



Universidade Federal do Piauí  
Centro de Ciências da Natureza  
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

# **Otimização por Enxame de Partículas e Fluxo de Carga Continuado para Leilões de Energia Elétrica com Restrição de Estabilidade de Tensão**

**Enza Rafaela de Sampaio Ferreira**

**Teresina-PI, 23 de fevereiro de 2022**



Enza Rafaela de Sampaio Ferreira

**Otimização por Enxame de Partículas e Fluxo de Carga  
Continuado para Leilões de Energia Elétrica com Restrição  
de Estabilidade de Tensão**

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPI (área de concentração: Sistemas de Computação), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Ciência da Computação.

Universidade Federal do Piauí – UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Orientador: Ricardo de Andrade Lira Rabêlo

Teresina-PI

23 de fevereiro de 2022

FICHA CATALOGRÁFICA  
Universidade Federal do Piauí  
Sistema de Bibliotecas da UFPI – SIBi/UFPI  
Biblioteca Setorial do CCN

F383o Ferreira, Enza Rafaela de Sampaio.  
Otimização por enxame de partículas e fluxo de carga  
continuado para leilões de energia elétrica com restrição de  
estabilidade de tensão / Enza Rafaela de Sampaio Ferreira. –  
2022.  
68 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí,  
Centro de Ciências da Natureza, Pós-Graduação em Ciência  
da Computação, Teresina, 2022.  
“Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Andrade Lira Rabêlo”.

1. Sistemas Operacionais. 2. Fluxo de Potência. 3.  
Otimização. 4. Modelagem Matemática. I. Rabêlo, Ricardo  
de Andrade Lira. II. Título.

CDD 005.43

Bibliotecária: Caryne Maria da Silva Gomes. CRB/3-1461

# **“Otimização por Enxame de Partículas e Fluxo de Carga Continuado para Leilões de Energia Elétrica com Restrição de Estabilidade de Tensão”**

**ENZA RAFAELA DE SAMPAIO FERREIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

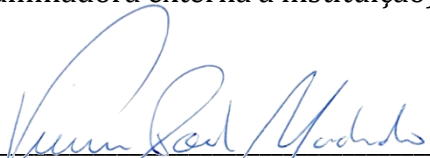
Aprovada por:

*Ricardo de Andrade Lira Rabêlo*

---

Prof. Ricardo de Andrade Lira Rabêlo  
(Presidente da banca examinadora)

  
Prof. Patrícia Teixeira Leite Asano  
(Examinadora externa à instituição)

  
Prof. Vinicius Ponte Machado  
(Examinador interno)

Teresina, 23 de fevereiro de 2022



*Aos meus amados pais Antônio C. Ferreira e Francisca de S. Sousa Ferreira (Diá)(in  
Memorian), e queridos irmãos,  
Carlos Gustavo e Érida Irca, por todo amor, apoio, segurança, paciência e carinho.*





# Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Ferreira e Diassis(in Memoriam), que sempre estiveram comigo, propiciando minha educação e apoiando meu crescimento com muita dedicação e amor.

Agradeço aos meus irmãos Gustavo e Irca por todo amor e serem meus companheiros e amigos em todos os passos de minha evolução.

Agradeço ao meu namorado Eucassio Júnior por todo seu amor, incentivo e admiração, sempre me dando forças e segurança para eu nunca desistir.

Agradeço ao meu orientador e Prof. Ricardo Lira, por todos os ensinamentos, apoio, convívio e atenção ao longo desses anos. Sua compreensão, respeito e confiança me fizeram sempre acreditar em mim. Obrigada por ser um humano único e admirável.

Agradeço ao meu amigo Rafael, por suas horas de ensinamentos, paciência, amizade e companherismo em ser meu braço direito. Um anjo que me acolheu e caminhou comigo para a conclusão desta pesquisa. Sem palavras para agradecer.

Agradeço ao Prof. Guilherme Lage, pela sua educação, disponibilidade e aprendizados conduzidos durante este trabalho. Foi primordial para engatarmos no meio dos sistemas elétricos de potência.

Agradeço aos amigos de mestrado, pelos momentos que passamos juntos no laboratório e a distância, por serem companheiros, irmãos e fiéis. Sei que posso contar com vocês sempre.

Agradeço aos professores do PPGCC, pela formação e conhecimentos repassados em suas disciplinas durante o curso.



*“Deus está cuidando de tudo, arrumando cada coisa em seu lugar,  
preparando o nosso coração e desenhando o nosso caminho.  
Deus é quem vai renovando as forças, aumentando a nossa fé e  
fazendo renascer a esperança.”*  
*(Yla Fernandes)*



# Resumo

Diante das mudanças ocasionadas nos mercados competitivos de eletricidade, várias estruturas de mercados foram propostas para promover concorrência com vistas a se obter energia elétrica, e uma delas foram os mercados de leilão de compra e venda de energia. Os leilões de energia referem-se aos negócios realizados para contratar energia, porém a implantação de novas linhas de transmissão e a realização dessas transações exigem a definição de regras sobre tarifas, segurança e qualidade dos serviços entre os agentes envolvidos, desde preços acessíveis aos consumidores como clareza nas negociações entre geradoras e concessionárias. Portanto, este trabalho propõe um modelo de fluxo de potência ótimo com restrição de estabilidade e segurança de tensão e sua estrutura de resolução. Nesta modelagem, o problema de sistema de leilão de fluxo de potência ótimo com estabilidade e segurança de tensão de período único, cuja restrição de estabilidade de tensão dependerá dos limites de estabilidade/segurança de tensão determinados pelo problema de máximo carregamento de sistema de potência. A estrutura da solução é baseada na aplicação do algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO) para resolução do sistema de leilão, além da solução do problema de máximo carregamento pelo Fluxo de Carga Continuado respeitando restrições de magnitudes de tensão e geração de energia reativa e utilizando o método de penalidades quadráticas na função objetivo. Pretende-se, desta forma, garantir condições mínimas de segurança adequadas ao sistema e preços de energia adequados a todos os participantes. Experimentos com um sistema IEEE de 6 barras e dois estudos de casos foram realizados para validar a proposta e mostrar a eficácia da aplicação desta abordagem para aquisição de energia no mercado de eletricidade, aplicando o PSO e o Fluxo de Carga Continuado. Os testes foram satisfatórios, já que apresentaram o comportamento esperado, se comparados com a literatura.

**Palavras-chaves:** sistema de leilão, fluxo de potência ótimo, otimização por enxame de partículas, fluxo de carga continuado, estabilidade/segurança de tensão.



# Abstract

In view of the changes brought about in the competitive electricity markets, several market structures were proposed to promote competition in order to obtain electricity, and one of them was the auction markets for the purchase/sale of energy. Energy auctions refer to the business carried out to contract energy, but the implementation of new transmission lines and the carrying out of these transactions require the definition of rules on tariffs, safety and quality of services among sector agents, since prices accessible to consumers and clarity in negotiations between generators and concessionaires must be guaranteed. Therefore, this work proposes a Voltage-Stability/Security-Constrained Optimal Power Flow (VSCOPF) model and its resolution structure. In this modeling, the external problem is an optimal power flow auction system with single-period voltage-stability/security, whose voltage stability constraint depends on the stability limits/security-constrained determined by the internal problem formulated as a problem of maximal power system loading. The solution structure is based on the application of the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to solve the auction system, in addition to the solution of maximal loading problem by Continuation Power Flow respecting restrictions of voltage magnitudes and reactive power generation and use of the penalty method. It is intended, in this way, to guarantee minimum security conditions adequate to the system and adequate electricity prices to all participants. Experiments with a 6-bus IEEE system were carried out to validate the proposal and show the effectiveness of applying of this approach for power acquisition in electricity markets, applying the PSO and Continuation Power Flow.

**Keyywords:** auction systems, optimal power flow, particle swarm optimization, continuation power flow, voltage stability/security constraint.





# Lista de ilustrações

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Funcionamento do Problema de Sistema de Leilão com PSO. . . . .    | 24 |
| Figura 2 – Funcionamento do Problema de Máximo Carregamento pelo FCC. . . . . | 26 |
| Figura 3 – Diagrama unifilar do sistema de 6 barras. . . . .                  | 30 |
| Figura 4 – Melhor Solução do Sistema de Leilão VSCOPF para o Caso 1. . . . .  | 31 |
| Figura 5 – Análise Estatística da Média das Execuções para o Caso 1. . . . .  | 32 |
| Figura 6 – Melhor Solução do Sistema de Leilão VSCOPF para o Caso 2. . . . .  | 33 |
| Figura 7 – Análise Estatística da Média das Execuções para o Caso 2. . . . .  | 34 |



# Lista de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Dados de lances e barras para o sistema IEEE de 6 barras . . . . .  | 29 |
| Tabela 2 – Dados das Linhas de Transmissão para o sistema IEEE de 6 barras . . | 30 |
| Tabela 3 – Resultado da Melhor Solução do Estudo de Caso 1 . . . . .           | 31 |
| Tabela 4 – Resultado da Melhor Solução do Estudo de Caso 2 . . . . .           | 32 |



# Lista de abreviaturas e siglas

|        |   |
|--------|---|
| BSN    | Bifurcação Sela-Nó  |
| BIL    | Bifurcação Induzida por Limites   |
| BDIL   | Bifurcação Dinâmica Induzida por Limites                                  |
| BEIL   | Bifurcação Estática Induzida por Limites                                  |
| FC     | Fluxo de Carga  |
| FCC    | Fluxo de Carga Continuado   |
| FPO    | Fluxo de Potência Ótimo   |
| IEEE   | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>                  |
| MVar   | Mega-volt-ampere reativo  |
| MW     | Mega-watt   |
| PSO    | <i>Particle Swarm Optimization</i>  |
| p.u.   | por unidade   |
| SEP    | Sistemas Elétricos de Potência  |
| VSI    | Índices de Estabilidade de Tensão   |
| VSCOPF | Fluxo de Potência Ótimo com Restrição de Estabilidade/Segurança de Tensão |



# Lista de símbolos

## Conjuntos e Índices

|               |   |
|---------------|---|
| $\mathcal{B}$ | é o conjunto dos índices de barra   |
| $\mathcal{K}$ | é o conjunto de índices de barra conectados a barra $k \in \mathcal{B}$ mais a barra $k$  |
| $\mathcal{T}$ | é o conjunto dos pares ordenados de índice de barra representando uma linha de transmissão, um transformador ou um transformador em fase conectando uma barra a outra |
| $k$           | índice da barra $k$ sendo $k \in \mathcal{B}$   |
| $m$           | índice da barra $m$ sendo $m \in \mathcal{B}$   |
| $k, m$        | é o ramo de transmissão da barra $k$ para a barra $m$ , onde $k, m \in \mathcal{T}$   |

## Variáveis e Parâmetros

|                          |  |
|--------------------------|--|
| $P_S$                    | é o vetor dos blocos de ofertas não-negativos de fornecimento (lances de fornecimento) de potência ativa em unidade p.u. |
| $P_S^{\min}, P_S^{\max}$ | representa blocos de propostas de oferta de potência ativa mínima e máxima não-negativas em p.u.                         |
| $P_D$                    | é o vetor de blocos de oferta de demanda (lances de demanda) de potência ativa não-negativas aceitos em p.u.             |
| $P_D^{\min}, P_D^{\max}$ | representa blocos de oferta de demanda de potência ativa mínima e máxima não-negativa em p.u.                            |
| $Q_G$                    | é o vetor de geração de potência reativa em p.u.   |
| $Q_G^{\min}, Q_G^{\max}$ | limites mínimos e máximos de geração de energia reativa em p.u.  |
| $I$                      | é o vetor das correntes magnitudes de corrente em p.u.   |
| $I^{\max}$               | limites máximos das correntes de linha   |
| $\delta$                 | é o vetor de ângulos de fase de tensão em radianos   |
| $V$                      | é o vetor das magnitudes de tensão em p.u.   |
| $V^{\min}, V^{\max}$     | é o vetor dos limites das magnitudes de tensão   |

|                      |  |
|----------------------|--|
| $V_G$                | é o vetor das magnitudes de tensão nas barras de geração   |
| $V_C$                | é o vetor das magnitudes de tensão nas barras de carga   |
| $\Delta P$           | vetor de balanço de potência ativa em p.u.   |
| $\Delta Q$           | vetor de balanço de potência reativa em p.u.   |
| $\sigma$             | é uma função implícita adimensional definida em termos de $P_S$ , $P_D$ e $V_G$ que representa o carregamento crítico do sistema de potência |
| $P_G$                | representa as saídas ativas de geradores de operação obrigatória em p.u.   |
| $P_L, Q_L$           | cargas inelásticas ativas e reativas   |
| $K_L$                | representa parâmetros adimensionais utilizados para modelar o aumento da carga reativa em termos de $P_D$                                    |
| $P_{km}, Q_{km}$     | fluxos de potência ativa e reativa através do ramo de transmissão $k, m \in T$   |
| $Y$                  | matriz de admitância   |
| $G_{km}$             | parte real do elemento $Y_{km}$ na barra da matriz de admitância   |
| $B_{km}$             | parte imaginárias do elemento $Y_{km}$ na barra da matriz de admitância  |
| $\Phi_{km}$          | é o ângulo de deslocamento de fase se o ramo de transmissão $k, m \in T$ é um transformador de mudança de fase.                              |
| $g_{km}$             | a condutância em série em p.u. do ramo de transmissão $k, m \in T$   |
| $b_{km}$             | a susceptância em série em p.u. do ramo de transmissão $k, m \in T$  |
| $b_{km}^{\text{sh}}$ | é a susceptância de derivação de linha em p.u. se o ramo de transmissão $k, m \in T$ é uma linha de transmissão                              |
| $t_{km}$             | é a taxa de tap em p.u. se o ramo de transmissão $k, m \in T$ é um transformador   |
| $b_k^{\text{sh}}$    | é a suscetibilidade equivalente em p.u. do elemento shunt (banco de capacitores ou reator) conectado a barra $k \in B$                       |
| $K_G$                | é um escalar adimensional usado para representar uma barra slack   |

