudo de caso, os resultados obtidos entre os dois cenários convergiram para portfólios otimizados semelhantes, com poucas divergências para as obras prioritárias. O último cenário proposto utiliza a matriz de prioridades baseada na literatura e aplicando uma análise de sensibilidade para verificação da sua aplicação no sistema. Este cenário proposto é o que melhor representa a opção de escolha para as distribuidoras e seu resultado é semelhante com o obtido pelo enfoque elétrico.

O segundo estudo de caso teve como objeto o sistema de 135 barras. As 18 obras aplicadas neste sistema foram retiradas da literatura, sendo todas da classificação: expansão de rede. O resultado encontrado na otimização, considerando os cenários com enfoque em eficiência econômica e elétrica, apresentam obras semelhantes entre as prioritárias e não prioritárias. Desta forma, o resultado da otimização deste sistema conseguiu convergir para as melhores obras a serem desenvolvidas pelo gestor do sistema e das obras que devem ser replanejadas ou retiradas do escopo da distribuidora de energia elétrica. A última análise aplicada no sistema de 135 barras foi a priorização do portfólio utilizando a matriz de prioridades da literatura em conjunto com a análise de sensibilidade dos parâmetros. Este resultado, que se entende como a melhor opção para a concessionária, apresentou semelhanças com o resultado do enfoque elétrico. Esta mesma conclusão é verificada no sistema de 33 barras.

Por fim, os dois estudos de caso mostram que a metodologia de otimização de portfólio permite a priorização e classificação das obras de escopo da distribuidora elétrica, levando as obras com maiores benefícios possíveis. A versatilidade do método permite a inclusão e retirada de características, resultando em um método flexível que pode gerar diversos estudos e otimizações com múltiplos enfoques. Sugere-se, como melhoria ao método, que os parâmetros escolhidos para diversificar as obras sejam definidos com enfoque nas mais diversas áreas.

Como escopo para trabalhos futuros, sugerem-se as seguintes adições:

- Inclusão de mais parâmetros no modelo de otimização;
- Estimativa, por ferramentas de simulação do sistema elétrico, dos índices regulatórios (DEC, FEC, etc) das obras;
- Inclusão de maiores modelos de obras, como, por exemplo: geração distribuída, reguladores de tensão, etc.

Além disso, a teoria de otimização de portfólio é bastante vasta e é possível aplicar outras técnicas para este problema. Como, por exemplo, a inteligência artificial ou algoritmos genéticos avançados.

Atualmente, a otimização de portfólios está sendo aplicada em larga escala no setor de geração distribuída. A otimização de um portfólio de unidades fotovoltaicas,

por exemplo, em uma rede de distribuição pode fornecer *insights* interessantes para as companhias deste setor e levar a alocação destas unidades em pontos que tragam maiores benefícios econômicos e elétricos ao sistema, além de poder, reduzir os indicadores de continuidade do sistema.

Referências

ABDULLAH, A. G. et al. Multi-criteria decision making for nuclear power plant selection using fuzzy ahp: Evidence from indonesia. *Energy and AI*, Elsevier, v. 14, 2023. Citado na página 35.

AGERGS. *Recurso da RGE ao Auto de Infração 0002/2020-AGERGS-SFE*. 2022. Disponível em: <<https://agergs.rs.gov.br/upload/arquivos/202009/02141817-4-voto-relatoria-processo-sei-00008-3900-20-9.pdf>>. Acesso em: 23 mar 2022. Citado na página 16.

ALI, S. et al. Integrated gis-ahp-based approach for off-river pumped hydro energy storage site selection. *Applied Energy*, Elsevier, v. 337, 2023. Citado na página 35.

ALVES, J. R. X.; ALVES, J. M. Definição de localidade para instalação industrial com o apoio do método de análise hierárquica (ahp). *Production*, Vol.25C, 2015. Citado na página 28.

ANEEL. *Resolução ANEEL n° 505*. [S.l.], 2021. Citado na página 42.

ANEEL. *Manual de Contabilidade do Setor Elétrico*. [S.l.], 2022. 782 p. Citado na página 42.

ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*. [S.l.], 2022. Citado na página 15.

ANEEL. *Procedimentos de Regulação Tarifária 2.5*. [S.l.], 2022. (Resolução Normativa). Citado na página 15.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 1984. Citado na página 22.

BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989. Citado 3 vezes nas páginas 39, 90 e 91.

BOGETOFT, P. *Benchmark and Frontier Analysis Using DEA and SFA*. [S.l.], 2022. Citado na página 45.

BROWN, T.; HÖRSCH, J.; SCHLACHTBERGER, D. PyPSA: Python for Power System Analysis. *Journal of Open Research Software*, v. 6, n. 4, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.5334/jors.188>>. Citado na página 50.

CARLUCCI, F. V. *Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação do impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar na produção de açúcar e etanol no Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2012. Citado na página 24.

