



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESPACHO ECONÔMICO DE GERAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
CONSIDERANDO GERAÇÃO TÉRMICA E EÓLICA**

Aluno: Paulo Henrique Libraiz Junior

Orientador: Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi

Ilha Solteira

2022

PAULO HENRIQUE LIBRAIZ JUNIOR

**DESPACHO ECONÔMICO DE GERAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
CONSIDERANDO GERAÇÃO TÉRMICA E EÓLICA**

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do diploma no curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: **Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi**

Ilha Solteira

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L697d **Libraiz Junior, Paulo Henrique.**
Despacho econômico de geração em sistemas de distribuição considerando
geração térmica e eólica / Paulo Henrique Libraiz Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.],
2022

34 f. : il.

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

Orientador: Antonio Marcos Cossi

Inclui bibliografia

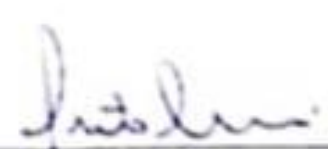
1. Despacho econômico de geração. 2. Geração térmica. 3. Geração eólica.

Rafane da Silva Santos
Rafane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CBL/21 - 0000

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos dois dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e dois, o discente *Paulo Henrique Libraiz Junior*, matriculado sob o n°. 171050231, tendo como banca examinadora seu orientador o Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi, a Profa. Dra. Erica Regina Marani Daruichi Machado e o aluno de Doutorado *Renan Sanches Geronel*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Despacho econômico de geração em sistemas de distribuição considerando geração térmica e eólica", obtendo a nota 10,0 (DEZ) e conceito APROVADO.


Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi
- orientador -


Paulo Henrique Libraiz Junior
- discente -


Profa. Dra. Erica Regina M. Daruichi Machado
- membro da banca -


Mac. Renan Sanches Geronel
- membro da banca -

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Paulo Henrique Libraiz e Naide Aparecida Barbosa Libraiz e ao meu irmão Pedro Gustavo Barbosa Libraiz, por todo apoio, seja ele financeiro ou emocional. Há de se ressaltar que durante a minha jornada acadêmica, eles estiveram ao meu lado apoiando nas minhas decisões relevantes, comemorando minhas vitórias e oferecendo suporte nos momentos de adversidades.

À minha namorada Mariana Passos Saad por ter me acompanhado durante grande parte do período de graduação, sendo paciente, me aconselhando e apoiando independente de qual fosse a situação e sempre compartilhando momentos bons ao longo da vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi, pela confiança depositada em minha pessoa em todo meu período acadêmico e que me deu a honra de realizar três trabalhos de iniciação científica na área de Distribuição de Energia como seu orientando.

Aos colegas que conquistei ao longo do curso, que de alguma maneira contribuíram para chegar aqui, especialmente ao Evandro Gregoleta, Hugo Commar, João Pedro Trindade, João Victor Fernandes e Theo Meneguetti que estiveram desde o início ao meu lado.

A todos os professores que já fizeram parte de minha educação e àqueles que ainda o farão.

RESUMO

Este Trabalho de Graduação teve como objetivo promover um estudo sobre despacho econômico de geração em sistemas de distribuição considerando geração térmica e eólica, e consequentemente, apresentar um modelo matemático que contemple o despacho econômico de ambos os tipos de geração de energia, bem como estudos de casos hipotéticos comparando os tipos de geração. O modelo matemático apresentado minimiza uma função econômica de geração de energia considerando geração térmica e eólica, sujeita a um conjunto de restrições do problema. Desta forma, esse modelo procura otimizar a geração térmica com a presença de geração eólica, que poderá ser utilizada para suprir uma determinada demanda de carga do sistema elétrico. As restrições do problema são técnicas e operacionais de redes, e de capacidade de geração das usinas térmicas e unidades eólicas. O modelo de geração eólica apresentado, considera as incertezas da velocidade do vento. Os resultados apresentados, referem-se a testes feitos em cenários hipotéticos, criados para comparar os custos relacionados aos tipos de geração, térmica e eólica.

Palavras-chave: Despacho Econômico de Geração, Geração Térmica, Geração Eólica.

ABSTRACT

This Graduation Work aimed to promote a study on economic dispatch of generation in distribution systems considering thermal and wind generation, and consequently, to present a mathematical model that contemplates the economic dispatch of both types of energy generation, as well as hypothetical case studies comparing generation types. The mathematical model presented minimizes an economic function of energy generation considering thermal and wind generation, subject to a set of constraints of the problem. In this way, this model seeks to optimize thermal generation with the presence of wind generation, which can be used to supply a certain load demand of the electrical system. The constraints of the problem are technical and operational in networks, and in the generation of thermal plants and wind farms. The wind generation model presented considers the wind speed uncertainties. The results presented refer to tests for hypothetical scenarios, created to compare the costs related to the types of thermal and wind generation.

Keywords: Economic Dispatch of Generation, Thermal Generation, Wind Generation.

Lista de Figuras

Figura 1. Esquemático de uma Usina Térmica.....	15
Figura 2. Estratégia de geração dada por uma Curva de Demanda.	18
Figura 3. Gráfico da função de densidade de probabilidade de Weibull.	22
Figura 4. Comportamento da potência em relação a velocidade do vento.....	24

Lista de tabelas

Tabela 1. Dados dos geradores térmicos.....	28
Tabela 2. Dados dos geradores eólicos.	28
Tabela 3. Dados dos geradores térmicos para o Cenário I	29
Tabela 4. Dados dos geradores térmicos para o Cenário II.	29
Tabela 5. Dados dos geradores eólicos para o Cenário II..	30
Tabela 6. Dados dos geradores térmicos para o Cenário III.	30
Tabela 7. Dados dos geradores eólicos para o Cenário III..	31
Tabela 8. Dados dos geradores térmicos para o Cenário IV.....	31
Tabela 9. Dados dos geradores eólicos para o Cenário IV..	32

Lista de Abreviaturas e Siglas

POSEP - Planejamento e Operação de Sistemas de Potência.

CO2 - Dióxido de Carbono.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico.

MME - Ministério de Minas e Energia.