### Constantes

$C_S$  os vetores de oferta de preço de potência ativa



|          |   |
|----------|---|
| $C_D$    | os vetores de demandas de preço de potência ativa |
| $\eta_B$ | número de barras                                  |
| $\eta_T$ | número de linhas de transmissão                   |
| $\eta_G$ | número de barras de geração                       |



# Sumário

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
|          | <b>INTRODUÇÃO</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>   | <b>7</b>  |
| 1.1      | Fluxo de Potência Ótimo nos Mercados de Eletricidade e Técnicas de Otimização                    | 7         |
| 1.2      | Sistemas de Leilão nos Mercados de Eletricidade e Estabilidade/Segurança de Tensão               | 9         |
| <b>2</b> | <b>MODELAGEM MATEMÁTICA</b>  | <b>13</b> |
| 2.1      | Sistema de Leilão VSCOPF   | 13        |
| 2.2      | Problema de Máximo Carregamento do Sistema de Potência   | 15        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA PROPOSTA</b>  | <b>17</b> |
| 3.1      | <i>Particle Swarm Optimization</i>   | 17        |
| 3.2      | Fluxo de Carga Continuado  | 19        |
| 3.2.1    | Fluxo de Carga   | 20        |
| 3.2.2    | Formulação do Problema de Fluxo de Carga com Barra Slack Distribuída                             | 21        |
| 3.2.3    | Análise das Bifurcações  | 22        |
| 3.3      | <b>Abordagem Proposta</b>  | <b>23</b> |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>   | <b>29</b> |
| 4.0.1    | Sistema de leilão VSCOPF com máximo carregamento definido por limite mínimo de tensão na barra 5 | 29        |
| 4.0.2    | Sistema de leilão VSCOPF com máximo carregamento definido por uma bifurcação induzida por limite | 32        |
| 4.1      | <b>Limitações</b>  | <b>34</b> |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES</b>  | <b>35</b> |
| 5.1      | <b>Trabalhos Futuros</b>   | <b>35</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>   | <b>37</b> |



# Introdução

Com a introdução dos mercados competitivos de eletricidade, operações nas redes elétricas mudaram significativamente, já que os sistemas de energia elétrica estão passando de um ambiente regulado fundamentado em serviços tradicionais para um ambiente mais descentralizado. Tais estruturas podem ser agrupadas em três categorias: os mercados centralizados, mercados de leilão padrão e mercados de preços à vista ou híbridos. A expectativa que neste novo ambiente de mercado, os operadores de sistema são independentes de todos os participantes do mercado, sendo um pouco diferente dos procedimentos operacionais seguidos antes da desregulamentação/privatização dos mercados de eletricidade, quando as operadoras despachavam mantendo a segurança da rede (FRANCO; DURAN, 2018; XUE et al., 2019; MACGILL; BRUCE; ZEKULICH, 2020). Várias estruturas de mercados foram propostas para promover concorrência com vistas a se obter energia elétrica, e um interesse crescente tem ocorrido no uso dos leilões de compra/venda de energia, como forma de promover compras eficientes e fomentar a disputa em todos os setores (MILANO; CANIZARES; INVERNIZZI, 2005), sejam eles de geração, distribuição e transmissão.

Diante dessas mudanças, leilões foram formalmente introduzidos nesse setor por serem um mecanismo transparente que deve alcançar um processo de aquisição justo, oportuno e concorrente (MAURER; BARROSO, 2011), à medida que esse processo de desburocratização vem sendo implementado para acompanhar as mudanças sofrida nos mercados de eletricidade. Produtores e compradores buscam alocações transparentes de potência ativa e de menor custo para a oferta e a demanda, por isso negociar contratos de eletricidade de longo, médio e curto prazo podem preencher a lacuna entre a oferta e a demanda (MAURER; BARROSO, 2011). Além de promover competição no setor elétrico entre os agentes do setor, o uso de leilões de eletricidade para a compra de energia possibilita uma ação de despacho eficiente e de menor custo (MILANO; CANIZARES; INVERNIZZI, 2003), garantindo clareza nas negociações entre geradoras e concessionárias como beneficiando ao final, os consumidores, que terá uma cobrança tarifária adequada em suas faturas de energia.

A importância dos estudos de leilões se referem ao fator deles representarem uma importante via de comercialização de energia. Diversos agentes estão envolvidos nesse processo: comercializadores, distribuidores e governo. Os impactos são gigantescos sobre a economia e no desenvolvimento do país, já que atrai investimentos nacionais e até estrangeiros. Os consumidores também são afetados seja pela tarifa (modicidade tarifária) a ser paga ou pelo acesso facilitado de energia.

## Definição do Problema

Leilões de energia se referem a um processo licitatório realizados para contratar energia, ou seja, é uma concorrência promovida visando se obter energia elétrica em um prazo futuro (curto, médio e a longo prazo), seja pela construção de novas usinas de geração elétrica, linhas de transmissão de energia até os centros consumidores ou mesmo a energia que é gerada em usinas em funcionamento e com seus investimentos já pagos.

Os leilões, ao definirem os preços dos contratos, definem também, a participação das fontes de energia utilizadas na geração, o que impacta na qualidade da matriz elétrica de nosso país em termos ambientais (mais ou menos as hidrelétricas, energia nuclear, energia eólica, biomassa, queima de combustíveis etc.), bem como no valor das tarifas pagas pelos consumidores.

A implantação de novas linhas de transmissão e o aumento significativo nas transações para compra de energia associadas aos mercados de eletricidade, impõem a manutenção da segurança do sistema, gerando preocupações dos operadores de mercado e exigindo definição de regras sobre tarifas, segurança e qualidade dos serviços entre esses agentes do setor, já que preços acessíveis aos consumidores e clareza nas negociações entre geradoras e concessionárias têm que ser garantidos. Embora a confiabilidade do sistema ainda seja primordial, uma vez que uma rede insegura pode levar ao colapso do sistema, gerando perdas financeiras e sociais significativas no atual ambiente de mercado, as preocupações econômicas são o principal fator de operação do sistema.

## Visão Geral da Proposta

Este trabalho apresenta uma abordagem para resolver o problema de sistema de Leilão baseado em Fluxo de Potência Ótimo (FPO) para uma rede de transmissão considerando limites de oferta e demanda e restrições técnicas, operacionais e de estabilidade/segurança de tensão com aplicação do método da função de penalidade quadrática à função objetivo. Restrições referentes ao balanço de potência ativa e reativa, bem como os limites de magnitudes de tensão, geração de potência reativa, limites térmicos e limite de máximo carregamento, são incorporados à função objetivo por meio de funções de penalidade.

Em um primeiro momento, foi aplicado o algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (do inglês *Particle Swarm Optimization* ou PSO) para resolver o sistema de leilão e se obter os lances de oferta e demanda. O PSO é aplicado para calcular as variáveis de controle que em seguida foram usadas como parâmetros no problema de máximo carregamento do sistema resolvido por meio do Fluxo de Carga Continuado(FCC), a fim de verificar se o ponto de operação determinado pelo problema de sistema de leilão

---

cumpra níveis aceitáveis de segurança, respeitando as restrições de magnitudes de tensão, geração de potência reativa, limites térmicos e operacionais.

## Justificativa

A abordagem proposta é aplicada para resolver sistemas de leilão baseado em FPO com estabilidade/segurança de tensão para aquisição de potência nos mercados de eletricidade (MAURER; BARROSO, 2011), com vista em aplicar uma metaheurística para encontrar soluções ótimas, uma vez que o FPO consiste de uma classe de problemas de otimização de grande porte, não-linear e não-convexo, nos quais pode existir mais de um ótimo local, além da região factível não-convexa (LEE et al., 2020).

Técnicas de otimização têm sido aplicadas para a resolução de problemas de FPO, como as metaheurísticas que são métodos de solução que coordenam procedimentos de busca locais com estratégias de mais alto nível, de modo a criar um processo capaz de escapar de mínimos locais e realizar uma busca robusta no espaço de soluções de um problema (LUKE, 2013; GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

Comparado a outras técnicas heurísticas, o PSO mostra bom desempenho para problemas de FPO, além de ser usado para resolver muitos problemas de otimização complexos que são não-lineares, não-diferenciáveis e multimodais, pois sua principal vantagem é a alta velocidade de convergência e a facilidade de implementação (WANG et al., 2005; KUMARI; PRIYANKA; SYDULU, 2007).

## Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste em apresentar e analisar soluções para uma abordagem de sistema de leilão com Fluxo de Potência Ótimo resolvido pelo PSO e problema de máximo carregamento pelo FCC, garantindo a estabilidade e segurança de tensão do sistema.

Para isso, os seguintes objetivos específicos, fizeram parte desta pesquisa:

- Aplicar o algoritmo de otimização PSO para determinar os valores dos lances de oferta e demanda, magnitudes de tensão do modelo de leilão, bem como bem-estar social, que são métricas do sistema de leilões a serem avaliadas;
- Aplicar o FCC, que consiste em resolver sucessivamente um sistema algébrico de equações e inequações de forma parametrizada, para obter um novo ponto de operação do sistema;

- Aplicar o método de penalidades ou método penalidades quadráticas, em que qualquer violação de alguma restrição do problema de sistema de leilão com PSO é penalizada no valor da função-objetivo;

## Contribuições

As contribuições relacionadas à abordagem proposta neste trabalho podem ser resumidas como:

- Apresentação de uma abordagem baseada em FPO com fundamentação em metaheurística, a fim de maximizar o bem-estar social e assegurar a estabilidade/segurança de tensão na aquisição de energia nos mercados de eletricidade. Dada a importância de acompanhar as mudanças nos mercados competitivos dispondo de técnicas de otimização inseridas nas sofisticações dos recursos computacionais, verifica-se a relevância de tal proposição;

## Contribuições Científica

O trabalho produzido e publicado relacionado a este é o seguinte:

- E.R.S.Ferreira, R.M.Barros, J.M. Gaspar, G.G.Lage e R.A.L.Rabêlo (2021). "*A Two-Stage Approach to Solve Voltage-Stability/Security-Constrained Optimal Power Flow Auction Systems by means of PSO and the Continuation Power Flow*". 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech).

## Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1 traz os trabalhos relacionados à temática aqui tratada, dividindo-se entre: trabalhos que lidam com o Fluxo de Potência Ótimo nos mercados de eletricidade, além de métodos de Otimização, e trabalhos que abordam a estabilidade/segurança de Tensão ,como o cálculo por Fluxo de Carga Continuado.

O Capítulo 2 descreve a modelagem do Sistema de Leilão de Fluxo de Potência ótimo com Estabilidade/Segurança de Tensão, em inglês, Optimal Power Flow Auction System with Voltage Stability/Security (VSCOPF) e o sistema de equações e inequações algébricas a partir do qual o carregamento máximo é determinado pelo FCC, base para a aplicação da metodologia proposta nessa pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta a abordagem para resolver o sistema de leilão VSCOPF e o problema de máximo carregamento pelo FCC, além de uma explicação do passo a passo da resolução da metodologia.



O Capítulo 4 descreve os cenários dos experimentos realizados para validar a abordagem proposta. Foi usado um sistema de teste de 6 barras para obter os resultados, além de dois estudos de caso.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões, análises e trabalhos futuros relacionados a essa pesquisa.



# 1 Referencial Teórico

Neste capítulo são apresentados os trabalhos relacionados à metodologia proposta. Primeiramente, é feita uma breve retrospectiva sobre técnicas de otimização em problemas de FPO nos mercados de eletricidade. Em seguida, trabalhos que lidam com a estabilidade/segurança de tensão em sistemas de leilão de energia nos mercados de eletricidade. Todos eles procurando destacar trabalhos publicados e até limitações encontradas.

## 1.1 Fluxo de Potência Ótimo nos Mercados de Eletricidade e Técnicas de Otimização

Muitas de técnicas de otimização tem sido aplicadas para a resolução de problemas de FPO, podendo ser particionadas em dois grupos: técnicas de programação matemática e metaheurísticas. Técnicas de programação matemática são determinísticas e geralmente fazem uso do cálculo de derivadas a fim de determinar a direção de busca da solução. Já as metaheurísticas são aplicadas para encontrar respostas a problemas sobre os quais há poucas informações: não se sabe como é a aparência de uma solução ótima, porém dada uma solução candidata ao problema, esta pode ser testada e sua otimalidade, averiguada.

No entanto, o FPO consiste de uma classe de problemas de otimização de grande porte, não-linear e não-convexo, nos quais pode existir mais de um ótimo local. Além da região factível não-convexa, destaca-se que esta pode ser ainda desconexa (LEE *et al.*, 2020). Comparado a outros métodos heurísticos, o Particle Swarm Optimization (PSO) não requer o cálculo de derivadas para a sua implementação e tem a possibilidade de implementação em computadores paralelos (BAKIRTZIS *et al.*, 2002; ROA-SEPULVEDA; PAVEZ-LAZO, 2001), além de ser usado para resolver muitos problemas de otimização complexos que são não-lineares, não-diferenciáveis e multimodais.(LAI; MA, 1995; WANG *et al.*, 2005; KUMARI; PRIYANKA; SYDULU, 2007).

Em (CABADAG; TURKAY, 2013) trata do Fluxo de Potência Ótimo (FPO) que é uma das ferramentas mais eficazes tanto para a análise de sistemas atuais quanto para o planejamento de novos sistemas de potência. No manuscrito um aplicativo de Inteligência Artificial (IA) é aplicado com base em métodos heurísticos que podem resolver problemas de FPO com uma dada precisão em comparação com os métodos convencionais. O custo total de geração por hora das unidades geradoras é minimizado como uma função objetivo para atender a demanda de carga e perdas do sistema. Os métodos de Algoritmo Genético e PSO são desenvolvidos usando o MATLAB aplicados aos sistemas de 14 e 30 barras do IEEE para resolver o problema de FPO. Em consequência do uso FPO realizado com

o uso de PSO e GA, as soluções ótimas foram comparadas com estudos semelhantes na literatura. Determinou-se que o algoritmo PSO desenvolvido no escopo deste trabalho apresenta resultados de custo inferior ao do GA desenvolvido para este estudo e aos estudos de GA que estão presentes na literatura.

