

FEIS - UNESP

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**Alocação otimizada de bancos de
capacitores e fontes de energia
renováveis em sistemas de
distribuição de energia elétrica.**

Autor:

Caio NIGRO VIANNA

Orientador:

Dr. Diogo RUPOLO

10 de março de 2022



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

Caio Nigro Vianna

Alocação otimizada de bancos de capacitores e fontes de energia renováveis em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de graduado.

Dr. Diogo Rupolo
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

V617a Vianna, Caio Nigro.
Alocação otimizada de bancos de capacitores e fontes de energia renováveis em sistemas de distribuição de energia elétrica / Caio Nigro Vianna. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
53 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Diogo Rupolo
Inclui bibliografia

1. Planejamento de sistemas de distribuição. 2. Geradores renováveis. 3.
Emissão de gases poluentes. 4. Banco de capacitores. 5. Busca em vizinhança
variável.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos dez dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e dois, o discente *Caio Nigro Vianna*, matriculado sob o nº 151052476, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Dr. Diogo Rupolo*, o *Dr. Juan Manuel Home Ortiz* e o *Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **“ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE BANCOS DE CAPACITORES E FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA”** obtendo a nota 9,0 (nove) e conceito Aprovado.



Dr. Diogo Rupolo

- Orientador -



Caio Nigro Vianna

- Discente -



Dr. Juan Manuel Home Ortiz

-Membro da Banca -



Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani

- Membro da Banca-

Resumo

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de um algoritmo computacional para realizar o planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica, através da de bancos de capacitores e geradores renováveis. O planejamento visa encontrar o sistema mais econômico financeiramente, levando em consideração o preço de instalação e manutenção dos dispositivos e também a penalização na emissão desses poluentes, provenientes de fontes de energia não-renováveis. Para resolver este problema, uma meta-heurística de busca em vizinhança variável, Variable Neighbourhood Descent (VND) é aplicada. A meta-heurística VND permite uma adaptação na solução do problema de sistemas de distribuição pela sua capacidade de acessar e avaliar diferentes estruturas de vizinhança, garantindo adequada exploração do espaço de busca. Dois sistemas de distribuição com 32 e 135 barras, respectivamente, foram testados para mostrar a eficiência do modelo proposto e da metodologia de planejamento desenvolvida, frente aos resultados obtidos.

Palavras-chave: planejamento de sistemas de distribuição; geradores renováveis; emissão de gases poluentes; banco de capacitores; busca em vizinhança variável.

Abstract

This work presents a computational algorithm development to perform electrical power distribution systems planning, taking into account capacitor banks allocation and renewable generators. The planning seeks to obtain the cheapest distribution system, considering installation and maintenance equipment costs, plus the penalty for greenhouse gas emissions. To solve this problem, a Variable Neighborhood Descent (VND) metaheuristic was developed. This metaheuristic is quite adapted to distribution system planning for its capacity of accessing and evaluating different neighborhood structures ensuring adequate exploitation of the search space. In order to show the efficiency of the proposed model and the developed planning methodology, results from two power distribution systems with 32 and 135 nodes are presented.

Key-words: Distribution systems planning; renewable generators; greenhouse gas emissions; capacitor banks; variable neighbourhood search.

Lista de figuras

Figura 1: Diagrama de uma rede de distribuição radial	(14)
Figura 2: Barra k exemplo de cálculo de corrente	(15)
Figura 3: Sistema kl exemplo de cálculo <i>backwards</i>	(15)
Figura 4: Sistema kl exemplo de cálculo <i>forwards</i>	(16)
Figura 5: Representação de uma meta-heurística VND com $s = 3$	(23)
Figura 6: Vetor que exemplifica as estruturas de vizinhanças	(24)
Figura 7: Diagrama de blocos	(26)
Figura 8: Resultados da alocação de capacitores (sistema 1)	(30)
Figura 9: Resultados da alocação de geradores (sistema 1)	(32)
Figura 10: Resultados da alocação de capacitores e geradores (sistema 1)	(34)
Figura 11: Resultados da alocação de capacitores (sistema 2)	(36)
Figura 12: Resultados da alocação de geradores (sistema 2)	(38)
Figura 13: Resultados da alocação de capacitores e geradores (sistema 2)	(40)

Lista de símbolos

- F - Função objetivo, o custo total do sistema de distribuição de energia elétrica.
- I_{ij} - Magnitude de corrente no circuito ij .
- $I_{ij,d}$ - Magnitude de corrente no circuito ij no nível de demanda d .
- I_{\max} - Magnitude de corrente máxima.
- $P_{i,d}^S$ - Potência ativa gerada pela subestação i no nível de demanda d .
- P_{ij} - Fluxo de potência ativa no circuito ij .
- $P_{ij,d}$ - Fluxo de potência ativa no circuito ij no nível de demanda d .
- $P_{ij,G}$ - Fluxo de potência ativa no circuito ij gerada por um gerador.
- $Q_{i,d}^S$ - Potência reativa gerada pela subestação i no nível de demanda d .
- Q_{ij} - Fluxo de potência reativa no circuito ij .
- $Q_{ij,d}$ - Fluxo de potência reativa no circuito ij no nível de demanda d .
- $V_{i,d}$ - Magnitude de tensão no nó i no nível de demanda d .
- $q_i^n, n = \{1, 2, 3\}$ - Variável binária que indica alocação de um capacitor em específico.
- q_i^{sol} - Variável binária que indica alocação de um gerador solar.
- q_i^{eol} - Variável binária que indica alocação de um gerador eólico.
- D_d - Número de horas em um ano do nível de demanda d (h).
- $P_{i,d}^D$ - Demanda de potência ativa no nó i no nível de demanda d (kW).
- P^G - Potência ativa de cada gerador sustentável (kW).
- $Q_{i,d}^D$ - Demanda de potência reativa no nó i no nível de demanda d (kvar).
- Q^{cp} - Potência reativa de cada banco de capacitor (kvar).
- Q^G - Potência reativa de cada gerador sustentável (kvar).
- R_{ij} - Resistência do circuito na linha ij (k Ω).
- V_{\max} - Magnitude de tensão máxima (kV).
- V_{\min} - Magnitude de tensão mínima (kV).
- $V_{i,d}$ - Magnitude de tensão no nó i no nível de demanda d (kV).

Z_{ij} - Impedância do circuito ij ($k\Omega$).

X_{ij} - Reatância do circuito ij ($k\Omega$).

c_d^{ls} - Custo de perdas nos níveis de demanda d (R\$/kWh).

p_d^{ls} - Penalidade por emissão de poluentes nos níveis de demanda d (R\$/kWh).

$c^n, n = \{1, 2, 3\}$ - Custo de instalação e manutenção de um banco de capacitor específico.

G^{sol}, G^{eol} - Custo de instalação e manutenção dos geradores solares e eólicos, respectivamente.

Ω_l - Conjuntos dos circuitos.

Ω_b - Conjunto de nós.

Ω_d - Conjunto de níveis de demanda.

FP - Fator de potência de um gerador.

Sumário

1	Introdução	7
1.1	Geração Distribuída Sustentável	8
1.1.1	Geradores solares	8
1.1.2	Geradores eólicos	9
1.2	Revisão bibliográfica	9
1.3	Contribuições	10
1.4	Estrutura do trabalho	11
2	Modelo matemático	12
2.1	Fluxo de potência	13
2.1.1	Cálculo das correntes por processo <i>backward</i>	14
2.1.2	Cálculo das tensões por processo <i>forward</i>	16
2.2	Modelagem dos Geradores Renováveis	17
2.3	Geradores fotovoltaicos	17
2.4	Geradores eólicos	18
2.5	Modelagem das incertezas no sistemas de distribuição	19
2.6	Emissão de gases poluentes	20
3	A meta-heurística de Busca em Vizinhança Variável	21
3.1	O algoritmo VND	22
4	A meta-heurística de Busca em Vizinhança Variável dedicada ao Planejamento de Sistemas de Distribuição	24
4.1	Codificação	24
4.2	Geração da solução inicial	24
4.3	Estruturas de vizinhança	24
4.4	Avaliação das soluções	25
4.5	Algoritmo de planejamento	26
5	Resultados	28
5.1	Sistemas Testes	28
5.2	Casos de estudo	29
5.2.1	Sistema de 32 barras	29
5.2.2	Sistema de 135 barras	36
5.3	Discussão dos resultados	42
6	Conclusões	43

1 Introdução

Atualmente, a sociedade é inteiramente dependente de energia elétrica. Quase tudo que é utilizado ou consumido necessita de energia elétrica para funcionar ou ser fabricado. A energia elétrica é necessária para produção de insumos agrícolas, processamento, transporte ou armazenamento. Serviços essenciais como abastecimento de água, hospitais, segurança pública e correios são praticamente paralisados quando há blecautes e racionamentos. Assim, com o crescimento populacional e da atividade industrial vem o aumento no consumo de energia elétrica. Para que não haja muitos imprevistos e interrupções no seu fornecimento, são necessários investimentos em pesquisa na área de planejamento dos sistemas de energia elétrica, desde a geração até o consumidor final (MENDOZA, 2006). Além disso, o fato de grande parte das empresas distribuidoras estarem sendo privatizadas, o planejamento otimizado dos sistemas de distribuição tem como consequência um maior controle da qualidade de energia elétrica fornecida aos consumidores finais (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

As redes de distribuição modernas, de maneira geral, são sistemas de grande porte. Antigamente, estações elétricas eram planejadas a curto prazo para poder entregar a potência necessária para todos os seus clientes próximos. Atualmente, porém, com o crescimento do centro dos consumidores, uma estação feita em tempos modernos deve planejar a longo prazo a distância enorme que a energia precisa percorrer. As perdas por efeito Joule invariavelmente causam problemas, como o afundamento de tensão, operando fora dos limites estabelecidos, até o fator de potência irregular. Dessa forma, encontra-se a necessidade de planejamento de sistemas de distribuição pelas concessionárias de distribuição, de forma que atenda a critérios de confiabilidade, qualidade e fornecimento de energia (INEE, 2021).

Historicamente, a solução mais utilizada para esse problema é a instalação de bancos de capacitores em paralelo com as linhas. Os bancos de capacitores possuem a capacidade de armazenar energia no campo elétrico e melhorar o fator de potência, pois sistemas de distribuição, em geral, são indutivos. Dessa forma, reduzem a carga aparente na fonte supridora e circuitos, liberando capacidade para a ligação de cargas adicionais. Além disso elevam a tensão na carga, reduzem a componente atrasada da corrente do circuito e como consequência reduzem as perdas ativas e reativas e melhoram a regulação do sistema (INEE, 2021). Por outro lado, existe também a geração distribuída (GD), que é definida por conexão de geradores de energia elétrica diretamente à rede de distribuição. A ideia de geração distribuída veio antes dos estudos mais aprofundados em conexão de capacitores em paralelo e foi uma resposta direta aos maiores problemas causados pelo crescimento do consumo de energia, pois uma rede que está isolada não pode ser afetada por defeitos na estação de geração (PORTAL SOLAR, 2021). Porém, apesar que a solução dos capacitores é atualmente mais viável, GDs alocados em pontos estratégicos na rede também permitem reduzir quedas de tensões, melhorar o perfil da corrente e portanto melhorar todo o estado da rede. Além disso, os preços dos próprios geradores vêm diminuindo com o tempo. Entre os GDs, fontes de energias renováveis (RES) se destacam, pois a sua geração limpa reduz a emissão de gases poluentes (RITCHIE, 2020).

1.1 Geração Distribuída Sustentável

Energia sustentável é definida por qualquer tipo de energia útil que é coletada de fontes renováveis, que são naturalmente reabastecidas em uma escala menor que a vida média humana, incluindo fontes neutras de carbono como chuvas, ondas, marés, calor geotérmico e, como no caso desse trabalho, luz solar e vento. O termo também é aplicável para biomassas, apesar que seu status de neutralidade ao carbono ainda é alvo de discussões (OURWORLDINDATA, 2020).

Geradores sustentáveis são bem associados à geração distribuída, pois a rede pode estar conectada a várias fontes de energia sustentáveis. Antigamente, geração distribuída era dedicada a produzir energia próxima ao local de demanda, em locais isolados. Portanto, a GD não era considerada no planejamento de sistemas de distribuição. Porém, graças ao super crescimento de demandas nas estações, que precisam exigir que o próprio cliente regule a sua rede, a GD tornou-se uma maneira viável de aliviar a demanda que um estabelecimento consome, mesmo quando ele ainda pretende estar conectado à estação. Em outras palavras, a GD transformou-se em uma ferramenta utilizada no planejamento de sistemas de distribuição (BLANCO; FAAIJ, 2018).

A conexão de geradores sustentáveis tem vantagens e desvantagens em comparação à conexão de bancos de capacitores. Por um lado, os dados dependem de variáveis climáticas que na prática são incertas e portanto depende de planejamentos que levam em consideração os casos mais críticos que podem acontecer. Por outro lado, fontes de energias renováveis podem reduzir os custos relacionados com os investimentos em equipamento físicos do sistema como transformadores, condutores, subestações, além dos custos relacionados com a compra de energia necessária para atender a demanda do sistema (RUPOLO, 2017).

Nesse trabalho, é proposta a inserção de dois tipos de geradores sustentáveis juntamente com os capacitores em sistemas de distribuição, solares e eólicos.

1.1.1 Geradores solares

Um painel fotovoltaico transforma luz solar em eletricidade útil. Cada painel é composto por várias células fotovoltaicas pequenas, que são feitas de materiais semi-condutores, geralmente silício. O silício é um material que pode conduzir eletricidade, enquanto mantém o desbalanceamento elétrico necessário para criar um campo elétrico. Quando a luz solar atinge o semicondutor na célula a energia da luz, em forma de fótons, esta é absorvida, o que causa a movimentação de elétrons que procedem a se movimentar na célula, causando a corrente elétrica. As células fotovoltaicas são montadas com um semicondutor com carga positiva e um com negativa encaixados juntos em série para criar um campo elétrico que vai forçar os elétrons a se movimentarem em direção as placas metálicas condutivas. Desse ponto, os elétrons e por extensão a corrente podem fluir como se ela viesse de qualquer outra fonte de energia elétrica e podem ser conectados em qualquer sistema de corrente contínua (HOW DO SOLAR PANELS WORK? THE SCIENCE OF SOLAR EXPLAINED, n.d.).