CHP - Custo Horário Produtivo.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. SISTEMAS DE GERAÇÃO TÉRMICA.....	14
2.1. Princípio de Funcionamento.....	14
2.2. Vantagens	16
2.3. Modelo Matemático da Geração Térmica	17
2.3.1. Função Custo	18
2.3.2. Restrições.....	19
2.3.3. Custo Marginal.....	19
3. SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA	20
3.1. Princípio de Funcionamento.....	20
3.2. Vantagens e Desvantagens	20
3.3. Incerteza da Velocidade do Vento e a Função de Probabilidade de Weibull	21
4. MODELO MATEMÁTICO DE DESPACHO ECONÔMICO	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
5.1. Cenário I.....	28
5.2. Cenário II.....	29
5.3. Cenário III.....	30
5.4. Cenário IV	31
5.5. Análise dos resultados	32
6. CONCLUSÕES.....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

O Despacho Econômico de Energia é um tópico clássico em algumas pesquisas anteriores à década de 1920 e foi atualizado com a modernização dos sistemas elétricos de potência inteligentes (*Smart Grids*) e, portanto, são a chave para o Planejamento e Operação de Sistemas de Potência (POSEP), conforme menciona Hetzer (2008). De acordo com Hetzer (2008) o objetivo é fazer uma ótima distribuição e alocação para os geradores disponíveis, fornecendo efetivamente a todas as cargas do sistema de energia o menor custo possível, sujeito a todas as restrições impostas pelo projeto. Portanto, visa obter os menores custos operacionais necessários conforme os limites operacionais de restrição do balanço de potência, de operação dos geradores e funcionamento das redes do sistema elétrico de potência.

Tradicionalmente, o custo de uma unidade geradora é modelado por uma função quadrática para tornar o Despacho Econômico um problema convexo a ser resolvido pelos métodos clássicos. Assim, o despacho econômico pode ser formulado como uma função não-linear que visa minimizar o custo total na geração de energia, satisfazendo várias restrições de igualdade e desigualdade que representam a operação dos sistemas de energia elétrica.

Além disso, o despacho econômico usa o mercado de energia de curto prazo, o mercado *spot*, onde ocorrem todas as transações de compra e venda de energia elétrica. A programação da geração considera fatores como o custo de geração, capacidade de transmissão, confiabilidade do suprimento e segurança do sistema elétrico (GIAMPIETRO, 2007).

Com relação a geração térmica, tem-se como objetivo minimizar, respectivamente, o custo dos combustíveis e a emissão dos poluentes que ocorrem através da queima de combustíveis fósseis, e ao mesmo tempo atender as restrições operacionais do problema (GIAMPIETRO, 2007).

Na geração eólica, a geração de energia é realizada por meio de turbinas eólicas para converter a energia cinética contida na massa de ar em movimento (vento) em energia mecânica. A energia mecânica de rotação da turbina aciona o gerador de energia elétrica através do eixo e, em seguida, converte-o em energia elétrica por meio de

indução eletromagnética que gera corrente alternada. A grande vantagem da geração de energia eólica é que ela não emite gases de efeito estufa ou gases tóxicos, nem emite partículas em suspensão ou resíduos radioativos que podem poluir o solo e a água. Dessa forma, os parques eólicos são considerados uma excelente fonte de energia renovável e podem reduzir a queima de combustíveis fósseis (MARTINS; BALBO; JONES, 2019).

O despacho econômico relativo à energia eólica tem como objetivo minimizar os custos de geração, porém como esses custos estão relacionados a fatores climáticos, tais como a velocidade dos ventos, que é uma variável aleatória, este deve ser tratado de forma probabilística e estocástica. Assim, o modelo é estocástico por conta da influência do comportamento do vento, que apresenta variação de velocidade em curtos intervalos de tempo. Nos modelos que analisam a produção eólica de energia, a função de distribuição de probabilidade de Weibull é considerada na análise do aproveitamento da energia eólica por sua capacidade de fazer previsões utilizando pouca quantidade de dados (MARTINS; BALBO; JONES, 2019).

Assim, este trabalho contempla um estudo sobre despacho de geração em sistemas de distribuição considerando geração térmica e eólica. Para tal é apresentado um modelo matemático que contemple o despacho econômico de ambos os tipos de geração de energia. O modelo matemático tem como objetivo minimizar uma função econômica de geração térmica considerando a presença de geração eólica, sujeita a um conjunto de restrições do problema.

Como resultados, apresenta-se uma comparação entre gerações térmica e eólica de cenários hipotéticos, e verificar a influência econômica da geração eólica em sistemas que possuem geração térmica.

O trabalho está dividido da seguinte forma: Além deste Capítulo 1, que trata da Introdução sobre o trabalho, os Capítulos 2 e 3 apresentam os modelos matemáticos das gerações térmicas e eólicas, respectivamente. No capítulo 4 é apresentado o modelo matemático de despacho econômico considerando os tipos de gerações térmica e eólica, tendo como base os Capítulos 2 e 3. No Capítulo 5, são apresentados os resultados e comentários dos testes propostos. O Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais do trabalho. E, o Capítulo 7, as referências bibliográficas efetivamente utilizadas no trabalho.

2. SISTEMAS DE GERAÇÃO TÉRMICA

A geração térmica é feita através de geradores que utilizam a queima de combustíveis, em geral combustíveis fósseis, para a produção de energia elétrica, e que são prejudiciais ao meio ambiente devido a emissão de CO₂ proveniente da queima desses combustíveis (MARTINS, 2018).

Entretanto, a Geração Térmica é responsável por cerca de 80% da eletricidade produzida no mundo, sendo 67% a partir de combustíveis fósseis e 13% a partir de usinas nucleares. Portanto, o estudo a respeito da Geração Térmica é fundamental, pois, embora responda por menos de 20% da produção de eletricidade atualmente no Brasil, de acordo com diversos estudos de planejamento do ONS e do MME, sua participação deve aumentar bastante nos próximos anos (GUILHERME, 2022).

A seguir, detalha-se o sistema de geração térmica.

2.1. Princípio de Funcionamento

Com relação ao seu princípio de funcionamento, temos que ela converte energia química ou nuclear dos combustíveis em energia elétrica, ocorrendo em três fases, sendo elas:

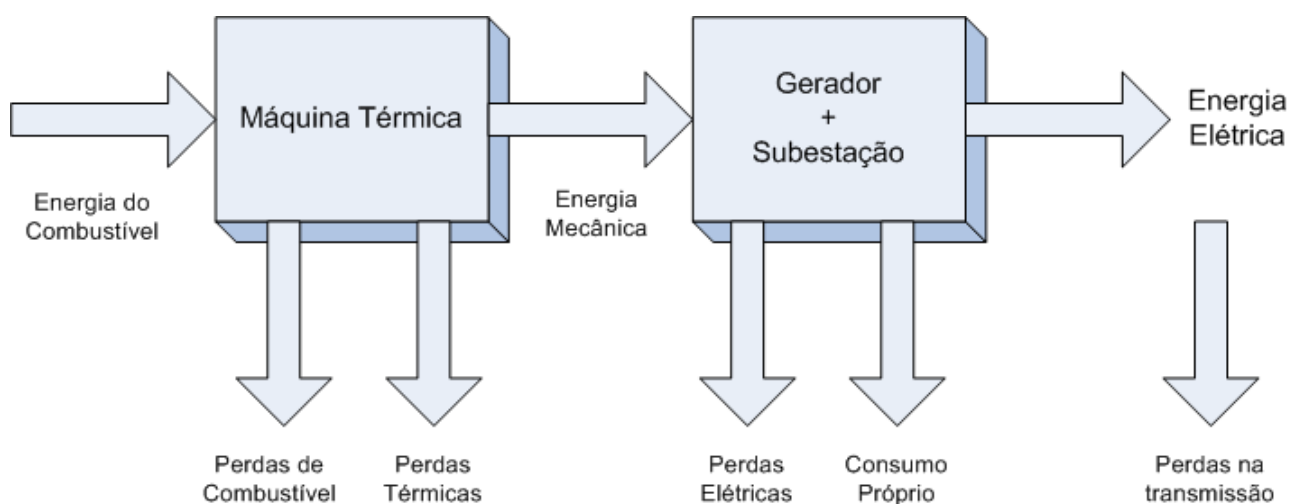
1. A energia química do combustível é transformada em calor através da queima do combustível ou a energia atômica do combustível é transformada em calor através da fissão nuclear;
2. O calor produzido é transformado em trabalho mecânico por uma máquina térmica;
3. O trabalho mecânico, produzido pela máquina térmica, é transformado em energia elétrica pelo gerador elétrico.

Assim, em sua maior parte, gera energia através de turbinas movidas a vapor, onde um volume de água é aquecido pelo processo de queima citado e se transforma em vapor, acionando uma máquina giratória chamada turbina e, em seguida, a energia mecânica desta turbina através do processo cinético da rotação vai acionar um gerador elétrico. A eletricidade é transmitida para um transformador para se adequar à voltagem

das linhas de transmissão para as longas distâncias onde serão consumidas. Os subprodutos gerados são a fumaça do combustível queimado, que sai pelo exaustor, e parte do vapor, que é resfriado e sai pelo condensador após a passagem pela turbina (GUILHERME, 2015).

Por ser um sistema complexo, é dividido nos seguintes subsistemas: combustível; lubrificante; controle; conversão de energia; ar; conexão com a rede; resfriamento; exaustão de gases; e água e esgoto. Este processo está melhor representado pela Figura 1 (GUILHERME, 2015).

Figura 1. Esquemático de uma Usina Térmica.



Fonte: GUILHERME (2015).

De acordo com a Figura 1, observa-se também as perdas decorrente do processo de geração de energia, como: as perdas de combustível, que ocorrem no processo de armazenagem e tratamento na usina.; as perdas térmicas, inerentes ao processo de conversão de energia; e as perdas elétricas no gerador e na subestação, que também são inerentes às máquinas elétricas.

Por fim, um dos fatores primordiais na análise de uma Usina Térmica é o seu rendimento, sendo definido pela Equação (1).

$$\eta = \frac{E_s}{E_e} \quad (1)$$

em que:

η : Rendimento da usina;

E_s : Energia na entrada;

E_e : Energia na saída.

2.2. Vantagens

As grandes vantagens da geração térmica são sua potência e flexibilidade de uso, podendo ter sua operação iniciada e interrompida de acordo com a disponibilidade de combustível. As usinas térmicas podem gerar muita energia porque queimam grandes quantidades de combustível, e cada parte desse combustível consome muita energia. Em termos de potência, um quilograma de carvão ou um litro de óleo contém cerca de 30 Megajoules (MJ) de energia, o equivalente a milhares de baterias de 1,5 volt.

Em termos de flexibilidade, há uma dezena de combustíveis usados. Algumas plantas são até multicomcombustíveis. A maioria das usinas térmicas utiliza combustíveis fósseis, que podem ser sólidos (carvão), líquidos (combustível ou óleo diesel) ou gasosos (gás natural). Existem também usinas térmicas que queimam resíduos urbanos ou rurais, incluindo biocombustíveis. As usinas de fusão são um pouco diferentes, pois usam o processo físico de fissão nuclear para gerar o calor necessário para transformar água em vapor, girar uma turbina e iniciar um gerador (CBIE, 2020).

O setor elétrico utiliza usinas combinadas de calor e energia desde o final do Século XIX, quando as turbinas a vapor começaram a ser utilizadas. Naquela época, essa geração era muito ineficiente em comparação com as plantas modernas. Na história do desenvolvimento de usinas de calor e energia, a eficiência da conversão de energia, ou seja, a conversão da energia armazenada na forma físico-química em combustível em eletricidade, foi muito procurada. Usinas simples que queimam carvão, por exemplo, alcançam um percentual de eficiência de geração entre 20% e 38%. Mesmo as usinas de energia mais avançadas que usam outros combustíveis fósseis atingem um máximo de 45% (CBIE, 2020).

Eventualmente, as usinas passaram a adotar um ciclo combinado de geração e aproveitamento do calor dos gases de combustão produzidos durante a combustão do combustível para gerar vapor em outra caldeira. Este outro vapor, por sua vez, aciona outra turbina a vapor, de forma que a usina de CHP possui dois geradores.

Atualmente, as usinas térmicas estão na base dos sistemas de geração de eletricidade de quase todos os países desenvolvidos do mundo e muitos em desenvolvimento. Um dia, seremos capazes de produzir toda a nossa eletricidade de uma forma totalmente eficiente e limpa por meio da Transição de Energia. Até então, as termelétricas são vitais para manter o funcionamento da vida moderna (CBIE, 2020).

