

08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## UM ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR REAÇÕES QUÍMICAS PARA ALOCAÇÃO DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL

Aileen Zancanaro Carniel<sup>1</sup> – aileenzc@gmail.com

Mário Mestria<sup>1</sup> – mmestria@uol.com.br, mmestria@ifes.edu.br

<sup>1</sup> Mestrado Profissional em Tecnologias Sustentáveis - Instituto Federal do Espírito Santo – Vitória, ES, Brazil

**Resumo.** O problema de otimização do posicionamento de Unidades de Medição Fasorial (UMFs) visa minimizar a quantidade de UMFs instaladas em redes elétricas de transmissão mantendo a observabilidade do sistema elétrico. As UMFs fornecem informações de maior qualidade e frequência que as Unidades Terminais Remotas (RTUs), permitindo que estimadores de estados mais rápidos do que o tempo real sejam implementados. Como consequência, os sistemas SCADA podem ser substituídos por sistemas automáticos de monitoramento, operação e controle, adicionando adaptabilidade, eficiência e confiabilidade às redes elétricas inteligentes. Devido à maleabilidade e larga escala de redes de transmissão reais, métodos heurísticos tem tido maior aplicação neste tipo de problema que métodos matemáticos. Utilizamos neste artigo a Otimização por Reações Químicas (CRO) com análise topológica da observabilidade, discorrendo sobre a parametrização do CRO e as estratégias de intensificação e diversificação aplicadas. O algoritmo desenvolvido foi aplicado aos sistemas de testes IEEE (14, 30, 57 e 118 barramentos) e seus resultados foram comparados com testes executados com uma modelagem de referência. Os resultados ótimos de todas as escalas dos problemas IEEE foram encontrados em baixo tempo computacional.

**Palavras-chave:** Unidades de Medição Fasorial, Observabilidade, Otimização por Reações Químicas, Redes elétricas inteligentes.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os sistemas elétricos de potência tem operado em situações de estresse e com demanda crescente de energia. A disponibilidade e a confiabilidade da rede elétrica impacta profundamente na sociedade, principalmente na indústria, onde existem potenciais perdas financeiras decorrentes de quedas e variações de energia.

A rede elétrica tradicional consiste basicamente das usinas geradoras de energia, do sistema de transmissão e do sistema de distribuição, onde o fluxo de energia é unidirecional,

pois flui somente das unidades de geração para os consumidores. No final do século XX, foram implantados os sistemas de controle supervisórios e de aquisição de dados (SCADA) que monitoram e controlam remotamente equipamentos das subestações. Recebem dados de módulo de tensão, corrente, potência ativa e reativa em uma frequência de 2 a 30 segundos dos RTUs, o que restringe o SCADA a condições de operação quase-estacionárias, perdendo eventos transientes.

Desenvolveu-se na década de 80 a tecnologia dos sincrofasores, na qual um GPS (Global Position System) interno aos medidores UMF oferece além de medições bidirecionais de tensão, corrente, potência ativa e reativa, medições síncronas dos fasores de tensão e de corrente. Com uma taxa de aproximadamente 60 medições por segundo, viabilizam a implantação de estimadores de estado de alta precisão que enviam dados para sistemas de controle mais rápidos do que o tempo real, eliminando instabilidades transitórias e instabilidades de tensão através de ações corretivas de estados de emergência.

O sistema deve ser totalmente observável para que se possa aplicar um estimador de estados. Há duas abordagens diferentes de análise da observabilidade, a numérica e a topológica, sendo a última mais simples e, conseqüentemente, de maior aplicação na literatura.

Os dados medidos e estimados alimentam o Sistema de Gerenciamento de Energia, que os analisa e adiciona inteligência à rede elétrica, dotando-a da capacidade de corrigir suas próprias falhas e de otimizar sua rede de transmissão e de distribuição.

Devido à propriedade de medição bidirecional de energia, as UMFs e demais medidores inteligentes asseguram a integração de fontes renováveis de energia ao sistema elétrico em concordância com o conceito de sustentabilidade. A demanda por novas fontes de energia advém de questões tanto ambientais quanto econômicas e impulsiona a participação dos consumidores no gerenciamento do consumo e na geração de energia, inserida na rede elétrica. Tais conceitos fazem parte da tecnologia de *smart grid*, ou redes elétricas inteligentes, que aumenta a segurança, agilidade e automação das tomadas de decisões, pois mantém a estabilidade da rede e aumenta sua eficiência através de sistemas de monitoramento e de controle em tempo real de redes de longa distância (WAMS – Wide Area Monitoring Systems).