- CEMIG. *CEMIG Desenvolve Software de Priorização de Investimentos*. 2019. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/noticia/cemig-desenvolve-software-de-priorizacao-de-investimentos/>>. Acesso em: 20 abr 2023. Citado na página 17.
- COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; TONE, K. *Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and dea-solver software*. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 81.
- CORREA, I. S. *Análise sobre a sustentabilidade das distribuidoras de energia elétrica no período de 2013 a 2017*. [S.l.], 2019. (Coletânea de Pós-Graduação). Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- COSTA, H. G. Introdução ao método de análise hierárquica. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2002. Citado na página 28.
- COSTA, R. C.; PEREIRA, P. R. S.; MADRUGA, E. P. Análise multivariável para priorização de obras em redes de distribuição de energia elétrica com foco nos indicadores de qualidade. *Congresso Brasileiro de Automática Volume II*, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 34.
- COSTA, R. dos S. et al. A hybrid modelo for investment prioritization and performance analysis in electrical power distribution systems. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer, 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40313-022-00967-2>>. Acesso em: 30 09 2023. Citado na página 34.
- DAVID, A. L. de C. *Gestão de Execução do Portfólio de Obras de Planejamento das Empresas Distribuidoras Usando Modelagem de Financiamento*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado na página 32.
- DONEGAN, H. A.; DODD, F. J. A note on saaty's random indexes. *Mathematical and Computer Modelling*, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 31.
- DUARTE, M. D. de O. *Modelos de Decisão Multicritério e de Portfólio com Aplicação na Construção de Políticas Energéticas Sustentáveis*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de Pernambuco, 2011. Citado na página 32.
- EPE. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021*. [S.l.], 2022. (Relatório). Citado na página 14.
- EPE. *Investimentos em Energia Elétrica*. [S.l.], 2022. (séries Históricas). Citado na página 17.
- FARRELL, M. The measurement of productive efficiency. 1957. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 24.
- FERNANDES, L. *Ferramenta de Apoio à Decisão Para Priorização de Obras de Manutenção em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. Citado na página 33.
- FERNANDES, M. G. M.; JUNIOR, O. S. S. OtimizaÇÃO da alocaÇÃO de recursos em portfólio de projetos – estudo de caso do sistema de obras do exÉrcito brasileiro. *XIX Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha*, 2019. Citado na página 34.

FERRET, R. *Hierarquização de Alimentadores para Fins de Manutenção Utilizando Análise Multicriterial*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2012. Citado na página 27.

FONSECA, C. M. L. *Análise da Eficiência Técnica Relativa de Empresas Brasileiras Distribuidoras de Energia Elétrica, em 2015 e 2016*. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2018. Citado na página 33.

GOMES, L. F. A. M. *Teoria da Decisão*. São Paulo: Editora Thompson, 2007. 1–20 p. Citado na página 34.

GRIFFITH, P. *AHPy*. 2021. Disponível em: <<https://pypi.org/project/ahpy/>>. Acesso em: 21 mai 2023. Citado 3 vezes nas páginas 85, 86 e 87.

JUBRAN, A. J. *Modelo de Análise de Eficiência na Administração Pública: Estudo Aplicado às Prefeituras Brasileiras Usando a Análise de Envoltória de Dados*. Tese (Doutorado em Engenharia) — Universidade Federal de São Paulo, 2006. Citado na página 21.

JUNIOR, N. F. I.; CORSO, L. L. Análise e priorização de clientes do setor industrial e metalmeccânico utilizando a análise envoltória de dados – dea. 2020. Citado na página 34.

KESSLER, M. R. *A regulação econômica no setor elétrico brasileiro: teoria e evidências*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. Citado na página 14.

KOOPMANS, T. C. Measuring the efficiency of decision-making units. 1978. Citado na página 21.

KOPONEN, K.; NET, E. L. Towards robust renewable energy investment decisions at the territorial level. *Applied Energy*, Elsevier, v. 287, 2021. Citado na página 35.

LOURENÇO, C. G. C. *Qualidade dos Serviços Prestados Pelas Distribuidoras de Energia Elétrica no Brasil*. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade São Francisco, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

MANTOVANI, J. R.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *Controle e Automação v11*, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 20, 39, 49, 59 e 70.

MARKOWITZ, H. Portfolio selection. 2008. Citado na página 31.

MARQUES, A. C. *Revisão Tarifária do Sistema Elétrico Brasileiro Com a Aplicação do Modelo de Redes da Análise de Envoltória de Dados – NDEA*. 132 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Junho 2016. Citado 4 vezes nas páginas 15, 16, 26 e 33.

MARTINS, L. F. *Planejamento e Avaliação em Manutenção e Melhoria de Redes de Distribuição de Energia, Com Base em Indicadores Operacionais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Passo Fundo, 2016. Citado na página 33.

MEGAWHAT. *Copel Planeja Investimento de R/2, 4 bilhões para 2024, alta de 7%*. 2023. Disponível em: <>. Acesso em: 02 dez 2023. Citado na página 16.

MEGGINSON, W. L. *The Financial Economics of Privatization*. [S.l.]: New York: Oxford University Press, 2005. Citado na página 14.

MELO, H. M. *Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) Para Avaliação de Desempenho Das Unidades Acadêmicas de uma Universidade Federal*. 93 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Maio 2019. Citado na página 22.

