

JOÃO PAULO DE LIMA

Um Método de Busca Tabu Direcionada a Pontos Singulares e o
Problema de Despacho Econômico com Pontos de Válvula

BAURU/SP

Novembro/2019

JOÃO PAULO DE LIMA

Um Método de Busca Tabu Direcionada a Pontos Singulares e o Problema de Despacho Econômico com Pontos de Válvula

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia.

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"- Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Orientadora: Profa. Dra. Edmea Cássia Baptista

BAURU/SP

Novembro/2019

Lima, João Paulo

Um Método de Busca Tabu Direcionada a Pontos Singulares e o
Problema de Despacho Econômico com Ponto de Válvula

45 p.

Orientadora: Profa. Dra. Edmea Cássia Baptista

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Despacho Econômico com Ponto de Válvula. 2. Busca Tabu.
3. Metaheurísticas. 4. Pontos Singulares. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

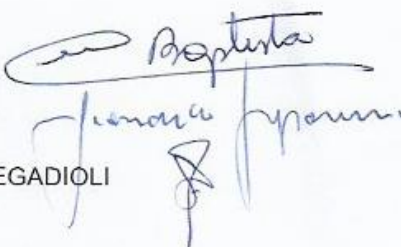
ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JOÃO PAULO DE LIMA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 05 dias do mês de novembro do ano de 2019, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro do DTI / FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profª. Drª. EDMEA CASSIA BAPTISTA - Orientador(a) do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof. Dr. LEONARDO NEPOMUCENO do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Profª. Drª. GABRIELA FERNANDA BREGADIOLI do(a) Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia - ICET / Universidade Paulista - UNIP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de JOÃO PAULO DE LIMA, intitulada **UM MÉTODO DE BUSCA TABU DIRECIONADA A PONTOS SINGULARES E O PROBLEMA DE DESPACHO ECONÔMICO COM PONTOS DE VÁLVULA**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Profª. Drª. EDMEA CASSIA BAPTISTA

Prof. Dr. LEONARDO NEPOMUCENO

Profª. Drª. GABRIELA FERNANDA BREGADIOLI



Dedico aos meus pais Aparecido e Maria Tereza, que não mediram esforços para que eu pudesse chegar até mais essa etapa.

Às minhas irmãs, sobrinhos e todos os meus colegas e amigos que sempre torcem por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tantas graças em minha vida, por me abençoar, me dar tantas oportunidades e colocar pessoas em meu caminho que me incentivam a crescer pessoalmente e profissionalmente.

Aos meus pais, Aparecido de Lima e Maria Tereza Rossi de Lima por sempre terem se dedicado e se esforçado a me dar o melhor estudo e me proporcionar a melhor formação, com tudo isso, agradeço por nunca desistirem de mim e por sempre apoiarem e acreditarem em meu potencial.

Às minhas irmãs Talita, Elaine e Renata e também aos meus sobrinhos Luiz Felipe, Thiago e Miguel por sempre acreditarem em mim.

À minha orientadora Profa. Dra. Edmea Cássia Baptista, pela paciência, sabedoria, atenção e carinho que, sem os quais, tornariam impossível a apresentação deste trabalho. Agradeço, também ao professor Leonardo Nepomuceno por me auxiliar e aconselhar no desenvolvimento do projeto

Agradeço de modo especial a todos os meus amigos que sempre torceram por mim e que, de uma forma ou de outra, sempre estiveram demonstrando sua lealdade e sua fé em mim.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade e a todos os professores, minha gratidão a cada ensinamento e apoio durante esta trajetória.

RESUMO

O problema de Despacho Econômico com Ponto de Válvula é um importante problema relacionado aos Sistemas Elétricos de Potência, que pode ser formulado como um problema de otimização não linear, não convexo e não diferenciável, o que dificulta sua resolução através de métodos exatos. Pode-se observar na literatura que diversos métodos heurísticos são propostos para a resolução do mesmo, os quais são eficientes e com um baixo custo computacional. Uma das desvantagens desses métodos é o tamanho do espaço de busca para realizar tais testes. Pesquisas realizadas apontam que, na grande maioria das vezes, os pontos ótimos para o problema de Despacho Econômico com Ponto de Válvula se encontram em pontos nos quais a função modular, presente na formulação do problema, possui valor nulo, ou estão na região destes e tais pontos são denominados de Pontos Singulares. Neste trabalho, com o objetivo de propor um método heurístico com espaço de busca reduzido, é proposto um método de Busca Tabu direcionada a Pontos Singulares, o qual utiliza o método de Busca Tabu para percorrer os pontos nos quais a função modular se anula. O método se mostra eficiente para problemas de DEP de 3, 13 e 40 geradores, com valores próximos aos valores ótimos obtidos por métodos determinísticos e com baixo custo computacional.

Palavras-chave: Despacho Econômico com Ponto de Válvula, Busca Tabu, Metaheurísticas, Pontos Singulares.

ABSTRACT

The problem of Economic Load Dispatch with Valve Point (EDVP) is an important problem related to Electric Power Systems, that can be formulated as a non-linear, non-convex and non-differentiable optimization problem, that difficulties resolution through deterministic methods. We can observe in the literature that many heuristic methods are proposed for the resolution of the same, being efficient with a low computational cost. One of the advantages of this methods is the size of the search space necessary to perform the tests. Researches points out that, in most cases, the optimal points for the Economic Load Dispatch with Valve Point problem are at points where the modular function present in the problem formulation has zero value, or in the region thereof, these points are called Singular Points. In this work is proposed, with the objective to propose a heuristic method with the search space reduced, a Tabu Search Directed to Singular Point Search, which uses the tabu search method to the points in which the modular function cancels out. The method is efficient for resolution of Economic Load Dispatch with Valve Point problems of 3, 13 and 40 generators units, with values close to optimal obtained by deterministic methods values and low computational cost.

Key words: Economic Load Dispatch with Valve Points, Tabu Search, Metaheuristics, Singular Points.

Sumário

Introdução.....	1
Capítulo 1 O Problema de Despacho Econômico.....	5
1.1 Apresentação do Problema	5
1.2 Despacho Econômico Clássico.....	6
1.3 Despacho Econômico com Ponto de Válvula.....	8
Capítulo 2 Uma Revisão Bibliográfica	10
2.1 Histórico.....	10
Capítulo 3 A Busca Tabu Direcionada a Pontos Singulares.....	22
3.1 Busca Tabu Clássica.....	22
3.2 Busca Tabu para Problemas Restritos.....	24
3.3 Busca de Valores Singulares.....	25
Capítulo 4 Testes e Resultados	30
4.1 Sistema com 3 geradores.....	30
4.2 Sistema com 13 geradores.....	32
4.3 Sistema com 40 geradores.....	34
Conclusões	39
Referências.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Participação de Hidrelétricas e Termoelétricas a gás natural na matriz energética brasileira de 1970 até 2014.....	2
Figura 2: Matriz energética brasileira em ANEEL(2018).....	3
Figura 3: Curva de custo de geração em função da potência de saída.....	7
Figura 4: Curva de custo de geração em função da potência de saída com ponto de válvula	9
Figura 5: Representação gráfica da função objetivo do problema de DEPV com 3 Geradores.....	31
Figura 6: : Representação gráfica das Curvas de Nível da função objetivo do problema de DEPV com 3 geradores	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados do sistema com 3 geradores.....	30
Tabela 2	Resultados dos testes do método BTDPS do problema DEPV associado a um sistema de 3 geradores.....	32
Tabela 3	Dados do sistema com 13 geradores.....	33
Tabela 4	Resultados dos testes do método BTDPS do problema DEPV associado a um sistema de 13 geradores.....	33
Tabela 5	Dados do sistema com 40 geradores.....	35
Tabela 6	Resultados dos testes do método BTDPS do problema DEPV associado a um sistema de 40 geradores.....	36

Introdução

A utilização de energia elétrica é fundamental para o funcionamento de diversas áreas e a sua garantia de seu suprimento está diretamente ligada com a confiabilidade do sistema elétrico. Ao sistema de geração cabe garantir o atendimento de sua demanda, dessa forma, um sistema de geração composto somente por Usinas Hidrelétricas (UHEs) tem sua operação dependente de afluentes, comprometendo a confiabilidade por ser um aspecto de difícil controle. Porém a diversificação da matriz energética através da presença de Usinas Termelétricas (UTES), as quais podem ser utilizadas de forma complementar, assegura a continuidade de energia e aumenta a confiabilidade do sistema, no que se refere à geração (SILVA, 2014).

É possível afirmar que o desenvolvimento da sociedade atual é devido, em grande parte, à utilização da energia elétrica. A razão entre o consumo de energia e o crescimento econômico é discutida em vários indicadores sociais e verifica-se que a sociedade que expande seu conhecimento sobre fontes energéticas, adquire um maior controle sobre a natureza e extrai dela recursos de forma sustentável, visando uma melhoria na qualidade de vida. O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) tem passado por transformações devido ao processo de transição de modelo estrutural. As bases desse novo modelo consistem em diversos fatores, entre eles o planejamento de longo prazo do SEB, por meio da Empresa de Pesquisa Energética. O planejamento da Matriz Elétrica Brasileira (MEB) é de extrema importância, afim de se alcançar uma matriz diversificada, e assim, evitar problemas de sazonalidade.

A vantagem da utilização de UHEs está relacionada ao custo de operação, pois estas unidades demandam apenas os custos de manutenção e operação. Já a utilização de UTES eleva os custos de geração, pois, além de terem os mesmos custos presentes nas UHEs, há o custo do combustível, por exemplo: gás, carvão e óleo. Portanto, faz-se necessário otimizar a escolha da Unidade Geradora de Energia (UGE) que irá operar, o tipo de combustível utilizado e a geração de cada termoeletrica, pois estes fatores impactam diretamente no custo total do sistema de geração.

O sistema elétrico brasileiro é um sistema hidrotérmico de grande porte com predominância de geração hidrelétrica. O parque gerador possui 141.053 MW de capacidade instalada, sendo o total composto por 60% de hidrelétricas e 30% de

termelétricas englobando a biomassa (9%), gás natural (8%), óleo diesel (3%), óleo combustível (2%), carvão (2%), outros combustíveis fósseis (4%) e usinas nucleares (1%). A geração eólica e solar corresponde a 9% da potência instalada (ANEEL, 2018).

As usinas térmicas exercem um papel de complementação da geração hidrelétrica e oferecem flexibilidade operativa ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Essas usinas funcionam como um seguro nos períodos de escassez hidrológica, contribuindo para a garantia do suprimento de energia. Em razão das suas características técnicas e econômicas, particularmente a geração termelétrica a gás natural também tem sido associada à expansão das fontes renováveis intermitentes, como eólica e solar, para ser acionada nos períodos de indisponibilidade da geração a partir dos ventos e do sol.

Historicamente, as usinas hidrelétricas têm a maior contribuição na geração de energia elétrica no País, conforme mostra a Figura 1. Nas décadas de 1970, 1980 e 1990, estas usinas tiveram participação média de 92%. Mas, a partir do ano 2000, a contribuição da geração hidráulica manteve-se abaixo dos 90% e, desde 2012, está abaixo de 80%. Em 2018, 60% da eletricidade consumida no país foi gerada a partir de usinas hidrelétricas (Figura 2).

Figura 1: Participação de Hidrelétricas e Termoelétricas a gás natural na matriz energética brasileira de 1970 até 2014. Fonte: Toalmasquin (2016).