O fator limitante para a substituição de RTUs por UMFs nas redes de transmissão é o alto custo das UMFs, que varia diretamente com o número de canais e das funcionalidades que oferecem. Mohammadi *et al.* (2016) considera o custo de uma Unidade de Medição Fasorial com dois canais de medição em US\$40.000, com o custo adicional de US\$4.000 por canal adicional. Além disso, o preço de 1km da fibra ótica utilizada em sua instalação, bem como de um *switch*, é estimado em US\$4.000.

As restrições financeiras levaram à caracterização do problema de minimização da quantidade de medidores na rede como problema OPP (Optimal PMU Placement). Diversos trabalhos da literatura tratam o assunto desde os anos 90, otimizando-o através de métodos heurísticos, matemáticos, modelos híbridos e métodos de redução de matrizes. Entretanto, nota-se a crescente tendência de otimização por métodos heurísticos devido à classificação do problema OPP como NP-hard. Os métodos heurísticos tem a vantagem de produzir soluções robustas em baixo tempo computacional.

Neste trabalho, pretendemos otimizar o problema de alocação das UMFs através do método de Otimização por Reações Químicas (CRO) e observabilidade topológica. A seção 2 apresenta uma revisão de literatura sobre observabilidade, algoritmos heurísticos aplicados ao posicionamento de UMFs e Otimização por Reações Químicas. Na seção 3 apresentamos a modelagem utilizada neste trabalho, seguido pela parametrização do algoritmo CRO na seção 4. Por fim, demonstramos os resultados na seção 5 e realizamos as conclusões na seção 6.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Observabilidade da rede elétrica

A fim de verificar a observabilidade do sistema elétrico, cria-se a matriz de incidência a partir da árvore de medições do sistema, indicando para cada ponto da rede se seus dados são medidos ou estimados, ou seja, se o ponto é observável direta ou indiretamente.

A definição da observabilidade é dividida em duas categorias, observabilidade numérica e observabilidade topológica. Se o sistema for completamente observável, é possível determinar o estado de suas variáveis através de uma função linear  $h(x)$  ou matriz  $H$ , que relaciona o estado estimado com as medições reais.

O sistema é dito numericamente observável se matriz de design do sistema ( $H$ ) possuir posto completo. A observabilidade topológica, por sua vez, é baseada na teoria dos grafos, em que a árvore de dispersão de medição da rede deve possuir posto completo e uma submatriz de incidência medidor/nó deve possuir posto igual ao número de nós da árvore. Pontua-se que a observabilidade numérica implica na observabilidade topológica, porém o inverso não é verdadeiro.

A matriz  $H$  é de difícil acesso devido à sua grande dimensão e, portanto, defende-se a utilização da observabilidade topológica juntamente com regras de análise topológica para casos que incluam barramentos de injeção nula (barras que não possuam injeção de energia ou carga). Nas regras definidas, utilizam-se medições diretas, realizadas por UMFs instaladas e pseudo-medições calculadas com base em medições reais. Nos barramentos de injeção nula, é possível calcular tensão ou corrente em um dos barramentos adjacentes através das leis de Kirchhoff se os demais forem conhecidos.

A observabilidade total do sistema pode ser adicionada como restrição do modelo de otimização ou como penalidade em um problema multiobjetivo. Alguns modelos na literatura incluem uma função objetivo específica para maximizar a redundância das medições visando garantir a observabilidade total do sistema em casos de perda da medição de uma UMF e/ou de um ramo da rede. Para tanto, adiciona-se a cada barramento ao menos uma redundância direta ou indireta.

### 2.2 Algoritmos heurísticos aplicados ao posicionamento de UMFs

As metaheurísticas representam algoritmos aproximados, generalistas, aplicáveis a diferentes problemas de otimização. Combinam métodos heurísticos básicos com estruturas de nível superior focadas na exploração eficiente e efetiva de espaços de busca.

Devido à maleabilidade das redes elétricas e menor tempo computacional de desenvolvimento e de execução das metaheurísticas frente aos métodos matemáticos, são diversos os métodos de otimização heurísticos aplicados ao problema OPP. Dentre os mesmos encontram-se Recozimento Simulado (SA), Busca Tabu (TS), Algoritmo de Fuga de Bactérias (BFO), Colônia Artificial de Abelhas (ABC), Aprendizagem Celular Automata (CLA), Evolução Diferencial (DE), dentre outros.