MILLER, G. A. The magical number seven, plus or mi-nus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 1956. Citado na página 28.

MONTENEGRO, S. *ANEEL aprova revisão de produtividade do Fator X*. 2020. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53129657/aneel-aprova-revisao-de-produtividade-do>>. Acesso em: 23 mar 2022. Citado na página 15.

MOREIRA, D. R.; SANT'ANNA, A. P. Análise de eficiência em tratamentos cirúrgicos em períodos de mudanças tecnológicas. *Relatórios de Pesquisa em Engenharia de Produção*, 2010. Citado na página 21.

MOREIRA, W. S. da C. *Priorização de Obras em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. Citado na página 32.

MUSSOI, F. L. R. *Modelo de Decisão Integrado para a Priorização Multiestágio de Projetos de Distribuição Considerando a Qualidade da Energia Elétrica*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. Citado na página 27.

NORONHA, J. C. C.; LIMA j. W. M. Otimização de portfólio de projetos de investimentos em distribuição de energia elétrica utilizando opções reais. 2008. Citado na página 31.

OLIVEIRA, A. E. A. *Alocação de Medidores de Corrente Visando Melhorar Fluxo de Potência Probabilístico em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2019. Citado na página 40.

OLIVEIRA, R. A. *Especificação e Implementação de um Algoritmo Genético para Otimização de Projetos de Iluminação Pública*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015. Citado 6 vezes nas páginas 59, 60, 93, 94, 95 e 96.

PAIVA, F. C. *Uma Aplicação do Método Análise Envoltória de Dados - DEA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2000. Citado na página 22.

PENA, C. R. Um modelo de avaliação da eficiência da administração pública através do método análise envoltória de dados (dea). *Revista de Administração Contemporânea*, SciELO, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rac/a/TdB6TqzwQyBXhB7qQgptsTf/>>. Acesso em: 13 09 2023. Citado na página 25.

PEREIRA, M. *Otimização do Fluxo de Potência em Redes Elétricas com o UPFC*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado na página 42.

PEREIRA, M. dos R. *Metodologia Multicritérios Para Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2017. Citado na página 33.

PINTO, C. L. da S. *Otimização em Dois Níveis Aplicada a Priorização de Obras do Sistema de Distribuição, Voltada ao Cumprimento dos Índices de Continuidade*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 32.

PR, A. *Com foco na modernização das redes, Copel vai investir R\$ 2,1 bilhões em 2023*. 2023. Disponível em: <<https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Com-foco-na-modernizacao-das-redes-Copel-vai->>. Acesso em: 20 abr 2023. Citado na página 16.

PWC. *Otimização de Portifólio de Projetos*. 2015. Disponível em: <https://www.pwc.com.br/pt/gestao-projetos/assets/fl141_otim_p_proj_15.pdf>. Acesso em: 28 02 2023. Citado na página 34.

R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2009. ISBN 3-900051-07-0. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Citado na página 45.

RAMOS Érica B. T. *Análise da Eficiência das Unidades Locais da Emater em Goiás*. 59 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2020. Citado na página 26.

RIBEIRO, M. C. C. R.; ALVES, A. S. Aplicação do método analytic hierarchy process (ahp) com a mensuração absoluta num problema de seleção qualitativa. *Sistemas Gestão* 11, 2016. Citado na página 28.

SAATY, T. L. “*Método de Análise Hierárquica*”. McGraw-Hill, 1991. Citado 4 vezes nas páginas 28, 29, 30 e 55.

SAATY, T. L. Decision making for leaders. *WS. Publications*, 2000. Citado na página 29.

- SANTOS, S. R.; VIAGI, A. F. Uso do método ahp (analytic hierarchy process) para otimizar a cadeia de suprimentos durante o desenvolvimento integrado de produtos. *Simpoi*, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- SATO, J. M. *Utilização da Análise Envoltória de Dados (DEA) no Estudo de Eficiência do Setor de Saneamento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Católica de Brasília, 2011. Citado na página 22.
- SOARES, B. N. *Metodologia Para Priorização de Investimentos em Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Foco em Ganhos Operacionais e Financeiros*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 27, 32 e 46.
- SOMBRA, L. C. *Um Estudo da Eficiência Relativa das Taxas de Sucesso e dos Desempenhos no Ranking Universitário da Folha de São Paulo (RUF) das Universidades Federais Brasileiras para o Ano de 2015*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2017. Citado na página 23.
- SOUSA, B. J. S. de. *Metodologia para Avaliação de Projetos com Ênfase na Qualidade do Serviço Utilizado Técnicas de Inteligência Artificial*. 102 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2022. Citado na página 43.
- SOUZA, M. V. P. D. *Uma Abordagem Bayesiana para o Cálculo dos Custos Operacionais Eficientes das Distribuidoras de Energia Elétrica*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008. Citado na página 26.
- TORRES, L. M. L. de S. *Sistema Elétrico Brasileiro: Uma Avaliação Integrada do Modelo Dinâmico com Estrutura em Redes da Análise de Envoltória de Dados e Programação Multiobjetivo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018. Citado na página 26.
- TREVIZANO, W. A.; FREITAS, A. L. O. Emprego do método da análise hierárquica (a.h.p.) na seleção de processadores. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 2005. Citado na página 29.
- TUPY, O.; ALVES, E.; FERRERA, R. P. Avaliação da eficiência técnica e de escala de empresas do agronegócio brasileiro. *Revista de Política Agrícola*, 2019. Citado na página 22.
- VALENTE, A. et al. Priorização de investimentos em melhoramentos de sistemas de distribuição. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.
- VARGAS, E. L. *Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição Através da Simulação de Alternativas e Análise Multicritério*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 33, 34, 46, 58 e 67.