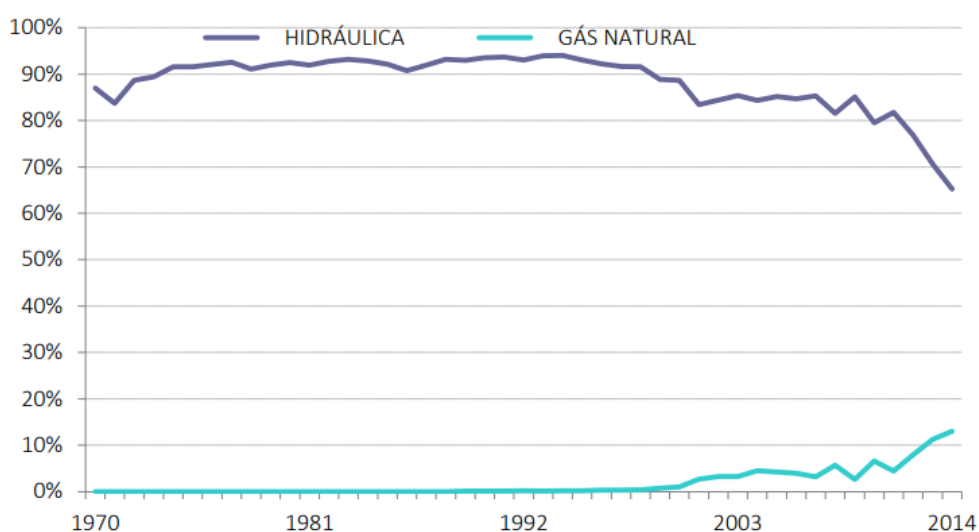
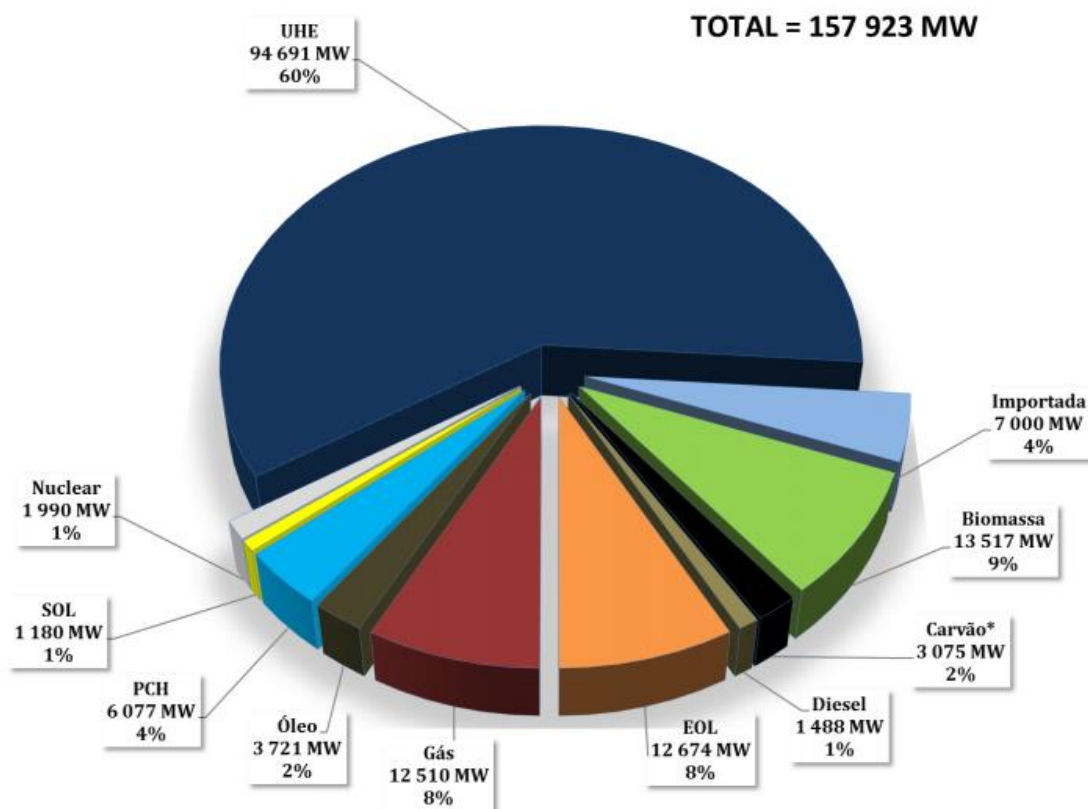


Figura 2: Matriz energética brasileira em 2018. Fonte: ANEEL (2018).



Devido à variedade de combustíveis que são utilizados em unidades termoeletricas, existem diversos custos de geração, dessa forma, faz-se necessário a otimização do despacho de cada uma das unidades geradoras envolvidas no processo, cujo objetivo é a redução do custo de operação total do sistema.

A solução do Despacho Econômico (DE) é importante para o planejamento e a operação do sistema elétrico de potência (SEP), pois consiste no atendimento à demanda ao menor custo de geração do sistema. Portanto, ao se resolver o problema do DE com características reais, faz-se necessário a utilização de técnicas de otimização associadas à sua formulação matemática que permita contornar o problema de descontinuidade e da não convexidade inerente ao problema. Tais estratégias podem se basear em metodologias determinísticas, como em Silva (2014), mas também podem se basear em heurísticas e em metaheurísticas, que são capazes de produzir boas soluções em um

tempo de processamento reduzido.

O problema de DE tem por finalidade minimizar o custo de geração da energia, respeitando que o somatório da energia gerada seja igual à potência demandada e os limites máximos e mínimos das unidades geradoras. Dentre as variantes desse problema, há o Despacho Econômico com Ponto de Válvula (DEPV), no qual são consideradas as necessidades de abertura e fechamento das válvulas de admissão de vapor nos geradores térmicos dos equipamentos, obtendo, assim, um modelo para o DEPV não linear, não convexo e não diferenciável.

Dadas as dificuldades encontradas pelos métodos determinísticos para a resolução desse tipo de problema, na literatura pode-se encontrar vários trabalhos abordando o DEPV através de métodos heurísticos, como Busca Tabu (Glover, 1989), Enxame de Partículas (Meng, 2010), Algoritmos Genéticos (Walters, 1993), Colônia de Formigas (Socha; Dorigo, 2008), entre outros, conforme será abordado com mais profundidade na revisão bibliográfica.

Entre essas propostas de resolução do DEPV, destacamos, neste trabalho, a abordagem realizada em Zhan *et al.* (2015), a qual indica que, na grande maioria das vezes, os pontos ótimos do DEPV estão na região, ou até mesmo em pontos nos quais a função modular se anula, denominados pelo autor como pontos singulares. Em seu artigo, Zhan desenvolve um método de busca por esses pontos singulares, diminuindo o espaço de busca de um algoritmo com a abordagem determinística, tendo resultados eficientes se comparados com outros métodos.

Propõe-se, assim, neste trabalho, uma combinação entre a proposta apresentada em Zhan *et al.* (2015) e o algoritmo de Busca Tabu de Glover (1989), o qual explora, não toda a região de busca, mas apenas os pontos singulares, o qual é denominado Busca Tabu Direcionada a Busca de Pontos Singulares (BTDPS).

Este trabalho encontra-se dividido como segue: no Capítulo 2 é descrito o problema de despacho econômico com ponto de válvula; no Capítulo 3, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a resolução do problema em questão; no Capítulo 4 é apresentado o algoritmo de Busca Tabu Direcionada a Pontos Singulares; os testes e resultados numéricos são apresentados no capítulo 5; e, finalmente, tem-se as conclusões.

Capítulo 1

O Problema de Despacho Econômico

Neste capítulo, é apresentado o problema de despacho econômico e suas variantes. O DE é um problema de otimização que permite minimizar o custo dos combustíveis empregados na geração termelétrica tendo em vista as restrições operativas de demanda e capacidade dos geradores e, portanto, é de grande importância para os operadores do Sistema.

1.1 Apresentação do Problema

O problema de despacho econômico, proposto por Steinberg e Smith (1943), pode ser definido como o processo de alocação ótima das demandas de eletricidade entre as unidades geradoras disponíveis, de modo que as restrições operacionais sejam satisfeitas ao mesmo tempo em que se minimizam os custos de geração.

O PDE clássico é modelado como um problema de otimização matemática não-linear, cujas restrições estão relacionadas essencialmente aos limitantes de potência gerada para cada uma das unidades geradoras e à satisfação da demanda. Modelos mais complexos do PDE podem incluir outras restrições, como restrições de transmissão, relacionadas ao fluxo de potência nos ramos do sistema.

A questão econômica da geração, entretanto, não é recente. De acordo com Happ (1977), o despacho econômico data do início dos anos 1920, ou até mesmo antes, quando engenheiros preocupavam-se com a alocação econômica da geração ou como dividir adequadamente a carga entre as unidades geradoras disponíveis.

Até o período anterior ao ano de 1930, vários métodos para despacho eram utilizados. Dentre eles, destaca-se o carregamento por ordem de mérito, que se baseava no carregamento sucessivo das unidades mais eficientes (Happ, 1977). Isto é, segundo esse critério para despacho, solicita-se potência do gerador mais eficiente em termos de

custo até que este atinja o limite de geração e, então, passa-se para o próximo gerador mais eficiente. A falha deste método para minimizar os custos reside no fato de que se desconsidera que a eficiência de uma unidade geradora é uma função da potência gerada.

No início de 1930, entretanto, o método supracitado passou a ser substituído pelo critério dos custos incrementais iguais, devido aos resultados mais econômicos que este último apresentava. A utilização do custo incremental considera que a eficiência é função da potência gerada, e que o ponto de menor custo é aquele em que os custos incrementais de todas as unidades geradoras são iguais. Isto é, a ideia do método dos custos incrementais é que o carregamento das unidades geradoras seja realizado de modo que o próximo aumento incremental de carga no sistema deve ser feito alocando-o na unidade geradora com menor custo incremental, o qual é determinado medindo a derivada da curva de custo.

Na sessão 1.2 apresenta-se a formulação do problema de DE clássico.

1.2 Despacho Econômico Clássico

Dentro da área de sistemas elétricos de potência um importante problema é o cálculo do DE, isto é determinar qual deve ser a geração de cada unidade geradora. Um dos modelos de DE é o que se refere ao de minimização de custos da produção, utilizado nos mercados de energia do tipo regulado. O modelo de DE abordado neste trabalho contém unidades geradores do tipo termelétrica e é apresentado em (1.1a) - (1.1c).

$$\underset{Pg}{\text{Minimizar}} \quad \sum_{i \in G} a_i Pg_i^2 + b_i Pg_i + c_i \quad (1.1a)$$

$$\text{sujeito a :} \quad \sum_{i \in G} Pg_i = Pd \quad (1.1b)$$

$$Pg_i^{\min} \leq Pg_i \leq Pg_i^{\max} \quad \forall i \in G \quad (1.1c)$$

em que:

- Conjunto:

G : conjunto das unidades de geração termelétrica do sistema;

- Parâmetros:

Pg^{min} , Pg^{max} : vetor dos valores de potência gerada mínima e máxima, respectivamente, associados à potência ativa gerada pela unidade termelétrica i ;

Pd : potência ativa demandada do sistema;

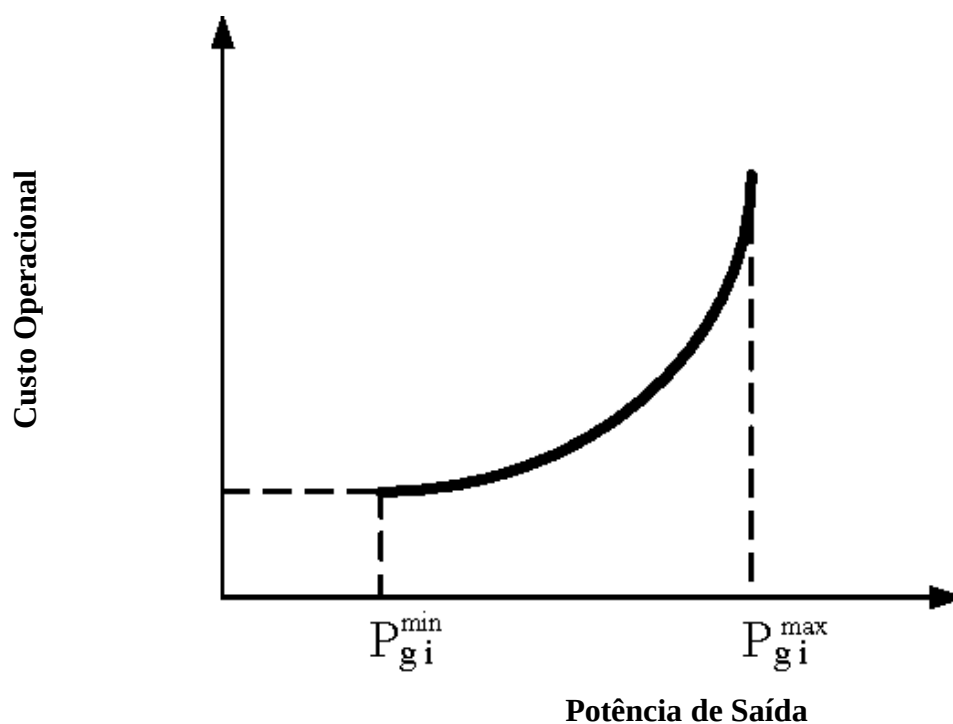
a_i , b_i , c_i : parâmetros da função de custo de produção da unidade de geração termelétrica i ;

- Variáveis:

Pg_i : potência ativa gerada pela unidade de geração termelétrica.