Painéis solares geralmente são conectados em redes de corrente alternada, portanto, precisam ser conectados a um inversor de sinal antes de ser ligado a um fio da rede. Após passar pelo inversor, a potência gerada pode ser usada pela rede para aliviar as perdas (INVERSOR SOLAR: TUDO QUE VOCÊ PRECISA SABER, n.d.).

1.1.2 Geradores eólicos

Turbinas de vento funcionam com um princípio simples: ao invés de usar eletricidade para gerar vento, elas usam vento para gerar eletricidade. O vento é formado no planeta graças a três fatores principais: o Sol aquecendo a atmosfera de forma não uniforme, irregularidades do formato da superfície da Terra e a própria rotação do planeta. O termo "energia eólica" se refere simplesmente ao vento que está sendo utilizado por humanos para qualquer geração mecânica ou elétrica. Portanto, como as hélices da turbina são movimentadas a partir do vento, são chamadas de turbinas eólicas. É esse movimento que gera eletricidade, pois o rotor está conectado ao gerador e a rotação.

1.2 Revisão bibliográfica

A alocação ótima de banco de capacitores é um problema de programação não linear inteiro misto (*PNLIM*) de difícil solução, principalmente para sistemas de médio e grande porte, com a inclusão das condições de operação reais dos sistemas que incluem requisitos de qualidade, confiabilidade e economia. O problema de alocação de bancos de capacitores é estudado desde 1960, mas desde o começo do século 21 este assunto é fonte de vários estudos na literatura (BEÊ, 2007; PEREIRA JUNIOR; MANTOVANI, 2008), devido ao aumento da complexidade dos sistemas de distribuição. Diversos trabalhos sobre o problema estão disponíveis na literatura, com várias técnicas propostas para sua solução. Inicialmente foram formulados modelos relaxados e técnicas heurísticas de solução. Porém, apenas na década de 1980 foram formulados os modelos matemáticos usados atualmente. Dentre os trabalhos encontrados na literatura que propõe o modelo matemático e técnica clássica de otimização para solução do problema de alocação de bancos de capacitores encontram-se os trabalhos de Grainger e Civanlar (1985) e Baran e Wu (1989), que formulam o problema como sendo um problema de programação não-linear inteiro misto. Para a solução deste modelo, Baran e Wu (1989) propõem a aproximação da função objetivo não diferenciável por uma função linear e resolvem o problema utilizando decomposição de Benders com variáveis contínuas.

Na década de 1990 surgiram pesquisas propondo a solução do modelo de otimização não linear da alocação de bancos de capacitores através de meta-heurísticas, entre elas algoritmos genéticos, busca tabu (*tabu search*), *simulated annealing* entre outras. Sundhararajan e Pahwa (1994), usaram um algoritmo genético com o objetivo de minimizar as perdas de potência no pico de carga, juntamente com as perdas de energia considerando os custos dos bancos de capacitores. Uma análise de sensibilidade de perdas ativas visando a seleção de locais candidatos à alocação de bancos de capacitores foi aplicada com objetivo de melhorar o espaço de busca. Miu *et al.* (1997), apresentam um algoritmo em dois estágios para alocação, realocação e controle de capacitores de sistemas gerais de

distribuição de grande porte e desbalanceados. O primeiro estágio do algoritmo proposto consiste de um algoritmos genético seguido pelo segundo estágio que consiste de um método heurístico baseado em sensibilidades construída para o problema. Pereira Junior e Mantovani (2008), apresentam um algoritmos genético multiobjetivo baseado no NSGA-II considerando duas funções objetivos: máxima queda de tensão e custos de instalação e operação da rede. Neste trabalho as cargas são consideradas de forma estocástica buscando uma representação mais próxima da realidade. Segura *et al.* (2008), apresentam um estudo dos impactos causados na alocação ótima de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica radiais, considerando a presença de geradores distribuídos operando com fator de potência constante e com tensão controlada. Na metodologia proposta busca-se minimizar as perdas de potência ativa e o custo com a alocação de capacitores, mantendo as tensões das barras dentro dos limites aceitos. Huang *et al.* (1996), utilizam um algoritmo busca tabu para resolver o problema. A função objetivo considera a redução de perdas, considerando os níveis máximos e mínimos de tensão do sistema nos diferentes níveis de carregamento. Gallego *et al.* (2001), propõem uma método híbrido baseado em busca tabu estendida com características baseadas em outras meta-heurísticas, tais como algoritmos genéticos e *simulated annealing* e de heurísticas práticas. O problema é formulado como um problema de programação não linear inteiro misto. Chiang (1990) utilizam a técnica de otimização *simulated annealing* para resolver o problema de alocação de bancos de capacitores formulado como um problema de otimização combinatorial discreto com uma função objetivo não-diferenciável. Masoum *et al.* (2004), apresentam um método baseado em lógica fuzzy para a alocação de bancos de capacitores em redes radiais de distribuição com presença de correntes de tensões harmônicas. A função objetivo é composta de custos de instalação e operação da rede. Vilchez Lazo (2014), aprofunda o estudo em métodos heurísticos de resolver o problema da alocação de bancos de capacitores. Montsutsumi (2017), estuda uma metodologia multipartida para também solucionar o problema dos capacitores, e, Sousa (2015), propõe uma busca dispersa.

O estudo de energia sustentável é relativamente mais recente. Rupolo (2017) estuda a geração distribuída sendo utilizada no planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica. Montoya-Bueno *et. al* (2015) estuda em maior profundidade o funcionamento dos geradores em si e como que eles geram potência útil enquanto Melgar-Dominguez *et. al* (2019) se aprofunda no impacto financeiro da emissão de gases poluentes e portanto na sua diminuição também. Na literatura, o estudo de painéis fotovoltaicos é particularmente bem comum, textos que podem ser citados incluem Terrones (2017), que considerou o retorno do investimento em painéis para vários prazos distintos, Colqui (2017), que mostrou como geradores sustentáveis podem ser usados não apenas como uma maneira de aliviar a potência mas também corrigir a tensão como capacitores, e Gastelu (2016), que propôs a misturar geradores com capacitores em uma única solução, entre outros.

1.3 Contribuições

O objetivo geral do trabalho é realizar o planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica, considerando BC e RES. Também é considerado o custo da emissão de gases poluentes no planejamento da rede. Também são contribuições do trabalho:

- Desenvolver uma metodologia para o planejamento de sistemas de distribuição consi-

derando um algoritmo de busca em vizinhança variável.

- Considerar a alocação de fontes de energias renováveis juntamente com a alocação de banco de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica.

1.4 Estrutura do trabalho

No capítulo 1 é apresentada uma introdução com o objetivo principal do trabalho de resolver o problema de planejamento de alocação de banco de capacitores juntamente com fontes de energia renováveis, além de ferramentas importantes que serão utilizadas para alcançar esse objetivo. No capítulo 2, é apresentada a formulação matemática do modelo de planejamento. No capítulo 3 é apresentada a meta-heurística que é utilizada para resolver o problema de otimização proposto. No capítulo 4 é apresentada a metodologia proposta para resolver o problema de planejamento proposto, nos quais são detalhadas a codificação e todo o processo de otimização. No capítulo 5 são apresentados resultados de dois sistemas testes, além da discussões dos resultados encontrados. No capítulo 6 é descritas as conclusões e algumas sugestões de trabalhos futuros.

2 Modelo matemático

Nesta seção, são apresentados em detalhes o modelo matemático de planejamento de sistema de distribuição de energia elétrica para a alocação ótima de bancos de capacitores e fontes de energia renováveis. Também é apresentado o fluxo de potência, utilizado para determinar o ponto de operação da rede. Além disso, se apresenta a modelagem dos geradores eólicos, solares e da emissão de gases poluentes. Na equação (1) é apresentada a função objetivo que se pretende minimizar ao longo desse trabalho.

$$\min F = \sum_{i \in \Omega_b} (c^n q_i^n + G^{sol} q_i^{sol} + G^{eol} q_i^{eol}) + (c_d^{ls} + p_d^{ls}) D_d \sum_{ij \in \Omega_l} (R_{ij} I_{ij,d}^2) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{ki \in \Omega_l} P_{ki,d} + P_{i,d}^s - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij,d} + R_{ij} I_{ij,d}^2) + P_{i,d}^G = P_{i,d}^D; \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (2)$$

$$\sum_{ki \in \Omega_l} Q_{ki,d} + Q_{i,d}^s - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij,d} + X_{ij} I_{ij,d}^2) + Q^{cp} n_{i,d} + Q_{i,d}^G = Q_{i,d}^D; \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (3)$$

$$0 \leq P_{i,d}^G \leq P_{\max}^G; \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (4)$$

$$0 \leq Q_{i,d}^G \leq P_{\max}^G \cdot \frac{\text{sen}(\arccos(FP))}{FP}; \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (5)$$

$$V_{\min} \leq V_{i,d} \leq V_{\max}; \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (6)$$

$$0 \leq I_{ij,d} \leq I_{\max}; \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (7)$$

$$n_i^{cp} = \{0, 1\}; \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (8)$$

$$q_i \text{ fixo}; \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (9)$$

A função objetivo, na equação (1) representa o custo total de planejamento do sistema. A primeira parte da função objetivo, de três termos, representa o custo de investimento e manutenção dos bancos de capacitores e geradores instalados. A segunda parte, de dois termos, é a perda total de energia durante o horizonte de planejamento considerado, após a multiplicação pelos valores de custo de potência ativa e penalização por emissão de poluentes, representa o custo anual do sistema elétrico.

A restrição (2) representa o balanço de potência ativa (lei dos nós de Kirchhoff), em cada nó i , no nível de demanda d . Em um dado nó, o fluxo total de potência ativa chegando ($\sum_{ki \in \Omega_l} P_{ki,d}$), somando ao fornecimento pela subestação ($P_{i,d}^s$) subtraído as perdas no circuito ($\sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij,d} + R_{ij} I_{ij,d}^2)$), somado à potência ativa do gerador sustentável conectado (P^G) deve ser igual à demanda de potência ativa ($P_{i,d}^D$).

A restrição (3) representa o balanço de potência reativa (lei dos nós de Kirchhoff), em cada nó i , no nível de demanda d , ou seja, ela é similar a anterior aplicada em potência reativa, porém, com a adição do termo $Q^{cp} n_{i,d}$, que refere à potência reativa injetada no nó pelo banco de capacitor, que é sempre um valor negativo.

As restrições (4) e (5) representam os limites de potência ativa e reativa que cada gerador sustentável pode fornecer no circuito i , no nível de demanda d , que é delimitado por zero e pelo valor máximo da corrente. A potência reativa é sempre calculada a partir da potência ativa.

A restrição (6) representa as restrições da magnitude de tensão do nó i , no nível de demanda d . A magnitude de tensão ($|V_{i,d}|$) é delimitada pelo valor mínimo ($|V_{\min}|$) e pelo valor máximo ($|V_{\max}|$).

A restrição (7) representa os limites do fluxo de corrente no circuito ij , no nível de demanda d , que é delimitado por zero e pelo valor máximo da corrente.

A restrição (8) representa o limite do número de bancos de capacitores ou geradores instalados no nó i pela variável n_i^{cp} , que pode valer apenas 0 ou 1. Isso significa que é alocado apenas um item por nó ao invés de instalar múltiplos capacitores e geradores em cada carga do sistema.

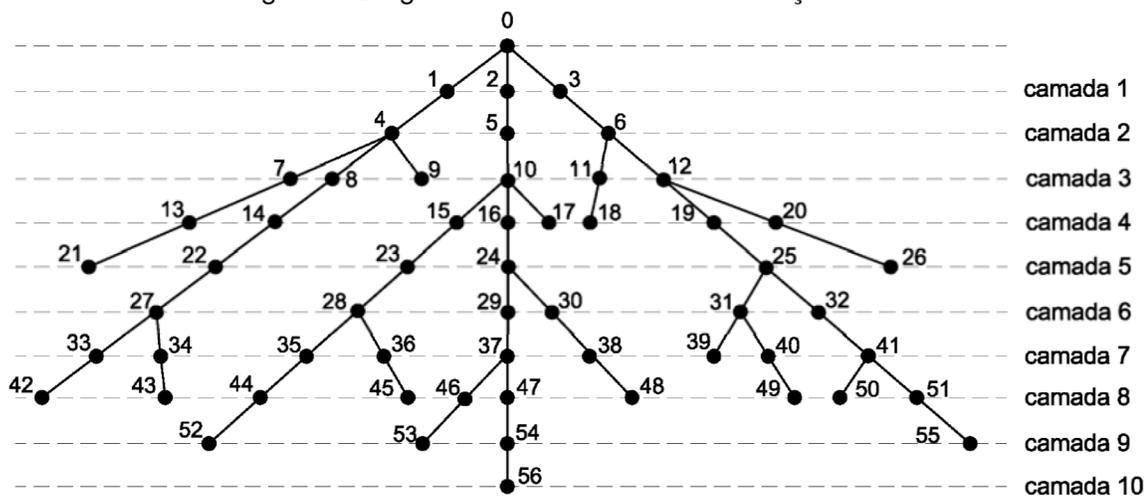
Na restrição (9), as variáveis binárias representam se há algum capacitor ou gerador em um nó (q_i), para os diferentes níveis de demanda.

Nas seções seguintes são detalhadas a modelagem matemática dos geradores renováveis e do fluxo de potência, incluindo sua remuneração por camada. Tais tópicos são necessários para detalhar no próximo capítulo a meta-heurística aplicada ao problema de planejamento de sistemas de distribuição.