VIEIRA, F. R.; UNSIHUAY-VILA, C.; AOKI, A. R. Methodology for prioritizing investments in the distribution network with an electrical and economic focus. *Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2022*, 2022. Citado na página 23.

VOGT, M.; DEGENHART, L.; JUNIOR, M. M. R. Modelo de preferência do investidor por meio da análise envoltória de dados (dea) em empresas brasileiras. 2017. Citado na página 34.

WANG, H.-W.; DODD, A.; KO, Y. Resolving the conflict of greens: A gis-based and participatory least-conflict siting framework for solar energy development in southwest taiwan. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 197, 2022. Citado na página 35.

ZAHID, F. et al. Wind farms selection using geospatial technologies and energy generation capacity in gwadar. *Energy Reports*, Elsevier, v. 7, 2021. Citado na página 35.

ZVIETCOVICH, W. G. *Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando a Metaheurística Busca de Vizinhaça Variável*. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade Estadual Paulista, 2006. Citado na página 59.

Apêndices

APÊNDICE A – Análise de Envoltória de Dados

Neste apêndice será apresentado um exemplo prático da técnica DEA aplicada a um modelo simples de dados com enfoque em demonstrar de forma simples o cálculo da eficiência.

A.1 Exemplo da Aplicação do DEA

O exemplo para a aplicação da técnica DEA é um sistema de uma entrada e uma saída que representa a quantidade de vendas de 4 equipes de uma empresa. A entrada do sistema são os números de empregados de cada equipe e a saída do sistema a quantidade, em milhões de reais, das vendas. O exemplo tem como base o livro do [Cooper, Seiford e Tone \(2007\)](#).

A [Tabela 29](#) apresenta dos dados do modelo.

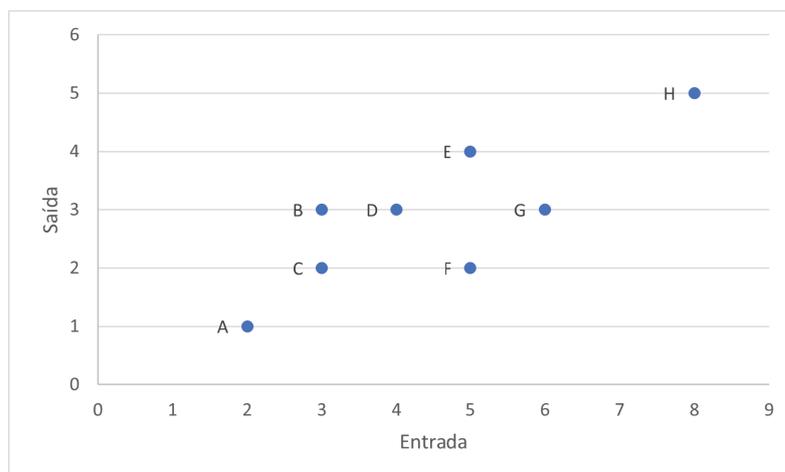
Tabela 29 – Entradas e Saídas do Modelo

Variável	A	B	C	D	E	F	G	H
Vendas (Saída)	1	3	2	3	4	2	3	5
Funcionários (Entrada)	2	3	3	4	5	5	6	8

Fonte: adaptado de ([COOPER; SEIFORD; TONE, 2007](#))

Aplicando-se as informações em um gráfico de entradas e saídas, entende-se que o sistema analisado pode ser representado conforme a [Figura 19](#).

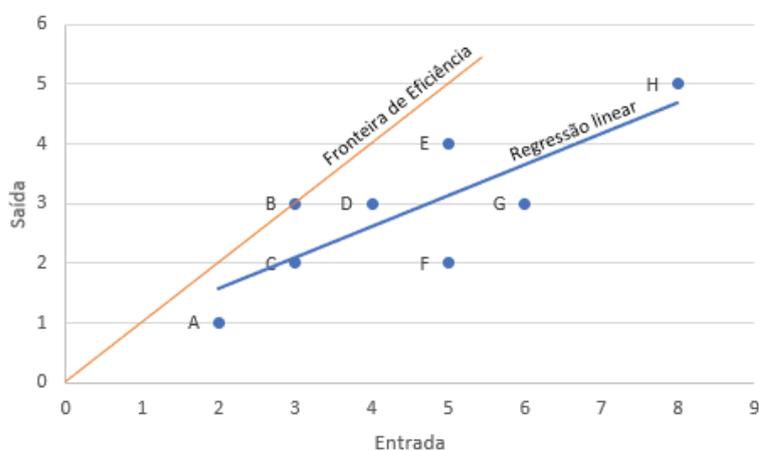
Figura 19 – Gráfico de Entradas e Saídas



O Autor, 2023

Conforme a teoria apresentada no [Capítulo 2](#), podemos aplicar uma fronteira de eficiência CCR no modelo teste e comparada com a regressão linear do modelo, conforme apresenta a [Figura 20](#).