Como já citado, o modelo (1.1a)-(1.1c) tem como objetivo a minimização dos custos de produção. Em usinas termelétricas o custo de operação é expresso em função da potência, sendo o custo do combustível o principal fator para as usinas de combustíveis fóssil (GRAINGER, 1994). Como apresentado na Figura 3, o custo não é uma função linear da potência de saída, e sim uma função quadrática, como formulado em (1.1a).

Figura 3: Curva de custo de geração em função da potência de saída. Adaptado: Grainger (1994).



A restrição (1.1b) impõe que o somatório da produção de energia de todas as usinas deve ser igual a potência demandada do sistema e a restrição (1.1c) impõe limites mínimos e máximos de geração para cada usina, sendo tais limites referentes às restrições físicas de cada unidade.

1.3. Despacho Econômico com Ponto de Válvula

Uma variante do modelo (1.1a)-(1.1c) é apresentado em (1.2a)-(1.2c), denominado despacho econômico com ponto de válvula.

$$\underset{Pg}{\text{Minimizar}} \quad \sum_{i \in G} a_i Pg_i^2 + b_i Pg_i + c_i + |e_i \sin(f_i(Pg_i^{\min} - Pg_i))| \quad (1.2a)$$

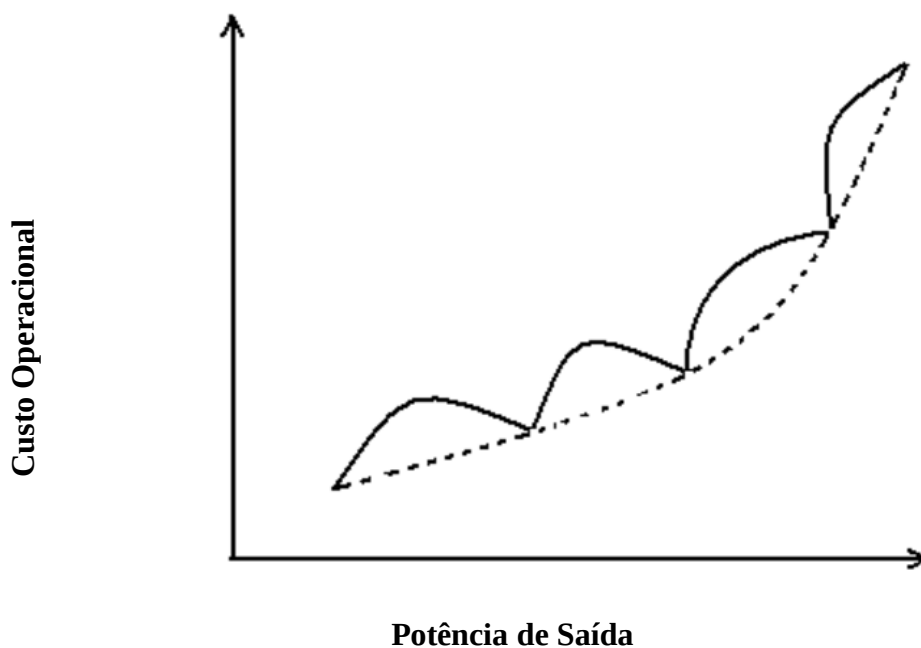
$$\text{sujeito a :} \quad \sum_{i \in G} Pg_i = Pd \quad \forall i \in G \quad (1.2b)$$

$$Pg_i^{\min} \leq Pg_i \leq Pg_i^{\max} \quad \forall i \in G \quad (1.2c)$$

em que e_i e f_i são parâmetros da função custo,

Durante a operação das usinas termelétricas existem momentos em que são acionadas válvulas para o aumento da produção. Nesses momentos de acionamento existe um aumento do consumo de combustível, tornando a função de custo não mais quadrática como apresentando na Figura 2 e formulado em (1.1a). A Figura 4 apresenta o comportamento da potência de saída em função da entrada de combustível considerando o ponto de válvula.

Figura 4: Curva de custo de geração em função da potência de saída com ponto de válvula. Adaptado: Sum-im (2015).



Ao considerar o ponto de válvula no modelo, o termo modular é acrescentado à função objetivo (1.1a), resultando na função (1.2a), que apresenta não linearidades, não convexidades e não diferenciabilidade, o que dificulta, ou até mesmo impossibilita a utilização dos métodos determinísticos para a sua resolução. Métodos heurísticos, podem ser, nesse caso, ótimas opções para abordar o problema. Neste trabalho propõe-se um método heurístico para a resolução do problema (1.2a)-(1.2c).

Capítulo 2

Uma Revisão Bibliográfica

Neste capítulo descreve-se alguns trabalhos que foram desenvolvidos visando solucionar o problema de DE com o objetivo de apresentar metodologias determinísticas e heurísticas já aplicadas a esse problema.

2.1 Histórico

Por volta do ano de 1931, a ideia do critério dos custos incrementais iguais já estava bem estabelecida, de modo que se concluiu que para que a geração fosse econômica, os custos incrementais de todas as unidades geradoras deveria ser igual. No intuito de compreender do ponto de vista teórico essa escolha para as unidades geradoras, um passo foi dado no trabalho de Steinberg & Smith (1943), quando investigaram e mostraram que este critério era válido para a obtenção do custo mínimo, no caso de duas unidades geradoras.

A partir de então, muitos trabalhos se dedicaram à sua resolução. Neste trabalho serão apresentados alguns desses métodos a partir do ano de 1980. Uma revisão sobre o período anterior a este pode ser encontrada em Silva (2014).

No trabalho de Fahmideh-Vojdani e Galiana (1980), é apresentada uma maneira de resolver problemas de DE com função objetivo quadrática, com restrição de atendimento de demanda e limites de geração. Os autores apresentam um contra exemplo mostrando que o procedimento de despacho realizado à época, fixando as variáveis que violam os limites no valor mínimo ou máximo, de acordo com a violação ocorrida, pode levar a um despacho de geração inadequado. Os autores ainda apresentam um teorema e um método que permite a realização do despacho de maneira ótima, bem como uma modificação do mesmo para o caso em que as perdas também são consideradas.

Aoki e Satoh (1984), apresentam três algoritmos para resolução do DE clássico, a saber: Programação Quadrática Paramétrica (PQP), Programação Quadrática Paramétrica

Modificada (PQPM) e Programação Quadrática Recursiva (PQR). Enquanto o método PQP pode ser aplicado à função objetivo de custo aproximada por segmentos lineares, os outros dois métodos, PQPM e PQR, podem tratar de aproximações da função objetivo por segmentos quadráticos. Os autores aplicam os métodos propostos a um Sistema com 120 barras, 150 ramos e 31 geradores, sendo que utilizaram cinco segmentos para aproximar a função custo dos geradores. Além disso, os autores apresentam breves considerações a respeito dos autovalores da matriz de coeficientes B utilizada.

Somuah e Khunaizi (1990) resolveram o problema de despacho econômico dinâmico. A formulação dos autores propunha a utilização de limites de rampa como restrições intertemporais, restrições de reserva de segurança buscando evitar a sobrecarga de algumas linhas monitoradas e de maior importância. Para resolver o problema, os autores aplicaram uma relaxação nas restrições de rampa, solucionando um problema de despacho econômico estático para cada intervalo, através de programação quadrática. Em seguida, um problema de programação linear é formado e resolvido, de modo a considerar as restrições de limite de rampa, mediante a linearização em torno das soluções do caso estático, buscando-se na decomposição de Dantzig-Wolfe.

Três anos depois, no trabalho de Walters e Sheble (1993), o problema de DE com ponto de carregamento de válvula e perdas representadas através de coeficientes B é resolvido através de um algoritmo genético. Para minimizar a função, os autores empregaram os operadores genéticos de reprodução, crossover e mutação. Os autores destacam que a escolha adequada dos parâmetros é importante para a execução do algoritmo, a fim de que ele possa explorar adequadamente o espaço de busca. Em particular, o tamanho da população deve ser grande o bastante para que ocorram informações genéticas que permitam uma varredura eficiente desse espaço.

Djukanovic *et al.* (1996), propõem a aplicação de redes neurais artificiais para o despacho de geração de unidades térmicas em tempo real. A abordagem pode levar em conta requisitos operacionais e perdas na transmissão de energia. O DE proposto utiliza uma rede neural artificial (RNA) para a geração de fatores de penalidade, dependendo das potências do gerador de entrada e da mudança de carga do sistema identificado. Em seguida, algumas iterações adicionais são realizadas dentro de um procedimento de computação iterativo para a solução de equações de coordenação, usando-se fatores de penalidade, de barreira e um método de Newton-Raphson. Uma técnica de coordenação

para o DE ambiental de sistemas de energia térmica pura, baseada na teoria de redes neurais é introduzida. Os resultados numéricos em dois exemplos de teste mostram que o algoritmo proposto pode desenvolver de forma eficiente e precisa as trajetórias de saída do gerador, aplicando as previsões da rede neural dos padrões de carga do sistema de potência.

No mesmo ano, Yang *et al.* (1996), em seu trabalho, desenvolve um algoritmo eficiente de DE com funções de custo não diferenciáveis. Baseado em programação evolucionária (PE), o novo algoritmo é capaz de determinar as soluções de despacho ótimas globais ou quase globais nos casos em que os algoritmos clássicos baseados em Lagrange deixam de ser aplicáveis. A eficácia do novo algoritmo é demonstrada em dois exemplos de sistemas de potência e comparada com a da programação dinâmica, simulated annealing e algoritmos genéticos. A aplicação prática do algoritmo desenvolvido é adicionalmente verificada no sistema de potência de Taiwan (Taipower). Resultados numéricos mostram que o algoritmo ED baseado em PE proposto pode fornecer soluções de despacho precisas dentro de um prazo razoável para qualquer tipo de função de custo de combustível.

No trabalho de Lin *et al.* (2002), foi desenvolvido um algoritmo de Busca Tabu (BT) aprimorado para DE com funções de custo não contínuas e não-suaves. A BT emprega um sistema de memória flexível para evitar o aprisionamento em um mínimo local e desenvolve a ideia de vizinhança para adequar a otimização. A nova abordagem estende o algoritmo de BT clássica para o problema de otimização de valor real e aplica o paralelismo para enfraquecer a dependência da taxa de convergência do algoritmo de busca tabu modificada (BTM) em relação à solução inicial inicial. A eficácia do método foi comparada a métodos convencionais. Os resultados mostram que o algoritmo proposto pode fornecer soluções precisas com desempenho razoável e tem um grande potencial para outras aplicações no sistema de energia.

Ling *et al.* (2003) apresentam um algoritmo genético aprimorado para o DE de carga com carregamento de ponto de válvula. Novas operações de cruzamento e mutação são introduzidas. As soluções do despacho econômico de carga com cargas de ponto de válvula abaixo de três casos são resolvidas pelo algoritmo genético melhorado. Os resultados dos testes são dados e comparados com os de diferentes algoritmos genéticos publicados. É mostrado que o algoritmo genético melhorado proposto tem um

desempenho melhor do que os algoritmos genéticos ao qual foi comparado.