2.1 Fluxo de potência

O fluxo de potência permite determinar o estado de operação da rede de distribuição. O cálculo de fluxo de potência utilizado neste trabalho é baseado no método de fluxo monofásico a um fio para redes de distribuição de energia elétrica radiais (CHENG; SHIR-MOHAMMADI, 1995). Porém, para fins de implementação computacional e para obter a eficiência do algoritmo, é necessária a renumeração das barras do circuito antes de processar o fluxo de potência. Na Figura 1, ilustra-se a topologia de uma rede de distribuição radial.

Figura 1: Diagrama de uma rede de distribuição radial



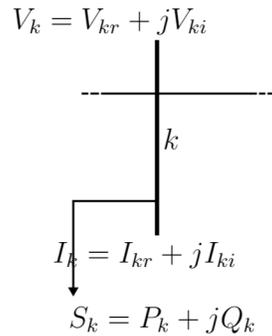
Fonte: (SOUZA, 2006)

Observa-se que as barras são ordenadas por camadas a partir da barra de referência, que não é a maneira mais comum de renumeração. A renumeração mais intuitiva seria numerar cada barra até o final depois voltar com o próximo número. Mesmo que a numeração original das barras não esteja nessa ordem desejada, o processo de renumeração as ordena numericamente por camadas, assegurando ao algoritmo para cálculo de fluxo de potência uma sequência lógica de barra para os cálculos. Isso é feito porque o programa depende do somatório de correntes vindo de cada barra.

O objetivo do cálculo do fluxo de potência é obter o estado de todas as barras e linhas do sistema de distribuição em análise. O processo de resolução do fluxo é iniciado escolhendo um valor para os módulos de tensões em cada barra do circuito, tipicamente a mesma tensão da subestação. Ou seja, para cada barra k , presume-se a tensão de referência $V_p = V_{ref} + j0$, sendo V_{ref} o módulo de tensão da subestação. Com as tensões nas barras determinadas, calculam-se a corrente de carga em todas as barras e as correntes em todos os ramos do circuito radial. Para isso, é implementado o processo *backward*.

2.1.1 Cálculo das correntes por processo *backward*

Considere a barra k exemplo da figura 2:

Figura 2: Barra k exemplo de cálculo de corrente

Fonte: elaborada pelo autor

Como o valor da potência consumida é sempre conhecido e o valor de V_k foi presumido, o valor de I_k pode ser calculado pela equação (10).

$$S_k = V_k \cdot I_k^* \longrightarrow I_k = \left(\frac{S_k}{V_k}\right)^* \quad (10)$$

A equação (10) pode ser apresentada com as partes real e imaginária separadas:

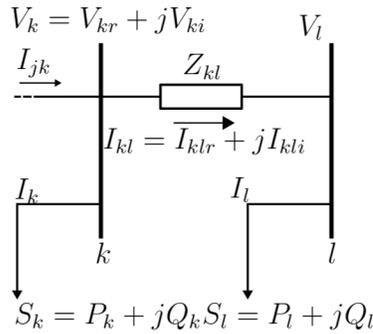
$$I_k = \left(\frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}}\right)^* = \left(\frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} \cdot \frac{V_{kr} - jV_{ki}}{V_{kr} - jV_{ki}}\right)^* = \frac{(P_k V_{kr} + Q_k V_{ki}) - j(Q_k V_{kr} - P_k V_{ki})}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2}$$

Portanto, as equações (11) e (12) são, respectivamente, as partes real e imaginária da equação (10).

$$I_{kr} = \frac{P_k V_{kr} + Q_k V_{ki}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (11)$$

$$I_{ki} = \frac{P_k V_{ki} - Q_k V_{kr}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (12)$$

Sabendo disso, considere outro sistema exemplo, onde a barra l é terminal, visto na figura 3.

Figura 3: Sistema kl exemplo de cálculo *backwards*

Fonte: elaborada pelo autor

Como a barra l é terminal, a corrente no ramo kl é igual a corrente da barra l :

$$I_{kl} = I_l$$

A corrente do ramo anterior à barra k é dada pela soma da corrente em k e pela corrente do ramo logo após essa barra, sendo que essa corrente também é calculada pela soma entre uma barra e o ramo anterior. Portanto, conclui-se que a corrente em um dado ramo é a soma entre a barra imediatamente após ele e o somatório de todas as barras após ele, generalizada na equação (13).

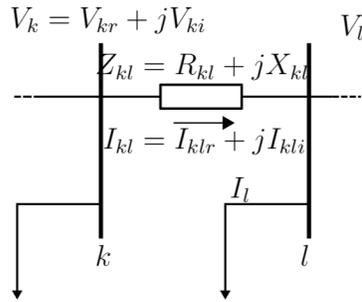
$$I_{ik} = I_k + \sum_{kb \in \Omega_b} I_{kb} \quad (13)$$

Essa equação é aplicada em todo o sistema, começando da última camada e terminando na subestação, por isso o processo é chamado de *backward*. Após isso, o processo inverso, *forward*, para recalculas as tensões.

2.1.2 Cálculo das tensões por processo *forward*

Para o cálculo das correntes, são utilizados os valores de tensão e de potência. Porém, enquanto os valores de potências são conhecidos e fixos, os valores da tensão precisam ser atribuídos na primeira iteração. Portanto, com os valores da corrente agora conhecidos, os valores da tensão são recalculados, utilizando também os valores das impedâncias de linha que também são conhecidos. Esse processo inteiro pode então ser repetido quantas vezes for necessário para chegar em valores cada vez mais precisos. Geralmente, o critério de parada utilizado é comparar os novos valores de tensão com os valores anterior após cada iteração, até que a diferença total ser menor que um erro máximo permitido escolhido anteriormente no programa. Porém, variações, onde a quantidade de iterações é previamente definida também podem existir.

A figura 4 apresenta o trecho hipotético de um sistema radial com as barras k e l , onde são conhecidas a tensão na barra k , a corrente do ramo e a impedância do ramo. Deseja-se encontrar a tensão na barra l .

Figura 4: Sistema kl exemplo de cálculo *forwards*

Fonte: elaborada pelo autor

Como V_k é conhecido, V_l pode ser calculado por definição, equação (14):

$$V_l = V_k - Z_{kl} \cdot I_{kl} \quad (14)$$

E dado que a tensão na subestação é sempre atribuída valor nominal de 1 p.u., é possível calcular a tensão em todos os pontos. Portanto, o processo se chama *forward*.

Assim como anteriormente, a equação pode ser separada em parte real e parte imaginária, apresentada nas equações (15) e (16), respectivamente:

$$V_{lr} + jV_{li} = V_{kr} + jV_{ki} - (R_{kl} + jX_{kl}) \cdot (I_{klr} + jI_{kli})$$

$$V_{lr} + jV_{li} = V_{kr} + jV_{ki} - R_{kl} \cdot I_{klr} - jR_{kl} \cdot I_{kli} - jX_{kl} \cdot I_{klr} + X_{kl} \cdot I_{kli}$$

$$V_{lr} = V_{kr} - R_{kl} \cdot I_{klr} + X_{kl} \cdot I_{kli} \quad (15)$$

$$V_{li} = V_{ki} - R_{kl} \cdot I_{kli} - X_{kl} \cdot I_{klr} \quad (16)$$

2.2 Modelagem dos Geradores Renováveis

Neste trabalho, os geradores eólicos e solares são considerados como propriedade da concessionária no sistema de distribuição.

2.3 Geradores fotovoltaicos

O modelo de produção de energia fotovoltaica transforma irradiação solar em potência, conforme apresentado na equação (17). Essa fórmula depende da temperatura da célula, que é apresentada em (18).

$$P^{PV} = P_{STC} \cdot \left(\frac{G}{1000} \cdot (1 + \delta(T_{cell} - 25)) \right) \quad (17)$$

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{T_{NOCT} - 20}{800} \right) \cdot G \quad (18)$$

Sendo:

P^{PV} : potência de saída de um painel (W).

P_{STC} : potência em condições padrões de teste (W).

G : irradiação solar (W/m^2).

δ : coeficiente entre potência e temperatura ($\%/^{\circ}C$).

T_{cell} : temperatura da célula ($^{\circ}C$),

T_{amb} : temperatura ambiente ($^{\circ}C$).

T_{NOCT} : temperatura de operação nominal da célula ($^{\circ}C$).

Os valores de G essencialmente medem o impacto da energia solar, sendo uma variável incerta para cada período de operação do sistema. É importante mencionar que a energia gerada por um único painel é comparativamente baixa em comparação às tensões padrões de redes de distribuição. Pode-se observar que o valor nominal é dado em W enquanto frequentemente se trabalha com uma potência base de kW. Com o preço de instalação individual também sendo relativamente baixo, porém, é assumido que os geradores sempre serão instalados em um conjunto de quantidades que é fixo.

2.4 Geradores eólicos

O modelo de produção de energia eólica transforma a velocidade do vento em potência. Existem quatro casos diferentes para a equação (19). Apesar que existe uma velocidade mínima de vento para o gerador conseguir gerar potência, existe também uma velocidade nominal que alcança a melhor potência possível. Há uma velocidade máxima também, caso o vento for muito rápido, o gerador suspender a produção de energia e pode sofrer danos. A metodologia foi baseada na linearização da curva de potência.

$$P^{wd} = \begin{cases} 0, & v < v_I \\ \frac{P_R \cdot v}{v_R - v_I} + P_R \cdot \left(1 - \frac{v_R}{v_R - v_I}\right), & v_I \leq v < v_R \\ P_R, & v_R \leq v < v_O \\ 0, & v_O \leq v \end{cases} \quad (19)$$

Sendo:

P^{wd} : potência de saída da turbina (kW),

P_R : potência nominal do gerador (kW),

v é a velocidade do vento que precisa ser conhecida (m/s),

v_R : velocidade nominal (m/s).

v_I : velocidade mínima para que ocorra geração (m/s).

v_O : velocidade máxima que o equipamento aguenta (m/s).

Nesse caso, a incerteza de v é similar à da irradiação solar G , ou seja, a velocidade do vento precisa ser conhecida e não é constante ao decorrer de um período de tempo.

2.5 Modelagem das incertezas no sistemas de distribuição

Muitas abordagens presumem que a demanda de um dado sistema elétrico é fixa, porém, isso geralmente não é observado na prática. A demanda de uma indústria é um valor que varia durante um determinado período de tempo. Frequentemente, uma curva da variação da demanda a cada hora do dia é montada. Com 24 valores conhecidos dentro de um período que geralmente se repete, é possível montar as 8760 horas de um ano inteiro. Nesse trabalho, porém, a modelagem das incertezas é ainda mais importante pois as intensidade solar e velocidade do vento são fatores que também têm importância no planejamento sendo que elas variam estocasticamente ao longo do ano.

Essa seção descreve a modelagem de todas as incertezas: demanda, custo, irradiação solar e velocidade do vento, sendo que o custo inclui tanto o valor de perdas de tensão por efeito Joule quanto a penalidade por emissão de gases poluentes. A metodologia pode ser descrita em 6 passos:

1. Uma separação de valores em duas estações (verão entre outubro e março, inverno entre abril e setembro, 4380 horas cada), é feita. Os dados são separados em picos.
2. As curvas são montadas ordenando os dados em ordem decrescente, mantendo a relação entre hora e as cinco variáveis. A curva dos valores ordenados da demanda mostra regiões onde os valores são altos. São essas áreas de alta demanda que têm o maior impacto no investimento.
3. Blocos de tempo são estabelecidos para modular o impacto dessas demandas. A demanda de pico no verão e no inverno determinam um bloco de tempo.
4. As outras curvas também são ordenadas de forma decrescente dentro de cada bloco de tempo. Após, para cada bloco e tipo de dado (entre as cinco incertezas mencionadas), uma função de distribuição cumulativa é montada e a sua curva é levantada.
5. A função obtida é dividida em segmentos ou seções definidas (números de níveis de demandas que podem ser obtidos em um bloco de tempo). Nesse caso, separaria-se em três segmentos, cada um com uma probabilidade acumulada de 33%. Com os segmentos conhecidos, os níveis são determinados com a média dos dados de todo o alcance. Esse processo é igual para todos os tipos de blocos de tempo e dados. Os cenários do sistema são formados combinando os níveis obtidos quando mode-

lado os dados da incerteza dentro de cada bloco de tempo. Em um exemplo completo, o número total de cenários pode ser: 2 estações \times 4 blocos de tempo \times 3 níveis de demanda \times 3 níveis de sol \times 3 níveis de vento, que produziria um total de 216 cenários. Para os exemplos desse trabalho, os casos foram simplificados para apenas 32 cenários.

6. O cálculo da produção de potência por fontes renováveis são obtidos utilizando os modelos já discutidos nas seções 2.3 e 2.4.

2.6 Emissão de gases poluentes

Com o advento da ideia de sustentabilidade, usar recursos naturais para a satisfação das necessidades presentes sem comprometer a satisfação das necessidades futuras passou a ser algo discutido em primeira ordem pelas principais nações.

Pesquisas feitas no último século mostraram alguns fatos preocupantes sobre como a humanidade vem poluindo o ar que ela mesmo respira. Não pode existir vida sem ar, mas respirar ar poluído nos condena a uma vida com doenças e morte precoce.

Um ar mais limpo trás inúmeros benefícios tanto para a saúde da população quanto para o meio ambiente como um todo, diminuindo os efeitos do aquecimento global. Isso pode ser visto, por exemplo, na Europa, que implementou políticas e medidas de redução de gases poluentes desde os anos 1970s e vem aproveitando um ar com qualidade melhor desde então.

Portanto, as fontes de energia renováveis sugeridas nesse trabalho têm benefícios a longo prazo que vão além apenas de seu custo, pois a redução de emissão de gases poluentes é uma das maiores preocupações que a humanidade atualmente enfrenta.