Figura 20 – Comparação entre fronteira de eficiência e regressão linear



O Autor, 2023

Observa-se que a fronteira de eficiência do modelo se difere da regressão linear em diversos aspectos, não sendo possível analisar a eficiência das equipes utilizando a reta de regressão. A fronteira de eficiência está relacionada com o desempenho das melhores equipes (DMUs), no caso do modelo teste a equipe C está balizando a inclinação da fronteira de eficiência.

Portanto, as equipes A, C, D, E, F, G e H são ineficientes se comparadas com os resultados obtidos pela equipe B e é possível calcular suas eficiências relativas com a equipe B a partir da seguinte [Equação A.1](#).

$$0 \leq \frac{\text{Vendas por Funcionário}}{\text{Vendas por Funcionário da B}} \leq 1 \quad (\text{A.1})$$

Os resultados das eficiências relativas estão apresentados na [Tabela 31](#).

Tabela 30 – Eficiência Relativa

Variável	A	B	C	D	E	F	G	H
Eficiência Relativa	0,5	1	0,6	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6

Fonte: O Autor, 2023

A eficiência relativa traz de forma coerente o que se espera da eficiência entre as DMUs e a fronteira de eficiência. Pois, a eficiência no método DEA pode ser explicada como a distância entre a DMU e o ponto mais próximo da curva da eficiência. Caso seja calculado a distância no eixo y, estamos aplicando a orientação a saída e caso o cálculo seja com base na distância no eixo x, estamos aplicando a orientação a entrada.

Aplicando-se a formulação [Equação 2.1](#) no modelo teste, para cálculo da eficiência da equipe A, chega-se na seguinte expressão [Equação A.2](#).

$$\begin{aligned}
 &max \ h = \mu \\
 &sujeito \ a \\
 &2v = 1 \\
 &\mu \leq 2v \\
 &2\mu \leq 3v \\
 &4\mu \leq 5v \\
 &3\mu \leq 6v \\
 &3\mu \leq 3v \\
 &3\mu \leq 4v \\
 &2\mu \leq 5v \\
 &5\mu \leq 8v \\
 &\mu_j, v_i \geq 0 \ \forall i, j
 \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

A solução do problema linear acima é:

- $\mu = 0,5$
- $v = 0,5$
- $h = \text{Eficiência} = 0,5$

Aplicando a modelagem apresentada em [Equação 2.1](#) para todas as DMUs do problema, chega-se em todas as eficiências.

Tabela 31 – Eficiência pelo Método DEA

Variável	A	B	C	D	E	F	G	H
Eficiência Relativa	0,5	1	0,6	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6

Fonte: O Autor, 2023

Para este caso, a eficiência relativa apresentou resultados idênticos eficiência do método DEA. Isso se deve a fronteira de eficiência aplicada se basear apenas em uma DMU, neste caso a equipe B. Caso houvesse sido aplicado uma fronteira de eficiência do método VRS ou o modelo aplicado possuísse múltiplas entradas e saídas, o cálculo da eficiência pelo método DEA só pode ser calculado através da resolução dos problemas lineares.

APÊNDICE B – *Analytic Hierarchy Process*

Neste apêndice será apresentado um exemplo de priorização de portfólios através do método AHP.

B.1 Exemplo da aplicação do método AHP

O exemplo de teste para aplicação do método AHP é a seleção de candidatos para uma vaga de estágio dentro de uma empresa (GRIFFITH, 2021). O recrutador decidiu comparar as qualificações necessárias para o trabalho entre os candidatos, sendo elas: carisma, educação, experiência e pontualidade. Os candidatos (Ana, Pedro e Marcelo) e suas respectivas pontuações estão representados na [Tabela 32](#) até a [Tabela 35](#).

Tabela 32 – Comparação entre os candidatos - Experiência

Candidatos	Ana	Pedro	Marcelo
Ana	1	1/4	4
Pedro	4	1	9
Marcelo	1/4	1/9	1

Fonte: adaptado de (GRIFFITH, 2021)

Tabela 33 – Comparação entre os candidatos - Educação

Candidatos	Ana	Pedro	Marcelo
Ana	1	3	1/5
Pedro	1/3	1	1/7
Marcelo	5	7	1

Fonte: adaptado de (GRIFFITH, 2021)

Tabela 34 – Comparação entre os candidatos - Carisma

Candidatos	Ana	Pedro	Marcelo
Ana	1	5	9
Pedro	1/5	1	4
Marcelo	1/9	1/4	1

Fonte: adaptado de (GRIFFITH, 2021)