Em Victoire e Jeyakumar (2004), é apresentado um método inovador e eficiente para resolver o problema de DEPV, integrando a técnica de otimização de enxame de partículas (PSO) com a técnica de programação quadrática sequencial (PQS). O PSO é o principal otimizador e o PQS é usado para ajustar todas as melhorias na solução da execução do PSO. O PQS é um método de otimização não linear que inicia a partir de um único ponto de pesquisa e localiza uma solução usando as informações de gradiente. A eficácia do método proposto é validada através da realização de testes exaustivos em três diferentes problemas DEPV. O método proposto supera e fornece soluções de qualidade em comparação com outras técnicas existentes para este problema, considerando os efeitos do ponto de válvula.

Após dois anos, Coelho e Mariani (2006) propõem um método baseado em algoritmos evolutivos (AE), os quais são métodos heurísticos que produziram resultados promissores para resolver problemas de otimização não-lineares, não diferenciáveis e multimodais na área de sistemas elétricos de potência. O algoritmo de evolução diferencial (ED) é um algoritmo evolucionário que utiliza uma abordagem menos estocástica para a resolução de problemas do que os algoritmos evolucionários clássicos, como algoritmos genéticos, programação evolucionária e estratégias de evolução. A ED também incorpora uma maneira eficiente de mutação adaptativa usando pequenas populações. As vantagens da ED são sua estrutura simples, facilidade de uso, propriedade de convergência, qualidade da solução e robustez. Este trabalho propõe uma nova abordagem para resolver problemas econômicos de despacho de carga com efeito de ponto de válvula. O método proposto combina o algoritmo DE com o gerador de seqüências de caos e a técnica de programação quadrática sequencial (PQS) para otimizar o desempenho de problemas econômicos de despacho. A ED com seqüências de caos é o otimizador global, e a PQS é usado para ajustar sua execução de maneira sequencial. A metodologia combinada e suas variantes são validadas para dois sistemas de teste que consistem em 13 e 40 unidades geradoras. O método combinado proposto supera outros algoritmos de última geração da época na solução do problema abordado.

Em Ravi *et al.* (2006), o problema de DEPV é resolvido com a utilização de um algoritmo baseado programação evolutiva. Neste algoritmo, uma população inicial de vetores pais é determinada e, sobre esta população, vetores filhos são determinados pela

escolha do melhor filho gerado por mutação Gaussiana ou mutação de Cauchy. Em um ciclo a parte do método, os coeficientes-B e a função de perdas são atualizados utilizando um algoritmo de fluxo de potência. Os testes foram realizados com sistemas de 6, 14 e 30 geradores, mostrando a eficiência do método proposto.

Yuan *et al.* (2008) propõem um método para a resolução do problema de DE dinâmico com carregamento de válvula. Este artigo apresenta uma abordagem de evolução diferencial no qual técnicas de comparação de seleção baseadas em viabilidade e regras de busca heurística são planejadas para lidar com as restrições de forma eficaz. Em contraste com o método da função de penalidade, o método de tratamento de restrições não requer fatores de penalidade nem nenhum parâmetro extra e pode guiar rapidamente a população até a região viável. Especialmente, podem ser satisfeitas as restrições de igualdade do problema com precisão. Além disso, os efeitos de dois parâmetros cruciais no desempenho da EV para o problema de DE também são estudados. A exequibilidade e eficácia do método proposto é demonstrada para o exemplo de aplicação e os resultados do teste são comparados com os de outros métodos relatados na literatura. Mostra-se que o método proposto é capaz de produzir soluções de maior qualidade.

Selvakumar e Thanushkodi (2009) propuseram um algoritmo heurístico denominado Otimização por Exame Civilizado (OEC), o qual combina o Algoritmo de Civilização da Sociedade (ACS) com Otimização por Exame de Partículas (OEP). No ACS, os indivíduos são agrupados em pequenas sociedades, sendo que os indivíduos com melhores resultados em cada grupo atuam como “líderes”. Este algoritmo é baseado em dois aspectos sociais: uma civilização progride devido à cooperação entre as sociedades (grupos menores) e os indivíduos evoluem progridem devido a interação com outros indivíduos. Neste trabalho foram realizados testes para problemas de DE de grande porte, com até 200 unidades geradoras.

Em Yan *et al.* (2009) foi utilizado um método híbrido baseado em evolução diferencial (ED). Na resolução do despacho dinâmico com ponto de válvula e restrições de limite de rampa. O método foi construído juntamente com o r-algoritmo de Shor, que é utilizado ao final do processo para refinar a solução obtida pelo método de ED. O r-algoritmo de Shor é um método que, através de subgradientes, é utilizado na resolução de problemas de otimização não diferenciáveis. Neste trabalho, os testes foram realizados

para sistemas com 10 unidades geradoras e com horizonte de planejamento de 24 horas, obtendo, nestes testes, soluções de boa qualidade.

Hemamalini e Simon (2009) propõem um método Lagrangiano baseado na série Maclaurin para resolver problemas DE não convexos e não lineares. Neste método, a função senoidal retificada é representada pela expansão da série senoidal de Maclaurin e é resolvida pelo método Lagrangeano. O problema é resolvido iterativamente usando o método de iteração lambda. A metodologia proposta é validada usando o sistema de teste IEEE 30-bus. Além disso, a eficácia do novo algoritmo é demonstrada com 3, 13 e 40 sistemas de teste de geradores disponíveis na literatura. Os resultados obtidos comprovam a aplicabilidade do método proposto para resolver problemas de DE com funções de custo não suaves, a par com técnicas de busca estocástica geralmente utilizadas.

Pothiya *et al.* (2010) apresenta uma abordagem de otimização inovadora e eficiente baseada na otimização de colônias de formigas (ACF) para resolver o problema do despacho econômico (ED) com funções de custo não suaves. Para melhorar o desempenho do algoritmo ACF, são apresentadas três técnicas adicionais, isto é, lista de prioridades, redução de variável e recurso de zoom. Para mostrar sua eficiência e eficácia, o método proposto é aplicado a dois tipos de problemas de DE com funções de custo não suaves. Em primeiro lugar, o problema de DE com efeitos de carga de ponto de válvula consiste em 13 e 40 unidades geradoras. Em segundo lugar, o problema do DE considerando os múltiplos combustíveis consiste em 10 unidades. Posteriormente, os resultados do ACF proposto são comparados com os das abordagens heurísticas convencionais. Os resultados experimentais mostram que a abordagem proposta é comparativamente capaz de obter soluções de maior qualidade e menor tempo computacional.

No trabalho de Niknam (2010), foi empregado um método de otimização por enxame de partículas adaptativo, que utiliza sistema fuzzy, juntamente com o método de Nelder-Mead. O Sistema fuzzy é utilizado para auxiliary no controle dos parâmetros de otimização por enxame de partículas. Já o método de Nelder-Mead foi utilizado como uma busca local. Este método é frequentemente empregado em otimização não-linear. Tal metodologia foi empregada no problema de DEPV.

Hemamalini & Simon (2010) apresentaram um método lagrangiano baseado na série de Maclaurin para a solução do problema de DEPV multiperíodo com restrições de

limite de rampa. A série de Mclaurin é utilizada para tratar o termo modular senoidal presente na função objetivo de custos no problema que considera ponto de carregamento de válvula. Em seguida, o método lagrangiano é aplicado. Os testes foram realizados para um Sistema de 40 geradores monoperíodo e 5 geradores multiperíodo.

Em Battacharya e Chattopadhyay (2010) um algoritmo de otimização baseada em biogeografia para resolver problemas de despacho econômico de carga térmica de usinas térmicas é apresentado. A metodologia proposta pode cuidar de problemas econômicos de despacho envolvendo restrições como perdas de transmissão, limites de taxa de rampa e carregamento de pontos de válvulas. Biogeografia lida com a distribuição geográfica de espécies biológicas. Modelos matemáticos da biogeografia descrevem como uma espécie surge, migra de um habitat para outro e é eliminada. O método tem algumas características que estão em comum com outros métodos de otimização baseados em biologia, como algoritmos genéticos (AGs) e otimização de enxame de partículas (PSO). Este algoritmo procura o ótimo global principalmente através de duas etapas: migração e mutação. A eficácia do algoritmo proposto foi verificada em quatro sistemas de teste diferentes, pequenos e grandes, envolvendo diferentes graus de complexidade. Comparado com as outras técnicas existentes, o algoritmo proposto foi encontrado para melhor desempenho em um número de casos. Considerando a qualidade da solução obtida, este método parece ser uma abordagem alternativa promissora para a solução dos problemas de ELD em sistemas de energia práticos.

Khansawang e Jiriwibhakorn (2010) utilizaram uma abordagem híbrida de sequências de Sobol, Enxame de Partículas e Busca Tabu para a resolução do DEPV. As sequências de Sobol produzem uma sequência de números entre 0 e 1, em que os sucessivos pontos geradores preenchem os espaços entre os pontos geradores previamente.

Ainda no mesmo ano, Malik *et al.* (2010) contribuíram com um trabalho que propõe uma nova abordagem híbrida para resolver o problema de DE considerando os pontos de válvula. A abordagem proposta por ele combina o algoritmo genético (AG) com otimização de potência ativa (OPA) com base no método de Newton de segunda ordem. O algoritmo genético atua como um otimizador global dando um cronograma de geração próximo do ideal, que se torna a entrada para os barramentos de geração no algoritmo OPA. Este algoritmo atua como uma técnica de busca local despachando a potência ativa

gerada das unidades para minimizar o custo e dar um cronograma de geração ótimo. Três unidades geradoras com 6 barras, IEEE 5 unidades geradoras com 14 barras e IEEE 6 unidades geradoras com 30 barras foram testadas para testes e validação da nova abordagem. Os resultados do esquema proposto em comparação com os resultados obtidos apenas da AG proporcionam melhorias significativas no custo de geração, mostrando a promessa da abordagem proposta.

No ano seguinte, em Arul *et al.* (2011), os autores propõem a utilização de um algoritmo de busca harmônica para a resolução do DEPV. O algoritmo de busca harmônica é uma metaheurística com base no processo de desempenho musical que ocorre quando um músico procura atingir um melhor estado de harmonia. Neste método, se considera a harmonia da música como análogo ao vetor solução, enquanto que o comportamento de improvisação do músico é análogo à busca local. Neste algoritmo, os operadores básicos de otimização são a memória harmônica, o tamanho da memória harmônica, o número de improvisações e a taxa de ajuste do som. Tal método foi aplicado a exemplos de sistemas com 6, 14 e 30 barras.

Hemamalini e Simon (2011) utilizaram um algoritmo de colônia artificial de abelhas para a resolução do problema de despacho econômico dinâmico com ponto de carregamento de válvula. Nesta metaheurística, abelhas artificiais “voam” pelo espaço de busca multidimensional. Determinados tipos de abelhas escolhem fontes de alimentos baseadas na experiência própria, enquanto outras utilizam a experiência das companheiras de colméia, e ajustam suas posições para posições mais vantajosas. Outros tipos de abelhas são as exploradoras, estas voam e escolhem aleatoriamente as fontes de alimento, sem se basear na experiência. A quantidade de nectar encontrado na fonte de alimento daquele ponto no qual a abelha está representa o fitness da solução. Quando uma solução não apresenta melhora após determinado número de tentativas, a fonte é descartada e a abelha se torna exploradora para buscar outra fonte. Foram realizados testes para sistemas de 5 e 10 unidades geradoras em um período de 24 horas.