Mohammadi-Ivatloo (2009) e Bedekar *et al.* (2011) analisam o problema de Posicionamento de UMFs através de Algoritmos Genéticos (GA). Hui-Ling *et al.* (2013), por outro lado, apresentou um algoritmo que combina Árvore Mínima de Abrangência (MST) com um GA melhorado, chamado de MST-GA.

A versão discreta binária do PSO, baseada no comportamento das partículas no meio, chamada Otimização Binária Modificada de Nuvem de Partículas (BPSO), é utilizada por Hajian *et al.* (2011) que adiciona à análise topológica de observabilidade uma nova regra para

maximizar a utilização de dados existentes; Su & Chen (2010), que inclui custos individuais para cada instalação de UMFs, número de barramentos adjacentes e condições de comunicação; Huang & Wu (2013), que analisa a observabilidade com base no critério de controle de reconfigurabilidade; e Ahmadi *et al.* (2011), que apresenta uma abordagem clássica, com garantia da observabilidade total e maximização da redundância das medições.

A busca Tabu (TS) utiliza explicitamente o histórico da pesquisa, tanto para escapar de mínimos locais quanto para implementar uma estratégia exploratória. Koutsoukis *et al.* (2013) aplica a Busca Tabu Recursiva (RTS), em que combina o método numérico para observabilidade com um algoritmo Guloso na criação da população inicial.

Saha Roy *et al.* (2012) inicia o sistema com UMFs posicionadas em todos os barramentos, eliminando-as por prioridade conforme sua conectividade. Posteriormente, aplica o método de Poda considerando que todas as medidas devem ser duplamente observáveis.

A otimização baseada na Biogeografia (BBO) modela matematicamente a migração de espécies de uma ilha de habitat para outra. Um método multiobjetivo de BBO é apresentado por Jamuna & Swarup (2012) e Jamuna & Swarup (2011) para minimizar as UMFs com verificação da observabilidade e maximização da redundância.

A Otimização por Reação Química (CRO) cujo objetivo é obter um estado de energia estável mais baixo ao simular a ação e reação das moléculas em uma reação química. Xu *et al.* (2013) utiliza 4 reações do CRO e apresenta um modelo simplificado do mesmo (SCRO). O SCRO apresentou resultados mais eficientes, de boa adaptação, com estrutura mais simples e menor tempo computacional que o CRO. Este trabalho foi utilizado como referência nesta pesquisa.

### 2.3 Otimização por Reações Químicas (CRO)

O CRO, criada por Lam & Li (2010), é uma metaheurística baseada nas leis da termodinâmica que regem as reações químicas. Lam & Li (2012) aplica o CRO a diferentes problemas de engenharia em domínios discretos e contínuos, concluindo que o mesmo possui desempenho superior a outros algoritmos de otimização.

Um sistema físico é dito instável quando possui energia em excesso, nesta situação, tende a se rearranjar através de reações químicas com o objetivo de liberar a energia excessiva, estabilizando-se.

Trata-se de um algoritmo multi-agente onde os agentes manipulados são as moléculas, que formam uma população variável de soluções. Alterações químicas das moléculas podem ser iniciadas através de operações uni ou intermoleculares, definidas como reações elementares.

Existem quatro tipos de reações elementares: colisão inefetiva contra a parede, decomposição, colisão inefetiva entre moléculas e síntese. A colisão unimolecular ocorre quando a molécula colide com uma substância externa, como a parede do recipiente. Por outro lado, a colisão intermolecular ocorre quando uma molécula colide com outra dentro do sistema. Na decomposição, ao sofrer uma colisão com elemento externo, a molécula se divide em duas novas moléculas. E na síntese, duas moléculas que se chocam formam uma nova molécula.

O algoritmo base do CRO possui 8 parâmetros, descritos na Tabela 1. Definem o comportamento do algoritmo quanto a tamanho de população, critério de parada, definição de reação química a ser realizada a cada iteração e capacidade do sistema em aceitar soluções piores.