2.3. Modelo Matemático da Geração Térmica

Matematicamente, o problema consiste em minimizar um critério escalar de custos ou função objetiva (Equação 2), sendo em função das variáveis de estado, de controle e de perturbação do sistema, observando as restrições de igualdade e desigualdade (Equações 3 e 4) (GIAMPIETRO, 2007).

$$C = C(x, u, p) \tag{2}$$

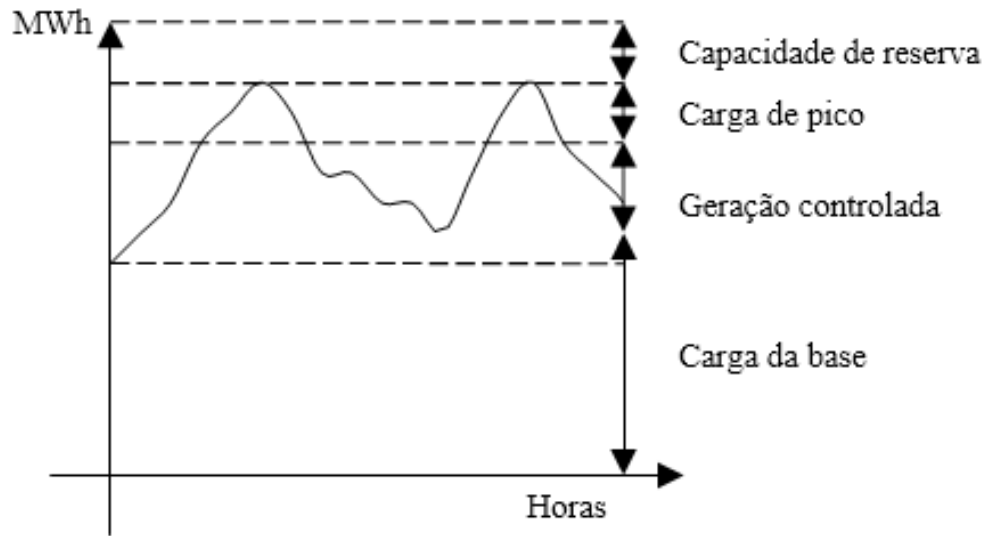
$$h(x, u, p) = 0 \tag{3}$$

$$g(x, u, p) = 0 \tag{4}$$

onde x é a variável de estado, u é a variável de controle, e p é a variável de perturbação do sistema. Nesse caso, as variáveis (x, u, p) e a função objetivo podem ser lineares ou não lineares.

A demanda de carga pode ser representada como a Figura 2, demonstrando a variação de carga em um horizonte de 24 horas. Para suprir essa carga, o despacho da geração é diferente para os pontos da curva, já que as geradoras para a carga base são normalmente os geradores que ficam fornecendo potência constantemente tais como, nuclear e hidrelétrica, mas não necessariamente a plena carga. As cargas de pico são supridas em curto intervalo de tempo e tem como característica a utilização de gerações mais caras (térmicas) (GIAMPIETRO, 2007).

Figura 2. Estratégia de geração dada por uma Curva de Demanda.



Fonte: GIAMPIETRO (2007).

2.3.1. Função Custo

Nas unidades térmicas, o termo "despacho" de geradores é utilizado para a ação de alocar geradores em uma determinada usina como parte de um planejamento para dada quantidade de carga do sistema elétrico. Uma unidade geradora só pode ser despachada em modo binário, ou seja, está em operação ou não. No entanto, sua potência de saída pode ser ajustada para garantir a estratégia de controle ideal, ocorrendo assim, de forma contínua. A estratégia ideal é julgada pela função objetivo dada na qual os controles podem ser combustível, perda ativa, água no tanque, etc. (GSEP, 2020).

Assim, segundo CARVALHO (2017), o custo da produção é uma somatória dos custos de cada gerador, sendo representada pela Equação (5).

$$f_t = \sum_{j=1}^m a_j P_{tj}^2 + b_j P_{tj} + c_j \quad (5)$$

onde P_{tj} é a potência nominal do gerador térmico j , e a_j , b_j e c_j são os coeficientes da unidade geradora j .

2.3.2. Restrições

A restrição de desigualdade (12) considera os limites de potência de cada gerador, pelo fato de que os mesmos não podem operar acima ou abaixo de sua potência nominal.

$$P_{tj,min} \leq P_{tj} \leq P_{tj,max} \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

Apesar da potência reativa e o módulo da tensão na barra de geração não afetarem diretamente o custo, deve-se respeitar as condições limites de geração (GIAMPIETRO, 2007).

2.3.3. Custo Marginal

O custo marginal de um gerador é definido pela derivada da função objetivo, custo de operação (\$/hora) e pela derivada da quantidade produzida/consumida (MWh). Quando os geradores são despachados e o balanço de potência ativa é respeitado, chega-se ao custo marginal para o incremento de 1MW na demanda, chamado de preço spot. Isto acontece quando os geradores são acionados em ordem crescente de custo variável de produção (\$/MWh) até que a produção total seja igual ao consumo total e mais as perdas na transmissão (GIAMPIETRO, 2007).

3. SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA

A geração eólica no Brasil vem aumentando gradativamente no Brasil, e já possui, em seu território, mais de 500 parques eólicos construídos, sendo o 8º no ranking mundial, com uma potência instalada superior a 13 GW (gigawatts) (RIBEIRO, 2022).

A seguir, detalha-se o sistema de geração eólica.

3.1. Princípio de Funcionamento

Na geração eólica, a geração de energia é realizada por meio de turbinas eólicas para converter a energia cinética contida na massa de ar em movimento (vento) em energia mecânica. A energia mecânica de rotação da turbina aciona o gerador de energia elétrica através do eixo e, em seguida, converte-o em energia elétrica por meio de indução eletromagnética que gera corrente alternada.

O design da pá usada para rotação tem características semelhantes às de uma asa de avião ou hélice de helicóptero, capturando a energia do vento e girando o rotor. Por sua vez, o rotor principal traz energia cinética de rotação para a caixa de engrenagens através do eixo e do sistema de frenagem. A caixa de engrenagens tem a função de transformar as rotações que as pás transmitem ao eixo de baixa velocidade (dezenas de rotações por minuto), de modo que chegue ao eixo de alta velocidade as rotações que o gerador precisa para funcionar (mais de mil rotações por minuto). O anemômetro mede a força e a velocidade do vento, enquanto a biruta (ou moinho de vento) mede a direção do vento e é responsável por transmitir ao sistema de controle, de forma que a turbina eólica mantenha uma boa orientação em relação ao vento (CBIE, 2020).

3.2. Vantagens e Desvantagens

A grande vantagem da geração de energia eólica é que ela não emite gases de efeito estufa ou gases tóxicos, nem emite partículas em suspensão ou resíduos radioativos que podem poluir o solo e a água. Dessa forma, os parques eólicos são considerados uma excelente fonte de energia renovável e podem reduzir a queima de combustíveis fósseis.

Em termos de flexibilidade, existem problemas de vento sazonais e intermitentes. Algumas regiões do mundo têm grande potencial de desenvolvimento, enquanto outras não. O problema é que a bateria de geração de energia no período de maior geração de energia não é suficiente para fornecer segurança de abastecimento para consumidores em grande escala. No entanto, próximo aos parques eólicos, é detectada poluição sonora devido ao ruído gerado, e também algumas pessoas consideram a poluição visual, já que grandes parques eólicos requerem grandes áreas para gerar grandes quantidades de eletricidade (CBIE, 2020).