3 A meta-heurística de Busca em Vizinhança Variável

Em um problema de otimização matemática, tem-se uma função objetivo que se deseja encontrar o menor valor. Em geral, pode-se definir este problema da seguinte maneira:

$$\begin{array}{ll} \min & f(x) \\ \text{s.a.} & x \in S \end{array} \quad (20)$$

onde x representa uma proposta de solução, $f(x)$ a função objetivo e S o espaço de soluções factíveis do problema.

O propósito de uma busca meta-heurística é minimizar o valor da função objetivo, nesse caso, a equação (1). Em teoria, deve-se encontrar o menor valor de $f(x)$ possível. Na prática, é comum que determinados tipos de problemas não possam ser resolvido por métodos exatos. Esses problemas são denominados "problemas combinatoriais", sendo motivos de vários estudos. Mesmo com o atual avanço rápido da tecnologia disponibilizando processadores cada vez mais rápidos, a explosão combinatorial trás uma quantidade muito grande de soluções candidatas. Além disso, torna-se inviável a exploração de todas as soluções, a fim de se encontrar a melhor solução para o problema. Portanto, ao longo do tempo, foram desenvolvidas técnicas que buscam encontrar soluções ótimas com esforço computacional realista.

Um método heurístico, também chamado simplesmente de heurística, é um algoritmo que classifica alternativas de pesquisa em cada etapa de ramificação com base nas informações disponíveis para decidir qual ramificação seguir. Por exemplo, pode aproximar a solução exata (PEARL, 1984). Em outras palavras, as heurísticas são algoritmos que encontram soluções otimizadas para problemas combinatoriais complexos, mantendo razoáveis as quantidades de cálculos que o computador precisa processar. Reeves (1993) e Glover e Kochenberger (2003), apresentam discussões e aplicações das meta-heurísticas mais conhecidas.

A meta-heurística VNS, sigla para *Variable Neighborhood Search* (Busca em Vizinhança Variável) é uma proposta introduzida no mundo da computação no final do século passado, feita por Mladenovic (1997) e tem se mostrado eficiente e de fácil adaptação para muitos problemas de otimização. O algoritmo começa a partir de uma solução inicial, que pode ser factível ou infactível. A partir dessa solução, o algoritmo gera várias soluções vizinhas, aumentando gradativamente o tamanho da busca até cumprir o seu critério de parada. Essa estratégia visa impedir que o algoritmo fique preso em uma solução que aparenta ser melhor que a sua vizinha imediata, mas que está longe de ser uma solução global, chamadas de "ótimos locais". As meta-heurísticas de busca em vizinhança variável exploram sistematicamente a troca de estruturas de vizinhança, com o objetivo de encontrar ótimos globais e ao mesmo tempo escapar de ótimos locais. A VNS é significativamente diferente das meta-heurísticas encontradas na literatura nesse aspecto, pois ela não aceita a degradação da solução corrente como forma de sair de ótimos locais.

Quando o processo encontra um ponto de ótimo local, a VNS muda de vizinhança para sair desse e passar para a nova solução incumbente. Como consequência, caso o algoritmo encontra a solução ótima global, a busca fica estagnada nesse ponto, não havendo a possibilidade de sair dele.

A estratégia principal dos algoritmos de busca em vizinhança variável foi inspirada nas três observações seguintes:

1. Um mínimo local em relação a uma estrutura de vizinhança não é necessariamente um mínimo local em relação a todas as outras estruturas;
2. Um mínimo global é um mínimo local em relação a todas as estruturas possíveis de vizinhança;
3. Para muitos problemas, um mínimo local em relação a uma ou várias estruturas de vizinhanças são relativamente próximos um do outro.

Estas hipóteses exigem o uso de estruturas de vizinhança adequadas para que o algoritmo apresente um bom desempenho na busca de soluções. É necessário mencionar que existem várias tipos de várias propostas de algoritmos VNS que podem ser usados de forma independente ou até integrados a estruturas de VNS mais complexas. Alguns outros algoritmos que se destacam entre os utilizados são RVNS (*Reduced Variable Neighborhood Search*), BVNS (*Basic Variable Neighborhood Search*) e GVNS (*General Variable Neighborhood Search*) (MLADENOVIC; HANSEN, 1997). Porém, nesse trabalho, será utilizado um algoritmo VND.

3.1 O algoritmo VND

Na resolução do modelo matemático de planejamento proposto neste trabalho é utilizada uma meta-heurística de busca em vizinhança variável do tipo VND - *Variable Neighborhood Descent*. Proposta por Mladenovic e Hansen (1997), a meta-heurística VND, se baseia na observação que "Um mínimo local em relação a uma estrutura de vizinhança não é necessariamente um mínimo local em relação a todas as outras estruturas" para garantir que o programa não fique preso nos possíveis ótimos locais.

Na Figura 5 é ilustrada uma representação da meta-heurística VND. A busca por soluções inicia-se pela vizinhança N_1 em torno da solução x . Caso não seja encontrada um melhor vizinho, a busca continua na vizinhança N_2 . Caso não seja encontrada uma melhor solução nessa vizinhança, a busca continua na vizinhança N_3 . Se a busca encontra uma melhor solução nessa vizinhança, substitui-se a solução incumbente e inicia-se novamente a busca pela vizinhança N_1 . Sempre que uma solução melhor que a incumbente é encontrada, o processo de busca retorna ao ponto inicial. O processo iterativo continua percorrendo as vizinhanças, até que um critério de parada seja satisfeito.

ALGORITMO VND

Inicialização: Selecionar o conjunto de estruturas de vizinhança $N_s, s = 1, \dots, s_{max}$ que irá ser usado na resolução; encontrar uma solução inicial x (ou aplicar estratégias para encontrar x);

Repetir até (que não ocorra uma melhora da solução)

1. Fazer $s \leftarrow 1$;
2. Repetir os passos até que $s = s_{max}$;
 - a. Explorar a vizinhança. **Encontrar o melhor vizinho x' de x** , ($x' \in N_s(x)$)
 - b. **Se** $f(x') < f(x)$, **então:**
 - Faça $x \leftarrow x'$;
 - Faça $s \leftarrow 1$

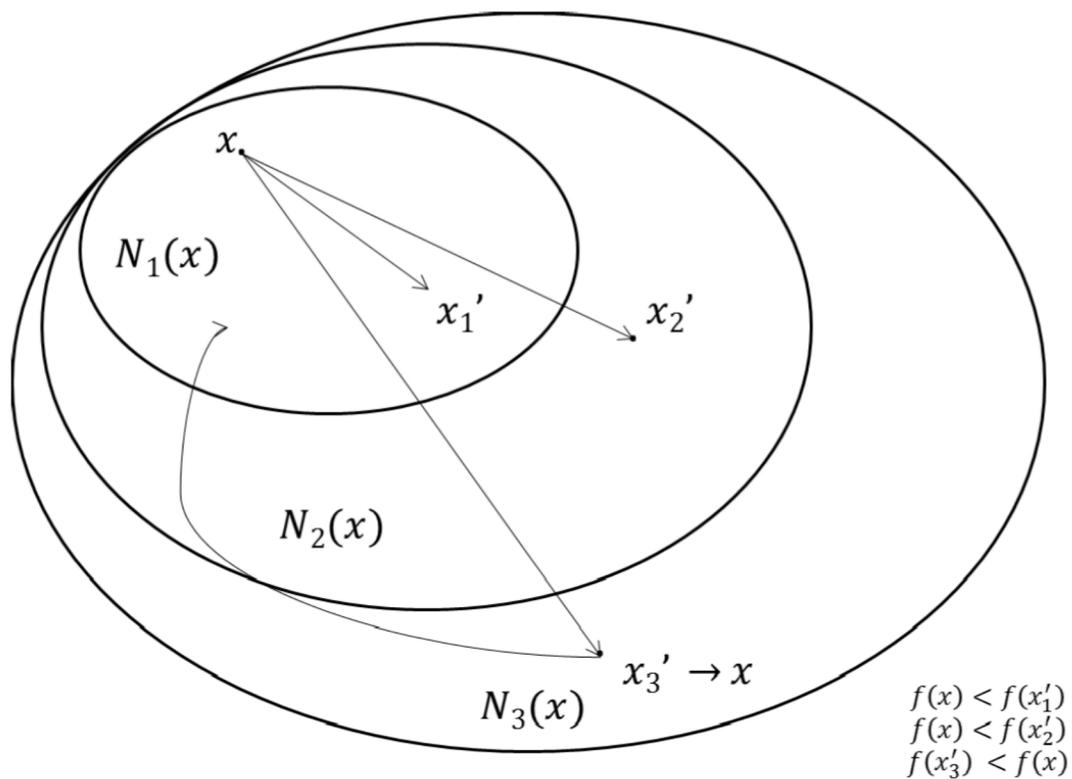
Senão:

- Faça $s \leftarrow s + 1$

Fim se;

Fim Repetir até

Figura 5: Representação de uma meta-heurística VND com $s = 3$



Fonte: (SOUZA, 2011)

4 A meta-heurística de Busca em Vizinhança Variável dedicada ao Planejamento de Sistemas de Distribuição

Neste capítulo, é apresentada a meta-heurística VND, dedicada ao problema de planejamento de alocação de banco de capacitores e fontes de energias renováveis em sistemas de distribuição de energia elétrica.

4.1 Codificação

A lógica do problema foi codificada em um vetor decimal. Para cada possível cenário de instalação de capacitores e geradores renováveis em barras candidatas do sistema, um vetor condizente é gerado. Este vetor tem como dimensão a quantidade de barras do sistema e cada localização recebe um número que representa o que foi instalado nas barras. Nesse caso, 0 representa que nada foi instalado, 1, 2 e 3 representam um tamanho de capacitor enquanto 4 e 5 representam um tipo de gerador. O programa utiliza gerador de números aleatórios para criar vetores solução.

4.2 Geração da solução inicial

O primeiro vetor solução que o programa utiliza considera o sistema sem capacitores ou geradores, portanto, ele é inteiramente formado por zeros. Todas as soluções do algoritmo após essa é gerada de maneira aleatória, por meio da codificação especificada. A solução é avaliada pelo fluxo de potência. O fluxo de potência permite encontrar as perdas ativas do sistema, os níveis de tensão em cada barra e os níveis de corrente, potência fornecida pela subestação, etc.. Para calcular o fluxo de potência são utilizadas como dados de entrada: o formato do próprio sistema com a quantidade de barras e os nós inicial e final de cada barra, as impedâncias de linha e as potências das cargas.

As condições necessárias para que o fluxo de potência possa ser calculado em um sistema foram discutidas na seção 2.1. Após serem obtidos os valores de perdas ativas, o preço do sistema é calculado utilizando tanto o custo das perdas quanto a penalização por emissão de gases poluentes.

4.3 Estruturas de vizinhança

O programa cria vários possíveis vetores solução simultaneamente e testa cada um deles individualmente, sempre deixando salvo qual é o melhor vetor solução atual e todos os vetores gerados em uma matriz. Caso um vetor melhor que o atual seja encontrado, ele será salvo no lugar da solução atual. A quantidade de vetores solução é determinada pelo usuário do programa, enquanto o conteúdo dos vetores é criado a partir de geração de números aleatórios.

São montadas até três matrizes para uma solução. Na primeira matriz, apenas uma localização dentro das válidas pode receber, trocar ou remover um gerador ou capacitor por vetor. Se a solução não melhorar, na segunda matriz, cada vetor muda o conteúdo de duas localizações diferentes. Se ainda não, na terceira, três localizações. O programa é finalizado caso nem a terceira matriz consiga encontrar uma solução melhor que a atual, pois isso significa que ela provavelmente é a melhor possível.

Um exemplo de como funcionam as estruturas de vizinhança é apresentado na figura 6:

Figura 6: Vetor que exemplifica as estruturas de vizinhanças
Vetor exemplo:

0102134

Exemplos de vizinhanças na primeira matriz:

0502134 0101134

0102124 0104134

Exemplos de vizinhanças na segunda matriz:

0102524 0152034

0100234 2102133

Exemplos de vizinhanças na terceira matriz:

4202334 2134134

0322135 3104104

Fonte: elaborada pelo autor.

4.4 Avaliação das soluções

Tendo uma solução inicial, as matrizes de vetores de comparação são montadas. Para cada vetor, as posições de tentativa de se colocar um item em paralelo são escolhidas aleatoriamente, assim como o tipo de capacitor ou gerador que será alocado. Para cada vetor, o sistema é simulado com os novos capacitores ou geradores alocados, ou seja, o consumo de potência reativa dos capacitores e a geração de potência complexa dos geradores são descontados da rede de distribuição, aliviando-a. O fluxo de potência então é calculado novamente.