Em (ALRASHIDI; EL-HAWARY, 2007) é mostrado um algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas Híbrido (HPSO) como uma ferramenta de otimização moderna para resolver o problema de fluxo de potência ótimo discreto (FPO) que possui variáveis discretas e contínuas. O problema é classificado como programação não-linear inteira mista restrita com características multimodais. As funções objetivo consideradas são as perdas reais de potência do sistema, o custo do combustível e as emissões gasosas das unidades geradoras. O algoritmo proposto faz uso do PSO, conhecido por sua capacidade de busca global, para alocar as configurações de controle ideais, enquanto o algoritmo de Newton-Raphson minimiza o desbalanço das equações de fluxo de carga. Um mecanismo de tratamento de restrição de desigualdade híbrido que preserva apenas soluções viáveis sem a necessidade de aumentar a função objetivo original é incorporado na abordagem. Para demonstrar sua robustez, o algoritmo proposto foi testado no sistema IEEE 30 barras com seis unidades geradoras. Vários casos foram investigados para testar e validar a consistência da detecção de solução ótima ou quase ótima para cada objetivo. Os resultados são comparados às soluções obtidas de resultados do software MATPOWER que emprega algoritmo de programação quadrática sequencial para resolver o FPO. Além disso, um estudo de ajuste dos parâmetros do HPSO em relação ao problema de FPO é apresentado e analisado.

Em (RAJ; PALANIVELU; GNANADASS, 2007) um algoritmo baseado em Otimização por Enxame de Partículas (PSO) para Fluxo de Potência Ótimo (FPO) é apresentado em ambiente de Despacho de Emissão Econômica Combinada (CEED) de unidades térmicas enquanto satisfaz as restrições como limites geração de potência reativa, balanços de potência e limites térmicos de linhas. Este método é dinâmico por natureza e supera as deficiências de outras técnicas de computação evolutiva, como convergência prematura, e fornece soluções de alta qualidade. O desempenho do método proposto foi demonstrado no sistema de 30 barras com seis unidades geradoras. O problema foi formulado como um único problema de otimização para obter como objetivos a solução para o problema de fluxo de potência ótimo com custo de combustível combinado e impacto ambiental. Os resultados obtidos pelo método proposto são melhores do que quaisquer outras técnicas de computação evolutiva até então comparadas.

Em (MILANO; CANIZARES; INVERNIZZI, 2005) é proposto duas técnicas novas para incluir contingências em cálculos nos mercado de eletricidade com base em FPO e para a estimativa de uma capacidade de transferência disponível de “todo o sistema”. A formulação do problema de FPO inclui restrições de estabilidade de tensão e um parâmetro

de carga para garantir uma margem de estabilidade adequada para a solução de mercado. Dois métodos são propostos: o primeiro é uma abordagem iterativa que calcula um valor de capacidade de transferência baseado em um critério de contingência N-1 para uma condição inicial operacional ótima, para então resolver um problema de FPO para o pior caso de contingência; a segunda abordagem resolve um número reduzido de problemas de FPO associados a casos de contingência de acordo com uma classificação baseada em uma análise de sensibilidade de transferência de potência nas linhas de transmissão. Ambos os métodos são testados em um sistema de 6 barras e em um modelo realista de rede de 129 barras, considerando os lances de oferta e demanda. Preços marginais locais e preços de congestionamento nodal resultantes das soluções são propostos, bem como comparações com resultados obtidos por meio de uma técnica padrão de FPO da literatura.

## 1.2 Sistemas de Leilão nos Mercados de Eletricidade e Estabilidade/ Segurança de Tensão

Em (FERREIRA et al., 2021) uma abordagem em duas etapas é proposta para a solução de um sistema de Leilão baseado em Fluxo de Potência Ótimo em redes de transmissão de energia, sendo um trabalho ainda com algumas limitações, pois nem todas as restrições dos modelos apresentados foram utilizadas, pois seria necessário aplicar técnicas que fariam a abordagem funcionar em relação a um modelo de dois níveis e a inserção de novos estudos de caso. A primeira etapa da abordagem consiste em resolver um modelo de sistema de leilão de período único. A estabilidade/segurança da tensão de rede é assegurada na segunda etapa, resolvendo o problema de máximo carregamento. A abordagem proposta baseia-se na aplicação do algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas para resolver o sistema de leilão, além do ajuste no carregamento por Fluxo de Carga Continuado (FCC) respeitando restrições de magnitudes de tensão e geração de potência reativa. Um sistema de teste de 6 barras é usado para ilustrar numericamente esses resultados e mostrar a eficácia de propor um sistema de leilão de duas etapas para aquisição de potência a curto prazo nos mercados de eletricidade e garantir condições adequadas de segurança do sistema, bem como melhores preços de eletricidade.

Em (CHAVEZ-LUGO et al., ), uma restrição de segurança baseada em aproximações de primeira ordem de estabilidade / segurança de tensão e limites de estabilidade considerando  $N - 1$  contingências no sistema de potência é aplicada em um sistema de leilão de FPO de estabilidade-segurança de tensão unilateral para aquisição de potência A longo prazo em mercados desregulamentados de eletricidade. Embora o limite de segurança real consista em coletores de interseção e ligações internas associados a bifurcações de nó de sela, induzidas por limite de Hopf em cenários operacionais  $N - 1$ , o limite de segurança aproximado consiste em uma série de hiperplanos tangentes de interseção e

ligação interna para cada coletor, resultando em um conjunto de desigualdades lineares em termos do estado de despacho. Uma heurística para reduzir o número de hiperplanos na restrição de segurança também é proposta para que tal aproximação não resulte em um problema de programação linear excessivamente grande. Além de exigir o cálculo de todo o limite de segurança, erros absolutos máximos de cerca de 0,8 e 10 na contabilidade de aproximação do limite de segurança para a heurística proposta são relatados para estudos de caso com os sistemas de teste de 9 e 118 barras, respectivamente. Consequentemente, isso pode dificultar sua aplicação prática e comprometer a precisão da representação de segurança proposta para sistemas maiores.

Em (LAGE; FERNANDES; COSTA, 2015), uma aproximação de rede neural artificial de Levenberg-Marquardt com uma arquitetura diferente é proposta para reforçar a estabilidade de tensão em um sistema de leilão VSCOPF bilateral para aquisição de potência a curto prazo em mercados híbridos de eletricidade. Além de exigir o cálculo de todo o limite de estabilidade / segurança de tensão para treinamento e validação das redes neurais artificiais e, portanto, ter alto custo computacional, ambas as abordagens para aproximar os limites de estabilidade / segurança de tensão são dependentes da arquitetura da rede neural artificial, bem como da definição de funções de ativação adequadas e algoritmos de treinamento.

Em (HAMON; PERNINGE; SÖDER, 2013), uma restrição de estabilidade / segurança com base em aproximações de segunda ordem de estabilidade / segurança de tensão e limites de estabilidade de sinal é proposta para impor um certo nível de segurança no custo de operação mínimo esperado baseado em FPO sob variações de parâmetros estocásticos. Embora o limite de estabilidade real consista em coletores de interseção e ligação interna associados a bifurcações de nó de sela, induzidos por limite e de Hopf e limites térmicos, o limite de estabilidade aproximado consiste em ligar internamente e interceptar expansões de Taylor de segunda ordem de cada variedade em torno de uma aproximação ponto. Apesar de ser bastante precisa devido às expansões de Taylor definidas em termos do mapa de Weingarten, esta abordagem possui alto custo computacional, pois exige o cálculo de toda a fronteira de estabilidade/segurança, a busca do ponto de aproximação em torno do qual o segundo a aproximação da ordem de cada variedade é mais precisa, a aproximação real de segunda ordem para cada cenário operacional pré e pós-contingência e ações corretivas pós-contingência.

(LAGE; COSTA; CANIZARES, 2012; AVALOS; CANIZARES; ANJOS, 2008) propõem um sistema de leilão VSCOPF para aquisição de potência em curto prazo nos mercados híbridos em que as restrições de estabilidade/segurança de tensão são asseguradas por Índices de Estabilidade de Tensão (VSIs). Tais índices monitoraram o quão perto um sistema está do colapso de tensão se associados a um único gerador, o que os torna difíceis de serem previstos. Mesmo que atribuir um valor crítico geral a eles pudesse ser

considerado, os resultados se mostraram conservadores, podendo levar a sinais de preço inadequados no contexto de Fluxo de Potência Ótimo com Estabilidade/Segurança de Tensão aplicados aos mercados de eletricidade.

Em (GUTIERREZ-MARTINEZ et al., 2011), é proposta a aplicação de uma restrição de estabilidade / segurança de tensão com base em aproximações de um algoritmo de retropropagação em rede neural artificial de um sistema de leilão de Fluxo de Potência Ótimo com Estabilidade/ Segurança de tensão de período único (VSCOPF), para obtenção de potência a curto e longo prazo, em mercados híbridos de eletricidade. A abordagem exige o cálculo dos limites de estabilidade/segurança de tensão a cada treinamento e validação das redes neurais artificiais, demandando um alto custo computacional.

Em (MILANO; CANIZARES; INVERNIZZI, 2003), o bem-estar social e a distância até o ponto de máximo carregamento são maximizados em um Sistema de Leilão multiobjetivo de Fluxo de Potência Ótimo com restrição de Estabilidade/ Segurança de Tensão (VSCOPF) para aquisição de potência a curto prazo em mercados híbridos de eletricidade. Limites de estabilidade / segurança de tensão são aplicados no sistema de leilão por um conjunto de equações de balanço de potência ativa e reativa associadas ao ponto de operação de máximo carregamento, limites de carregamento para garantir níveis de segurança mínimo e máximo, limites de geração de potência reativa, limites de magnitude de tensão e limites térmicos de corrente.

Embora tenham sido publicados vários estudos e estruturas sobre a definição de um modelo de mercado capaz de cumprir com aspectos econômicos e de segurança, no entanto, a representação adequada da estabilidade e segurança de tensão em FPOs ainda é uma questão em aberto. Muitas abordagens se mostraram, em geral, bastante dependentes de fatores de ponderação, bastante conservadoras ou melhor, aproximadas e demandando muitos recursos computacionais. Logo, elas podem não representar limites reais de estabilidade e segurança de tensão ou fornecer sinais de preço inadequados, dificultando seu uso prático.





## 2 Modelagem Matemática

Neste capítulo é apresentada a modelagem proposta do Sistema de Leilão de Fluxo de Potência Ótimo com Estabilidade/Segurança de Tensão (VSCOPF) para compra de energia a curto prazo em mercados de eletricidade e o problema de máximo carregamento pelo cálculo do Fluxo de Carga Continuado.

### 2.1 Sistema de Leilão VSCOPF

O sistema de leilão de Fluxo de Potência Ótimo com Restrição de Segurança/Estabilidade de Tensão (VSCOPF) tem como objetivo maximizar a função de bem-estar social, de modo a assegurar que os produtores maximizem sua receita em blocos aceitos de licitação de oferta de potência ativa e os compradores minimizem os preços pagos. Assim, o sistema de leilão VSCOPF de período único é formulado, considerando uma rede de transmissão com  $\eta_B$  barras e  $\eta_T$  ramos de transmissão, por:

$$\max_{P_S, P_D, Q_G, \delta, V} \quad C_D^T P_D - C_S^T P_S \quad (2.1a)$$

$$\text{s.t:} \quad \Delta P(P_S, P_D, \delta, V) = 0, \quad (2.1b)$$

$$\Delta Q(P_D, Q_G, \delta, V) = 0, \quad (2.1c)$$

$$P_S^{\min} \leq P_S \leq P_S^{\max}, \quad (2.1d)$$

$$P_D^{\min} \leq P_D \leq P_D^{\max}, \quad (2.1e)$$

$$Q_G^{\min} \leq Q_G \leq Q_G^{\max}, \quad (2.1f)$$

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max}, \quad (2.1g)$$

$$\sigma(P_S, P_D, V_G) > 1, \quad (2.1h)$$

onde  $P_S \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  é o vetor dos blocos de ofertas não-negativos de fornecimento (lances de fornecimento) de potência ativa em unidade (p.u.), com  $P_S^{\min} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  e  $P_S^{\max} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  representando os blocos de propostas de oferta de potência ativa mínima e máxima não-negativas em p.u.;  $P_D \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  é o vetor de blocos de oferta de demanda (lances de demanda) de potência ativa não-negativas aceitos em p.u., com  $P_D^{\min} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  e  $P_D^{\max} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  representando os blocos de oferta de demanda de potência ativa mínima e máxima não-negativa em p.u.;  $C_S \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  e  $C_D \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  são, respectivamente, os custos dos preços de oferta e demanda em \$/MWh, definidos em termos dos elementos de  $P_S$  e  $P_D$ ;  $V \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  é o vetor das magnitudes de tensão em p.u. com limites dados por  $V^{\min} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  e  $V^{\max} \in \mathcal{R}_+^{n_B}$ , onde  $V_G \subset V$  é o vetor de magnitudes de tensão nas barras de geração;  $\delta \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  é o vetor

de ângulos de fase de tensão em radianos (para a barra slack de referência é definido como 0 rad.);  $Q_G \in \mathcal{R}^{n_B}$  é o vetor de geração de potência reativa em p.u., com limites dados por  $Q_G^{\min} \in \mathcal{R}^{n_B}$  e  $Q_G^{\max} \in \mathcal{R}^{n_B}$ ;  $\Delta P : \mathcal{R}_+^{4n_B} \rightarrow \mathcal{R}_+^{n_B}$  e  $\Delta Q : \mathcal{R}_+^{4n_B} \rightarrow \mathcal{R}_+^{n_B}$  são, respectivamente, os vetores de balanço de potência ativa e reativa em p.u.;  $\sigma : \mathcal{R}_{3n_B} \rightarrow \mathcal{R}_+^{n_B}$  é uma função implícita adimensional definida em termos de  $P_S, P_D$  e  $V_G$  que representa o carregamento crítico do sistema de potência associado à estabilidade de tensão/limites de segurança, ou seja, impõe que blocos aceitos de oferta e demanda permitam níveis mínimos de segurança.