O artigo de Yang *et al.* (2011) apresenta uma nova abordagem para determinar a solução ótima possível dos problemas de DE usando o Algoritmo Firefly (FA). Muitas características não-lineares de geradores de energia e suas restrições operacionais, como limitações de geração, zonas de operação proibida, limites de taxa de rampa, perda de transmissão e funções de custo não-linear, foram todas contempladas para operação

prática. Para demonstrar a eficiência e aplicabilidade do método proposto, foram estudados quatro sistemas de teste de ED com espaços de solução não convexos e estes foram comparados com alguns dos métodos de solução de DE existentes na literature recente da época. Os resultados deste estudo mostram que a AF proposta é capaz de encontrar cargas mais econômicas do que aquelas determinadas por outros métodos. Este algoritmo é considerado um algoritmo alternativo promissor para resolver os problemas de DE em sistemas de energia práticos.

No ano seguinte Cai *et al.* (2012) desenvolveram, em seu artigo, um novo método para resolver os problemas econômicos de despacho, considerando os efeitos do ponto de válvula em sistemas de potência. O método é baseado em um algoritmo híbrido que consiste no algoritmo de otimização de enxame de partículas caótico (OEPC) e técnicas de programação quadrática sequencial (PQS). O OEPC é o principal otimizador do algoritmo e o SQP é usado para ajustar seus resultados, a fim de melhorar a solução. O método proposto foi aplicado a três diferentes casos de sistemas de potência. O efeito econômico, a qualidade da solução, a propriedade de convergência e a eficiência computacional do método proposto foram explorados através da comparação com as técnicas existentes para os problemas de DE considerando os efeitos do ponto de válvula. Os resultados da simulação demonstram a aplicabilidade e eficácia do algoritmo proposto para os problemas práticos de DE.

Yang *et al.* (2012) utilizou um algoritmo de vagalumes para a resolução do DEPV. Tal método é baseado no comportamento das características de brilho em vagalumes. A primeira delas é que não há distinção entre os indivíduos, independentemente do sexo. A segunda característica é que a atração que um vagalume provoca é proporcional ao brilho, e inversamente proporcional a distância entre eles. De modo que, para qualquer um dos vagalumes, o menos brilhante se moverá na direção do mais brilhante. Se nenhum dos vagalumes é mais brilhante que o outro, a direção se dá de forma aleatória. A Terceira característica é que a intensidade do brilho é influenciada pela função objetivo a ser otimizada. Para tratar das restrições do problema, o método utiliza uma função penalidade.

Em Gonçalves *et al.* (2013) foi utilizado um método híbrido, combinando algoritmos culturais e sistemas imunológicos artificiais para a resolução do DEPV. Os sistemas imunológicos artificiais herdam determinadas características baseadas no

Sistema imuno-biológico. Tal Sistema possui evoluir agentes denominados anticorpos, que interagem com os outros visando impedir danos ao organismo causados por agentes invasores, chamados de antígenos. No Sistema imunológico artificial desenvolvido pelo autor, o principal mecanismo utilizado foi a seleção clonal, que consiste em selecionar, para proliferar, aquelas células que são capazes de reconhecer os antígenos. O método híbrido elaborado utiliza o espaço de busca do algoritmo cultural para extrair informações dos anticorpos e utiliza este conhecimento como guia para gerar novos anticorpos e melhorar o desempenho do Sistema imunológico artificial.

No estudo presente em Aydin e Ozyon (2013), é apresentado um algoritmo com base em colônias de abelhas artificiais incrementais (CAAI) e colônias de abelhas artificiais incrementais com busca local (CAAI-BL) foram utilizadas para a solução do problema de despacho econômico com efeito de ponto de válvula. Na solução do problema, a matriz de perda B foi utilizada para o cálculo das perdas de linha. O custo total do combustível foi minimizado sob restrições elétricas. Os métodos CAAI e CAAI-BL foram aplicados a quatro diferentes sistemas de teste, um com 6 barras e 3 geradores, o outro com 14 barras e 5 geradores (IEEE), o terceiro com 30 barras e 6 geradores (IEEE) e o último com 40 geradores. Os melhores valores obtidos foram comparados com diferentes métodos na literatura e os resultados deles foram discutidos.

Em Silva (2014) é proposto um método determinístico para a resolução do DEPV. Neste trabalho, é apresentado um método Primal-Dual Previsor-Corretor Barreira Logaritmica Modificada (PDPCBLM) associada a uma estratégia de correção de inércia e uma técnica de suavização hiperbólica. A estratégia de correção de inércia visa garantir a convergência do método para mínimos locais do problema. A técnica de suavização hiperbólica, quando aplicada ao DEPV possibilita a utilização do método proposto neste artigo para sua resolução. Os resultados apresentados mostram que o método é eficiente na resolução do DEPV e suas variantes, obtendo resultados de boa qualidade, quando comparados a resultados presentes na literatura.

Em Banerjee *et al.* (2015) foi apresentada uma nova técnica de otimização baseada em aprendizado baseado em ensino (TLBO) para resolver o despacho econômico de carga (DE) da unidade térmica, sem considerar as perdas de transmissão, considerando a não linearidade, como o carregamento do ponto da válvula. O TLBO é um algoritmo evolutivo que foi desenvolvido baseado em dois conceitos básicos de educação, ou seja,

fase de ensino e fase de aprendizagem. Em primeiro lugar, os aprendentes melhoram os seus conhecimentos através da metodologia de ensino do professor e do outro lado, os alunos aumentam o seu conhecimento através de interações entre si. A eficácia do algoritmo proposto foi verificada em três sistemas de teste diferentes com restrições de igualdade e desigualdade. Comparado com as outras técnicas existentes demonstra a superioridade do algoritmo proposto.

No ano seguinte, Modiri-Delshad *et al.* (2016) apresenta um algoritmo de busca backtracking (BSA - backtracking search algorithm) para resolver problemas de DE com a consideração de efeitos de carregamento de pontos de válvulas, zonas de operação proibidas e múltiplas opções de combustível. O método proposto é uma técnica evolutiva de otimização com estrutura simples e parâmetro de controle único para resolver problemas de otimização numérica. É um método com capacidade para explorar efetivamente o espaço de busca de um problema de otimização para encontrar a solução ideal dentro de um baixo tempo computacional. Diferentes sistemas de teste com até 160 unidades geradoras foram utilizados a fim de testar o desempenho da BSA para resolver problemas de DE. Os resultados são comparados com vários métodos de otimização para verificar o alto desempenho da BSA para resolver os problemas de DE. A análise estatística dos resultados entre 50 ensaios independentes foi realizada para validar a BSA como um método altamente robusto.

Em Kheshti *et al.* (2017), um novo algoritmo Lightning Flash Algorithm (LFA) é proposto para resolver problemas DE não convexos em sistemas de energia de larga escala, considerando várias opções de combustível e efeitos de ponto de válvula nos geradores. Cinco sistemas de estudo de casos, incluindo 10 unidades, 40 unidades, 80 unidades, 160 unidades e 640 unidades, são realizados para validar a aplicabilidade e eficácia do método LFA proposto para resolver problemas de DE. Os resultados são comparados com outros métodos publicados na literatura e confirmam a aplicabilidade e eficácia do LFA contra outros métodos existentes.

Al-Betar *et al.* (2018) apresenta um método no qual o processo de atualização do algoritmo de busca por harmonia (BH) é modificado para melhorar seu conceito de diversidade. O processo de atualização no BH é baseado em um mecanismo ganancioso no qual a nova solução de harmonia, criada em cada geração, substitui o pior indivíduo da população. Este processo poderia ser melhorado com outros mecanismos de atualização,

a fim de controlar a diversidade perfeitamente. Três versões do BH foram propostas: (1) Natural Proportional BH; (2) Torneio Natural BH; (3) Classificação Natural BH. Essas três versões do BH empregavam o princípio da seleção natural da “sobrevivência do mais apto”. Em vez de substituir o pior indivíduo da população, qualquer indivíduo pode ser substituído com base em determinados critérios. Foram realizados testes destas versões do BH para um exemplo de problema de DEPV. Os resultados mostram que as novas versões do BH são muito promissoras.

Podemos observar que, na literatura diversos métodos foram e ainda são utilizados para a resolução do DEPV, já que o mesmo tem grande relevância dentro dos problemas associados aos sistemas elétricos de potência e tem sua resolução dificultada devido à sua formulação possuir um módulo senoidal ao serem considerados os pontos de abertura de válvula. Devido à essa grande relevância, neste trabalho é apresentado um método heurístico para a resolução do DEPV no qual são associados o método de busca tabu Glover (1986) e o conceito de pontos singulares apontados por ZHAN *et al.* (2015).

Em 2019, um algoritmo de otimização por enxame competitivo (OEC) é proposto por Mohapatra *et al.* (2019) para a resolução do problema de DE. O algoritmo OEC é baseado no algoritmo de otimização de enxame de partículas (OEP), mas não memoriza o melhor indivíduo para atualizar os enxames. Em vez disso, no algoritmo OEC, é apresentado um cenário competitivo aos pares, em que a partícula perdida é atualizada a partir da partícula vencedora e as partículas vencedoras são aceitas diretamente para a próxima população. O estudo experimental e as investigações revelaram um desempenho melhor para o algoritmo OEC do que o OEP e outros algoritmos meta-heurísticos de última geração na solução do problema de DE.

Capítulo 3

A Busca Tabu Direcionada a Pontos Singulares

A Busca Tabu foi proposta em Glover (1989) e teve seus conceitos aprofundados em Glover & Laguna (1998). O método consiste numa rotina iterativa para construir vizinhanças com ênfase na proibição da parada em um ótimo local. Segundo Osman & Laporte (1996), o emprego de estratégias para modificar a vizinhança de uma solução durante o processo de busca permite que se ultrapasse os limites de um algoritmo de busca local clássico.

3.1 Busca Tabu Clássica

Esta metaheurística possui um tipo de procedimento adaptativo que pode guiar um algoritmo de busca local na exploração contínua do espaço de busca, sem ser encerrado prematuramente pela ausência de vizinhos que melhorem a solução corrente. Este método utiliza estruturas flexíveis de memória para armazenar o conhecimento sobre o espaço de busca adquirido durante o processo de exploração do espaço de soluções. Caso ocorram retornos a um ótimo local previamente visitado (condição desejada, mas não necessária), a Busca Tabu, através de seus mecanismos de controle, permite que a exploração do espaço de soluções prossiga, evitando ciclagem. O procedimento de otimização da Busca Tabu transcende à otimalidade local e é baseado em uma função que avalia, a cada iteração, o “movimento” com o melhor valor (MARTINS, 2002).

A função de avaliação escolhe o movimento que produz a maior melhoria, ou a menor piora na função objetivo. O melhor movimento admissível num dado instante é aquele com melhor avaliação na vizinhança da solução corrente em termos do valor da função objetivo e das restrições do tipo tabu. A fim de guardar informações dos movimentos realizados ou apenas para proibir que este ou aquele movimento de troca seja realizado por um determinado número de iterações, uma lista de elementos tabu é gerada. A lista tabu garante que futuros movimentos que apresentem característica tabu,

sejam proibidos de serem executados, permitindo que o algoritmo prossiga, saindo de uma possível situação de ciclagem.

A aceitação de movimentos que não melhoram a solução atual possibilita o retorno a soluções já visitadas porém, estes não representarão problema, pois a função da lista tabu é exatamente evitar que tais ciclos ocorram constantemente de modo que o método não estacione apenas nestas soluções, explorando de forma mais completa a região de busca. Assim é necessário restringir a busca através de uma estratégia de proibição cuja função seja controlar e atualizar a lista tabu. O objetivo desta estratégia é evitar que sequências de soluções sejam repetidas, induzindo à exploração de novas regiões.

A busca tabu está centrada em três princípios básicos:

- (i) a utilização de uma estrutura de dados do tipo fila para guardar o histórico da evolução do processo de busca;
- (ii) a utilização de um mecanismo de controle para fazer o balanceamento entre a aceitação, ou não, de uma nova configuração, com base nas informações registradas na lista tabu representando o conjunto de restrições e a qualidade do valor da função desejado; e
- (iii) a incorporação de procedimentos que alternam as estratégias de diversificação e intensificação.

A busca tabu faz uma exploração na região factível, realizando sempre o melhor movimento possível em qualquer instante, podendo melhorar ou não a solução atual, o que permite alternar os processos de diversificação e intensificação através da análise dos atributos proibidos guardados em uma lista tabu (GLOVER E LAGUNA, 1997).