Tabela 1 - Parâmetros do Algoritmo CRO

Parâmetro	Descrição	Função
PopSize	Tamanho da População	Tamanho da população do CRO.
MAX_ITER	Critério de parada	Define o número máximo de iterações do algoritmo CRO a serem executadas.
initialKE	energia cinética inicial	Define o valor de energia cinética para cada molécula criada. A energia cinética está relacionada com a tolerância do sistema em receber uma solução pior que a atual.
KELossRate	taxa de perda de energia cinética	Define o percentual de energia cinética da molécula perdida ao meio em cada colisão que sofrer.
iniBuffer	buffer de energia do meio	Define a quantidade inicial de energia do meio ambiente.
MoleColl	variável de decisão entre tipos de colisão	Comparada com um parâmetro gerado aleatoriamente pelo algoritmo para escolha entre operações unimoleculares (decomposição e colisão inefetiva na parede) ou intermoleculares (síntese e colisão inefetiva intermolecular).
Alpha	variável de decisão entre operações unimoleculares	Limite do critério de decomposição ( $NumHit - MinHit > \alpha$ ). Se a molécula escolhida atender ao critério, a operação de decomposição é realizada, em caso negativo, a colisão inefetiva na parede.
Beta	variável de decisão entre operações intermoleculares	Limite do critério de síntese ( $KE \leq \beta$ ). Se as duas moléculas escolhidas atenderem ao critério, a operação de síntese é realizada, em caso negativo, a colisão inefetiva intermolecular.

Quando há um número pequeno de moléculas, foca-se na busca local em algumas regiões específicas. No caso contrário, espalham-se sementes em todo o espaço de soluções. Sendo assim, adapta-se o problema alcançando efetivamente o mínimo global.

O atendimento aos critérios de síntese e de decomposição tem uma forte relação com o comportamento da função objetivo. Se a direção de busca é decrescente, o critério de decomposição não é iniciado. Se o sentido crescente não ocorrer, as moléculas não converterão sua energia cinética para soluções piores e o critério de síntese não será alcançado.

Xu *et al.* (2013) inclui na modelagem a restrição da observabilidade como penalidade na função objetivo. Tal particularidade viabiliza que se encontrem soluções inviáveis para o problema, implicando em um número maior de iterações para atingir os objetivos e procedimentos para verificar a viabilidade da solução.

Apresenta duas configurações do algoritmo, uma canônica e uma simplificada (SCRO) em que utiliza uma única operação, a de colisão inefetiva na parede. A SCRO é proposta devido aos melhores resultados da forma canônica terem sido atingidos com o parâmetro MoleColl nulo e Alpha alto, favorecendo a reação de colisão inefetiva na parede. Ao utilizar população unitária, ignora as vantagens da otimização baseada em população, como a diversificação, em que diversas soluções no espaço de busca são visitadas.

O design de plataforma do CRO, com possibilidade de customizar e integrar novos operadores, e a variação do tamanho de população, facilita sua aplicação a diferentes problemas. A conversão e transferência de energia distinguem o CRO das demais metaheurísticas, alcançando resultados satisfatórios em problemas em que o resultado das demais não foi satisfatório.

O fluxograma da Fig. 1 demonstra o algoritmo do CRO indicando as operações que intensificam a busca local e as que diversificam o espaço de busca.