Na Equação (2.2) e Equação (2.3), os balanços de potência ativa e reativa na barra  $k \in B$ , onde  $B$  é o conjunto de barras do sistema, são:

$$\Delta P_k = P_{G_k} + P_{S_k} - (P_{L_k} + P_{D_k}) - \sum_{m \in \mathcal{K}} P_{km}(\delta, V), \quad (2.2)$$

$$\Delta Q_k = Q_{G_k} + (Q_{L_k} + K_{L_k} P_{D_k}) - \sum_{m \in \mathcal{K}} Q_{km}(\delta, V), \quad (2.3)$$

onde  $P_G \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  representa as saídas ativas de geradores de operação obrigatória em p.u. e, portanto, não participa de licitações;  $P_L \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  e  $Q_L \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  são as cargas inelásticas ativa e reativa em p.u. e não participam também das licitações;  $K_L \in \mathcal{R}_+^{n_B}$  é um vetor de parâmetros adimensionais usado para modelar o aumento da carga reativa em termos de  $P_D$  para manter um fator de potência constante;  $\mathcal{K}$  é o conjunto de índices de barras conectados à barra  $k \in B$  mais a própria barra  $k$ ; e  $P_{km}$  e  $Q_{km}$  são os fluxos de potência ativa e reativa através do ramo de transmissão  $\{k, m\} \in T$ , onde  $T$  é o conjunto ordenado de pares de índice de barra que representam uma linha de transmissão ou um transformador conectando uma barra a outra, dado por:

$$P_{km} = V_k V_m (G_{km} \cos \delta_{km} + B_{km} \sin \delta_{km}), \quad (2.4)$$

$$Q_{km} = V_k V_m (G_{km} \sin \delta_{km} - B_{km} \cos \delta_{km}), \quad (2.5)$$

onde  $G_{km}$  e  $B_{km}$ , são respectivamente as partes real e imaginária do elemento  $Y_{km}$  na barras da matriz de admitância; e  $\delta_{km} = \delta_k - \delta_m$ .

Na modelagem do sistema de leilão VSCOPF, a função objetivo (2.1a) representa o bem-estar social. As restrições (2.1b) e (2.1c) são as equações do Fluxo de Carga. As restrições (2.1d) e (2.1e) limitam os blocos dos lances aceitos de oferta e demanda de

potência. Restrição (2.1f) denota os limites de geração de potência reativa. A restrição (2.1g) limita as magnitudes de tensão em todas as barras. Por fim, a restrição (2.1h) é a restrição de estabilidade / segurança de tensão definida por uma função implícita de  $P_S$ ,  $P_D$  e  $V_G$ . Esta função representa o nível de carregamento máximo do sistema com blocos de oferta e demanda alocados e garante que os blocos de oferta aceitos permitam margens mínimas de estabilidade / segurança. A formulação do problema para determinar esse nível de carga é apresentada a seguir.

## 2.2 Problema de Máximo Carregamento do Sistema de Potência

A restrição de estabilidade/segurança de tensão (2.1h) é uma função implícita em termos de  $P_S$ ,  $P_D$  e  $V_G$ , que associa o nível de carregamento do sistema com o ponto de operação da rede naquele momento. Logo, o máximo carregamento (crítico)  $\sigma$  deve ser maior que 1 (2.1h), impondo que os blocos de oferta e demanda permitam níveis mínimos de estabilidade/segurança. O Fluxo de Carga Continuado, que consiste em resolver sucessivamente o seguinte sistema algébrico de equações e inequações de forma parametrizada (AJJARAPU; CHRISTY, 1992), é aplicado para resolver o problema. Assim, o máximo carregamento é formulado, por:

$$\Delta P^c(P_S, P_D, \sigma, K_G, \delta^c, V^c) = 0, \quad (2.6a)$$

$$\Delta Q^c(P_D, \sigma, Q_G^c, \delta^c, V^c) = 0, \quad (2.6b)$$

$$Q_G^{\min} \leq Q_G^c \leq Q_G^{\max}, \quad (2.6c)$$

$$V^{\min} \leq V^c \leq V^{\max}, \quad (2.6d)$$

$$I(\delta^c, V^c) \leq I^{\max}, \quad (2.6e)$$

onde o sobrescrito  $c$  é usado para diferenciar as funções e variáveis dependentes no sistema de leilão VSCOPF (2.1) e aquelas na formulação do problema de máximo carregamento (2.6);  $K_G$  é um escalar adimensional usado para representar uma barra slack distribuída (presume-se que as perdas de potência ativa no cálculo do fluxo de carga são distribuídas entre todos os geradores na proporção de suas respectivas injeções de potência);  $I : \mathcal{R}^{2n_B} \rightarrow \mathcal{R}_+^{n_B}$  é o vetor de magnitudes de linhas de corrente em p.u. nos ramos de transmissão, cujos limites são dados por  $I^{\max} \in \mathcal{R}_+^{n_T}$  em p.u. (limites térmicos); e  $P_S, P_D$  e  $V_G$  são os parâmetros em (2.6) determinados no sistema de leilão VSCOPF (2.1).

Na Equação (2.6a) e Equação (2.6b), respectivamente, os balanços de potência ativa e reativa para a barra  $k \in B$  são:

$$\Delta P_k^c = (\sigma + K_G)(P_{G_k} + P_{S_k}) - \sigma(P_{L_k} + P_{D_k}) - \sum_{m \in \mathcal{K}} P_{km}(\delta^c, V^c) \quad (2.7)$$

$$\Delta Q_k^c = Q_{G_k}^c - \sigma(Q_{L_k} + K_{L_k} P_{D_k}) - \sum_{m \in \mathcal{K}} Q_{km}(\delta^c, V^c) \quad (2.8)$$

Finalmente, o ponto crítico de carregamento em (2.6) pode estar associado a limites de magnitude de tensão, limites térmicos ou limites de estabilidade de tensão. Se as restrições (2.6d) e (2.6e) não estão ativas, a carga crítica está no limite de estabilidade real (local ótimo de (2.6) nessas condições corresponde a um nó de sela ou bifurcação estática induzida por limite (AVALOS et al., 2009)).

Após formalizadas as modelagens matemáticas com suas respectivas equações, restrições, variáveis e parâmetros que fundamentam a abordagem para resolução do sistema de leilão VSCOPF, no próximo capítulo, será explanada que recursos e técnicas foram aplicadas para determinação das soluções para tais problemas sendo de fundamental importância para a apresentação da abordagem proposta.

## 3 Metodologia Proposta

Neste capítulo é apresentada a abordagem proposta para resolver o sistema de leilão com PSO e o problema do máximo carregamento pelo Fluxo de Carga Continuado. A metaheurística aplicada e o FCC são descritos em detalhes, bem como o funcionamento da metodologia.

### 3.1 *Particle Swarm Optimization*

O método de Otimização por Enxame de Partículas (PSO), do inglês *Particle Swarm Optimization*, é um procedimento de otimização estocástica inspirado em princípios de cooperação e comportamento em sociedade de enxames, cardume de peixes e bandos de pássaros. O algoritmo foi proposto por Kennedy e Eberhart (1995) (KENNEDY; EBERHART, 1995) e rapidamente o algoritmo popularizou-se como um otimizador global devido sua eficiência e custo computacional relativamente baixo (SHARMA; PANDIT, 2012), robusto e simples para realizar o procedimento de busca e otimização para obtenção de uma solução  $N - dimensional$ . O algoritmo está entre o algoritmo genético e a programação evolucionária, partilhando conceitos comuns de ambos.

O PSO é uma técnica otimização estocástica populacional motivada pela simulação do comportamento social, que detalha uma população potencial de soluções em um espaço de busca, em que através da cooperação e da competição entre estas soluções, e o mesmo trabalha a partir de uma população de partículas fazendo-as evoluir até que se ache uma solução ótima, quando aplicadas em problemas de otimização (RAFIK; SLIMANI; BOUKTIR, 2006; MOHAMED; RAO; HASAN, 2010). Entretanto, diferentemente dos algoritmos evolutivos clássicos, que utilizam uma população inicial de soluções (indivíduos) gerada aleatoriamente com uma distribuição uniforme, o PSO trabalha com uma população de partículas em um enxame, onde cada partícula  $i$  tem sua posição  $x_i$  e velocidade  $v_i$  atualizados a cada geração  $t$  (iteração do algoritmo) através de fatores de sua própria memória (fator cognitivo), e de seu conhecimento social (fator social). Tais fatores são regidos respectivamente pelas ponderações social  $c_1$  e cognitiva  $c_2$ .

Resumidamente, o comportamento de cada partícula  $i$  é definido de acordo com as equações de atualização da velocidade e de posição das partículas, que são definidas conformes as equações (3.1) e (3.2):

$$V_i^{k+1} = W * V_i^k + c_1 * rand_1 * (P_{best_i} - X_i^k) + c_2 * rand_2 * (G_{best_i} - X_i^k) \quad (3.1)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (3.2)$$

onde  $V_i^k$  é a velocidade da partícula  $i$  na iteração  $k$ ;  $V_i^{k+1}$  é a velocidade atualizada da partícula na iteração  $(k + 1)$ ;  $W$  é o de peso de inércia,  $rand_1$  e  $rand_2$  são os números aleatórios entre 0 e 1;  $P_{best_i}$  é o melhor valor encontrado pela partícula  $i$  até a iteração  $k$ , ou seja, reflete as informações trocadas dentro da vizinhança da partícula, refletindo o conhecimento local do ambiente;  $G_{best_i}$  é a melhor partícula encontrada no grupo até iteração  $k$ , ou seja, a atualização da velocidade da partícula reflete informações obtidas de todas as partículas do enxame;  $X_i^k$  é a posição da partícula  $i$  em  $k$  iterações;  $X_i^{k+1}$  é a corrente posição (ponto de busca modificado) da partícula  $i$  na iteração  $(k + 1)$ ;  $c_1$  e  $c_2$  são as constantes de aceleração e representam os fatores de ponderação dos termos de aceleração que puxam cada partícula para as posições  $P_{best}$  e  $G_{best}$ . A maneira encontrada pelo algoritmo para fazer as comparações entre posições é por meio de uma função de adaptação ou aptidão, chamada de *fitness* que é uma função para medir a qualidade da solução apresentada.

O princípio básico do algoritmo de enxame de partículas é que as partículas se movem no espaço de busca, visando encontrar uma solução, guiada por sua experiência e pela experiência do enxame. Além de todos os parâmetros apresentados, existe outro importante usado para organizar as partículas no enxame, que são as topologias do algoritmo. As mais usadas: topologia estrela e topologia anel. Na topologia estrela todas as partículas possuem informações sobre todas as demais. Já na topologia anel, uma partícula só possui informações de sua vizinha esquerda e direita.

A escolha adequada da topologia evita que o algoritmo caia em mínimos locais já que se uma função a ser otimizada, possuir muitos máximos e/ou mínimos, pode ocorrer de uma partícula cair em um mínimo/máximo local, e influenciar todas as demais irem para lá, colaborando para o algoritmo ter uma convergência prematura (EBERHART; KENNEDY, 1995). A topologia anel ajuda a evitar tal problema, já que as partículas possuem a informação de melhor posição apenas de seus vizinhos, portanto o risco delas convergirem para a mesma posição ao mesmo tempo é mínimo, pois partes da população que estão distantes entre si são também independentes umas das outras. Então, um segmento da população pode convergir para um mínimo local, enquanto outra parte converge para outra solução ou continua a busca, todavia a convergência pode ficar mais lenta.

Iterações dos algoritmos são executadas até que uma condição de parada seja satisfeita. Dentro de cada iteração, várias avaliações de funções de fitness são realizadas, onde essa função caracteriza o problema de otimização a ser resolvido pelo algoritmo. O primeiro passo do PSO é inicializar o enxame e seus parâmetros de controle. As constantes

de aceleração, as velocidades iniciais, as posições de cada partícula e suas melhores posições devem ser especificadas. Para garantir a convergência do algoritmo, seus vários parâmetros precisam ser cuidadosamente ajustados, a fim de alcançar um desempenho satisfatório.

O PSO, utilizado na resolução de problemas sem restrições, pode ser definido assim (VENTER; SOBIESZCZANSKI-SOBIESK, 2003):

- **1.** Inicializar um conjunto de partículas em um tempo  $k = 0$  com velocidades e posições aleatórias distribuídas dentro do espaço de busca;
- **2.** Avaliar a função objetivo de cada uma das partículas da população;
- **3.** Atualizar a melhor posição individual de cada partícula bem como a melhor posição do bando;
- **4.** Atualizar a posição de cada partícula no tempo  $k + 1$  baseado na posição e velocidade no tempo  $k$ ;
- **5.** Repetir os processos de 2 a 4 até que uma condição de parada seja satisfeita.

Por ser considerado bastante eficiente para resolver problemas de otimização sem restrições, uma técnica ou estratégia deve ser considerada para tratar problemas com restrições (PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2002). As estratégias mais conhecidas são: técnicas que preservam a viabilidade das soluções, técnicas para a separação de soluções viáveis das inviáveis, técnicas que reparam soluções inviáveis e técnicas baseadas em funções de penalização (RAY; LIEW, 2001). Dentre diversas técnicas de penalização, uma bastante utilizada é a que considera uma função de penalização, que pode ser aditiva ou multiplicativa, sobre o valor da função objetivo.