Tabela 35 – Comparação entre os candidatos - Pontualidade

Candidatos	Ana	Pedro	Marcelo
Ana	1	1/3	5
Pedro	3	1	9
Marcelo	1/5	1/9	1

Fonte: adaptado de (GRIFFITH, 2021)

Observa-se que as a diagonal principal das matrizes de comparação sempre será unitária. Isso porque, a comparação que ocorre nesta diagonal é entre os mesmos elementos, não podendo haver prioridade. A Ana, em comparação com o Marcelo em carisma, é 9 vezes mais prioritária. Por isso, na [Tabela 34](#) o terceiro elemento da primeira linha tem valor 9. Em contrapartida, o primeiro elemento da terceira linha é o inverso deste valor. A montagem da matriz de prioridade pode seguir o modelo apresentado em [Equação 2.5](#).

O cálculo da prioridade dos candidatos por educação, por exemplo, é realizado adicionando uma linha de somatório na matriz representada por [Tabela 33](#). A operação está representada em [Tabela 36](#).

Tabela 36 – Comparação entre os candidatos - Educação

Candidatos	Ana	Pedro	Marcelo
Ana	1	3	1/5
Pedro	1/3	1	1/7
Marcelo	5	7	1
Somatório	6,33	11	1,34

Fonte: O Autor, 2023

Após esta etapa, é realizada a operação de normalização da tabela. Para isso, divide-se cada elemento da tabela pelo somatório dos valores das suas respectivas colunas, conforme apresenta a [Tabela 37](#).

Tabela 37 – Matriz normalizada

Candidatos	Ana	Pedro	Marcelo
Ana	0,157	0,272	0,149
Pedro	0,052	0,090	0,106
Marcelo	0,789	0,636	0,746

Fonte: O Autor, 2023

Após a normalização, aplica-se a média aritmética dentro de cada linha e encontra-se a priorização dos candidatos para sobre a ótica da educação. Esta etapa esta demonstrada na [Tabela 38](#).

Tabela 38 – Cálculo da Priorização dos candidatos pela Educação

Candidatos	Ana	Pedro	Marcelo	Priorização
Ana	0,157	0,272	0,149	0,192
Pedro	0,052	0,090	0,106	0,082
Marcelo	0,789	0,636	0,746	0,723

Fonte: O Autor, 2023

Calculando-se a priorização para as outras características dos candidatos, encontrasse as seguintes priorizações [Tabela 39](#).

Tabela 39 – Conjunto total de priorizações para as qualidades dos candidatos

Candidatos	Educação	Pontualidade	Carisma	Experiência
Ana	0,192	0,265	0,743	0,214
Pedro	0,082	0,672	0,194	0,717
Marcelo	0,723	0,063	0,063	0,066

Fonte: adaptado de ([GRIFFITH, 2021](#))

Como dependendo da qualidade é possível escolher um candidato diferente para a vaga, o recrutador decide ranquear as qualidades. Para isso, aplica-se a mesma técnica aplicada para cada atributo dos candidatos, porém agora entre as qualidades para que se possa priorizar uma frente a outra ([Tabela 40](#)).

Tabela 40 – Conjunto total de priorizações para as qualidades dos candidatos

Atributos	Experiência	Educação	Carisma	Pontualidade	Priorização
Experiência	1	4	3	7	0,547
Educação	1/4	1	1/3	3	0,127
Carisma	1/3	3	1	5	0,270
Pontualidade	1/7	1/3	1/5	1	0,056

Fonte: adaptado de ([GRIFFITH, 2021](#))

O ranqueamento dos candidatos é realizado multiplicando a priorização de cada atributo pelo resultado de cada etapa para cada candidato. Por exemplo, a [Equação B.1](#) calcula o ranqueamento da candidata Ana para o vaga.

$$Rank(Ana) = (0,547 \times 0,214) + (0,127 \times 0,192) + (0,270 \times 0,743) + (0,056 \times 0,265) = 0,358 \quad (B.1)$$

Sendo assim, o ranqueamento dos candidatos é dado pelo resultado do cálculo acima para cada um dos candidatos. Portanto, a priorização aplicada para este exemplo é dado a seguir:

- Pedro: 0,49
- Ana: 0,35
- Marcelo: 0,15

APÊNDICE C – CONFIGURAÇÃO DOS SISTEMAS TESTE

Neste apêndice são mostrados as características dos sistemas testes utilizados neste trabalho.