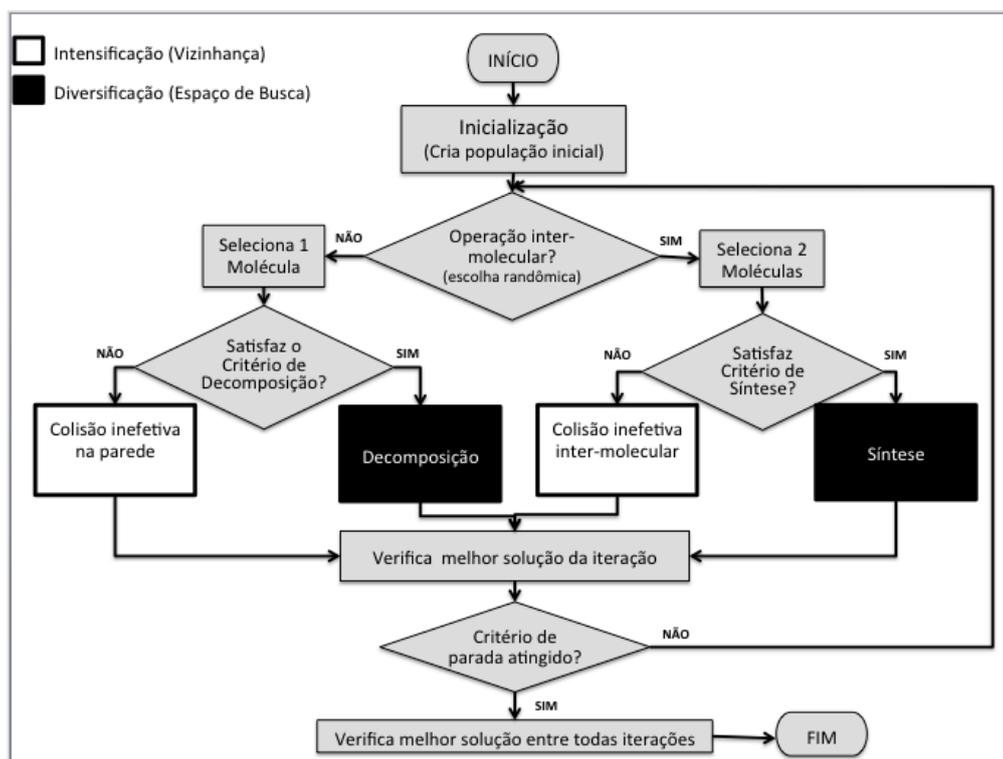


Figura 1 - Fluxograma do Algoritmo de Otimização por Reações Químicas (CRO)

### 3 MODELAGEM DO PROBLEMA DE POSICIONAMENTO DE UMF

O problema de posicionamento de UMFs na rede elétrica é um Problema de Cobertura de Conjuntos (PCC) em que a união de diversos subconjuntos cobre todas as posições de um determinado espaço.

A modelagem utilizada para o posicionamento de UMFs minimiza o custo total de UMFs com restrição de observabilidade mínima de cada nó. A observabilidade é verificada com auxílio da matriz  $A_{ij}$ , definida como matriz de conectividade, de incidência ou de design. A modelagem de Xu *et al.* (2013), que inclui a observabilidade como penalidade na função objetivo, foi implementada para fins de testes e é tratada como modelo de penalização. A modelagem sugerida por este trabalho é descrita pelas Eq. (1) e (2):

$$\min \sum_i^n w_i x_i, \quad (1)$$

$$\text{subject to } A_{ij} \cdot x_i \geq I \quad (2)$$

Onde  $I = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]_{N \times 1}^T$ ,

$w_i$  = custo de instalação de UMF no barramento  $i$ ,

$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se houver uma UMF instalada no barramento } i \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases}$  e

$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 1, & \text{se os barramentos } i \text{ e } j \text{ forem conectados entre si} \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases}$

## 4 PARAMETRIZAÇÃO DO CRO

O estabelecimento de valores adequados para os parâmetros do CRO define o comportamento do método de otimização, pois a resposta à parametrização do método de otimização difere para cada sistema modelado.

Inicialmente, define-se como será realizada a criação da população. A solução apresentada por cada molécula é implementada como um vetor booleano. Para a modelagem proposta neste trabalho as soluções iniciais da população foram criadas aleatoriamente, restringindo o número barramentos com UMFs instaladas a entre 20 a 35% do número total de barras do sistema. Este valor foi definido com base em Baldwin *et al.* (1993), que indica que o número ótimo de UMFs para os problemas OPP está entre 20 a 30% da quantidade total de barramentos do sistema elétrico. Entretanto, o limite superior foi aumentado para 35% para diminuir o tempo de execução durante a busca por soluções que atendam à restrição (2).

A implementação das reações elementares do CRO definem como a intensificação e a diversificação serão desenvolvidas em cada reação elementar. Nas colisões inefetivas na parede e intermoleculares empregamos um número aleatório de trocas entre os valores de um dado par de bits da solução, selecionado aleatoriamente. Na decomposição criamos duas soluções similares à molécula original alterando aleatoriamente os bits pares da primeira molécula e os bits ímpares da segunda molécula. Já na síntese, definimos um ponto de corte randômico a ser aplicado a duas moléculas escolhidas, criando uma nova molécula cuja solução é uma combinação dos bits anteriores ao ponto de corte de uma molécula e dos bits posteriores ao ponto de corte da outra. Também definimos o número máximo de 10 tentativas de geração de novas soluções que atendam à restrição (2), se a mesma não for atendida, mantivemos a solução inicial da reação elementar como saída.