A vantagem da aplicação do PSO em problemas de FPO é a sua fácil implementação e sem grande custo computacional já que esta metaheurística não requer o cálculo de derivadas para a sua implementação. Porém, como toda heurística, o mesmo não garante a solução ótima, sendo bastante comum levar a solução a mínimos locais pelo fato de o algoritmo poder convergir prematuramente. Isto significa que as partículas podem permanecer girando em torno do máximo/mínimo por muito tempo, até finalmente "pousarem" sobre o ponto. Por essa razão, existem mecanismos para melhorar o algoritmo e evitar essa ocorrência.

## 3.2 Fluxo de Carga Continuado

O FCC é um algoritmo baseado na reformulação das equações do Fluxo de Carga e aplicação de uma técnica de continuação local parametrizada (AJJARAPU; CHRISTY, 1992). A base geral para seu funcionamento é bastante simples, pois consiste numa resolução

de sucessivos problemas de Fluxo de Carga, reformulado para incluir o parâmetro de carregamento  $\sigma$  como em (2.7) e (2.8).

Na técnica de parametrização local, o conjunto original das equações do FC é aumentado por uma equação que especifica o valor de uma das variáveis de estado, podendo ser elas: uma magnitude de tensão de uma das barras, um ângulo de tensão de barra ou o parâmetro de carga  $\sigma$ , sendo esse último o especificado nesse trabalho. Com a adição de carga, as equações de FC são resolvidas em função do aumento no valor do parâmetro de carga (AJJARAPU; CHRISTY, 1992).

Assim, é possível encontrar o ponto de carregamento máximo (ponto crítico)  $\sigma$ , que caracteriza o ponto de colapso da tensão. Neste ponto, os pontos de equilíbrio estável e instável se fundem, e essa fusão é matematicamente representada por uma bifurcação (um nó de sela ou uma bifurcação induzida por limite). A partir daí, o conjunto de equações do FC não possui mais soluções (AJJARAPU; CHRISTY, 1992).

A vantagem de utilizar o FCC em relação aos métodos diretos (baseados em otimização) como forma de determinar esse ponto, está em obter informações adicionais sobre múltiplas soluções do FC, como os limites técnicos e operacionais em direção ao ponto máximo, além de ser baseado em um algoritmo de FC convencional.

O aumento de carga e a solução do problema de Fluxo de Carga até que o processo divirja, não possibilita a obtenção de um ponto de máximo carregamento, apenas chegar até bem próximo a ele. Portanto, nas proximidades do ponto de máximo carregamento, a solução do FC é dificultada, devido a condição de singularidade da matriz jacobiana (AJJARAPU; CHRISTY, 1991).

### 3.2.1 Fluxo de Carga

O Fluxo de Carga (FC) consiste em determinar o ponto de operação da rede, considerando uma modelagem estática, em que a rede é representada por um conjunto de equações e inequações algébricas, as quais devem ser resolvidas de forma a se conhecer a geração de potência reativa nas barras de geração, a distribuição dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão, etc, que representam o comportamento do sistema (LAGE, 2013).

A solução do Fluxo de Carga é essencial para determinar o estado operativo dos sistemas elétricos verificando se a operação rede está ocorrendo de forma adequada, o que possibilita a indicação de correções ou prevenções de situações operativas indesejáveis. Basicamente, a resolução do problema de Fluxo de Carga é efetuada por meio de métodos específicos para resolução de sistemas de equações não lineares, fornecendo seu estado, isto é, a magnitude e o ângulo de fase da tensão em cada barra da rede (MONTICELLI, 1983).

Na formulação básica do problema de FC, apenas duas grandezas são conhecidas



em cada barra. Dependendo de quais grandezas são conhecidas, as barras são classificadas como um dos três tipos: barra de referência angular ou slack, barra de geração e barra de carga. Visto que cada barra do sistema apresenta dois parâmetros e duas variáveis associadas, para que o sistema de equações algébricas não-lineares se torne possível e determinado, cada barra deve apresentar duas equações. Através da Primeira Lei de Kirchhoff, é possível igualar a injeção de potência ativa e reativa em uma barra com a soma dos fluxos de potência que entram e deixam a barra (MONTICELLI, 1983).

Além das equações de igualdade que representam o balanço de potência nas barras do sistema, mostradas na modelagem matemática, há também as inequações que representam as restrições operacionais/segurança do sistema. O conjunto de restrições operacionais é representado por: restrição de magnitude da tensão nodal, restrição de geração de potência reativa na barra  $k$  e restrição da magnitude dos *taps* de transformadores.

### 3.2.2 Formulação do Problema de Fluxo de Carga com Barra Slack Distribuída

Na formulação básica do problema de FC, a barra slack fecha o balanço de potência ativa do sistema e supre, sozinha, as perdas de potência ativa nas linhas de transmissão. Em sistemas reais, a alocação de perdas ativas na transmissão é geralmente distribuída entre os geradores, cada um com seu fator de participação na alocação das perdas. Dessa forma, acrescenta-se uma variável associada ao sistema elétrico, denominada  $K_G$ .

Assim, a barra de referência angular deixa de ser uma barra  $V\theta$  e passa a ser uma barra do tipo  $PV\theta$ , em que  $P$  agora é um parâmetro da barra slack, definido inicialmente de forma a fechar o balanço de potência entre geração e demanda (desconsiderando perdas ativas na transmissão).

Portanto, a equação de balanço de potência ativa representada por (2.2) na formulação básica é substituída por (2.7). A equação de balanço de potência reativa não é alterada na formulação do problema de FC com barra slack distribuída. A resolução do problema de FC com barra slack distribuída também é dividida em dois subsistemas. Entretanto, como há a adição de uma nova variável ( $K_G$ ), além da mudança da equação de balanço de potência ativa, ambos os subsistemas do problema são alterados, sendo representados da seguinte maneira:

- Subsistema 1: No primeiro subproblema, são fornecidos os valores de injeção (geração de menos carga) de potência ativa para todas as barras do sistema (visto que a barra slack se tornou uma barra do tipo  $PV\theta$ ) e a injeção de potência reativa para todas as barras do tipo  $PQ$ . Seja  $n_B$  o número de barras do sistema. Dessa forma, a dimensão do primeiro subsistema, de acordo com as equações, é  $n_B + n_{PQ}$ . O primeiro subsistema determina tanto o estado do sistema quanto o valor da variável  $K_G$ , que

é encontrada a partir da inserção da equação de balanço de potência ativa na barra slack.

- Subsistema 2: Após encontrado o estado do sistema (Subsistema 1), as únicas variáveis que ainda não foram determinadas são das injeções de potência reativa nas barras de geração. Dessa forma, a dimensão desse subsistema é  $n_{V\theta} + n_{PV}$ . Da mesma forma que na resolução do problema básico de FC, o Subsistema 1 do problema de FC com barra slack distribuída apresenta as variáveis implícitas nas equações de balanço, o que exige a resolução desse subproblema por um método numérico, em que a solução é alcançada quando o erro das equações de balanço for menor do que a tolerância desejada.

### 3.2.3 Análise das Bifurcações

A teoria da bifurcação fornece informações quantitativas e qualitativas sobre as mudanças no comportamento do conjunto solução de uma equação ou sistemas de equações à medida que um parâmetro  $\sigma$  (chamado de parâmetro de bifurcação) é variado. Mudanças no comportamento do conjunto solução do sistema de equações são normalmente contínuas. Assim, quando há uma mudança descontínua no comportamento, este ponto é caracterizado como um ponto de bifurcação (JORDAN; SMITH, 2007).

Em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), como o parâmetro  $\sigma$  varia de maneira discreta, as bifurcações podem ser determinadas a partir de uma mudança na estrutura da matriz Jacobiana associada ao conjunto de equações de balanço do sistema ou com o desaparecimento de soluções para esse conjunto de equações (caracterizando o ponto de máximo carregamento  $\sigma^c$ ). Tais bifurcações podem ser caracterizadas em duas principais categorias:

- Bifurcação sela-nó (BSN): Esse tipo de bifurcação ocorre quando dois pontos de equilíbrio do sistema se “fundem” para um determinado valor do parâmetro  $\sigma$  (denominado  $\sigma^c$ ). Matematicamente, um ponto em que ocorre a BSN é caracterizado pela singularidade da matriz Jacobiana associada ao sistema (CANIZARES, 1995). A partir desse ponto, o sistema não apresentará mais solução para valores de  $\sigma$  superiores  $\sigma^c$ . Em SEP, essa bifurcação caracteriza o ponto de colapso do sistema, visto que ele atingiu seu ponto de máximo carregamento.
- Bifurcação Induzida por Limites (BIL): As BIL são bifurcações que ocorrem quando alguma variável do sistema atinge o seu limite (inferior ou superior), ocasionando uma mudança no sistema de equações e, conseqüentemente, na estrutura da matriz Jacobiana. As BIL se dividem em dois grupo: as dinâmicas (BDIL) e as estáticas (BEIL). No caso das BDIL, o sistema continua apresentando uma solução mesmo

para um valor de  $\sigma$  superior ao que ocasionou a bifurcação. O BEIL é similar a BSN pois, em ambas, os pontos de equilíbrio estáveis de dois conjuntos diferentes de soluções se “fundem” para um determinado valor do parâmetro  $\sigma^c$ , deixando de existir solução para valores de  $\sigma$  superiores a  $\sigma^c$  (no caso de SEP, os valores que se fundem são as soluções de alta e baixa tensão). Dessa forma, as BDIL são associadas a mudanças “dinâmicas” do sistema, enquanto as BSN e BEIL estão associadas ao ponto de máximo carregamento do SEP.

É importante notar que as bifurcações do tipo BDIL e BEIL alteram a estrutura da matriz Jacobiana associada ao sistema mas não as tornam singular. Assim, caso um sistema tenha seu ponto de máximo carregamento caracterizado por uma BEIL, diferentemente da BSN, esse ponto não apresentará uma matriz Jacobiana com determinante nulo. Por fim, há também o caso em que um sistema apresenta tanto a BDIL quanto a BEIL. Nesses casos, algumas variáveis atingem o seu limite operacional mas não ocasionam o colapso do sistema, e alguma atinge o limite e caracteriza o ponto de máximo carregamento.

### 3.3 Abordagem Proposta

A metodologia da abordagem será demonstrada nesta seção. O PSO será aplicado para resolver o sistema de leilão baseado em FPO para obter os valores dos lances de oferta e demanda e magnitudes de tensão para as barras de geração, ou seja, calcular as variáveis de controle que em breve serão utilizadas como parâmetros no problema de máximo carregamento do sistema, resolvido pelo Fluxo de Carga Continuado para obter um valor crítico de carregamento, avaliado no sistema de leilão pela restrição (2.1h).

Os valores de potência ativa e reativa e as magnitudes de tensão das barras de geração de potência reativa são recalculados a cada nova execução no problema de leilão, caso uma condição mínima de estabilidade/segurança de tensão não seja satisfeita no problema de máximo carregamento. Este processo continua enquanto quaisquer restrições no sistema de leilão baseado em VSCOPF não forem atendidas. As Figuras 1 e 2 descrevem no formato de fluxograma o funcionamento da abordagem.

Na Fig. 1, o PSO é aplicado para se obter os valores dos lances de oferta e demanda, magnitudes de tensão do modelo de leilão, bem como do bem-estar social, que são métricas do sistema de leilão calculadas pelo PSO a serem avaliadas. Um vetor de partículas é inicializado, com todas as configurações do PSO setadas, onde é realizado o cálculo da função de *fitness*. Um destaque importante no cálculo da função de *fitness* é que ela envolve a resolução da função objetivo com uso do FC e da função penalidades, para atender ao problema do sistema de leilão que possui restrições. Com todas as restrições satisfeitas e o número de iterações atingidos, obteremos um vetor com a melhor posição para as partículas. Cada etapa pode ser melhor detalhada da seguinte forma:

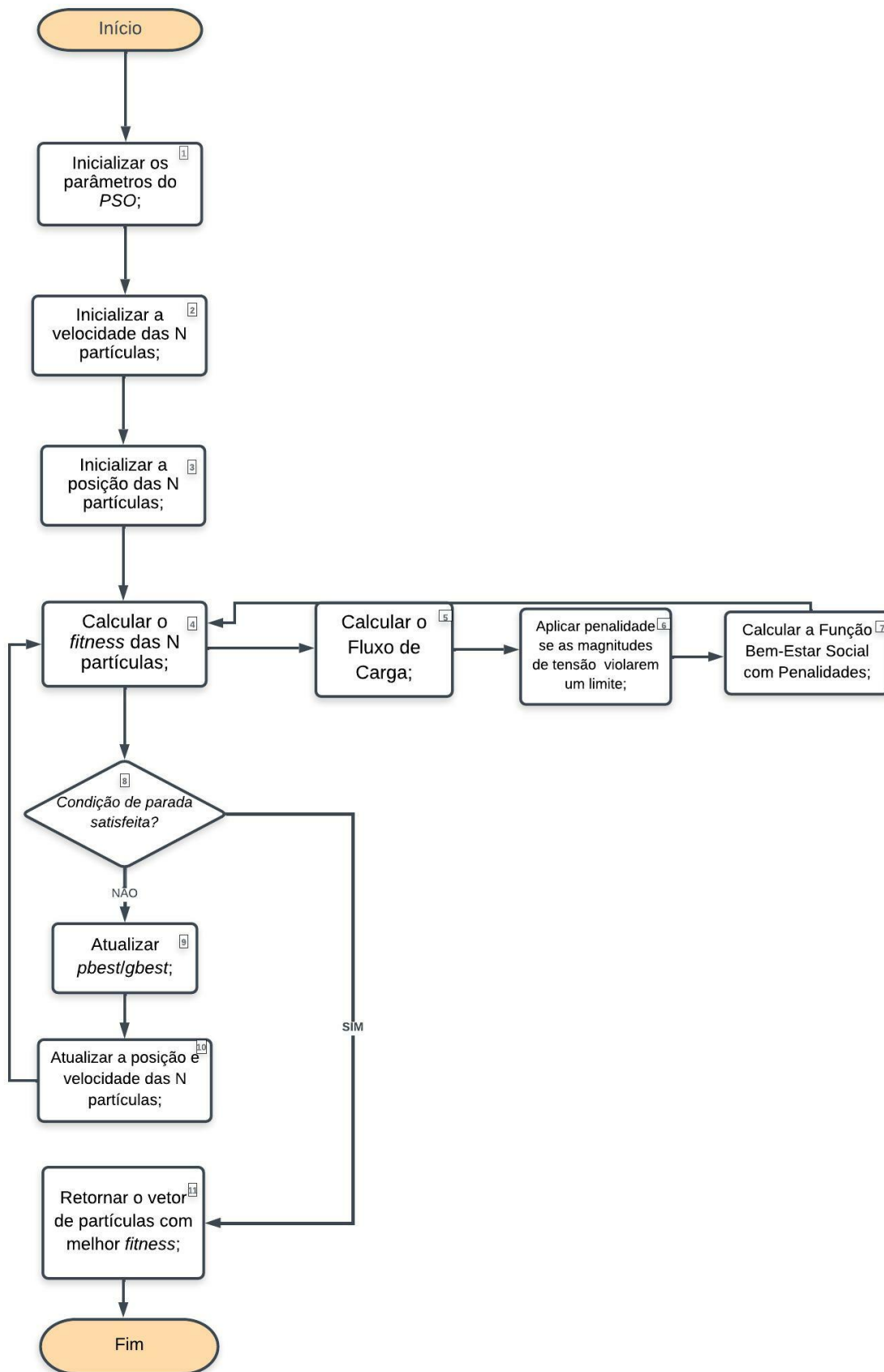


Figura 1 – Funcionamento do Problema de Sistema de Leilão com PSO.