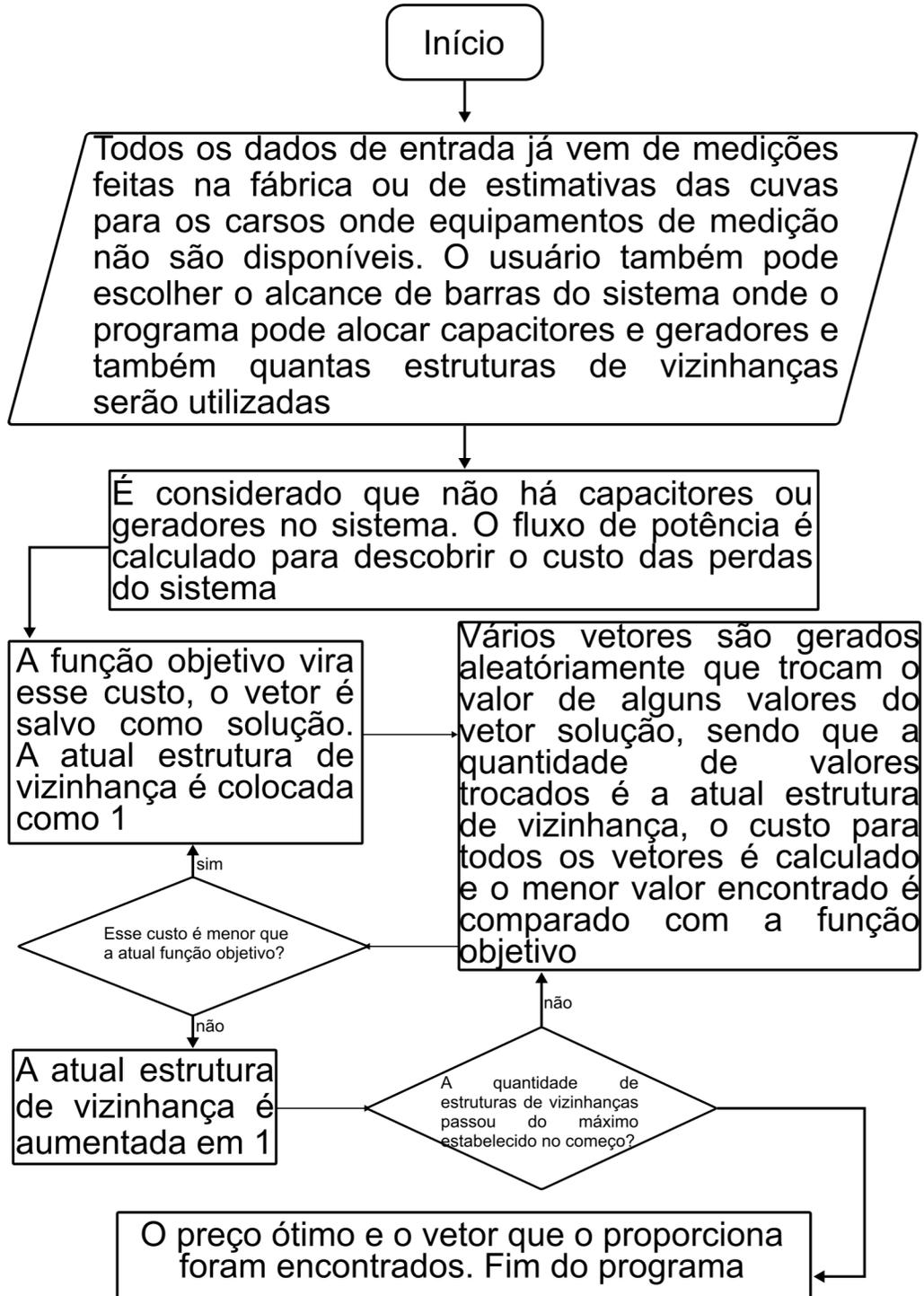
E após o cálculo dos valores de perdas ativas e de penalização por gases poluentes assim como no começo do programa, é também adicionado no custo total do sistema os valores de instalação e manutenção de qualquer banco de capacitores e fontes renováveis investidos na rede por meio da codificação. O preço final do sistema é comparado com o preço da solução atual.

Se uma solução melhor é encontrada dentro de uma matriz, esse vetor substitui o vetor de solução e o programa volta para a primeira estrutura novamente, sendo que as variáveis decimais dentro do vetor sempre são mantidas para outras comparações, permitindo que um capacitor ou gerador que foi adicionado seja removido se for encontrado um caso onde é melhor trocar por outro. Caso a solução viole níveis de tensão ou corrente, a solução é descartada por meio de penalização na função objetivo.

4.5 Algoritmo de planejamento

A figura 7 mostra um diagrama de blocos que representa a lógica utilizada para realizar o planejamento do sistema.

Figura 7: Diagrama de blocos



Fonte: elaborado pelo autor.

5 Resultados

O algoritmo de planejamento foi programado em linguagem de programação MATLAB. Com o objetivo de mostrar a eficiência do algoritmo, testes em um sistema de 33 barras e um de 135 barras são realizados.

5.1 Sistemas Testes

Os dados de barras dos dois sistemas, inclusive os valores de potência consumida e impedância de linhas, estão inclusos nos apêndices 1 e 2. O custo inicial dos sistema, ou seja, apenas a compra de energia e penalização por emissão de poluentes, antes de qualquer alocação de capacitores ou geradores, é de R\$90.442.626,81 para o primeiro sistema e de R\$330.287.904,42 para o segundo. Os dois sistemas também têm um valor de tensão menor que o aceitável de 0,93 p.u., mas o valor da multa nem foi considerado porque, durante a solução do programa, apenas vetores que garantam um menor valor de tensão maior que 0,93 p.u. após o planejamento serão aceitos, então a economia por não pagar a multa fica implícita.

Na operação do sistema de distribuição foram considerados 32 cenários que buscam modelar as incertezas relacionadas à demanda, irradiação solar e a velocidade do vento para cada período de operação. O horizonte de planejamento considerado é de 1 ano, ou seja 8760 horas. Anexado no apêndice 3 está a tabela que mostra os dados de demanda, velocidade de vento, irradiação solar, tempo, custo de potência ativa e custo de penalidade de emissão de gases poluentes para cada um dos 32 cenários.

Foram considerados três capacitores ideais que funcionam em valores de tensão quaisquer e tem potência reativa constante apesar da variação de corrente. Seus dados são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Valores dos capacitores ideais

	Custo (R\$)	Potência (kvar)
Capacitor 1	1563,99	300
Capacitor 2	3127,98	600
Capacitor 3	4691,97	900

O gerador não tem fator de potência unitário, portanto é considerado um fator de 0,96 indutivo. Como as cargas do sistema consomem potência reativa indutiva, o gerador ter esse fator de potência é ideal porque alivia as linhas do sistema. Para os testes do programa, foi utilizado os valores de um módulo fotovoltaico *KD 300-80 F Series*, da empresa Kyocera (KYOCERA, 2008). Os valores fixos foram:

- $P_{STC} = 325 \text{ W}$
- $\delta = -45 \text{ \%/}^\circ\text{C}$
- $T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

- $T_{NOCT} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Preço de instalação a cada 100 kW: R\$80.000,00
- Preço de manutenção a cada 100 kW: R\$150,00

Nos geradores eólicos, foram utilizado os valores de um *E-44*, da empresa Enercom. Os valores fixos foram:

- $P_R = 150 \text{ kW}$
- $v_R = 14 \text{ m/s}$
- $v_I = 2 \text{ m/s}$
- Velocidade máxima do vento: 25 m/s
- Preço de instalação unitário: R\$125.000,00
- Preço de manutenção unitário: R\$375,00

5.2 Casos de estudo

Para os dois sistemas, foram simulados três casos de estudo:

Caso I: o planejamento é realizado considerando apenas a alocação de bancos de capacitores.

Caso II: o planejamento é realizado considerando apenas a alocação de geradores renováveis.

Caso III: o planejamento é realizado considerando a alocação de banco de capacitores e geradores renováveis simultaneamente.

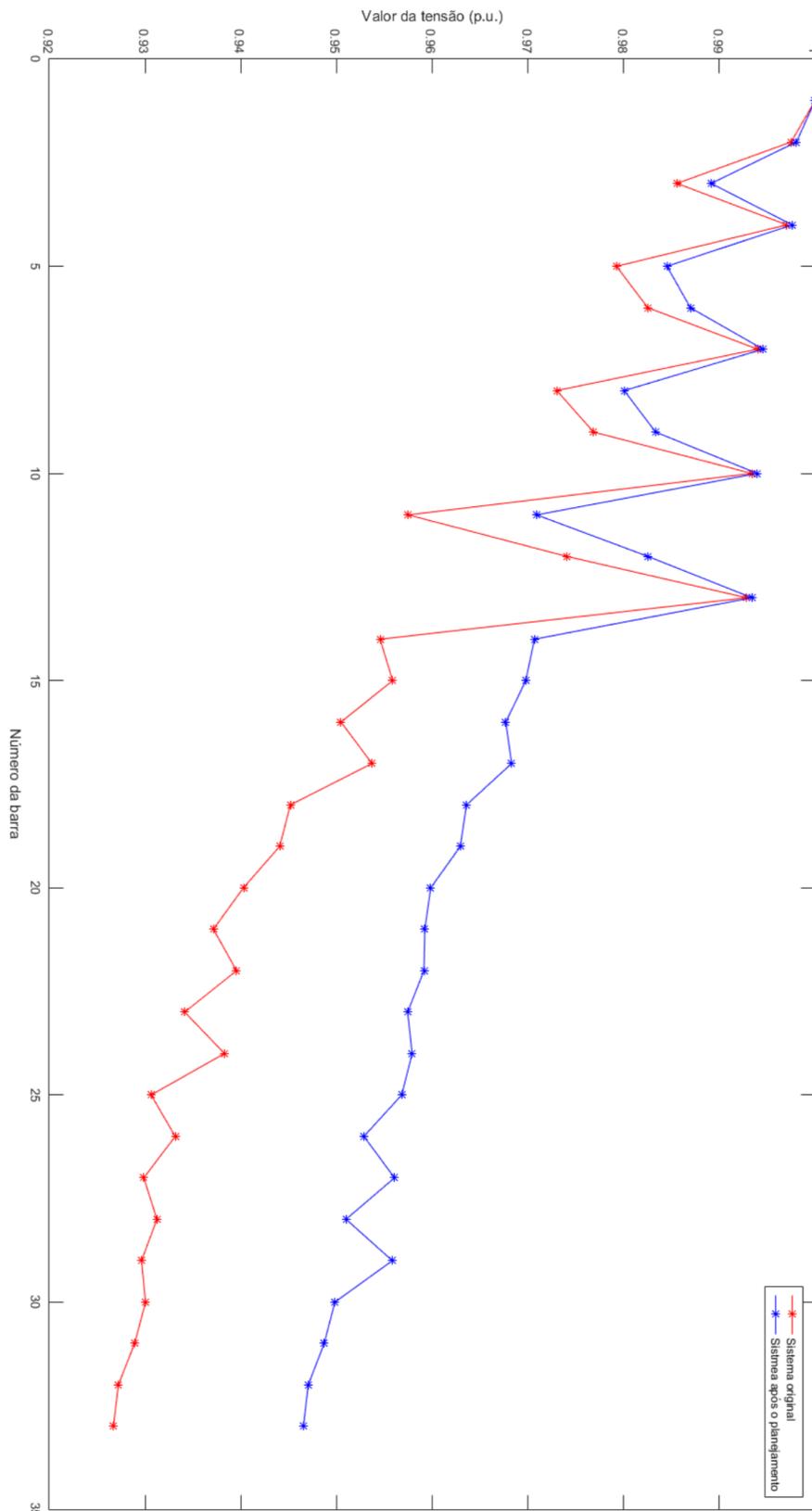
5.2.1 Sistema de 32 barras

No caso I, apenas capacitores foram alocados. Os resultados estão apresentados na tabela 2. Os valores de tensão estão detalhados na figura 8.

Tabela 2: Resultados da alocação de capacitores

Custo original do sistema		R\$90.442.626,81
Menor valor de tensão antes do planejamento		0,9267 p.u. (MENOR QUE 0,93)
Quantidade de capacitores alocados		5
Barras quais os capacitores foram alocados	Tipo 1	20; 23
	Tipo 2	12; 16; 25
	Tipo 3	-
Preço total dos capacitores		R\$12.511,92
Quantidade de geradores alocados		N/A
Barras quais os geradores foram alocados	Eólico	
	Solar	
Preço total dos geradores		
Custo após o planejamento		R\$59.821.604,12
Menor valor de tensão após o planejamento		0,9498 p.u.

Figura 8: Resultados da alocação de capacitores



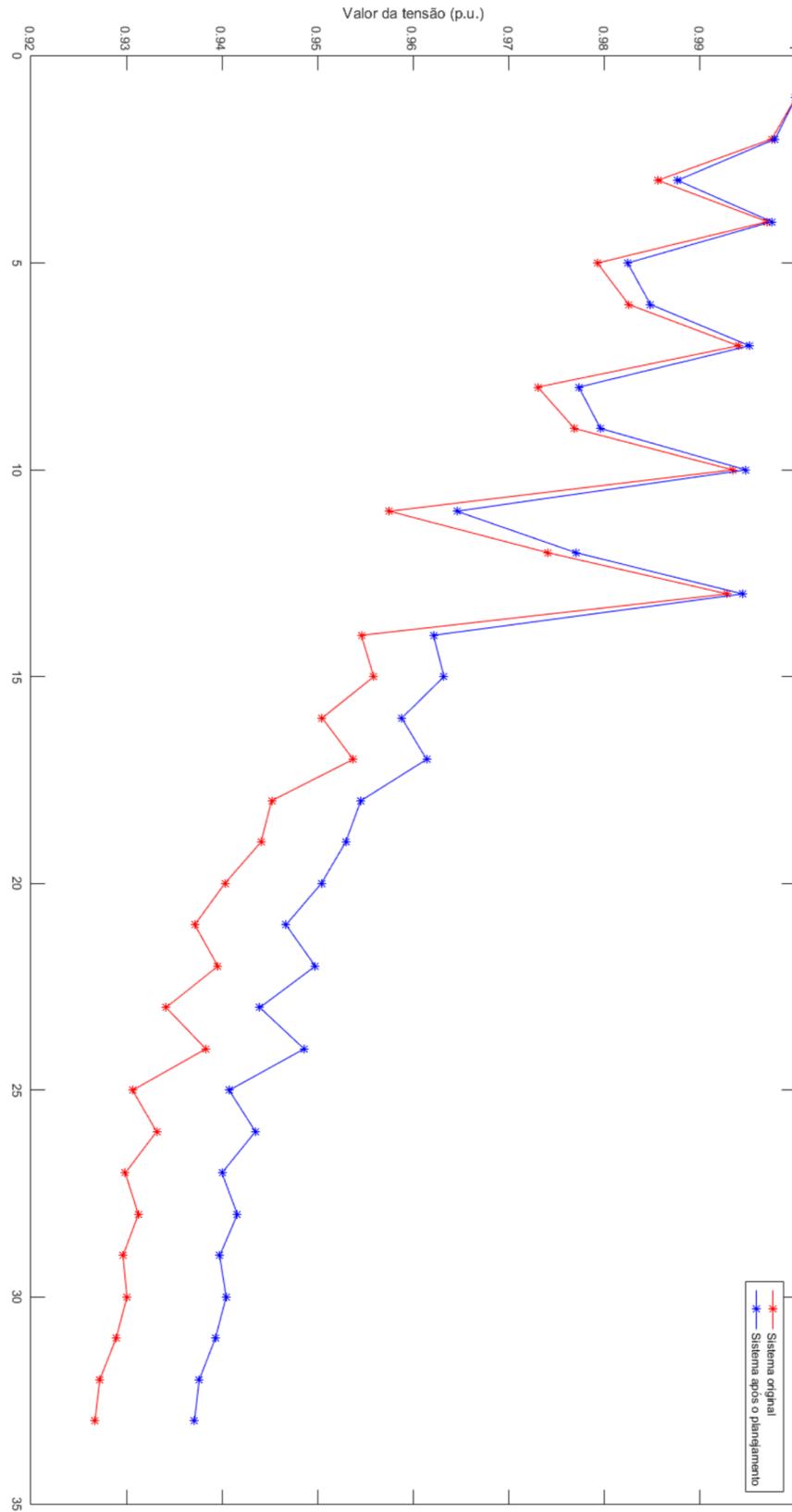
Fonte: elaborada pelo autor.