A memória pode ter várias dimensões, onde ressaltamos as que medem o momento de ocorrência de um dado evento (uso de um operador, por exemplo) ou, ainda, a frequência com que determinado evento ocorreu. A primeira dimensão, onde são guardadas as ocorrências mais recentes, pode-se dizer que consiste de uma memória de curto prazo, enquanto que a segunda dimensão, por guardar as situações mais antigas, é designada como memória de longo prazo. Neste contexto, na busca tabu, a memória pode ser utilizada segundo diferentes estratégias: para intensificar a busca na vizinhança de soluções de boa qualidade ou para diversificar a busca em regiões do espaço de busca ainda não visitadas. A seguir, é apresentado o algoritmo da busca tabu.

Algoritmo Busca Tabu Clássica

```

1. Seja  $s_0$  solução inicial;
2.  $s^* \leftarrow s_0$ ;                                {Melhor solução obtida até então}
3.  $Iter \leftarrow 0$ ;                               {Contador de número de iterações}
4.  $MelhorIter \leftarrow 0$ ;                         {Iteração mais recente que forneceu  $s^*$ }
5. Seja  $BTmax$  o número máximo de iterações sem melhora de  $s^*$ ;
6.  $T \leftarrow \emptyset$ ;                            {Lista Tabu}

Seja  $s$  a solução a ser testada
7. Inicialize a função de avaliação  $A(s)$ ;
8. Enquanto ( $Iter - MelhorIter \leq BTmax$ ), faça
9.    $Iter \leftarrow Iter + 1$ ;

Sendo  $m$  um movimento que leva a uma solução vizinha
10.  seja  $s' \leftarrow s + m$  uma solução vizinha de  $s^*$  que não pertence à lista tabu  $T$ 
      e  $A(f(s')) \leq A(f(s))$ ;
11.  Atualize a Lista Tabu  $T$ ;
12.   $s \leftarrow s'$ ;
13.  Se  $f(s) \leq f(s^*)$ , então
14.     $s^* \leftarrow s$ ;
15.     $MelhorIter \leftarrow Iter$ ;
16.  fim;
17.  Atualize a função de avaliação  $A(s)$ ;
18. fim – enquanto;
19. Retorne  $s^*$ ;
    fim BT

```

3.2 Busca Tabu para Problemas Restritos

Muitos problemas combinatórios, incluindo uma variedade de problemas de otimização combinatória, podem ser naturalmente formulados como problemas de

otimização restritos (POR). Em Nonobe e Ibaraqui (1998) é desenvolvido um algoritmo baseado em BT para a resolução de POR.

Nonobe e Ibaraqui (1998) propõem a utilização de penalidades na função de avaliação da busca tabu, as quais serão penalizadas se, e somente se, a combinação gerada na iteração não satisfazer as restrições deste problema, isto é feito por meio de uma função penalidade sendo adicionada à função que mede a qualidade da solução, ou seja, a função avaliação. Como segue:

$$A(s) + p(s), \text{ se } s \notin S \quad (3.1)$$

em que $A(s)$ é a função avaliação, $p(s)$ é a função penalidade e S é o conjuntos das soluções factíveis do problema em questão.

A função penalidade faz com que soluções que não atendam às restrições, tenham uma função avaliação com baixa qualidade, sendo estas, então descartadas no processo iterativo da BT.

3.3 Busca de Valores Singulares

O DE que considera o efeito de ponto de válvula, ou seja, DEPV, é apresentado como um modelo mais representativo do problema real quando comparado ao modelo de DE clássico. Este é basicamente um modelo de otimização não linear, não convexo, não diferenciável e multimodal com muitos mínimos locais. A Parte I do artigo de Zhan *et al.* (2015) destaca a análise dos mínimos locais deste problema. A análise indica que um mínimo local consiste nos, chamados por eles de pontos singulares, os quais são pequenas regiões convexas e com uma unidade de folga que é despachada para equilibrar a demanda de carga.

Para verificar a veracidade das análises, no artigo de Zhan *et al.* (2015) foi realizada uma busca local para resolver o DEPV com e sem considerar a perda de transmissão em diferentes sistemas de teste. Todos os resultados da simulação suportam a análise dada no artigo. Para resolver o DEPV, com base na análise apresentada neste artigo, apresenta-se um novo método heurístico.

A abordagem realizada em Zhan *et al.* (2015), atesta através de seus testes que, na grande maioria dos casos, o ponto ótimo do DEPV está muito próximo de certos pontos

singulares, ou até mesmo, são os próprios pontos. Em seu artigo, o autor indica os pontos singulares como sendo pontos nos quais a função modular em (1.2a) se anula.

Portanto, uma busca que seja direcionada exatamente à essas singularidades é proposta nesse trabalho a partir de um algoritmo de busca tabu no qual se aborda o problema DEPV com uma região de busca contendo apenas os pontos singulares. Insere-se uma variável k_i à qual são associados os Pg_i , para $i = 1, \dots, n-1$, sendo que n é o número de geradores do sistema. O que se dá através dos seguintes passos:

a) Obtenção de k_i

Através da função (3.1) presente no problema (1.2a)-(1.2c), sabendo-se que a função $f(x)=sen(x)$ se trata de uma função ímpar, e, além disso, tem suas raízes tais que $sen(x)=0$ se, e somente se, $x=k\pi$ para todo $k \in \mathbb{Z}$, sugere-se o seguinte procedimento para tratar a função modular da equação (1.2a). Seja o argumento da função modular dado por (3.1):

$$M = sen(f_i(Pg_i^{min} - Pg_i)) \quad (3.2)$$

Tem-se que os pontos em que a função (3.2) se anula são tais que:

$$f_i(Pg_i^{min} - Pg_i) = k_i \pi \quad (3.3)$$

Pelo fato de $sen(-k\pi) = sen(k\pi)$, tem-se que:

$$f_i(Pg_i - Pg_i^{min}) = k_i \pi \quad (3.4)$$

Então, isolando-se a variável k_i , obtem-se:

$$k_i = \frac{f_i(Pg_i - Pg_i^{min})}{\pi} \quad (3.5)$$

Para a obtenção da variável, Pg_i , associada a cada k_i , obtem-se a seguinte relação:

$$Pg_i = \frac{k_i \pi}{f_i} + Pg_i^{min} \quad (3.6)$$

b) Limites para k_i

Sabendo que os geradores devem atender aos limites mínimos e máximos, os valores de k_i deverão respeitar tais limites, portanto os valores de k_i devem ser mantidos dentro dos limites, ou seja:

$$0 \leq k_i \leq \max \left\{ x \in \mathbb{Z} / x \leq \frac{f_i(Pg_i^{\max} - Pg_i^{\min})}{\pi} \right\} \quad (3.7)$$

- c) Deve-se então gerar valores aleatórios para k_i , dentro dos limites, para uma solução inicial do método, e então, para cada k_i , encontra-se o Pg_i associado. O gerador n será Pg_{slack} , ou seja a potência gerada no gerador *slack*, de forma a gerar a quantidade necessária para satisfazer a demanda, dentro de seus limites. Para o cálculo do Pg_{slack} utiliza-se a equação (1.1b), denota-se por s o vetor que contém todos os Pg_i , incluindo o Pg_{slack} .

$$Pg_{slack} = Pd - \sum_{i=1}^{n-1} Pg_i \quad (3.8)$$

- d) Calcula-se então a função objetivo (1.2a) para esses valores de Pg_i encontrados. Se Pg_{slack} estiver fora de seus limites, penaliza-se a função avaliação até que Pg_{slack} fique dentro de seus limites. A penalização $p(s)$ é realizada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} & \text{Se } Pg_{slack} < Pg^{\min}, \\ & p(s) = \alpha(Pg^{\min} - Pg_{slack}) \\ & \text{Se } Pg_{slack} > Pg^{\max}, \\ & p(s) = \alpha(Pg_{slack} - Pg^{\max}) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Com α constante. Sugestão $\alpha = 1$ ou $\alpha = 0,5$.

- e) Para inicializar o algoritmo de busca tabu, a solução inicial encontrada é considerada a solução ótima atual e a mesma é inserida na lista tabu T, para evitar que o método volte a esse ponto nas próximas iterações.

- f) Calcula-se o próximo vetor de Pg_i 's e sua respectiva função de avaliação $A(s)$. Se Pg_{slack} estiver fora de seus limites, penaliza-se a função avaliação até que Pg_{slack} fique dentro de seus limites.
- g) Caso essa solução seja melhor que a solução ótima atual, será considerada a solução ótima e será inserida na lista tabu T.
- h) O método se repete até que se obtenha o número de iterações máximo.

Neste trabalho, a função avaliação $A(s)$ é adotada como a própria função custo do problema de DEPV apresentado em (1.2a). No algoritmo tem-se como $Nintmax$ o número de iterações máximas do método a serem estabelecidas e $Nint$ corresponde ao número de iteração.

Algoritmo Busca Tabu Direcionada a Pontos Singulares

Inicialização :

1. Encontrar uma solução inicial $k_0 = (k_1, k_2, \dots, k_{n-1})$, em que n é o número de geradores;

Define – se $N_{int\ max}$ e $N_{int} = 0$;

2. Determinar utilizando (3.5) os Pg 's associados à solução k_0
constrói – se o vetor s_0 e calcula Pg_{slack} (3.8);

3. Considerar s_0 a solução ótima s^*

$s^* \leftarrow s_0$;

$k^* \leftarrow k_0$;

4. Se Pg_{slack} estiver dentro de seus limites, calcular $A(s^*)$.

Caso contrário, calcular $A(s^*) + p(s^*)$ até que Pg_{slack} esteja dentro de seus limites

5. Determinar a dimensão da lista tabu e criar $T = \emptyset$;

6. Incluir s^* na lista tabu T ;

{Busca Tabu }

Enquanto $N_{int} \leq N_{int\ Max}$

7. Gerar vetor $k \in V(k^*)$ em que $V(k^*)$ é a vizinhança de k^* ;

Sendo k_{limite} o maior dos valores de k associado a cada gerador,

$k \leftarrow k + 1$. se $k + 1 \leq k_{limite}$

senão : $k = 0$

8. Determinar utilizando (3.5) os Pg 's associados à solução k e constrói – se s_k ;

9. Se Pg_{slack} estiver dentro de seus limites, calcular $A(s^*)$.

Caso contrário, calcular $A(s^*) + p(s^*)$ até que Pg_{slack} esteja dentro de seus limites;

10. Se $A(s_k) < A(s^*)$ e $s_k \notin T$

$s^* \leftarrow s_k$

$A(s^*) + p(s^*) \leftarrow A(s_k) + p(s_k)$

s_k é incluído na lista tabu;

$N_{int} \leftarrow N_{int} + 1$

Enquanto;

11. Solução = s^*

Custo = $A(s^*)$.

Fim.

Capítulo 4.

Testes e Resultados

O problema DEPV foi resolvido através do algoritmo de BTDPs, implementado no *software* Matlab, versão 2010b. A execução do programa foi realizada em um microcomputador com processador Intel Core i7, com 8GB de memória RAM e sistema operacional *Windows 10 Home Single Language*.

Os testes numéricos foram realizados com base nos dados de Silva (2014), o qual resolveu o problema de DEPV através do método de pontos interiores com suavização hipérbolica para os exemplos de sistema envolvendo 3 e 13 unidades geradoras, além dos dados de Sa-Ngiamvibool *et al.*(2011), o qual utilizou, além de outros métodos, o de busca tabu clássica para a resolução dos DEPV com 13 e 40 geradores e os geradores slack são escolhidos sendo os com maior gap de geração. Estes resultados são utilizados para fins de comparação.

4.1 Sistema com 3 Geradores

Na Tabela 1 são apresentados os dados do sistema de 3 geradores utilizados em Silva(2014). Sendo a demanda do sistema de 850 MW.

TABELA 1 – Dados do sistema com 3 geradores.