- **Etapa 1.** Inicializar os parâmetros do PSO, ou seja, o número de partículas, número de iterações, topologia da rede, peso de inércia e as constantes de aceleração (fator cognitivo e social);
- **Etapa 2.** Inicializar a velocidade das  $N$  partículas que é um dos componentes da metaheurística;
- **Etapa 3.** Inicializar a posição das  $N$  partículas ( $P_{S1}, P_{S2}, P_{S3}, P_{D4}, P_{D5}, P_{D6}, V_1, V_2$  e  $V_3$ );
- **Etapa 4.** Calcular o *fitness* das  $N$  partículas, onde o vetor de todas as partículas com todas as suas variáveis é calculado;
- **Etapa 5.** Calcular o Fluxo de Carga, ou seja, a matriz jacobiana para obter-se os valores de todas as variáveis dependentes e independentes;
- **Etapa 6.** Calcular o Bem-estar social com penalidades, que é cálculo do valor da função objetivo do problema;
- **Etapa 7.** Condição de parada satisfeita quando o número de iterações for atingido e todas as restrições impostas pelo problema não forem violadas;
- **Etapa 8.** Atualizar pbest/gabest de cada partícula para sua melhor posição individual já alcançada até o momento e para melhor posição no espaço de busca já alcançada até então;
- **Etapa 9.** Atualizar a velocidade e posição das  $N$  partículas de acordo com as equações (3.1) e (3.2);
- **Etapa 10.** Retornar a partícula com o melhor *fitness*, ou seja, o vetor com os valores de  $P_S, P_D$  e  $V_G$ .

A Fig. 2 descreve como funciona a abordagem para o problema de máximo carregamento do sistema resolvido pelo método FCC. Após a obtenção dos resultados no problema de sistema de leilão baseado em VSCOPF pelo PSO, o vetor com melhor *fitness* é utilizado como parâmetro no problema de máximo carregamento do sistema. Um valor de carga  $\sigma$  é especificado para iniciar o método iterativo de obtenção do novo ponto de operação da rede e então o sistema de equações é resolvido pelo FC, determinando assim o método do FCC, respeitando todas as restrições impostas pelo problema. Além do valor da carga, também são determinados valores para todas as variáveis dependentes e independentes do problema. Cada etapa pode ser detalhada da seguinte forma:

- **Etapa 1.** Inicializar os parâmetros do problema de máximo carregamento, ou seja, ( $P_S, P_D$  e  $V_G$ ). (Obs.:  $P_S, P_D$  e  $V_G$  é um vetor de valores determinados no problema de sistema de leilão pelo PSO);

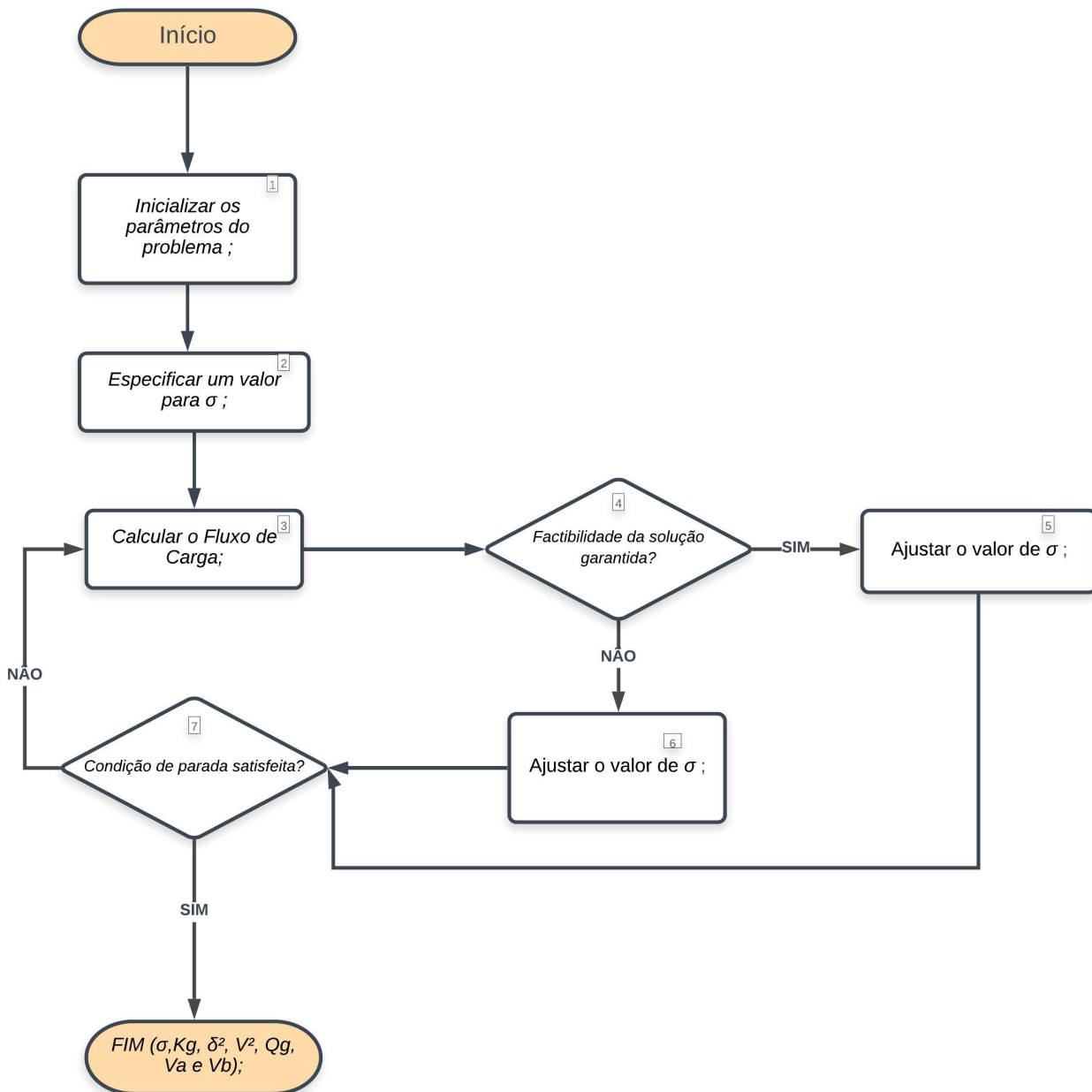


Figura 2 – Funcionamento do Problema de Máximo Carregamento pelo FCC.

- **Etapa 2.** Especificar um valor para  $\sigma$ , como caso base o valor inicial é 1.0;
- **Etapa 3.** Calcular o Fluxo de Carga (FC) (ao calcular o FC terei os valores das variáveis:  $Q_G$ ,  $K_G$ ,  $\delta^c$ ,  $V^c$ ,  $V_a$  e  $V_b$  até então desconhecidos);
- **Etapa 4.** Testar a factibilidade da solução, ou seja, analisar se meu problema de máximo carregamento é factível ou infactível;
- **Etapa 5.** Se a função for factível, o valor de  $\sigma$  será ajustado;
- **Etapa 6.** Se a função for infactível, o valor de  $\sigma$  será ajustado;

- **Etapa 7.** A condição de parada foi satisfeita (essa condição será atendida quando o valor de  $\sigma$  for máximo atendendo todas as restrições).

Assim, após demonstrar o funcionamento da abordagem para os dois problemas isoladamente, pode-se montar a abordagem proposta, onde foi feita a implementação de uma formulação em que aplica o método da função de penalidade quadrática à função objetivo do problema do sistema de leilões VSCOPF. No entanto, as restrições referentes ao balanço de potência ativa e reativa, bem como os limites de magnitudes de tensão, geração de potência reativa, limites térmicos e limite de máximo carregamento, são adicionadas à função objetivo por meio de funções de penalidade. Se uma condição mínima de estabilidade/segurança de tensão não for satisfeita, os valores de potência ativa e as magnitudes de tensão de geração de potência reativa são reajustados em nova rodada de execução no primeiro de Leilão para cumprir com restrições de estabilidade/segurança de tensão. Como resultado, são encontrados os valores de  $P_S$ ,  $P_D$ ,  $V_G$ ,  $Q_G$ ,  $K_G$ ,  $\sigma$  e bem-estar social e verificado se todas as restrições são atendidas, inclusive se o valor de carga crítico é maior que 1. As análises serão apresentadas na seção de resultados.

As implementações do PSO e do Fluxo de Carga Continuado foram realizada em Linguagem de Programação C e Python compiladas utilizando GCC (Gnu Compiler Collection) versão 5.4.0 . Foram executadas em um notebook SAMSUNG com processador Intel(R) Celeron(R) CPU 1007U 1.50GHz 1.50 GHz com 8 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10 Pro. Além dos testes feitos na máquina virtual (Virtual Box Machine) em Linux e também no programa Falcon C ++ para Windows.





## 4 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os experimentos realizados, a fim de verificar o desempenho da abordagem proposta. Serão apresentados os resultados numéricos e discussões para validar a aplicação do PSO no sistema de leilão VSCOPF apresentado e do Fluxo de Carga Continuado ao problema de máximo carregamento, usando um sistema do IEEE de 6 barras (MILANO; CANIZARES; INVERNIZZI, 2003), onde os dados de barras e linhas de transmissão são apresentados na Tabela 1 e Tabela 2 e seu diagrama apresentado na Fig. 3. Os experimentos foram realizados com a análise dos estudos de caso 1 e 2.

Na Fig. 3, cada barra do sistema representa um participante do leilão, em que as três primeiras empresas de geração vão dá lances de oferta e as três últimas empresas de geração darão os lances de demanda. Os participantes procuram arrematar o bem desde que o preço não supere o valor de oportunidade que eles possuem para o bem. Para definir quem é o vencedor no leilão, é utilizado o critério de menor tarifa: os vencedores são quem ofertam a energia elétrica pelo menor preço por \$/MWh.

Os parâmetros do PSO serão analisados, destacando: número de partículas ( $n$ ), ponderação(peso) de inércia linearmente decrescente ( $w$ ), componente de aceleração cognitivo e componente de aceleração social ( $c1$  e  $c2$ ), número de iterações, topologia da rede e número de execução das avaliações. As configurações para o Fluxo de Carga, erro e para função de *fitness*, o seu fator de penalidade, também serão considerados. Será feita o cálculo estatístico para os dois estudos da média das execuções para a função objetivo com penalidades, além do destaque para a melhor solução encontrada.

Tabela 1 – Dados de lances e barras para o sistema IEEE de 6 barras

| Participantes | $C_{bid}$ [p.u.] | $P_{bid}^{max}$ [MW] | $P_G$ [MW] | $P_L$ [Mvar] | $Q_L$ [MW] | $Q_G^{lim}$ [Mvar] |
|---------------|------------------|----------------------|------------|--------------|------------|--------------------|
| GENCO 1       | 9.7              | 20.0                 | 90.0       | 0.0          | 0.0        | $\pm 150.0$        |
| GENCO 2       | 8.8              | 25.0                 | 140.0      | 0.0          | 0.0        | $\pm 150.0$        |
| GENCO 3       | 7.0              | 20.0                 | 60.0       | 0.0          | 0.0        | $\pm 150.0$        |
| ESCO 1        | 12.0             | 25.0                 | 0.0        | 90.0         | 60.0       | 0.0                |
| ESCO 2        | 10.5             | 10.0                 | 0.0        | 100.0        | 70.0       | 0.0                |
| ESCO 3        | 9.5              | 20.0                 | 0.0        | 90.0         | 60.0       | 0.0                |

### 4.0.1 Sistema de leilão VSCOPF com máximo carregamento definido por limite mínimo de tensão na barra 5

Neste primeiro estudo de caso, o VSCOPF é resolvido para analisar as propriedades de convergência da abordagem proposta. Para isso, a base  $S^{base}$  é 100 MVA, a base de

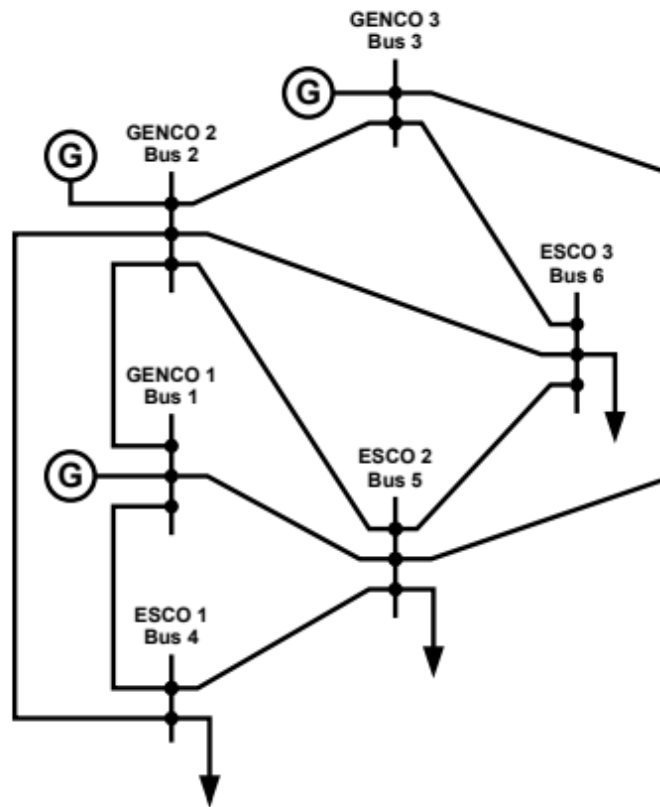


Figura 3 – Diagrama unifilar do sistema de 6 barras.