No caso II, apenas geradores foram alocados. Os resultados estão apresentados na figura 9 e os valores de tensão detalhados na tabela 3.

Tabela 3: Resultados da alocação de geradores

Custo original do sistema		R\$90.442.626,81
Menor valor de tensão antes do planejamento		0,9267 p.u. (MENOR QUE 0,93)
Quantidade de capacitores alocados		N/A
Barras quais os capacitores foram alocados	Tipo 1	
	Tipo 2	
	Tipo 3	
Preço total dos capacitores		
Quantidade de geradores alocados		17
Barras quais os geradores foram alocados	Eólico	9; 10; 11; 12; 13; 15; 16; 17; 18; 19; 21; 22; 23; 24; 25
	Solar	14; 20
Preço total dos geradores		R\$1.454.202,25
Custo após o planejamento		R\$68.479.328,86
Menor valor de tensão após o planejamento		0,9374 p.u.

Figura 9: Resultados da alocação de geradores



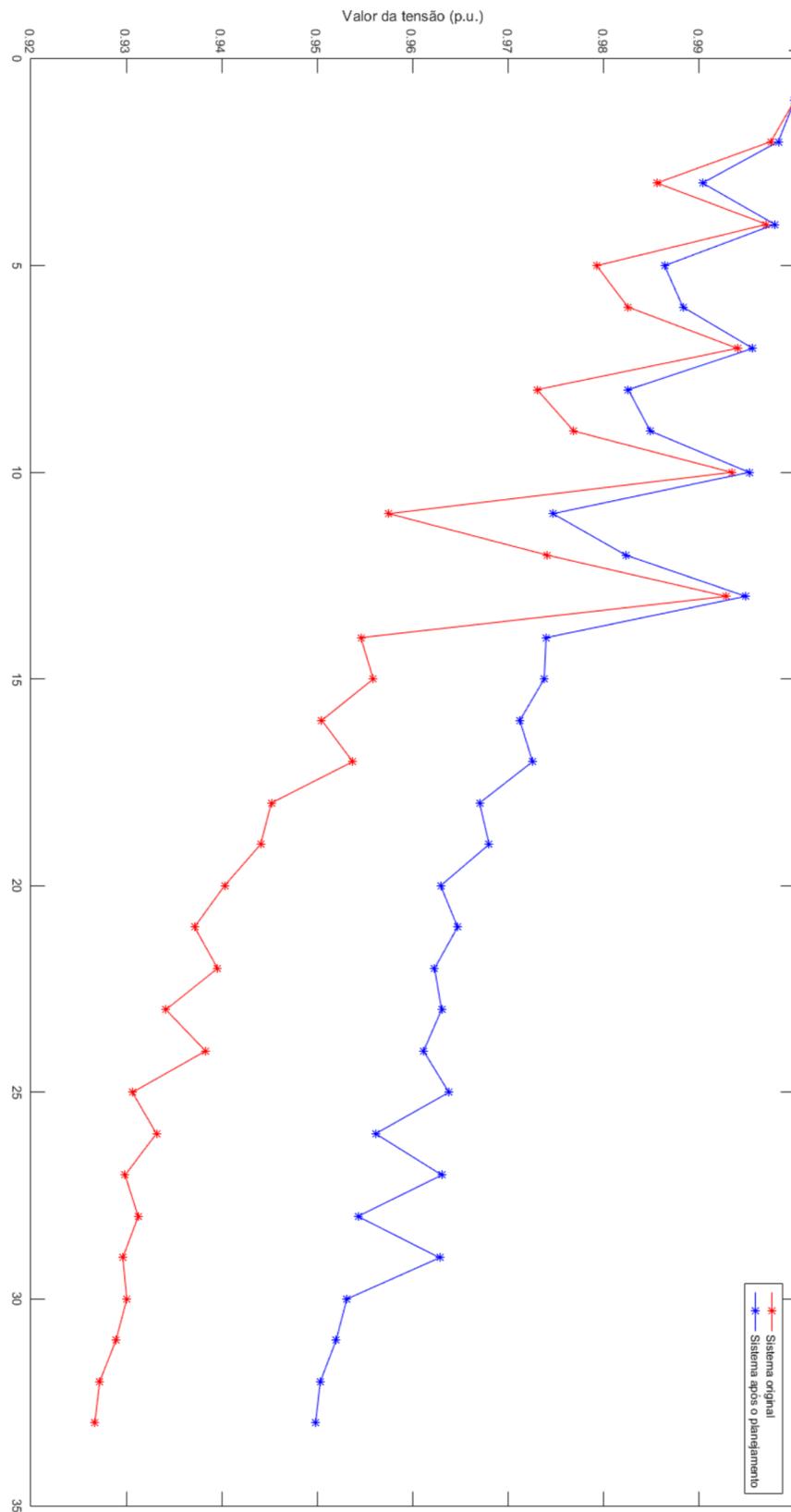
Fonte: elaborada pelo autor.

No caso III, capacitores e geradores foram alocados simultaneamente. Os resultados estão apresentados na figura 10 e os valores de tensão detalhados na tabela 4.

Tabela 4: Resultados da alocação de capacitores e geradores

Custo original do sistema		R\$90.442.626,81
Menor valor de tensão antes do planejamento		0,9267 p.u. (MENOR QUE 0,93)
Quantidade de capacitores alocados		3
Barras quais os capacitores foram alocados	Tipo 1	-
	Tipo 2	9; 16
	Tipo 3	25
Preço total dos capacitores		R\$10.947,93
Quantidade de geradores alocados		14
Barras quais os geradores foram alocados	Eólico	10; 11; 12; 13; 14; 15; 17; 18; 19; 20; 21; 23; 24
	Solar	22
Preço total dos geradores		R\$1.168.366,95
Custo após o planejamento		R\$47.743.230,06
Menor valor de tensão após o planejamento		0,9498 p.u.

Figura 10: Resultados da alocação de capacitores e geradores



Fonte: elaborada pelo autor.

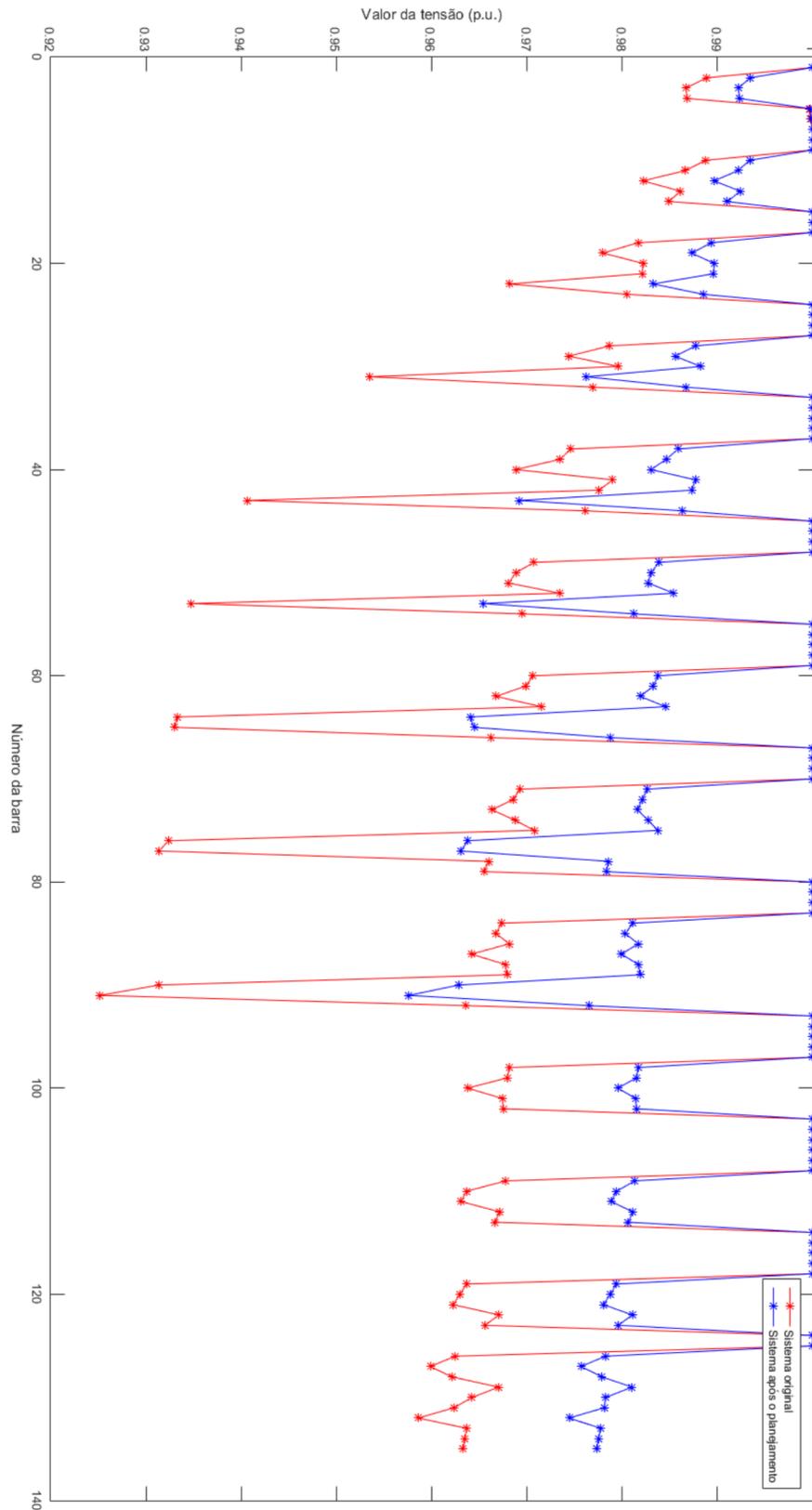
5.2.2 Sistema de 135 barras

No Caso I, apenas capacitores foram alocados. Os resultados estão apresentados na figura 11 e os valores de tensão detalhados na tabela 5.

Tabela 5: Resultados da alocação de capacitores

Custo original do sistema		R\$330.287.904,42
Menor valor de tensão antes do planejamento		0,9252 p.u. (MENOR QUE 0,93)
Quantidade de capacitores alocados		14
Barras quais os capacitores foram alocados	Tipo 1	38; 44; 62; 84; 91
	Tipo 2	31; 43; 51; 79
	Tipo 3	61; 63; 65; 74; 87
Preço total dos capacitores		R\$43.791,72
Quantidade de geradores alocados		N/A
Barras quais os geradores foram alocados	Eólico	
	Solar	
Preço total dos geradores		
Custo após o planejamento		R\$296.502.856,05
Menor valor de tensão após o planejamento		0,9576 p.u.