Unidade	$P_{G,i}^{min}$ [MW]	$P_{G,i}^{max}$ [MW]	a_i \$/[MW] ²	b_i \$/[MW]	c_i \$	e_i \$	f_i 1/[MW]
1	100	600	0,001562	7,92	561	300	0,0315
2	50	200	0,004820	7,97	78	150	0,0630
3	100	400	0,001940	7,85	310	200	0,0420

Apresenta-se a seguir uma visualização gráfica da função objetivo do problema de DEPV com 3 geradores e de suas Curvas de Nível, nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

Figura 5: Representação gráfica da função objetivo do problema de DEPV com 3 Geradores. Fonte: Gonçalves *et al.* (2018).

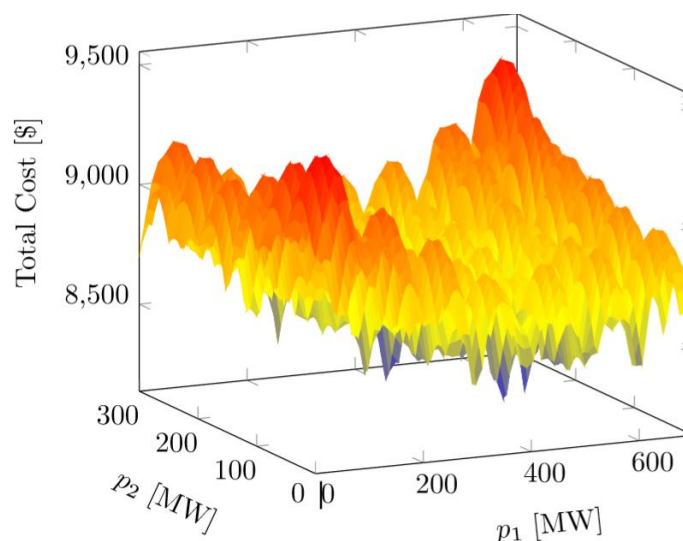
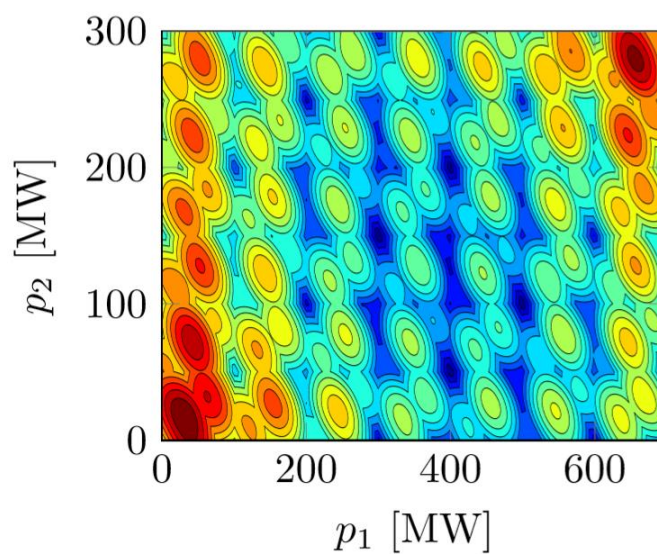


Figura 6: Representação gráfica das Curvas de Nível da função objetivo do problema de DEPV com 3 geradores. Fonte: Gonçalves *et al.* (2018).



São apresentados na Tabela 2 os resultados obtidos através da resolução pelo método BTDPs juntamente com o método exato apresentado em Silva (2014).

Tabela 2 – Resultados dos testes do método BTBPS do problema DEPV associado com um sistema de 3 geradores.

Resultados	BTDPs	Silva (2014)
$P_{G,1}$	251,20	300,06
$P_{G,2}$	199,59	149,94
$P_{G,3}$	399,19	399,19
Potência demandada(MW)	850	850
Função objetivo(\$)	8241,5	8234,2

É possível observar que o resultado da função objetivo calculada pelo método BTDPs foi cerca de 0,08% maior do que pelo método proposto por Silva (2014), com tempo de execução de 0,028 segundos. Com atendimento total da demanda em ambos os casos.

4.2 Sistema com 13 Geradores

Nas Tabelas 3 e 4, são apresentados, respectivamente, os dados do sistema de 13 geradores de acordo com Silva(2014) e os resultados obtidos através da resolução pelo método BTDPs, juntamente com o método exato apresentado por Silva (2014) e o método de busca tabu clássica apresentado por Sa-Ngiamvibool(2011) . A demanda do sistema é de 2520 MW.

Tabela 3 – Dados do sistema com 13 geradores.

Unidade	$P_{G,i}^{min}$ [MW]	$P_{G,i}^{max}$ [MW]	a_i \$/[MW]^2	b_i \$/[MW]	c_i \$	e_i \$	f_i 1/[MW]
1	0	680	0,00028	8,1	550	300	0,035
2	0	360	0,00056	8,1	309	200	0,042
3	0	360	0,00056	8,1	307	200	0,042
4	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
5	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
6	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
7	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
8	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
9	60	180	0,00324	7,74	240	150	0,063
10	40	120	0,00284	8,6	126	100	0,084
11	40	120	0,00284	8,6	126	100	0,084
12	55	120	0,00284	8,6	126	100	0,084
13	55	120	0,00284	8,6	126	100	0,084

Tabela 4 – Resultados dos testes do método BTDPs do problema DEPV associado com um sistema de 13 geradores.

Resultados	BTDPs	Silva (2014)	BT Sa- Ngiamvibool(2011)
$P_{G,1}$ (MW)	628,32	628,08	628,18
$P_{G,2}$ (MW)	299,06	298,79	298,92
$P_{G,3}$ (MW)	299,17	298,79	299,13
$P_{G,4}$ (MW)	159,74	159,53	159,13
$P_{G,5}$ (MW)	159,78	159,54	159,24

$P_{G,6}$ (MW)	158,21	159,54	159,70
$P_{G,7}$ (MW)	159,79	159,54	159,21
$P_{G,8}$ (MW)	159,77	159,54	159,79
$P_{G,9}$ (MW)	159,73	159,54	159,59
$P_{G,10}$ (MW)	75,55	76,92	77,44
$P_{G,11}$ (MW)	77,33	76,92	76,29
$P_{G,12}$ (MW)	92,1	91,63	90,56
$P_{G,13}$ (MW)	91,44	91,63	92,27
Potência demandada(MW)	2520	2520	2520
Função objetivo(\$)	24133,13	24173,81	24178,81

É possível observar que o resultado da função objetivo calculada pelo método BTDPs obteve uma melhora de cerca de 0,17% se comparado ao resultado obtido por Silva (2014) e aproximadamente 0,19% de melhora se comparado a busca tabu clássica apresentada em Sa-Ngiamvibool et al.(2011), e com tempo de execução de 0,095 segundos. Todos com atendimento da demanda.

4.3 Sistema com 40 geradores

Nas Tabelas 5 e 6, são apresentados, respectivamente, os dados do sistema de 40 geradores apresentados em Sa-Ngiamvibool et al.(2011) e os resultados obtidos através da resolução pelo método de busca tabu clássica de Sa-Ngiamvibool(2011) e pelo método da BTDPs. A demanda do sistema é de 10500 MW.

Tabela 5: Dados do sistema com 40 geradores.

Unidade	$P_{G,i}^{min}$ [MW]	$P_{G,i}^{max}$ [MW]	a_i \$/[MW]^2	b_i \$/[MW]	c_i \$	e_i \$	f_i 1/[MW]
1	36	114	94,705	6,73	0,00690	100	0,084
2	36	114	94,705	6,73	0,00690	100	0,084
3	60	120	309,54	7,07	0,02028	100	0,084
4	80	190	369,03	8,18	0,00942	150	0,063
5	47	97	148,89	5,35	0,0114	120	0,077
6	68	140	222,33	8,05	0,01142	100	0,084
7	110	300	287,71	8,03	0,00357	200	0,042
8	135	300	391,98	6,99	0,00492	200	0,042
9	135	300	455,76	6,6	0,00573	200	0,042
10	130	300	722,82	12,9	0,00605	200	0,042
11	94	375	635,2	12,9	0,00515	200	0,042
12	94	375	654,69	12,8	0,00569	200	0,042
13	125	500	913,4	12,5	0,00421	300	0,035
14	125	500	1760,4	8,84	0,00752	300	0,035
15	125	500	1760,4	8,84	0,00752	300	0,035
16	125	500	1760,4	8,84	0,00752	300	0,035
17	220	500	647,85	7,97	0,00313	300	0,035
18	220	500	649,69	7,950	0,00313	300	0,035
19	242	550	647,83	7,97	0,00313	300	0,035
20	242	550	647,81	7,97	0,00313	300	0,035
21	254	550	785,96	6,63	0,00298	300	0,035
22	254	550	785,96	6,63	0,00298	300	0,035
23	254	550	794,53	6,66	0,00284	300	0,035
24	254	550	794,53	6,66	0,00284	300	0,035

25	254	550	801,32	7,1	0,00277	300	0,035
26	254	550	801,32	7,1	0,00277	300	0,035
27	10	150	1055,1	3,33	0,52124	120	0,077
28	10	150	1055,1	3,33	0,52124	120	0,077
29	10	150	1055,1	3,33	0,52124	120	0,077
30	47	97	148,89	5,35	0,0114	120	0,077
31	60	190	222,92	6,43	0,0016	150	0,063
32	60	190	222,92	6,43	0,0016	150	0,063
33	60	190	222,92	6,43	0,0016	150	0,063
34	90	200	107,87	8,95	0,0001	200	0,042
35	90	200	116,58	8,62	0,0001	200	0,042
36	90	200	116,58	8,62	0,0001	200	0,042
37	25	110	307,45	5,85	0,0161	80	0,098
38	25	110	307,45	5,88	0,0161	80	0,098
39	25	110	307,45	5,88	0,0161	80	0,098
40	242	850	647,830	7,97	0,0031	300	0.035

Tabela 6 – Resultados dos testes do método BTDPDS do problema DEPV associado com um sistema de 40 geradores

Resultados	BTDPDS	BT Sa-Ngiamvibool (2011)
$P_{G,1}$ (MW)	110,65	111,41
$P_{G,2}$ (MW)	109,97	111,62
$P_{G,3}$ (MW)	97,79	119,98
$P_{G,4}$ (MW)	178,15	176,79
$P_{G,5}$ (MW)	91,78	86,00
$P_{G,6}$ (MW)	139,47	139,50

$P_{G,7}$ (MW)	299,43	298,66
$P_{G,8}$ (MW)	298,15	287,87
$P_{G,9}$ (MW)	285,93	290,29
$P_{G,10}$ (MW)	131,24	130,27
$P_{G,11}$ (MW)	169,95	95,22
$P_{G,12}$ (MW)	99,12	95,00
$P_{G,13}$ (MW)	214,48	125,99
$P_{G,14}$ (MW)	394,7	392,60
$P_{G,15}$ (MW)	303,48	484,15
$P_{G,16}$ (MW)	305,06	282,66
$P_{G,17}$ (MW)	488,15	491,14
$P_{G,18}$ (MW)	488,86	490,05
$P_{G,19}$ (MW)	512,29	509,18
$P_{G,20}$ (MW)	512,51	526,08
$P_{G,21}$ (MW)	521,63	529,19
$P_{G,22}$ (MW)	523,48	527,22
$P_{G,23}$ (MW)	522,45	524,25
$P_{G,24}$ (MW)	523,37	524,19
$P_{G,25}$ (MW)	522,97	528,29
$P_{G,26}$ (MW)	523,39	520,16

$P_{G,27}$ (MW)	12,00	10,05
$P_{G,28}$ (MW)	11,07	10,16
$P_{G,29}$ (MW)	10,59	10,00
$P_{G,30}$ (MW)	90,67	92,27
$P_{G,31}$ (MW)	189,35	189,89
$P_{G,32}$ (MW)	189,18	189,64
$P_{G,33}$ (MW)	189,95	189,53
$P_{G,34}$ (MW)	199,63	199,59
$P_{G,35}$ (MW)	199,03	199,05
$P_{G,36}$ (MW)	199,79	198,77
$P_{G,37}$ (MW)	109,99	108,04
$P_{G,38}$ (MW)	109,49	25,49
$P_{G,39}$ (MW)	109,35	109,98
$P_{G,40}$ (MW)	510,49	511,08
Potência demandada(MW)	10500	10500
Função objetivo(\$)	121830,68	122508.88

É possível observar que o resultado da função objetivo calculada pelo método da BTDPDS obteve uma melhora de cerca 0.55% se comparado à busca tabu clássica apresentada em Sa-Ngiamvibool *et al.*(2011), com tempo de execução de 0,334 segundos. Ambos com atendimento total da demanda.