Tabela 2 – Dados das Linhas de Transmissão para o sistema IEEE de 6 barras

| Ramos $k, m$ | $r_{km}$ [p.u.] | $x_{km}$ [p.u.] | $b_{km}^{sh}$ [p.u.] | $I_{km}^{\max}$ [A] |
|--------------|-----------------|-----------------|----------------------|---------------------|
| 1,2          | 0.1             | 0.2             | 0.04                 | 37.0                |
| 1,4          | 0.05            | 0.2             | 0.04                 | 133.0               |
| 1,5          | 0.08            | 0.3             | 0.06                 | 122.0               |
| 2,3          | 0.05            | 0.25            | 0.06                 | 46.0                |
| 2,4          | 0.05            | 0.1             | 0.02                 | 200.0               |
| 2,5          | 0.1             | 0.3             | 0.04                 | 103.0               |
| 2,6          | 0.07            | 0.2             | 0.05                 | 132.0               |
| 3,5          | 0.12            | 0.26            | 0.05                 | 95.0                |
| 3,6          | 0.02            | 0.01            | 0.02                 | 200.0               |
| 4,5          | 0.2             | 0.04            | 0.08                 | 26.0                |
| 5,6          | 0.1             | 0.03            | 0.06                 | 29.0                |

tensão  $V^{base}$  é 500 kV e os limites de magnitude da tensão mínimo e máximo são 0.90 e 1.10 p.u., respectivamente.

Experimentos foram realizados e os parâmetros do PSO foram os seguintes: 100 partículas, 1.000 iterações,  $c1=c2= 2,0$ , topologia em estrela e peso de inércia decrescente ( $w_o=1,0$  e  $w_f=0,4$ ). Foram realizadas 30 execuções. A Tabela 3 mostra os resultados da melhor solução para o sistema de leilão baseado no VSCOPF, no qual os resultados de

todas as variáveis foram obtidos a partir da abordagem.

Tabela 3 – Resultado da Melhor Solução do Estudo de Caso 1

| Participantes[k]  | $P_S$ [MW] | $P_D$ [MW] | $V$ [p.u.] | $Q_G$ [MVar] | $V^c$ [p.u.] | $Q_G^c$ [MVar] |
|---|------------|------------|------------|--------------|--------------|----------------|
| 1   | 0.0        | -          | 1.1000     | 44.7849      | 1.1000       | 140.2          |
| 2   | 25.0       | -          | 1.1000     | 77.2048      | 1.0708       | 150.0          |
| 3   | 20.0       | -          | 1.1000     | 73.9445      | 1.0686       | 150.0          |
| 4   | -          | 25.0       | -          | -            | 0.9264       | -              |
| 5   | -          | 10.00      | -          | -            | 0.9000       | -              |
| 6   | -          | 8.12565    | -          | -            | 0.9507       | -              |
| Bem-estar Social[\$]:122.19368371<br>Máximo Carregamento ( $\sigma$ ):1.6688<br>Barra Slack Distribuída ( $K_G$ ): 0.0599 |            |            |            |              |              |                |

Como pode ser visto, a carga máxima é definida por um limite inferior de magnitude de tensão na barra 5, onde  $V^c = 0.9000$ , mas o VSC não está ativo, pois o máximo carregamento é 1.668840.

A Fig. 4 mostra como as partículas iniciadas de forma aleatória convergem para a melhor solução, chegando a um ponto de estagnação onde todas as partículas permanecem nesse ponto, convergindo para o valor de 122.19368371. Mesmo com o alto número de iterações, observa-se que em determinado ponto, as partículas convergiram para o mesmo valor.

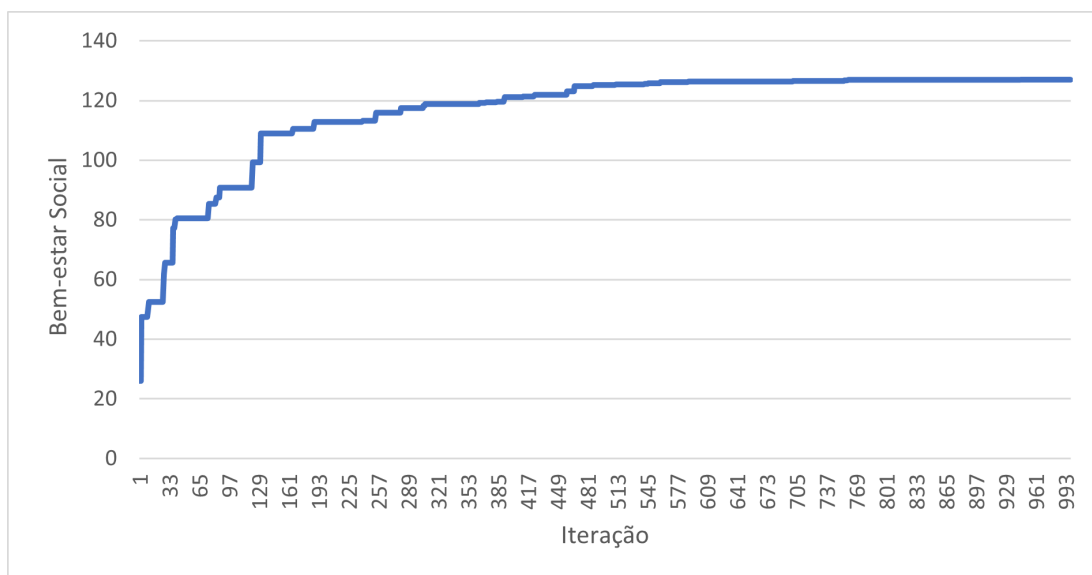


Figura 4 – Melhor Solução do Sistema de Leilão VSCOPF para o Caso 1.

A Fig. 5 apresenta a média da execução de 30 avaliações, mostrando que as partículas sempre convergem para o valor ótimo da melhor solução, mesmo que em diferentes execuções as soluções ficam abaixo do melhor valor encontrado.

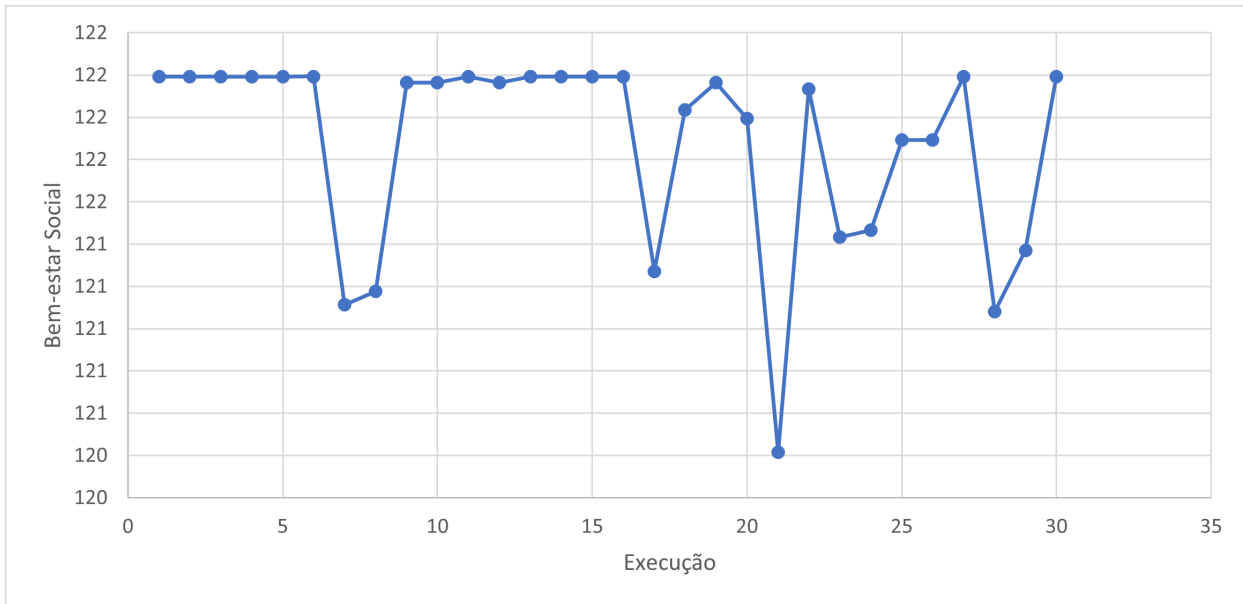


Figura 5 – Análise Estatística da Média das Execuções para o Caso 1.

#### 4.0.2 Sistema de leilão VSCOPF com máximo carregamento definido por uma bifurcação induzida por limite

Neste estudo de caso, a aquisição de potência baseada em VSCOPF é resolvida para mostrar uma bifurcação sela-nó ou bifurcação induzida por limite no ponto de máximo carregamento. Para isso, a base  $S^{base}$  é 100 MVA, a base de tensão  $V^{base}$  é 500 kV e os limites de magnitude da tensão mínimo e máximo são 0.90 e 1.12 p.u., com aumento no limite máximo para avaliar a influência de tais limites operacionais nas soluções do sistema.

Experimentos foram realizados e os parâmetros PSO foram os seguintes: 70 partículas, 1.000 iterações,  $c1=c2=2,0$ , topologia em estrela e peso de inércia decrescente ( $w_o=1,0$  e  $w_f=0,4$ ). Foram realizadas 30 execuções. A Tabela 4 mostra os resultados da melhor solução para o sistema de leilão baseado no VSCOPF, no qual os resultados de todas as variáveis foram obtidos a partir da abordagem.

Tabela 4 – Resultado da Melhor Solução do Estudo de Caso 2

| Participantes $[k]$   | $P_S$ [MW] | $P_D$ [MW] | $V$ [p.u.] | $Q_G$ [MVar] | $V^c$ [p.u.] | $Q_G^c$ [MVar] |
|---|------------|------------|------------|--------------|--------------|----------------|
| 1   | 0.00       | -          | 1.1200     | -            | 1.1200       | 150.0          |
| 2   | 25.00      | -          | 1.1200     | -            | 1.0854       | 150.0          |
| 3   | 20.00      | -          | 1.1200     | -            | 1.0809       | 150.0          |
| 4   | -          | 25.00      | -          | -            | 0.9417       | -              |
| 5   | -          | 10.00      | -          | -            | 0.9139       | -              |
| 6   | -          | 8.63321    | -          | -            | 0.9625       | -              |
| Bem-estar Social [\$]:127.01553601<br>Máximo Carregamento ( $\sigma$ ): 1.7065<br>Barra Slack Distribuída ( $K_G$ ): 0.0617 |            |            |            |              |              |                |

Os resultados mostram que o máximo carregamento é definido por uma bifurcação induzida por limite quando a barra 1 atinge seu limite superior de geração de potência reativa ( $Q_{G_1}^c = Q_G^{Max} = 150,00$  MVar), sem quaisquer outras restrições operacionais associadas.

A Fig. 6 mostra como as partículas iniciadas de modo aleatório convergem para a melhor solução, atingindo um ponto de estagnação onde todas as partículas permanecem nesse ponto, convergindo para o valor de 127.01553601. Mesmo com o alto número de iterações, observa-se que em determinado ponto, as partículas já encontram a solução ótima.

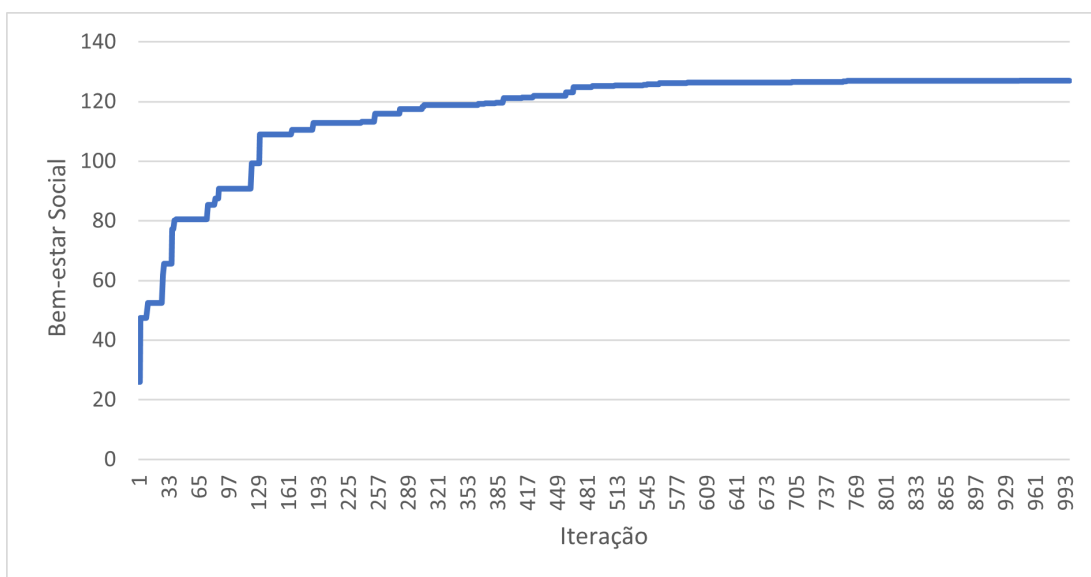


Figura 6 – Melhor Solução do Sistema de Leilão VSCOPF para o Caso 2.