Figura 11: Resultados da alocação de capacitores



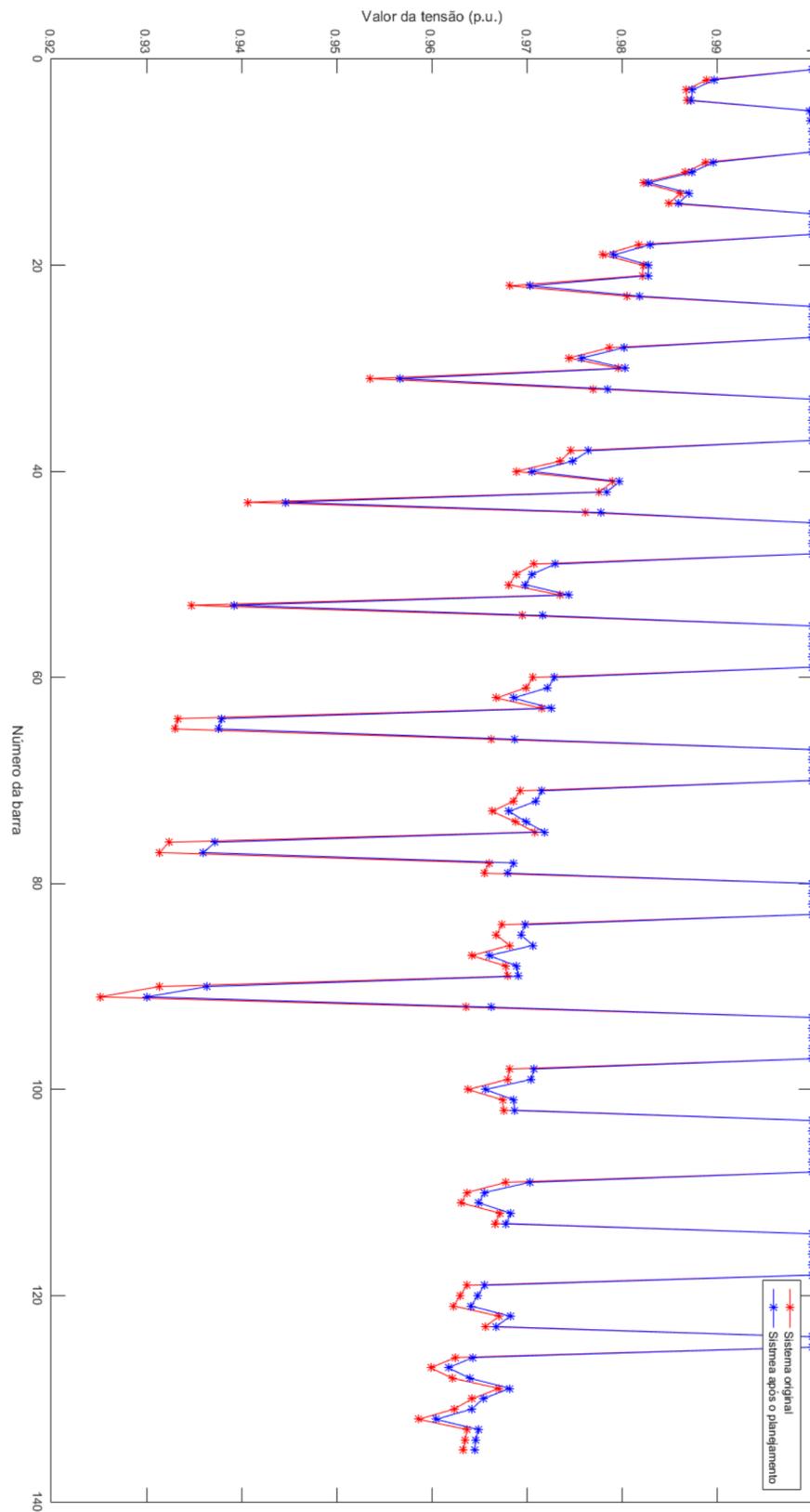
Fonte: elaborada pelo autor.

No Caso II, apenas geradores foram alocados. Os resultados estão apresentados na figura 12 e os valores de tensão detalhados na tabela 6.

Tabela 6: Resultados da alocação de geradores

Custo original do sistema		R\$330.287.904,42
Menor valor de tensão antes do planejamento		0,9252 p.u. (MENOR QUE 0,93)
Quantidade de capacitores alocados		N/A
Barras quais os capacitores foram alocados	Tipo 1	
	Tipo 2	
	Tipo 3	
Preço total dos capacitores		
Quantidade de geradores alocados		30
Barras quais os geradores foram alocados	Eólico	31; 40; 51; 60; 61; 62; 64; 65; 66; 73; 74; 75; 76; 77; 78; 79; 84; 85; 86 87; 88; 89; 90; 91; 92; 98; 99; 100
	Solar	43; 53
Preço total dos geradores		R\$9.236.526,80
Custo após o planejamento		R\$299.528.509,14
Menor valor de tensão após o planejamento		0,9301 p.u.

Figura 12: Resultados da alocação de geradores



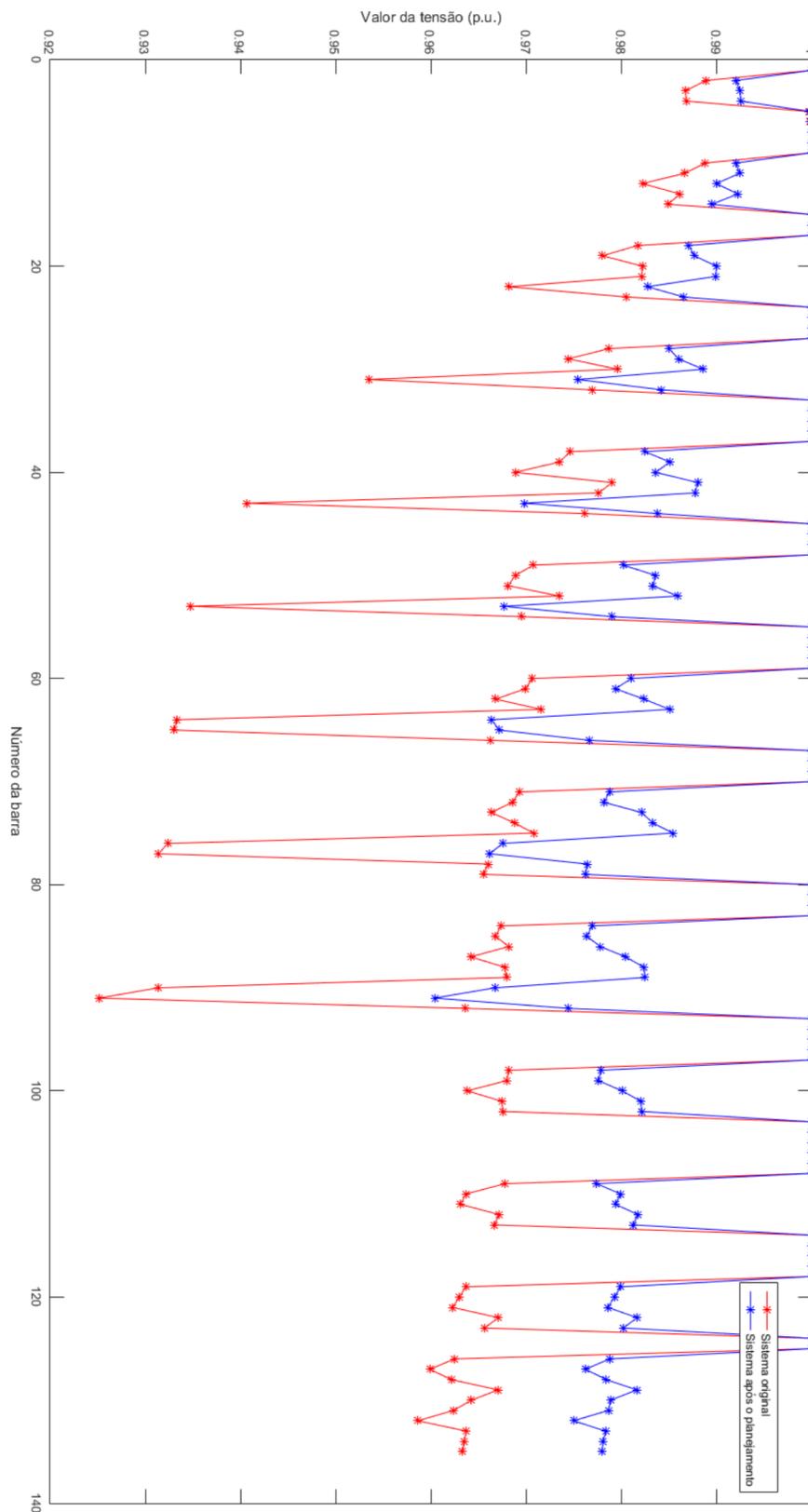
Fonte: elaborada pelo autor.

No caso III, capacitores e geradores foram alocados simultaneamente. Os resultados estão apresentados na figura 13 e os valores de tensão detalhados na tabela 7.

Tabela 7: Resultados da alocação de capacitores e geradores

Custo original do sistema		R\$330.287.904,42
Menor valor de tensão antes do planejamento		0,9252 p.u. (MENOR QUE 0,93)
Quantidade de capacitores alocados		9
Barras quais os capacitores foram alocados	Tipo 1	-
	Tipo 2	65; 76; 79
	Tipo 3	51; 60; 74; 75; 77; 87
Preço total dos capacitores		R\$37.535,76
Quantidade de geradores alocados		16
Barras quais os geradores foram alocados	Eólico	31; 43; 53; 61; 64; 66; 72; 73; 86; 88; 89; 92; 98; 100
	Solar	90; 91
Preço total dos geradores		R\$89.259,12
Custo após o planejamento		R\$284.313.923,40
Menor valor de tensão após o planejamento		0,9604 p.u.

Figura 13: Resultados da alocação de capacitores e geradores



Fonte: elaborada pelo autor.

5.3 Discussão dos resultados

Pode-se observar pelos gráficos que os resultados foram condizentes com o que era esperado. A alocação de capacitores nos dois sistemas melhorou bastante o valor de tensão e diminuiu o custo total do sistema, mesmo considerando o valor de compra dos capacitores. Essa técnica já foi estudada há muito tempo e esse resultado condiz com o que é conhecido. A alocação apenas de geradores conseguiu se provar bem viável, o preço dos sistemas também diminuiu bastante com seu uso e, apesar de não ser tão efetiva quando a alocação de capacitores nesse quesito, ela também melhorou a tensão mínima do sistema, para maior que o mínimo aceitável de 0,93 p.u. nos dois casos.

Os testes apenas com geradores favoreceram o gerador eólico, mas o conjunto de geradores solares apareceu em todos os testes. E os dois testes que visavam alocar tanto capacitores quanto geradores de fato misturaram os dois possíveis elementos, resultado em sistemas com bons valores de tensão e, nos dois casos, melhor preço possível, mostrando que a alocação mista é a que mais otimiza o planejamento do sistema de distribuição de energia elétrica.

6 Conclusões

Nesse trabalho, foi concluída a proposta de realizar um programa que calcula o planejamento de sistema de energia elétrica alocando capacitores e geradores sustentáveis fixos. Enquanto a teoria de alocação de capacitores já era relativamente bem conhecida, a necessidade de considerar fontes de energia renováveis no mundo é algo bem mais recente, assim como é o incentivo financeiro para a sua utilização, e portanto, a penalidade financeira do exagero da emissão de poluentes. Percebeu-se que, no momento, utilizar geradores em sistemas elétricos com problemas de tensão ao invés de capacitores é uma ideia inferior a curto e longo prazo, mesmo conseguindo resolver o problema de tensão. Porém, a alocação mista de capacitores e geradores se provou superior do que apenas um sistema em todos os aspectos. Considerando que essa tecnologia de geração sustentável é bem mais recente e mesmo assim comparável com a de alocação de capacitores, é possível que daqui poucos anos esses geradores consideravelmente mais valiosos, seja por um preço de compra bem menor ou porque a emissão de poluentes esteja com uma penalidade bem maior.

O programa desse projeto só considerou alocação de capacitores fixos, mesmo considerando que capacitores chaveados controlados automaticamente já existem. Fica de sugestão para um possível projeto futuro a implementação desse tipo de capacitor no programa do planejamento.

Referências Bibliográficas

BARAN, M. E.; WU, F. F.; Optimal capacitor placement on radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**. v. 4, n. 1, p. 725-734, Jan 1989.

BEÊ, R. T.; **Alocação de bancos de capacitores em sistema de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos genéticos**. Curitiba, 2007.

BLANCO, H.; FAAIJ, A.; A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. 1, p. 1049-1086, 2018.

CHENG, C. S.; SHIRMOHAMMADI, D.; A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis. **IEEE Transactions on Power Systems** v. 10, n. 2, p. 671-679, maio 1995.

CHIANG, S. -C.; CHIANG, S. -H.; **Sharing the Cost of Investment in General Training**. Dez. 1990.

CIVANLAR, S., GRAINGER, J. J.; Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. v. 104, n. 11, p. 3291 - 3297, Nov. 1985.

COLQUI, J. S. L.; **Controle de Tensão Em Redes de Baixa Tensão Com Alta Penetração de Geração Fotovoltaica**. Ilha Solteira, 2017.

GASTELU, J. V. V.; **Análise Espacial do Potencial Fotovoltaico em Telhados de Residências Usando Modelagem Hierárquica Bayesiana**. Ilha Solteira, 2016.

GERAÇÃO Distribuída de Energia – GD. **Portal solar**, 2014. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/geracao-distribuida-de-energia.html>> Acesso em: 18 de jan. de 2022

GLOVER, F. W.; KOCHENBERGER, G. A.; **Handbook of Metaheuristics**. Springer Science & Business Media, 2003.

E. Lorenzo, G. Araujo, A. Cuevas, M. Egido, J. Miñano, and R. Zilles, Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems. Seville, Spain: PROGNSA, 1994, p. 316.

HOW do Solar Panels Work? The Science of Solar Explained. **Solect Energy**, 2021. Disponível em: <<https://solect.com/the-science-of-solar-how-solar-panels-work/>> Acesso em: 18 de jan. de 2022

HOW Do Wind Turbines Work? **Energy.gov**, 2021. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>> Acesso em: 18 de jan. de 2022

HUANG, R. D.; MASULIS, R. W.; STOLL, H. R.; Energy shocks and financial markets. **The Journal of Future Markets**. v. 6, n. 1, p. 1-27, fev 1996.

INVERTOR Solar: Tudo Que Você Precisa Saber. **Solarvolt Energy**, 2021. Disponível em:

<<https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/inversor-solar/>> Acesso em: 21 de jan. de 2022

KAGAN, N.; DE OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J.; **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2ª edição. 2010.

KYOCERA. *KD 300-80 F Series: KD325GX-LFB KD330 GX-LFB*. Kyoto: 2002. 2 p.

MASOUM, M.A.S. *et al.* Fuzzy approach for optimal placement and sizing of capacitor banks in the presence of harmonics. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 2, p. 822-829, abr. 2004

MELGAR-DOMINGUEZ, OZY D. *et al.* An economic-environmental asset planning in electric distribution networks considering carbon emission trading and demand response. **Electric Power Systems Research**, Espoo, Finlândia (2020) p. 12.

MENDOZA, F.; BERNAL AGUSTÍN, J. L.; DOMÍNGUEZ-NAVARRO, J. A.; NSGA and SPEA applied to multiobjective design of power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 21, n. 4, p. 1938-1945, nov. 2006.

MIU, K. N.; CHIANG, H. -D.; DARLING, G.; Capacitor placement, replacement and control in large-scale distribution systems by a GA-based two-stage algorithm, **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, n. 3, p. 1160-1166 Ago 1997.