Conclusões

Podemos observar na literatura diversos métodos já propostos para a resolução do problema de DE, sendo o DEPV, uma de suas variantes com maiores dificuldades para soluções a partir de métodos determinísticos

O problema de DEPV é modelado como um problema de otimização não-linear, não-convexo e não-diferenciável, com restrições de igualdade e desigualdade. Por tais motivos, sua resolução na literatura usualmente é feita através de métodos heurísticos, pois, além dos métodos determinísticos encontrarem dificuldades em sua resolução devido à sua não diferenciabilidade, os mesmos, para problemas não convexos como este, tendem a encontrar ótimos locais, sem garantia de ótimo global.

Observou-se que a resolução do problema de DEPV pelo algoritmo de BTDPs foi eficiente para a resolução do problema envolvendo 3, 13 e 40 unidades geradoras, visto que, comparado com a resolução pelo método proposto por Silva (2014) e pela busca tabu clássica aplicada em Sa-Ngiamvibool *et al.* (2011), obteve um resultado próximo para o sistema com 3 geradores, e resultados significativamente superiores para os exemplos com 13 e 40 geradores com um baixo custo computacional e operações relativamente simples.

Esses bons resultados podem ter relação com a vantagem apresentada pela busca tabu, a qual não se estaciona em um ponto de mínimo local, juntamente com a vantagem apresentada pela diminuição do espaço de busca ao utilizar apenas os pontos singulares.

Apesar de ser um problema que apresenta diversas dificuldades para a resolução através de métodos determinísticos, podemos perceber que, para o caso abordado neste trabalho, um procedimento com a combinação da busca tabu e busca pelos pontos singulares é extremamente simples e eficiente para sua resolução.

Como trabalhos futuros, propõe-se a inclusão das perdas e das restrições de rampa do sistema a fim de avaliar o desempenho do método.

Referências

AL-BETAR. M. A, AWADALLAH M. A, A. T., KHADER . A, 'A. BOLAJI . L., ALMOMANI. A, “Economic load dispatch problems with valve-point loading using natural updated harmony search,” Neural Computing and Applications, vol. 29, no. 10, pp. 767–781, 2018.

ANEEL (2005). Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília, 2 edition. <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/atlas2005.zip>.

ANEEL (2018). Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília, 3 edition. <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>.

AOKI, K. & SATOH, T. (1984). New algorithms for classic economic load dispatch. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-103(6), 1423–1431.

ARUL, R., RAVI, D. G., & VELUSAMI, D. S. (2011). Non-convex economic dispatch with heuristic load patterns using harmony search algorithm. International Journal of Computer Applications, 16(1), 26–33. Published by Foundation of Computer Science.

AYDIN D., OZYON S. Solution to non-convex economic dispatch problem with valve point effects by incremental artificial bee colony with local search (2013) Applied Soft Computing Journal, 13 (5) , pp. 2456-2466.

CAI J., LI Q., LI L., PENG H., YANG Y, A hybrid CPSO-SQP method for economic dispatch considering the valve-point effects. (2012) Energy Conversion and Management, 53 (1) , pp. 175-181.

COELHO. L. S, MARIANI. V. C, "Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve-point effect," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 2, pp. 989-996, May 2006

DJUKANOVIC, M., CALOVIC, M., MILOSEVIC, B., & SOBAJIC, D. (1996). Neural-net based real-time economic dispatch for thermal power plants. IEEE Transactions on Energy Conversion, 11(4), 755–761.

Electr. Power Syst. Res., 80 (2010), pp. 1128-1136

FAIGLE, U. Kern W. Some Convergence Results for Probabilistic Tabu Search- ORSA Journal on Computing 4, (1992), pp. 32-37

FOX. B. L. – Integrating and accelerating tabu search, simulated annealing and genetic algorithms- Annals of Operations Research 41, (1993) pp. 47 – 67.

GLOVER F. – Tabu Search, Part II – ORSA Journal on Computing 2, (1990)

GLOVER F., LAGUNA M. (1998) Tabu Search. In: Du DZ., Pardalos P.M. (eds) Handbook of Combinatorial Optimization. Springer, Boston, MA.

GLOVER F.-Tabu Search, Part I – ORSA Journal on Computing 1, (1989)

GONÇALVES et al, Deterministic Approach for Solving Multi-Objective Non-Smooth Environmental and Economic Dispatch Problem. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018,

GONÇALVES, R., ALMEIDA, C., GOLDBARG, M., GOLDBARG, E., & DELGADO, M. (2013). Improved cultural immune systems to solve the economic load dispatch problems. In IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC) 2013 (pp. 621–628).

GRAINGER. Power System Analysis. 1st edition. New York: Mc Graw-Hill Science/Engineering, 1994. ISBN 978-0-07-058515.

HAPP, H. H. (1977). Optimal power dispatch – A comprehensive survey. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 96(3), 841–854.

HEMAMALINI, S. & SIMON, S. P. (2010). Dynamic economic dispatch with valve-point effect using Maclaurin series based lagrangian method. International Journal of Computer Applications, 1(17), 60–67. Published By Foundation of Computer Science.

HEMAMALINI, S. & SIMON, S. P. (2011). Dynamic economic dispatch using artificial bee colony algorithm for units with valve-point effect. European Transactions on Electrical Power, 21(1), 70–81.

KHESHTI M., KANG X., BIE Z., JIAO Z., WANG X. An effective Lightning Flash Algorithm solution to large scale non-convex economic dispatch with valve-point and multiple fuel options on generation units. (2017) *Energy*, 129 , pp. 1-15.

KHAMSAWANG, S. & JIRIWIBHAKOR. N. S. (2010). DSPSO–TSA for economic dispatch problem with nonsmooth and noncontinuous cost functions. *Energy Conversion and Management*, 51(2), 365–375.

LIN, C., CHEN, S., & HUANG, C. (1992). A direct newton-raphson economic dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(3), 1149–1154.

LIN. W, CHENG. F AND TSAY. M, "An improved tabu search for economic dispatch with multiple minima," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 108-112, Feb. 2002.

LING. S. H, LAM. H. K., LEUNG. F. H. F, LEE. Y. S, "Improved genetic algorithm for economic load dispatch with valve-point loadings," *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468)*, Roanoke, VA, USA, 2003, pp. 442-447 vol.1.

MALIK. T. N , UL ASAR. A., WYNE M.F. , AKHTAR. S, A new hybrid approach for the solution of nonconvex economic dispatch problem with valve-point effects

MARTINS, V. C. (2002). Otimização de layout em ambientes industriais realistas usando busca tabu, *Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Informática Aplicada*, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR.

MENG, K, WANG. H . G., DONG. Z. and WONG K. P., "Quantum-Inspired Particle Swarm Optimization for Valve-Point Economic Load Dispatch," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 215-222, Feb. 2010.

MODIRI-DELSHAD M., AGHAY KABOLI S.H., TASLIMI-RENANI E., RAHIM N.A. Backtracking search algorithm for solving economic dispatch problems with valve-point effects and multiple fuel options, (2016) *Energy*, 116 , pp. 637-649.

NIKNAM, T. (2010). A new fuzzy adaptive hybrid particle swarm optimization

algorithm for non-linear, non-smooth and non-convex economic dispatch problem. *Applied Energy*, 87(1), 327–339.

NONOBE K., IBARAKI T. A tabu search approach to the constraint satisfaction problem as a general problem solver (1998) *European Journal of Operational Research*, 106 (2-3), pp. 599-623.

POTHIYA, S., NGAMROO, I., & KONGPRAWECHNON, W. (2010). Ant colony optimisation for economic dispatch problem with non-smooth cost functions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(5), 478–487

POTHIYA, S., NGAMROO, I., KONGPRAWECHNON, W. Ant colony optimisation for economic dispatch problem with non-smooth cost functions, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 32, Issue 5, 2010, pp 478-487, ISSN 0142-0615,

RAVI, G., CHAKRABARTI, R., & CHOUDHURI, S. (2006). Nonconvex economic dispatch with heuristic load patterns using improved fast evolutionary program. *Electric Power Components and Systems*, 34(1), 37–45.

SA-NGIAMVIBOOL W., POTHIYA S., NGAMROO I. (2011) Multiple tabu search algorithm for economic dispatch problem considering valve-point effects *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 33 (4), pp. 846-854.

SELVAKUMAR, A. I. & THANUSHKODI, K. (2009). Optimization using civilized swarm: Solution to economic dispatch with multiple minima. *Electric Power Systems Research*, 79(1), 8–16.

SILVA, D. N. Método primal-dual previsor-corretor de pontos interiores e exteriores com estratégias de correção de inércia e suavização hiperbólica aplicado ao problema de despacho econômico com ponto de carregamento de válvula e representação da transmissão. 261 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Unesp, Bauru, 2014.

SOMUAH, C. & KHUNAIZI, N. (1990). Application of linear programming redispatch technique to dynamic generation allocation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(1), 20–26.

STEINBER. G, M. J. & SMITH, T. H. (1934). The theory of incremental rates and the impractical application to load division–parti. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 53(3), 432–445.

STEINBERG, M. J. & SMITH, T. H. (1943). *Economy Loading of Power Plants and Electric Systems*. John Wiley & Sons.

SUM-IM, T. Na enhanced diffecial evolution algorithm application to economic dispath with valve-point effects na system losses considerations.. In: *IEEE. Power Engineering Conference (UPEC), 2015 50th International Universities [S.I]*, 2015. P. 1-64.

VICTOIRE. T.A.A, JEYAKUMAR A.E, HYBRID PSO–SQP for economic dispatch with valve-point effect. *Electr Power Syst Res*, 71 (1) (2004), pp. 51-59

WALTERS. D. C. and SHEBLE G. B., "Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 1325-1332, Aug. 1993.

YANG,X.-S.,HOSSEINI,S.S.S.,&GANDOMI,A.H.(2012). Fireflyalgorithmforsolvingnonconvex economic dispatch problems with valve loading effect. *Applied Soft Computing*, 12(3), 1180–1186.

YANG,X.-S.,HOSSEINI,S.S.S.,&GANDOMI,A.H.(2012). Fireflyalgorithmforsolvingnonconvex economic dispatch problems with valve loading effect. *Applied Soft Computing*, 12(3), 1180–1186.

YANG. H, YANG. P, HUANG. C, "Evolutionary programming based economic dispatch for units with non-smooth fuel cost functions," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 112-118, Feb. 1996.

YUAN, X., WANG, L., ZHANG, Y., & YUAN, Y. (2009). A hybrid differential evolution method for dynamic economic dispatch with valve-point effects. *Expert Systems with Applications*, 36(2, Part 2), 4042–4048.

YUAN. X.H. , WANG. L , YUAN Y.B. , ZHANG Y.C. , CAO. B, YANG. B, A modified differential evolution approach for dynamic economic dispatch with valve-point effects. *Energy Convers Manage*, 49 (12) (2008), pp. 3447-3453

ZHAN. J, WU. Q. H, GUO .C and ZHOU.X, "Economic Dispatch With Non-Smooth Objectives—Part I: Local Minimum Analysis," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 710-721, March 2015.

ZHAN. J, WU. Q. H, GUO .C and ZHOU.X, "Economic Dispatch With Non-Smooth Objectives—Part II: Dimensional Steepest Decline Method," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 722-733, March 2015.