C.1 Sistema IEEE 33 Barras

Tabela 41 – Informações das Linhas IEEE 33 Barras

Linha	Barra 1	Barra 2	Resistência Ω	Reatância Ω
1	0	1	0,0922	0,0477
2	1	2	0,493	0,2511
3	2	3	0,366	0,1864
4	3	4	0,3811	0,1941
5	4	5	0,819	0,707
6	5	6	0,1872	0,6188
7	6	7	0,7114	0,2351
8	7	8	1,03	0,74
9	8	9	1,044	0,74
10	9	10	0,1966	0,065
11	10	11	0,3744	0,1238
12	11	12	1,468	1,155
13	12	13	0,5416	0,7129
14	13	14	0,591	0,526
15	14	15	0,7463	0,545
16	15	16	1,289	1,721
17	16	17	0,732	0,574
18	1	18	0,164	0,1565
19	18	19	1,5042	1,3554
20	19	20	0,4095	0,4784
21	20	21	0,7089	0,9373
22	2	22	0,4512	0,3083
23	22	23	0,898	0,7091
24	23	24	0,896	0,7011
25	5	25	0,203	0,1034
26	25	26	0,2842	0,1447
27	26	27	1,059	0,933
28	27	28	0,8042	0,7006
29	28	29	0,5075	0,2585
30	29	30	0,9744	0,963
31	30	31	0,3105	0,3619
32	31	32	0,341	0,5302

Fonte: (BARAN; WU, 1989)

Tabela 42 – Informações das Barras IEEE 33 Barras

Barra	Demanda Ativa (kW)	Demanda Reativa (KVAR)
0	0	0
1	100	600
2	90	40
3	120	80
4	60	30
5	60	20
6	200	100
7	200	200
8	60	20
9	60	20
10	45	30
11	60	35
12	60	35
13	120	80
14	60	10
15	60	20
16	60	20
17	90	40
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	50
23	420	200
24	420	200
25	60	25
26	60	25
27	60	20
28	120	70
29	200	600
30	150	70
31	210	100
33	60	40

Fonte: (BARAN; WU, 1989)

C.2 Sistema 135 Barras

Tabela 43 – Informações dos Ramos 135 Barras 1

De-Para	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Carga (MW/MVAr)
1-2	0,3320	0,7665	0
2-3	0,0018	0,0043	47,78/19,00
3-4	0,2234	0,5153	42,55/19,92
4-5	0,0994	0,2295	87,02/34,62
5-6	0,1557	0,3594	311,31/123,85
6-7	0,1632	0,3767	148,86/59,22
7-8	0,1144	0,2641	238,67/94,95
7-9	0,0567	0,0566	62,29/24,78
9-10	0,5212	0,2741	124,59/49,57
9-11	0,1087	0,1086	140,17/55,76
11-12	0,3980	0,2093	116,81/46,47
11-13	0,9174	0,3146	249,20/99,14
11-14	0,1182	0,1180	291,44/115,59
14-15	0,5022	0,2642	303,72/120,83
14-16	0,0567	0,0566	215,39/85,69
16-17	0,2337	0,1545	198,58/79,00
1-18	0,3320	0,7665	0/0
18-19	0,0018	0,0043	0/0
19-20	0,2232	0,5153	0/0
20-21	0,1088	0,2511	30,12/14,72
21-22	0,7107	0,3738	230,97/112,92
21-23	0,1819	0,4200	60,25/29,45
23-24	0,3032	0,1595	230,97/112,92
23-25	0,0243	0,0563	120,50/58,91
25-26	0,0450	0,1039	0/0
26-27	0,0187	0,0433	56,98/27,85
27-28	0,1182	0,1123	364,66/178,28
28-29	0,0236	0,0236	0/0
29-30	0,1895	0,0997	124,64/60,93
30-31	0,3980	0,2093	56,98/27,85
29-32	0,0567	0,0566	0/0
32-33	0,0947	0,0498	85,47/41,78
33-34	0,4169	0,2193	0/0
34-35	0,1137	0,0598	396,73/193,96
32-36	0,0756	0,0755	0/0
36-37	0,3696	0,1944	181,15/88,56
37-38	0,2653	0,1395	242,17/118,39
36-39	0,0567	0,0566	75,31/36,82
1-40	0,3320	0,7665	0/0
40-41	0,1181	0,2728	1,25/0,53
41-42	2,9628	1,0162	6,27/2,66
41-43	0,0018	0,0043	0/0
43-44	0,0694	0,1602	117,88/49,97
44-45	0,8150	0,4287	62,66/25,55
44-46	0,0637	0,1472	172,28/73,03
46-47	0,1313	0,3031	458,55/194,38

Fonte: (OLIVEIRA, 2015)