3.3. Incerteza da Velocidade do Vento e a Função de Probabilidade de Weibull

Com relação a variação exercida pelo vento, a função de densidade de probabilidade de Weibull é uma variante da distribuição de probabilidade gama para dois parâmetros, sendo eles k e c , utilizada principalmente em aplicações no aproveitamento de energia eólica. Assim, no sistema de conversão de energia eólica, a função de distribuição de probabilidade $fW(w)$ baseia-se na distribuição de probabilidade de Weibull, permitindo que a variável aleatória (velocidade do vento), seja representada por uma potência de saída (w). Assim, a função de probabilidade compatível ao sistema de conversão de energia eólica é dada pela Equação (7) a seguir (MARTINS; BALBO; JONES, 2019).

$$fW(w) = \frac{klv_i}{c} \left(\frac{(1+\rho l)v_i}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{(1+\rho l)v_i}{c} \right)^k \right) \quad (7)$$

em que:

k : é o fator de forma referente a uniformidade da distribuição dos valores da velocidade do vento (inclinação da distribuição);

c : é o fator de escala relacionado com a velocidade média e qualifica a velocidade do vento onde a usina eólica está instalada;

v_i : velocidade inicial;

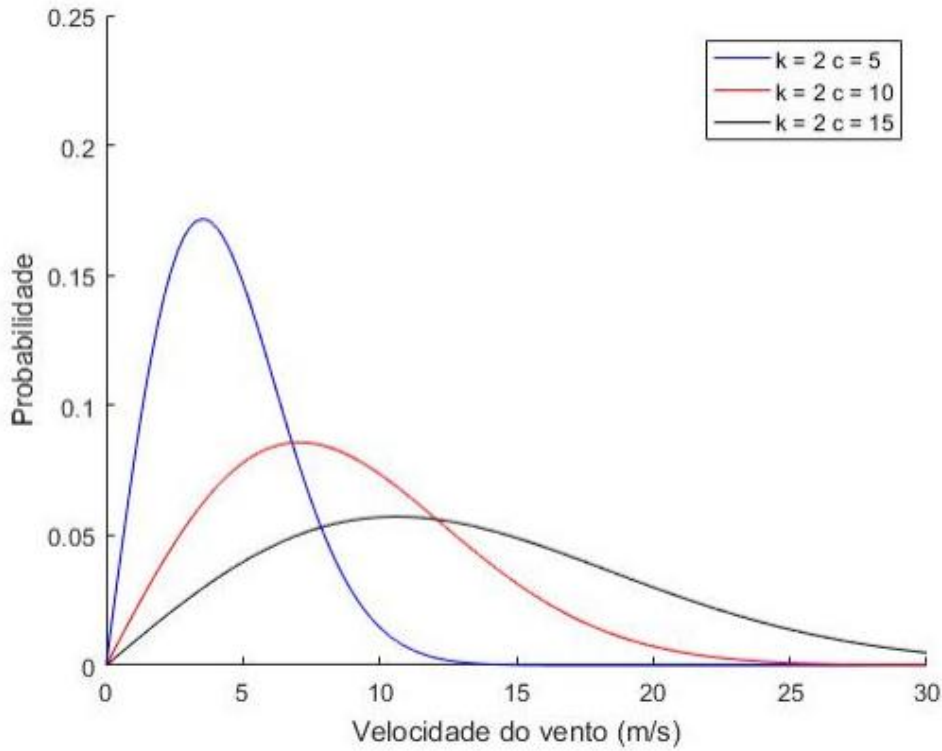
v_r : velocidade nominal;

w_r : potência nominal;

$l = \frac{(v_r - v_i)}{v_i}$: relação entre a faixa linear da velocidade do vento e a velocidade de corte;

$\rho = \frac{w}{w_r}$: relação entre a potência de saída e a potência nominal.

Figura 3. Gráfico da função de densidade de probabilidade de Weibull.



Fonte: SOUZA (2020).

Portanto, o custo da produção da energia eólica é relativamente mais baixo em comparação com as outras fontes, porém, com a incerteza da velocidade do vento disponível, a função econômica da geração de energia eólica (f_e), dependente desta velocidade, é definida por 3 funções custos diferentes, representadas pelas Equações (8), (9) e (10).

$$C_w = d_i \times P_{wi} \quad (8)$$

$$C_p = k_p \int_{P_{wi}}^{w_{ri}} (w - P_{wi}) fW(w) dw \quad (9)$$

$$C_r = k_r \int_0^{P_{wi}} (P_{wi} - w) fW(w) dw \quad (10)$$

em que:

d_i : coeficiente de custo de operação do gerador i , para $i = 1, \dots, n$;

C_w : Custo Linear, relacionado diretamente a produção de energia de cada gerador;

C_p : Custo Penalidade, relacionado a não utilização de toda a energia produzida pela fonte eólica;

C_r : Custo Reserva, relacionado ao não atendimento da demanda esperada pela produção de energia eólica.

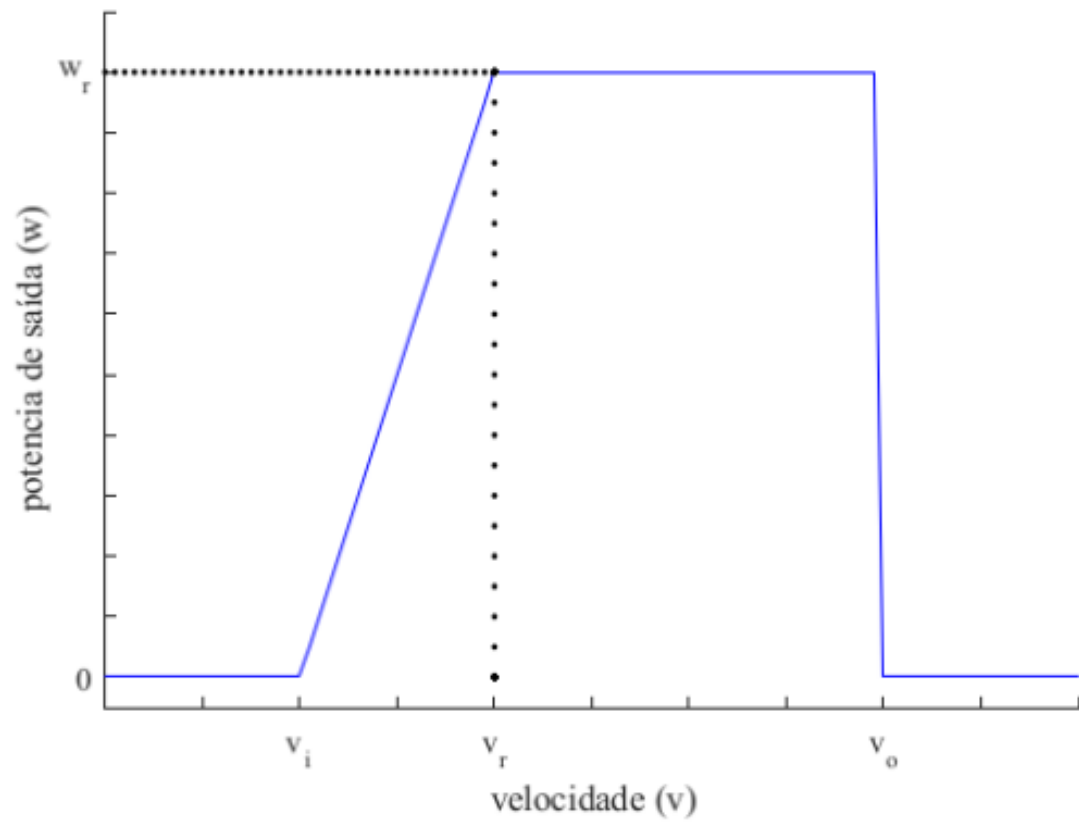
Assim, a função econômica de geração eólica é definida por:

$$f_e = C_w + C_p + C_r \quad (11)$$

Para determinar a potência de saída (w) de geração do sistema, é preciso assumir algumas restrições. Inicialmente, é necessária uma velocidade inicial (v_i), que aumenta no decorrer do tempo até atingir a velocidade nominal do gerador (v_r), fazendo com que este alcance sua potência nominal (w_r). A partir disso, a geração permanece constante até atingir uma velocidade de corte (v_o), a qual é determinada para que o gerador eólico não sofra danos estruturais e, a partir desta, este deixa de produzir energia. Este comportamento é demonstrado pela Figura 3. Temos então que, w é definida por uma transformação linear da função em relação a velocidade do vento, expressa pela Equação (12) (MARTINS; BALBO; JONES, 2019).

$$w = \begin{cases} 0, & \text{para } v < v_i \text{ e } v > v_o \\ w_r \frac{(v - v_i)}{(v_r - v_i)}, & \text{para } v_i \leq v \leq v_r \\ w_r, & \text{para } v_r \leq v \leq v_o \end{cases} \quad (12)$$

Figura 4. Comportamento da potência em relação a velocidade do vento.



Fonte: MARTINS (2019).

4. MODELO MATEMÁTICO DE DESPACHO ECONÔMICO

Com base nos modelos matemáticos de geração térmica e eólica apresentados nos Capítulos 2 e 3, respectivamente, apresenta-se um modelo matemático para o despacho econômico desses sistemas de geração. Tal despacho econômico consiste em minimizar os custos da produção de energia térmica e eólica. Assim, este modelo pode ser representado pela Equação (14).

$$\text{Min } f_o \quad (13)$$

$$f_o = f_t + f_e \quad (14)$$

em que:

f_t : função econômica das usinas térmicas, definida por:

$$f_t = \sum_{j=1}^m a_j P_{tj}^2 + b_j P_{tj} + c_j \quad (15)$$

onde P_{tj} é a potência nominal do gerador térmico j , e a_j , b_j e c_j os coeficientes da unidade geradora j ;

f_e : função econômica das usinas eólicas, definida por:

$$f_e = C_w + C_p + C_r \quad (16)$$

onde C_w , C_p e C_r são respectivamente os custos linear, penalidade e reserva obtidas no Capítulo 4.

As restrições, que satisfazem as demandas necessárias, assim como seus limites de operação:

$$D = \sum_{j=1}^m P_{tj} + \sum_{i=1}^n P_{wi} \quad (17)$$

$$P_{tj}^{min} \leq P_{tj} \leq P_{tj}^{max} \text{ para } j = 1, \dots, m \quad (18)$$

$$0 \leq P_{wi} \leq P_{wi}^{max} \text{ para } i = 1, \dots, n \quad (19)$$

em que:

D : potência demandada a ser atendida em produção de energia usinas térmicas e eólicas em (MW);

P_{tj} : potência gerada pela usina térmica j ;

P_{tj}^{min} e P_{tj}^{max} : limites mínimo e máximo de potência da usina térmica j ;

P_{wi} : potência gerada pela usina eólica i ;

P_{wi}^{max} : limite máximo de potência da usina eólica i .

De acordo com as restrições, a Equação (17) indica que a demanda total do sistema deve ser atendida pelas gerações térmicas e eólicas. A Equação (18) mostra que a potência gerada por cada usina térmica deve operar dentro de seus limites mínimo e máximo de geração. Por fim, a Equação (19) indica que a geração de cada unidade eólica deve operar dentro de seus limites mínimo e máximo de geração.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultados, apresentam-se simulações de quatro cenários criados hipoteticamente. O Objetivo é comparar entre os cenários a influência da geração eólica na geração térmica na questão dos custos. Os dados para as simulações referente às unidades de geração térmica foram retirados de Silva (2006), e das turbinas eólicas de Toledo (2021). Além disso considerou-se um sistema com uma demanda $P_{sistema} = 520$ (MW).

Os quatros cenários adotados foram:

1. **Cenário I:** Sistema abastecido apenas pela Geração Térmica;
2. **Cenário II:** Sistema abastecido por 70% de Geração Térmica e 30% de Geração Eólica;
3. **Cenário III:** Sistema abastecido por 50% de Geração Térmica e 50% de Geração Eólica;
4. **Cenário IV:** Sistema abastecido por 30% de Geração Térmica e 70% de Geração Eólica.

Para os cenários propostos, considerou-se as constantes de Weibull iguais a $k = 2$ e $c = 10$ e a velocidade do vento constante e igual a $v = 5$ m/s. Portanto, a potência de saída do sistema (w_i) se iguala a potência nominal do gerador eólico (P_{wi}). Com isso, conforme a Figura 3, a função de distribuição de probabilidade atinge o valor de aproximadamente $fW(w) = 0,08$. Para tal, calcula-se as novas equações de Custo Penalidade (C_p) e Custo Reserva (C_r) para a condição de velocidade do vento constante.

$$C_p = 0 \quad (20)$$

$$C_r = 0,08 \times k_r \times \frac{P_{wi}^2}{2} \quad (21)$$

As Tabelas 1 e 2 ilustram, respectivamente, os dados dos geradores térmicos e das turbinas eólicas.

Tabela 1. Dados dos geradores térmicos.