A Fig. 7 apresenta a média de 30 avaliações, mostrando que as partículas sempre tendem a convergir para o valor da melhor solução, mesmo em diferentes execuções e com soluções próximas do melhor valor encontrado.

Os resultados apresentados na Tabela 3 apresentam um comportamento esperado em comparação com o modelo VSCOPF de (AVALOS; CANIZARES; ANJOS, 2008), usado também para estudar como a restrição de estabilidade/segurança de tensão afeta os sistema e as condições de mercado. Essa comparação mostra que o modelo de leilão VSCOPF atende às restrições de segurança exigidas, onde o nível de carga foi seguindo as direções de aumento para determinar o ponto de máximo carregamento que para os dois modelos foi de  $\sigma=1.6688$ . Logo, os resultados mostram que a formulação proposta é um modelo de leilão que atende aos limites de segurança exigidos, além de outra análise a partir do estudo de Caso 2, consequentemente produzindo melhores condições de mercado e sistema.

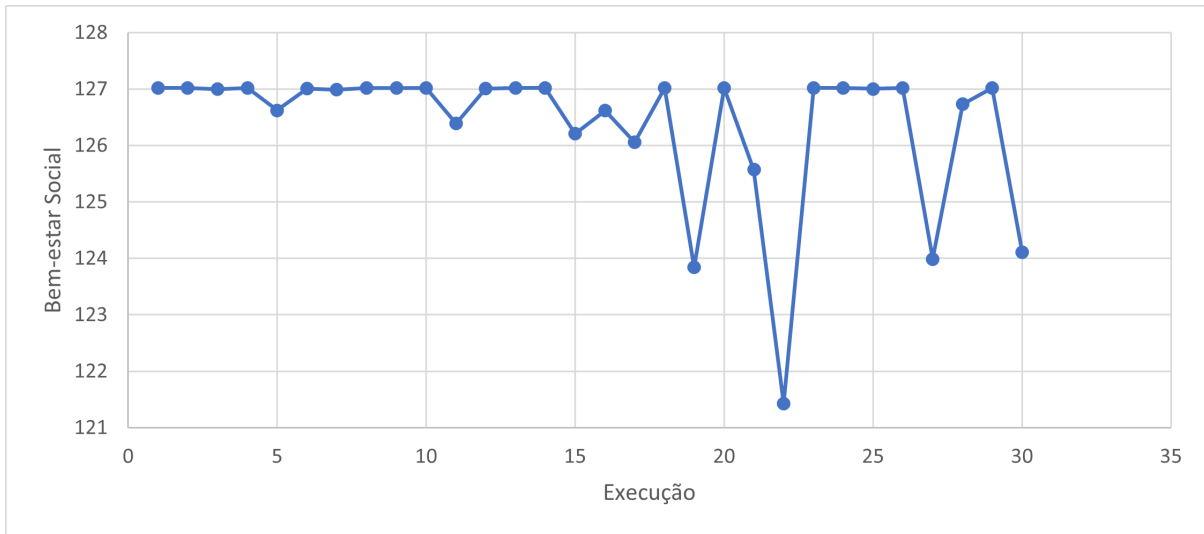


Figura 7 – Análise Estatística da Média das Execuções para o Caso 2.

## 4.1 Limitações

A metodologia proposta só considerou apenas uma metaheurística para os experimentos feitos, sendo que comparar com demais técnicas ou até mesmo fazer um estudo dos parâmetros do PSO o tornaria bem mais robusto, visto que eles influem na convergência do algoritmo. Também a abordagem só considerou um sistema de testes o *IEEE* de 6 barras, logo levar essa aplicação para sistemas maiores como 32 ou até 57 barras, poderia trazer dados mais fidedignos relacionados a realidade dos mercados de leilão, porém com sistema menor o custo computacional foi até aceitável. Outra limitação encontrada foi não usar de todas as restrições das modelagens apresentadas, já que para isso seria necessário aplicar técnicas que fizesse com que a abordagem funcionasse comparadas a um modelo binível.

## 5 Conclusões

Este trabalho apresentou uma abordagem para representar estabilidade/segurança de tensão em sistemas de leilão a curto prazo baseados em VSCOPF para aquisição de energia, introduzindo um modelo VSCOPF cuja estrutura de resolução é baseada na aplicação da metaheurística PSO e no cálculo do Fluxo de Carga Continuado. A modelagem proposta baseia-se na reformulação dos sistemas de leilões baseados em VSCOPF utilizando a função de penalidade e das equações de Fluxo de Carga para conter o carregamento com barra slack distribuída, formando assim a abordagem. Com isso, teremos preços máximos para licitações de ofertas e demandas, bem como valores dentro dos limites para magnitudes de tensão e geração de potência reativa, respeitando-se todas as restrições e limites mínimos e máximos definidos. Definir os parâmetros do PSO, como o número de partículas, o peso de inércia e a topologia da rede levam a caminhos para soluções satisfatórias, pois fazem com que as partículas visitem todo o espaço de busca. A reformulação das equações de Fluxo de Carga para conter um valor de carga, juntamente com a aplicação de penalidades quadráticas na função objetivo, leva a uma melhor convergência para a solução e assim garantir a estabilidade/segurança de tensão do sistema, além do que qualquer violação de alguma restrição foi penalizada no valor da função objetivo. Estudos de caso com um sistema de teste de 6 barras são apresentados para validar o sistema de leilão baseado em VSCOPF proposto e sua estrutura de resolução, respectivamente, analisando a consistência dos resultados e as propriedades de convergência do algoritmo PSO, tudo isso mostrado nos gráficos estatísticos utilizados e tabelas na seção dos resultados. Os experimentos foram satisfatórios, já que apresentaram o comportamento esperado de acordo com a literatura para os dois estudos de caso.

### 5.1 Trabalhos Futuros

Baseando-se nas implementações, experimentos e resultados, os seguintes pontos são considerados como trabalhos futuros:

- **Atividade 1:** Consideração de todas as restrições apresentadas na modelagem matemáticas das duas fases da abordagem proposta, fazendo com quem se formule uma modelagem binível composta por dois problemas: problema externo e interno, esse responsável pelos limites de estabilidade/segurança de tensão;
- **Atividade 2:** Investigação de outras técnicas de algoritmos de otimização e também com outras variações do PSO;

- **Atividade 3:** Inserção de novos estudos de casos em que a base de tensão e os limites de magnitudes tensão são alterados para analisar o comportamento da abordagem proposta;
- **Atividade 4:** Realização de testes com sistemas maiores, como o sistema SIGRÈ de 32 barras;
- **Atividade 5:** Escrita de artigo para ser submetido em revista da área;



## Referências

- AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. *IEEE Power Industry Computer Applications Conference Proceedings*, p. 304–311, 1991. Citado na página 20.
- AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 1, p. 416–423, 1992. Citado 3 vezes nas páginas 15, 19 e 20.
- ALRASHIDI, M. R.; EL-HAWARY, M. E. Hybrid particle swarm optimization approach for solving the discrete opf problem considering the valve loading effects. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 22, n. 4, p. 2030–2038, 2007. Citado na página 8.
- AVALOS, R. J.; CANIZARES, C. A.; ANJOS, M. F. A practical voltage-stability-constrained optimal power flow. In: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 33.
- AVALOS, R. J. et al. Equivalency of continuation and optimization methods to determine saddle-node and limit-induced bifurcations in power systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, v. 56, n. 1, p. 210–223, 2009. Citado na página 16.
- BAKIRTZIS, A. et al. Optimal power flow by enhanced genetic algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 17, n. 2, p. 229–236, 2002. Citado na página 7.
- CABADAG, R.; TURKAY, B. Heuristic methods to solve optimal power flow problem. *IU-Journal of Electrical & Electronics Engineering*, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, v. 13, p. 1653 – 1659, 2013. ISSN 1303-0914. Citado na página 7.
- CANIZARES, C. Conditions for saddle-node bifurcations in ac/dc power systems. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 17, n. 1, p. 61–68, 1995. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061595932787>>. Citado na página 22.
- CHAVEZ-LUGO, M. et al. *IEEE Transactions on Power Systems*, title=Practical Security Boundary-Constrained DC Optimal Power Flow for Electricity Markets, year=2016, volume=31, number=05, pages=3358-3368, doi=10.1109/TPWRS.2015.2504870. Citado na página 9.
- EBERHART, R. C.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, v. 1, 1995. Citado na página 18.
- FERREIRA, E. R. de S. et al. A two-stage approach to solve voltage-stability/security-constrained optimal power flow auction systems by means of pso and the continuation power flow. In: *2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6. Citado na página 9.

- FRANCO, S. T.; DURAN, I. Auction model simulator for the colombian electricity market. In: *2018 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T D-LA)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5. Citado na página 1.
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. *Handbook of meta-heuristics*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 3.
- GUTIERREZ-MARTINEZ, V. J. et al. Neural-network security-boundary constrained optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n. 1, p. 63–72, 2011. Citado na página 11.
- HAMON, C.; PERNINGE, M.; SÖDER, L. A stochastic optimal power flow problem with stability constraints - part i: Approximating the stability boundary. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 28, n. 2, p. 1839–1848, 2013. ISSN 0885-8950. Citado na página 10.
- JORDAN, D.; SMITH, P. Nonlinear ordinary differential equations: an introduction for scientists and engineers. In: *Nonlinear ordinary differential equations: an introduction for scientists and engineers*. [S.l.]. [S.l.: s.n.], 2007. v. 10. Citado na página 22.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, p. 1942–1948 vol.4. Citado na página 17.
- KUMARI, M. S.; PRIYANKA, G.; SYDULU, M. Comparison of genetic algorithms and particle swarm optimization for optimal power flow including facts devices. p. 1105–1110, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 7.
- LAGE, G. G. O fluxo de potência ótimo reativo com variáveis de controle discretas e restrições de atuação de dispositivos de controle de tensão. tese (doutorado). *Universidade de São Paulo*, 2013. Citado na página 20.
- LAGE, G. G.; COSTA, G. R. M. da; CANIZARES, C. A. Limitations of assigning general critical values to voltage stability indices in voltage-stability-constrained optimal power flows. In: *2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6. Citado na página 10.
- LAGE, G. G.; FERNANDES, R. A. S.; COSTA, G. R. M. da. Optimal power flows with voltage stability constraint based on voltage stability indices and artificial neural networks. In: *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Citado na página 10.
- LAI, L.; MA, J. Power flow control in facts using evolutionary programming. v. 1, p. 109–, 1995. Citado na página 7.
- LEE, D. et al. Feasible path identification in optimal power flow with sequential convex restriction. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 35, n. 5, p. 3648–3659, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 7.
- LUKE, S. *Essentials of Metaheuristics*. second. [S.l.]: Lulu, 2013. Available for free at <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/>. Citado na página 3.

- MACGILL, I.; BRUCE, A.; ZEKULICH, M. Electricity market norms vs power system norms: the example of primary frequency response in the Australian national electricity market. In: *2020 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–5. Citado na página 1.
- MAURER, L.; BARROSO, L. *Electricity Auctions: An Overview of Efficient Practices*. [S.l.]: The World Bank, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 3.
- MILANO, F.; CANIZARES, A. C.; INVERNIZZI, C. M. Voltage stability constrained opf market models considering n-1. *Contingency Criteria*, " *Electric Power Systems Research*, p. 27–36, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 8.
- MILANO, F.; CANIZARES, C.; INVERNIZZI, M. Multiobjective optimization for pricing system security in electricity markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 18, n. 2, p. 596–604, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 1, 11 e 29.
- MOHAMED, K. H.; RAO, K. R.; HASAN, K. N. B. M. Application of particle swarm optimization and its variants to interline power flow controllers and optimal power flow. In: *2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6. Citado na página 17.
- MONTICELLI, A. J. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. [S.l.]: São Paulo: E. Blucher, 1983. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- PARSOPOULOS, K. E.; VRAHATIS, M. N. Particle swarm optimization method for constrained optimization problems, intelligent technologies - theory and applications: New trends in intelligent technologies. p. 214–220, 2002. Citado na página 19.
- RAFIK, L.; SLIMANI, L.; BOUKTIR, T. Particle swarm optimization applied to the economic dispatch problem. *Journal of Electrical Systems*, v. 2, 01 2006. Citado na página 17.
- RAJ, P.; PALANIVELU, T.; GNANADASS, R. Optimal power flow solution for combined economic emission dispatch problem using particle swarm optimization technique. *Journal of Electrical Systems*, v. 3, 03 2007. Citado na página 8.
- RAY, T.; LIEW, K. M. A swarm with an effective information sharing mechanism for unconstrained and constrained single objective optimization problems. *IEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2001)*, p. 77–80, 2001. Citado na página 19.
- ROA-SEPULVEDA, C.; PAVEZ-LAZO, B. A solution to the optimal power flow using simulated annealing. In: *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502)*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 2, p. 5 pp. vol.2-. Citado na página 7.
- SHARMA, B.; PANDIT, M. Security constrained optimal power flow employing particle swarm optimization. In: *2012 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–4. Citado na página 17.
- VENTER, G.; SOBIESZCZANSKI-SOBIESK, J. Particle swarm optimization. *AIAA Journal*, v. 41(8), p. 1583–1589, 2003. Citado na página 19.
- WANG, C.-R. et al. A modified particle swarm optimization algorithm and its application in optimal power flow problem. v. 5, p. 2885–2889 Vol. 5, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 7.

XUE, X. et al. Research on evaluation indicators system for electricity market in china. In: *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 3095–3098. Citado na página [1](#).