Tabela 44 – Informações dos Ramos 135 Barras 2

De-Para	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Carga (MW/MVAr)
5-48	0,0619	0,1429	262,96/111,47
48-49	0,1144	0,2641	235,76/99,94
49-50	0,2837	0,2833	0/0
50-51	0,2837	0,2832	109,21/46,29
49-52	0,0450	0,1039	0/0
53-53	0,0262	0,0606	72,80/30,86
53-54	0,0600	0,1385	258,47/109,57
54-55	0,0300	0,0692	69,16/29,32
55-56	0,0206	0,0476	21,84/9,26
53-57	0,1088	0,2511	0/0
57-58	0,2558	0,1346	20,52/8,70
58-59	0,4169	0,2193	150,54/63,81
59-60	0,5022	0,2642	220,68/93,55
60-61	0,3317	0,1744	92,38/39,16
61-62	0,2084	0,1096	0/0
48-63	0,1388	0,3204	226,69/96,09
1-64	0,0075	0,0173	0/0
64-65	0,2701	0,6236	294,01/116,97
65-66	0,3827	0,8834	83,01/33,02
66-67	0,3301	0,7622	83,01/33,02
67-68	0,3283	0,7578	103,77/41,28
68-69	0,1707	0,3940	176,40/70,18
69-70	0,5591	0,2941	83,01/33,02
69-71	0,0581	0,1342	217,91/86,69
71-72	0,7013	0,3689	23,29/9,26
72-73	1,0235	0,5383	5,075/2,019
71-74	0,0675	0,1559	72,63/28,89
74-75	1,3235	0,4539	405,99/161,52
1-76	0,0112	0,0259	0/0
76-77	0,7297	1,6846	100,18/42,46
77-78	0,2251	0,5196	142,52/60,41
78-79	0,2082	0,4807	96,04/40,71
79-80	0,0469	0,1082	300,45/127,36
80-81	0,6195	0,6185	141,23/59,87
81-82	0,3404	0,3399	279,84/118,63
82-83	0,5696	0,2991	87,31/37,01
82-84	0,1087	0,1086	243,84/103,37
82-85	0,5686	0,2991	247,75/105,02
1-86	0,0112	0,0259	0/0
86-87	0,4183	0,9657	89,87/38,10
87-88	0,1049	0,1364	1137,28/482,10
87-89	0,4389	1,0133	458,33/194,29
89-90	0,0752	0,0257	385,19/163,29
90-91	0,0769	0,1775	0/0
91-92	0,3320	0,7665	79,60/33,74
92-93	0,0844	0,1948	87,31/37,01
93-94	0,1332	0,3074	0/0

Fonte: (OLIVEIRA, 2015)

Tabela 45 – Informações dos Ramos 135 Barras 3

De-Para	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Carga (MW/MVAr)
94-95	0,2932	0,2927	74,00/31,37
95-96	0,2175	0,2172	232,05/98,36
96-97	0,2648	0,2644	141,81/60,11
94-98	0,1031	0,2381	0/0
98-99	0,1350	0,3118	76,44/32,40
1-100	0,0093	0,0216	0/0
100-101	0,1688	0,3897	51,32/21,75
101-102	0,1181	0,2728	59,87/25,38
102-103	2,2860	0,7841	9,06/3,84
102-104	0,4558	1,0523	2,09/0,88
104-105	0,696	1,6066	16,25/0,53
105-106	0,4577	1,0566	1506,52/638,63
106-107	0,2029	0,2637	313,02/132,69
107-108	0,2134	0,2773	79,83/33,84
108-109	0,5496	0,2891	51,32/21,75
109-110	0,5401	0,2841	0/0
108-111	0,0455	0,0591	202,43/85,81
111-112	0,4738	0,2492	60,82/25,87
112-113	0,8624	0,4536	45,61/19,33
113-114	0,5686	0,2991	0/0
109-115	0,7771	0,4087	157,07/66,58
115-116	1,0803	0,5683	0/0
110-117	1,0663	0,5782	250,14/106,04
117-118	0,4738	0,2492	0/0
105-119	0,3226	0,7448	68,80/28,59
119-120	0,1463	0,3377	32,07/13,59
120-121	0,1238	0,2858	61,08/25,89
1-122	0,0112	0,0259	0/0
122-123	0,6491	1,4984	94,62/46,26
123-124	0,0450	0,1039	49,85/24,37
124-125	0,5264	0,1805	123,16/60,21
124-126	0,0206	0,0476	78,35/38,30
126-127	0,5307	0,27917	145,47/71,12
126-128	0,0975	0,2252	21,36/10,44
128-129	0,1181	0,2728	74,78/36,56
126-128	0,0975	0,2252	21,36/10,44
128-129	0,1181	0,2728	74,78/36,56
128-130	0,1388	0,3204	227,92/111,43
130-131	0,04315	0,0996	35,61/17,41
131-132	0,0919	0,2122	249,29/121,87
132-133	0,1613	0,3724	316,72/154,84
133-134	0,3783	0,3777	333,81/163,19
134-135	0,3972	0,3966	249,29/121,87

Fonte: (OLIVEIRA, 2015)

Tabela 46 – Informações das Obras 135 Barras

De-Para	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Carga (MW/MVAr)
135-136	0,2927	0,2927	0/0
8-74	0,1313	0,3031	0/0
10-25	0,2653	0,1395	0/0
16-84	0,1418	0,1416	0/0
39-136	0,0851	0,0849	0/0
26-52	0,0455	0,1039	0/0
51-97	0,1418	0,1416	0/0
56-99	0,1418	0,1416	0/0
63-121	0,0394	0,0909	0/0
67-80	0,1294	0,2988	0/0
80-132	0,0168	0,0389	0/0
85-136	0,3317	0,1744	0/0
92-105	0,1418	0,1716	0/0
91-130	0,0769	0,1775	0/0
91-104	0,0769	0,1775	0/0
93-105	0,0769	0,1775	0/0
93-133	0,0769	0,1775	0/0
97-121	0,2648	0,2644	0/0

Fonte: (OLIVEIRA, 2015)