Para realizar a parametrização neste trabalho foram definidos empiricamente os valores dos 8 parâmetros do algoritmo CRO através de combinações de valores entre intervalos definidos para cada um. Os intervalos foram definidos através da observação dos valores reais das variáveis de comparação, do comportamento do erro com a variação de cada parâmetro e do percentual de ocorrência de cada reação, como exemplifica a Fig. 2.

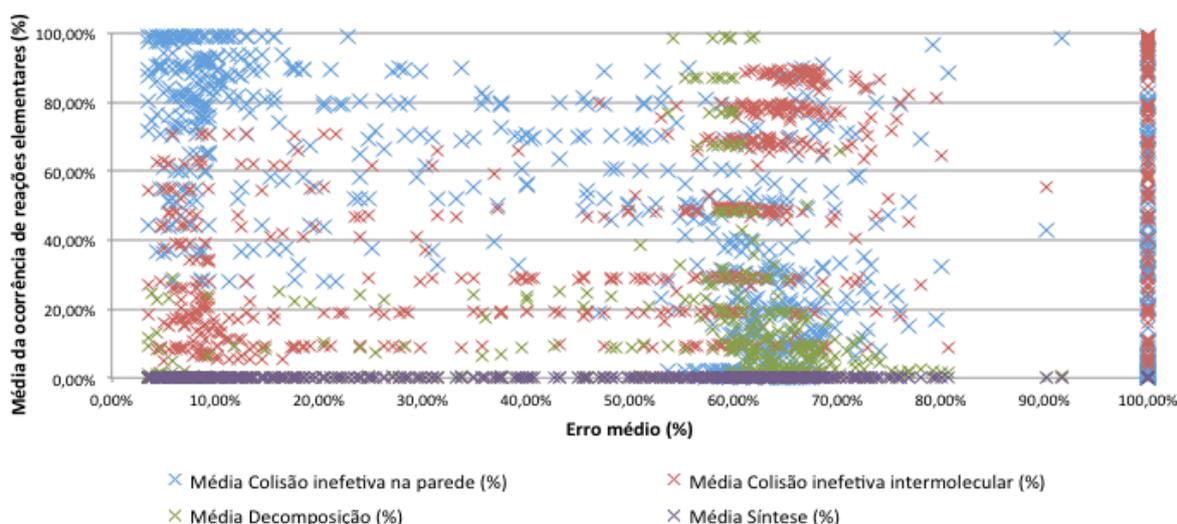


Figura 2 - Percentual de ocorrência das reações elementares por erro médio.

Como consequência, os intervalos de testes do parâmetro Beta foram aumentados para viabilizar a ocorrência tanto de colisões inefetivas intermoleculares quanto de síntese, aplicamos valores menores de Alpha, visando favorecer a ocorrência da decomposição, valores maiores de KLossRate, viabilizando soluções piores, e valores maiores do parâmetro de Buffer para viabilizar a efetivação de operações que consumam energia do meio, confirmando a viabilidade de alterações que diversifiquem o espaço de buscas.

Para os testes realizados com modelagem similar a de Xu *et al.* (2013), chamado de modelo com penalização, as soluções iniciais foram criadas como vetores booleanos gerados aleatoriamente, sem restrições; e as reações de colisões ineficazes na parede e intermolecular foram implementadas como alteração de valor de um único bit aleatório. Como a restrição da observabilidade é inserida como penalidade na função objetivo, não é necessário verificar se a restrição é atendida em cada geração ou alteração de solução. A parametrização seguiu a mesma metodologia descrita neste trabalho.

Os algoritmos foram desenvolvidos em Java com NetBeans 8.2. Utilizamos um computador Intel Core i7 de 3.6GHz e 16GB de RAM com sistema operacional Windows 10. Cada combinação de parâmetros foi executada 15 vezes. Computamos o melhor valor encontrado para o número mínimo de UMFs, erro médio e o tempo médio de execução.

## 5 RESULTADOS

Os melhores resultados dos testes com combinações de parâmetros para a modelagem de penalização e para a modelagem proposta em Eq. (1) e (2) são demonstrados na Tabela 2. As células de "MS", indicam a melhor solução encontrada por todas as configurações da tabela, ou seja, o número de UMFs a serem instaladas para cada instância do sistema de testes IEEE. "EM(%) Penalização" corresponde ao erro médio percentual atingido com a modelagem de penalização e demais definições. "EM(%) Modelo (1)(2)" corresponde ao erro médio percentual com a modelagem proposta por Eq. (1) e (2) e demais definições.