MLADENOVIC, N.; Variable Neighborhood Search. **Computers & Operations Research**. v. 24, n. 11, p. 1097-1100, 1997.

MONTSUTSUMI, M. M.; **Otimização Simultânea da Reconfiguração e da Alocação de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição Radiais Utilizando Uma Estratégia Multipartida**. Ilha Solteira, 2017.

O que é Geração Distribuída. **Instituto Nacional de Eficiência Energética**, 2021. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp> Acesso em: 18 de jan. de 2022

PEARL, J.; **Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving**. Michigan: Addison-Wesley Publishing Company, 1984.

PEREIRA JÚNIOR, B. R.; MANTOVANI, J. R.; **Alocação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Considerando as Incertezas**. Ilha Solteira, 2008.

REEVES, C.R.; **Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems**. Michigan: Wiley, 1993

RITCHIE, Hannah, What are the safest and cleanest sources of energy? **Our World in Data**, 2020. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>>. Acesso em: 18 de jan. de 2022.

RUPOLO, D.; **Planejamento Integrado de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Fontes Renováveis de Geração Distribuída na Média e Baixa Tensão**. Ilha Solteira, 2017.

SILVA, H.; HUGO, V. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **Science Direct**, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117311310>>. Acesso em: 18 de jan. de 2022.

SOUSA, M. C.; **Alocação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Radiais Usando Busca Dispersa**. Ilha Solteira, 2015.

DE SOUZA, C. H.; **Planejamento e Projeto de Circuitos Secundários de Distribuição de Energia Elétrica Por Meio de Algoritmo Busca Tabu**. Ilha Solteira, ago. 2006.

SOUZA, R. F. F.; **Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição Usando a Metaheurística de Busca em Vizinhança Variável**. Ilha Solteira, dez. 2011.

SUNDHARARAJAN, S.; PAHWA, A.; Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems Using a Genetic Algorithm, **IEEE Transactions on power Systems**, v. 9, n. 3, Ago 1994.

TERRONES, J. W. N.; **Despacho de Reativos Para Regulação de Tensão em Redes de Média Tensão Com Geradores Fotovoltáicos**. Ilha Solteira, 2017.

VILCHEZ LAZO, Ruben Ernesto. Heurística especializada aplicada na alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radial. 2014. 107 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/123864>>.

Apêndices

Apêndice 1

Tabela 8: Sistema de 32 barras

Número da barra	P (p.u.)	Q (p.u.)	Nó inicial	Nó final	R (p.u.)	X (p.u.)
1	0	0	1	2	0,0021	0,0011
2	0,0310	0,0186	2	3	0,0114	0,0058
3	0,0279	0,0124	3	4	0,0085	0,0043
4	0,0371	0,0248	4	5	0,0088	0,0045
5	0,0186	0,0093	5	6	0,0190	0,0164
6	0,0186	0,0062	6	7	0,0043	0,0143
7	0,0619	0,0310	7	8	0,0165	0,0054
8	0,0619	0,0310	8	9	0,0239	0,0172
9	0,0186	0,0062	9	10	0,0242	0,0172
10	0,0186	0,0062	10	11	0,0046	0,0015
11	0,0139	0,0093	11	12	0,0087	0,0029
12	0,0186	0,0108	12	13	0,0340	0,0268
13	0,0186	0,0108	13	14	0,0126	0,0165
14	0,0371	0,0248	14	15	0,0137	0,0122
15	0,0186	0,0031	15	16	0,0173	0,0126
16	0,0186	0,0062	16	17	0,0299	0,0399
17	0,0186	0,0062	17	18	0,0170	0,0133
18	0,0279	0,0124	2	19	0,0038	0,0036
19	0,0279	0,0124	19	20	0,0349	0,0314
20	0,0279	0,0124	20	21	0,0095	0,0111
21	0,0279	0,0124	21	22	0,0164	0,0217
22	0,0279	0,0124	3	23	0,0105	0,0071
23	0,0279	0,0155	23	24	0,0208	0,0164
24	0,1300	0,0619	24	25	0,0208	0,0163
25	0,1300	0,0619	6	26	0,0047	0,0024
26	0,0186	0,0077	26	27	0,0066	0,0034
27	0,0186	0,0077	27	28	0,0245	0,0216
28	0,0186	0,0062	28	29	0,0186	0,0162
29	0,0371	0,0217	29	30	0,0118	0,0060
30	0,0619	0,1857	30	31	0,0226	0,0223
31	0,0464	0,0217	31	32	0,0072	0,0084
32	0,0650	0,0310	32	33	0,0079	0,0123
33	0,0186	0,0124				

Apêndice 2

Tabela 9: Sistema de 135 barras

Número da barra	P (W)	Q (var)	Nó inicial	Nó final	R(Ω)	X(Ω)
1	0	0	0	1	0,332050	0,766530
2	106644	26394	1	2	0,001880	0,004330
3	94973	23506	2	3	0,223240	0,515350
4	194232	48072	3	4	0,099430	0,229530
5	694840	171970	4	5	0,155710	0,359450
6	332274	82237	5	6	0,163210	0,376770
7	532713	131844	6	7	0,114440	0,264170
8	139051	34415	6	9	0,056750	0,056660
9	278101	68828	9	10	0,521240	0,274180
10	312869	77433	9	12	0,108770	0,108600
11	260725	64528	12	13	0,398030	0,209370
12	556218	137661	12	15	0,917440	0,314690
13	650506	160997	12	17	0,118230	0,118050
14	677899	167777	17	18	0,502280	0,264210
15	480761	118986	17	20	0,056750	0,056660
16	443242	109699	20	21	0,293790	0,154540
17	0	0	0	24	0,332050	0,766530
18	0	0	24	25	0,001880	0,004330
19	0	0	25	26	0,223240	0,515350
20	67243	20451	26	27	0,108810	0,251180
21	515527	156787	27	28	0,710780	0,373880
22	134491	40902	27	29	0,181970	0,420080
23	515527	156787	29	30	0,303260	0,159520
24	268970	81802	29	32	0,024390	0,056300
25	0	0	32	33	0,045020	0,103940
26	127181	38679	33	34	0,018760	0,043310
27	813928	247539	34	35	0,118230	0,118050
28	0	0	35	36	0,023650	0,023610
29	278211	84612	36	37	0,189540	0,099700
30	127181	38679	37	38	0,398030	0,209370
31	0	0	36	39	0,056750	0,056660
32	190775	58020	39	40	0,094770	0,049850
33	0	0	40	41	0,416990	0,219340
34	885508	269309	41	42	0,113720	0,059820

35	0	0	39	43	0,075660	0,75550
36	404329	122968	43	44	0,369600	0,194420
37	540525	164389	44	45	0,265360	0,139580
38	168104	51125	43	46	0,056750	0,056660
39	0	0	0	48	0,332050	0,766530
40	2799	737	48	49	0,118190	0,272830
41	14003	3693	49	50	2,962880	1,016280
42	0	0	49	51	0,001880	0,004330
43	263107	69384	51	52	0,069410	0,160240
44	139874	36886	52	53	0,815020	0,428720
45	384538	101406	52	54	0,063780	0,147240
46	1023492	269903	54	55	0,131320	0,303150
47	586928	154778	55	56	0,061910	0,142910
48	526216	138767	56	57	0,114440	0,264170
49	0	0	57	58	0,283740	0,283310
50	243767	64284	58	59	0,283740	0,283310
51	0	0	57	61	0,045020	0,103940
52	162509	42855	61	62	0,026260	0,060630
53	576909	152136	62	63	0,060030	0,138580
54	154384	40713	63	64	0,030020	0,069290
55	48753	12857	64	65	0,020640	0,047640
56	0	0	62	67	0,108810	0,251180
57	45816	12083	67	68	0,255880	0,134600
58	336021	88611	68	69	0,416990	0,219340
59	492571	129895	69	70	0,502280	0,264210
60	206200	54377	70	71	0,331700	0,174480
61	0	0	71	72	0,208490	0,109670
62	505976	133430	56	73	0,138820	0,320470
63	0	0	0	75	0,007500	0,017320
64	656240	162416	75	76	0,270140	0,623620
65	185289	45859	76	77	0,382700	0,883460
66	185289	45859	77	78	0,330180	0,762200
67	231613	57323	78	80	0,328300	0,757870
68	393741	97449	80	81	0,170720	0,394090
69	185289	45859	81	82	0,559140	0,294120
70	486388	120378	81	83	0,058160	0,134250
71	51992	12867	83	84	0,701300	0,368900
72	11327	2803	84	85	1,023520	0,538390
73	162127	40126	83	86	0,067540	0,155910
74	906165	224271	86	87	1,323520	0,453970
75	0	0	0	121	0,011260	0,25980
76	223605	58966	121	122	0,729760	1,684640
77	318110	83888	122	123	0,225120	0,519680
78	214365	56529	123	124	0,208240	0,480710
79	670610	176845	124	125	0,046900	0,108270

80	315242	83132	125	127	0,619500	0,618570
81	624615	164717	127	128	0,340490	0,339980
82	194879	51392	128	129	0,568620	0,299110
83	544268	143528	128	130	0,108770	0,108600
84	552975	145825	130	131	0,568620	0,299110
85	0	0	0	133	0,011260	0,025980
86	200607	52902	133	134	0,418350	0,965750
87	2538396	669396	134	135	0,104990	0,136410
88	1023007	269776	134	136	0,438980	1,013380
89	859755	226725	136	137	0,075200	0,025790
90	0	0	137	138	0,076920	0,177560
91	177684	46857	138	139	0,332050	0,766530
92	194879	51392	139	141	0,084420	0,194880
93	0	0	141	142	0,133200	0,307480
94	165169	43557	142	143	0,293200	0,292760
95	517933	136583	143	144	0,217530	0,217210
96	316538	83474	144	145	0,264820	0,264430
97	0	0	142	146	0,103180	0,238190
98	170633	44998	146	147	0,135070	0,311810
99	0	0	0	148	0,009380	0,021650
100	114550	30208	148	149	0,168840	0,389760
101	133638	35241	149	150	0,118190	0,272830
102	20233	5336	150	152	2,286080	0,784140
103	4669	1232	150	153	0,455870	1,052360
104	37352	9850	153	154	0,696000	1,606690
105	3362539	886729	154	155	0,457740	1,056690
106	698664	184243	155	156	0,202980	0,263730
107	178182	46989	156	157	0,213480	0,277370
108	114550	30208	157	158	0,549670	0,289140
109	0	0	158	159	0,540190	0,284150
110	451833	119152	157	160	0,045500	0,59110
111	135756	35801	160	162	0,473850	0,249260
112	101819	26850	162	163	0,862410	0,453640
113	0	0	163	164	0,568620	0,299110
114	350578	92450	158	200	0,777110	0,408780
115	0	0	200	201	1,080380	0,568300
116	558327	147236	159	202	1,099330	0,578270
117	0	0	202	203	0,473850	0,249260
118	155813	41089	154	204	0,322670	0,744880
119	71584	18878	204	205	0,146330	0,337790
120	136339	359				

121	0	0	0	207	11260	0,025980
122	211195	64231	207	208	649100	1,498420
123	111282	33844	208	209	45020	0,103940
124	274901	83606	209	210	526400	0,180560
125	174876	53184	209	211	20640	0,47640
126	324698	98750	211	212	530710	0,279170
127	47695	14505	211	214	97550	0,225200
128	166928	50768	214	215	118190	0,272830
129	508728	154720	214	217	138820	0,320470
130	79490	24175	217	218	43150	0,099610
131	556424	169224	218	219	91920	0,212200
132	706920	214995	219	220	161340	0,372440
133	745076	226598	220	221	378320	0,377750
134	556424	169224	221	222	397240	0,396640
135	0	0	222	223	293200	0,292760

Apêndice 3

Tabela 10: Especificações de casos de demanda utilizadas nas simulações

Demanda	Velocidade do vento (p.u.)	Irradiação Solar (p.u.)	Tempo (h)	Preço (\$/MWh)	Poluentes (\$/MWh)
0,95	0,459825	0,294536	43,75	0,06	0,04
0,95	0,459825	0	43,75	0,06	0,04
0,95	0,210045	0,294536	43,75	0,06	0,04
0,95	0,210045	0	43,75	0,06	0,04
0,90	0,459825	0,294536	43,75	0,055	0,04
0,90	0,459825	0	43,75	0,055	0,04
0,90	0,210045	0,294536	43,75	0,055	0,04
0,90	0,210045	0	43,75	0,055	0,04
0,85	0,446324	0,952006	331,25	0,05	0,03
0,85	0,446324	0,025004	331,25	0,05	0,3
0,85	0,209563	0,952006	331,25	0,05	0,03
0,85	0,209563	0,025004	331,25	0,05	0,03
0,80	0,446324	0,952006	331,25	0,045	0,03
0,80	0,446324	0,025004	331,25	0,045	0,03
0,80	0,209563	0,952006	331,25	0,045	0,03
0,80	0,209563	0,025004	331,25	0,045	0,03
0,75	0,456580	0,860438	487,5	0,04	0,03
0,75	0,456580	0,025850	487,5	0,04	0,03
0,75	0,190538	0,860438	487,5	0,04	0,03
0,75	0,190538	0,025850	487,5	0,04	0,03
0,70	0,456580	0,860438	487,5	0,035	0,03
0,70	0,456580	0,025850	487,5	0,035	0,03
0,70	0,190538	0,860438	487,5	0,035	0,03
0,70	0,190538	0,025850	487,5	0,35	0,03
0,65	0,471223	0,082830	232,5	0,03	0,02
0,65	0,471223	0	232,5	0,03	0,02
0,65	0,164164	0,082830	232,5	0,03	0,02
0,65	0,164164	0	232,5	0,03	0,02
0,60	0,471223	0,082830	232,5	0,025	0,02
0,60	0,471223	0	232,5	0,025	0,02
0,60	0,164164	0,082830	232,5	0,025	0,02
0,60	0,164164	0	232,5	0,025	0,02