Unidade	Potência gerada (MW)		Coeficientes da unidade geradora (\$/MW)		
	P_{tj}^{min}	P_{tj}^{max}	a_j	b_j	c_j
UT1	75	300	0,0021	16,83	684,74
UT2	60	250	0,0042	16,95	585,62
UT3	100	400	0,0018	20,74	213,00
UT4	50	200	0,0034	23,60	252,00

Fonte: SILVA, 2006.

Tabela 2. Dados dos geradores eólicos.

Unidade	Potência gerada (MW)			Coeficientes da unidade geradora (\$/MW)		
	Nº de Turbinas	$P_{wi}^{nominal}$	P_{wi}^{TOTAL}	k_{ri}	k_{pi}	d_i
UE1	53	1,7	90,1	2	1	8,08
UE2	83	1,7	141,1	1	1	8,08
UE3	20	3,0	60	3	1	8,08
UE4	35	3,0	105	2	1	8,08

Fonte: TOLEDO, 2021.

5.1. Cenário I

Para o Cenário I, foi analisado um sistema abastecido apenas por Geração Térmica. Assim, considerou-se os quatros geradores térmicos operando com uma potência constante e igual a $P_{tj} = 130$ (MW) cada, como representado pela Tabela 3.

Tabela 3. Dados dos geradores térmicos para o Cenário I.

Unidade	Potência gerada (MW)	Coeficientes da unidade geradora (\$/MW)		
	P_{tj}^{max}	a_j	b_j	c_j
UT1	130	0,0021	16,83	684,74
UT2	130	0,0042	16,95	585,62
UT3	130	0,0018	20,74	213,00
UT4	130	0,0034	23,60	252,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das potências e coeficientes de operação ilustrados na Tabela 3, foi calculado a função custo (f_t) da geração térmica por meio da Equação (15), e consequentemente, a função custo do sistema como um todo (f_o). O valor encontrado para o referido caso foi de $f_o = 12.104,61$ (\$/h).

5.2. Cenário II

Para o Cenário II, foi analisado um sistema abastecido por 70% de Geração Térmica e 30% de Geração Eólica. Assim, considerou-se três geradores térmicos operando com uma potência constante e igual a $P_{tj} = 125$ (MW) cada, totalizando uma geração térmica de $P_t = 375$ (MW), e dois geradores eólicos também operando com uma potência constante representando uma geração eólica de $P_w = 150,1$ (MW). As especificações dos geradores estão representadas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Dados dos geradores térmicos para o Cenário II.

Unidade	Potência gerada (MW)	Coeficientes da unidade geradora (\$/MW)		
	P_{tj}^{max}	a_j	b_j	c_j
UT1	125	0,0021	16,83	684,74
UT2	125	0,0042	16,95	585,62
UT3	125	0,0018	20,74	213,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5. Dados dos geradores eólicos para o Cenário II.

Unidade	Potência gerada (MW)	Coeficientes da unidade geradora (\$/MW)		
	$P_{w_i}^{TOTAL}$	k_{ri}	k_{pi}	d_i
UE1	90,1	2	1	8,08
UE3	60	3	1	8,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das potências e coeficientes de operação ilustrados nas Tabelas 4 e 5, foi calculado a função custo da geração térmica ($f_t = 8.444,17$ (\$/h)) e a função custo referente a geração eólica ($f_e = 2.294,24$ (\$/h)). Assim, o custo total de geração foi de $f_o = 10.738,41$ (\$/h).

5.3. Cenário III

Para o Cenário III, foi analisado um sistema abastecido por 50% de Geração Térmica e 50% de Geração Eólica. Assim, considerou-se dois geradores térmicos operando com uma potência constante e igual a $P_{tj} = 130$ (MW) cada, totalizando uma geração térmica total de $P_t = 260$ (MW), e três geradores eólicos também operando com uma potência constante representando uma geração eólica de $P_w = 260$ (MW). As especificações dos geradores estão representadas nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Dados dos geradores térmicos para o Cenário III.

Unidade	Potência gerada (MW)	Coeficientes da unidade geradora (\$/MW)		
	P_{tj}^{max}	a_j	b_j	c_j
UT1	125	0,0021	16,83	684,74
UT2	125	0,0042	16,95	585,62

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7. Dados dos geradores eólicos para o Cenário III.

Unidade	Potência gerada (MW)	Coeficientes da unidade geradora (\$/MW)		
	$P_{w_i}^{TOTAL}$	k_{ri}	k_{pi}	d_i
UE1	50	2	1	8,08
UE2	120	1	1	8,08
UE4	90	2	1	8,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das potências e coeficientes de operação ilustrados nas Tabelas 6 e 7, foi calculado a função custo da geração térmica ($f_t = 5.768,23$ (\$/h)) e a função custo referente a geração ($f_e = 3.874,40$ (\$/h)). Assim, o custo total de geração foi de $f_o = 9.642,63$ (\$/h).

5.4. Cenário IV

Para o Cenário IV, foi analisado um sistema abastecido por 30% de Geração Térmica e 70% de Geração Eólica. Assim, considerou-se apenas um gerador térmico operando com uma potência constante e igual a $P_{tj} = 156$ (MW), totalizando uma geração térmica de $P_t = 156$ (MW), e quatro geradores eólicos também operando com uma potência constante representando uma geração eólica de $P_w = 365$ (MW). As especificações dos geradores estão representadas pelas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8. Dados dos geradores térmicos para o Cenário IV.

Unidade	Potência gerada (MW)	Coeficientes da unidade geradora (\$/MW)		
	$P_{t_j}^{max}$	a_j	b_j	c_j
UT1	156	0,0021	16,83	684,74

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9. Dados dos geradores eólicos para o Cenário IV.

Unidade	Potência gerada (MW)	Coeficientes da unidade geradora (\$/MW)		
	$P_{w_i}^{TOTAL}$	k_{ri}	k_{pi}	d_i
UE1	60	2	1	8,08
UE2	130	1	1	8,08
UE3	50	3	1	8,08
UE4	95	2	1	8,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das potências e coeficientes de operação ilustrados nas Tabelas 8 e 9, foi calculado a função custo da geração térmica ($f_t = 3.361,32$ (\$/h)) e a função custo referente a geração eólica ($f_e = 4.692,80$ (\$/h)). Assim, o custo total de geração foi de $f_o = 8.054,12$ (\$/h).

5.5. Análise dos resultados

De acordo com os resultados, comparando os quatro casos, percebe-se o quanto a geração eólica influencia na redução dos custos de geração, no atendimento às demandas do sistema, quando comparado com a geração térmica. Isto fica claro nas simulações, pois quanto maior a penetração de geração eólica no sistema menor é o custo de geração, como por ser visto no caso no caso IV, quando comparado com os demais casos. Além disso, basta destacar que a geração eólica é uma geração limpa e não polui o meio ambiente. No entanto, um fator que não foi avaliado no trabalho é a questão dos custos de implementação das usinas térmicas e turbinas eólicas, e consequentemente avaliar ao retorno financeiro. Esta avaliação poderá ser feita em trabalhos futuros.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo sobre despacho econômico de geração térmica, considerado a presença de fontes de energia eólica. O objetivo foi avaliar os custos de geração do sistema considerando estes dois tipos de geração.

Para avaliar o despacho econômico de geração, foi apresentado um modelo matemático que minimiza os custos de geração, sujeito a um conjunto de restrições técnicas e operacionais de redes elétricas, dos geradores térmicos e das turbinas eólicas.

De acordo com os resultados dos testes apresentados, conclui-se que o modelo matemático apresentado é capaz de avaliar com eficiência o despacho econômico de ambos os tipos de geração, térmica e eólica, respeitando as restrições do problema. No entanto, o ideal seria a implementação de uma técnica de solução capaz de encontrar soluções de qualidade para o problema, através do modelo matemático apresentado, ao invés da criação de cenários hipotéticos. Neste caso, o estudo e implementação de uma técnica de solução para encontrar soluções para o problema de despacho econômico, poderá ser feita como trabalho futuro.

Por fim, destaca-se que o presente Trabalho de Graduação foi de suma importante para o aprimoramento na formação acadêmica, em que se pôde ampliar o leque de conhecimentos sobre os problemas que envolvem os sistemas de distribuição de energia elétrica, em especial o de despacho econômico de geração, bem como adquirir experiência na realização de pesquisas e na escrita de textos técnicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL** (2015). *Resolução Normativa Nº 687/2015*. Agência Nacional de Energia Elétrica, Nov./2015.
- BRITO, J. D. A. J.** (2018). Solução Para O Despacho Econômico Ambiental De Um Sistema De Geração Térmica Por Recozimento Simulado. Tese de Doutorado, Belém, v. 1, n. 1, p. 1-125, jan./2018.
- CARVALHO, A. C. G.; SANTOS, C. E. A.; MOREIRA, Y. B.; JUNIOR, B. F. S.** (2017). Despacho Econômico de Unidades Térmicas Considerando a Presença de Usinas Fotovoltaicas Conectadas ao Sistema de Potência. CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE. Universidade Federal do Piauí, 2017.
- CBIE.** (2022). Como funcionam as Usinas Térmicas? Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/como-funcionam-usinas-termicas/>. Acesso em: 9 fev. 2022.
- CBIE.** (2022). Como funciona a geração eólica? Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/como-funciona-a-geracao-eolica/>. Acesso em: 15 fev. 2022.
- COSSI, A. M.** (2008). PLANEJAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA E BAIXA TENSÃO. Dissertação de Doutorado (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp, 2008
- COSTA E SILVA, Y. F. F, and BUENO. E. C.** (2016). SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM REDES INTELIGENTES: CARACTERÍSTICAS, OPORTUNIDADES E BARREIRAS. *Revista Brasileira de Energia*. Vol. 22, Nº1.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. e ROBBA, E. J.** (2005). INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. editora: Blucher, 344p.
- GIAMPIETRO, D. V.** (2007). Operação Econômica No Curto Prazo Considerando Térmicas A Gás Natural. Departamento De Engenharia Elétrica Da Escola Politécnica, Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D. Sc. Prof. Sergio Sami Hazan, Ph. D. RIO DE JANEIRO, v. 1, n. 1, p. 1-92, jan./2007.

GUILHERME, A. (2022). Geração Térmica. Disponível em: http://www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/intro_termo.php. Acesso em: 15 fev. 2022.

GSEP. (2022). OTIMIZAÇÃO E DESPACHO ECONÔMICO. Disponível em: <http://www.gsep.ene.unb.br/osem/damasceno/ASP-2-2009/Notas-de-aula/Cap7-otimizacao.pdf>. Acesso em: 9 fev. 2022.

HETZER, J. (2008). An economic dispatch model incorporating wind power. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, n. 2, pp. 603-611, 2008.

LIMA, J. C. (2012). IMPACTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS SOBRE AS DECISÕES DAS CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR.

LUCERO, F. A. B. (2003). PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMO BUSCA TAB. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp, 2003.

MARTINS, A. C. S.; BALBO, A. R.; JONES, D. (2018). A modelagem de um problema de despacho térmico e eólico e sua influência na redução da emissão de CO₂, V Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional – ERMAC, Bauru-SP, p. 24-30, 2018.

MIRANDA, I. T. (2012). OTIMIZAÇÃO DO PLANEAMENTO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DISTRIBUÍDO DE ENERGIA EM REDES COM ELEVADA PRODUÇÃO DISPERSA. 2012. 138F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012.

MACHIAVELLI, J. A. (2018). SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO PARA O GERENCIAMENTO DA CURVA DE CARGA. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete-RS, 2018.

RIBEIRO, L. (2022). JORNAL ESTADO DE MINAS GERAIS. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2018/02/26/internas_economia,940112/brasil-ocupa-8-lugar-no-ranking-mundial-de-producao-de-energia-eolica.shtml. Acesso em: 14 de jan. 2022.

RODRIGUES, N. M. (2007). Um algoritmo cultural para problemas de despacho de energia elétrica, M.S.C. dissertation, Dept. Computação. Ciência da Comp., Univ. Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

SILVA, I. C. J.; OLIVEIRA, E. J.; GARCIA, P. A. N.; CARNEIRO, S. J.; PEREIRA, J. L. R.; MARCATO, A. L. M. (2006). DETERMINAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UNIDADES TÉRMICAS PARA O ESTUDO DE UNIT COMMITMENT ATRAVÉS DE UMA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE. Universidade Federal do Rio de Janeiro – RJ. Universidade Federal de Juiz de Fora – MG. Revista Controle & Automação, 2006.

SOUZA, R. R. (2020). O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO PROBABILÍSTICO SOLUCIONADO POR MÉTODOS DE PONTOS INTERIORES/EXTERIORES. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Bauru, Brasil.

TOLEDO, G. F.; LAGE, G. G. (2021). LEVANTAMENTO DA CURVA DE CUSTO DE USINAS EÓLICAS PARA DEFINIÇÃO DE PREÇOS EM CONTRATOS DO PROINFA GERENCIADOS PELA ELETROBRÁS. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de São Carlos, Abril, 2021.