Tabela 2 - Melhores resultados encontrados para o CRO.

Parâmetros							Sistema IEEE 14 Barras		Sistema IEEE 30 Barras		Sistema IEEE 57 Barras		Sistema IEEE 118 Barras	
							MS: 4 UMFs		MS: 10 UMFs		MS: 17 UMFs		MS: 32 UMFs	
Tamanho da População	Número de Iterações	Alpha	Beta	KLoss Rate	MoleColl	Buffer	EM (%) Penalização	EM (%) Modelo (1)(2)	EM (%) Penalização	EM (%) Modelo (1)(2)	EM (%) Penalização	EM (%) Modelo (1)(2)	EM (%) Penalização	EM (%) Modelo (1)(2)
1	500	200	20	0,9	0,0	1000	0,00	0,00	20,00	0,00	9,02	0,00	9,17	0,63
1	700	150	50	0,8	0,0	0	3,33	0,00	30,00	0,00	4,31	0,00	9,79	0,42
10	700	150	2	0,7	0,0	1000	3,33	0,00	15,33	0,00	8,24	0,00	11,25	1,04
10	700	150	500	0,8	0,0	1000	0,00	0,00	25,33	0,00	6,67	0,00	9,38	2,29
10	700	500	2	0,9	0,0	0	6,67	0,00	22,67	0,00	7,84	0,00	9,17	2,29
10	700	500	50	0,9	0,0	1000	10,00	0,00	23,33	0,00	6,67	0,00	9,58	1,67
1	100	100	500	0,8	0,2	10000	21,67	0,00	7,33	0,00	13,33	0,00	14,17	4,38
1	100	200	800	0,8	0,3	5000	18,33	0,00	9,33	0,00	11,76	1,18	14,58	3,33
1	500	200	500	0,8	0,3	3000	26,67	1,67	18,67	0,00	14,90	0,78	19,58	1,04
10	500	100	200	0,8	0,5	5000	18,33	26,67	7,33	0,67	12,94	1,18	17,92	1,46
100	1000	100	800	0,8	0,2	10000	15,00	36,67	7,33	0,67	10,20	2,35	15,00	1,04
100	1000	200	200	0,8	0,5	5000	13,33	1,67	6,00	0,00	12,55	0,78	15,83	0,83

Para fins de comparação, para o sistema de 118 barras com a modelagem de penalização o menor tempo computacional obtido neste trabalho foi de 376ms. Xu *et al.* (2013) encontra

os valores ótimos em 3,1s com o CRO canônico e 1,1s com o SCRO. Com a modelagem proposta, atingimos o tempo de 991ms. Em nossa pesquisa focamos na qualidade da solução encontrada ao invés do tempo computacional do algoritmo, que neste caso foi irrelevante.

Os primeiros resultados demonstrados possuem parâmetro MoleColl nulo, o que impede a realização de reações elementares intermoleculares. Para estes casos, notamos que valores baixos de Beta são aceitos, isso se deve ao fato do critério de síntese nunca ser testado, pois apenas se executam reações unimoleculares. Os melhores resultados são encontrados para os maiores valores de KELossRate, o que indica que o algoritmo aceita piores soluções.

O modelo proposto chega à solução ótima com menor erro percentual que o modelagem de penalização. Entretanto, os melhores resultados ainda foram encontrados com maior incidência de reações de busca local (colisões inefetivas na parede e intermolecular), havendo baixa incidência de decomposição e síntese.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados encontrados para os sistemas de testes IEEE de 14, 30, 57 e 118 barras demonstram que é possível chegar ao valor ótimo dos problemas OPP através da otimização CRO com a ocorrência de outros tipos de reações químicas que não somente a colisão inefetiva na parede. O tempo computacional é considerado aceitável e irrelevante. Também foram considerados satisfatórios os resultados encontrados através de população não-unitária, ao contrário do proposto por Xu *et al.* (2013).

São poucos os trabalhos na literatura que exploram o custo individual das UMFs nas simulações realizadas. Portanto, em trabalhos futuros pretendemos realizar testes com sistemas que possuam barramentos de injeção nula, incorporar informações de custo real e variável de medidores e aplicar o algoritmo desenvolvido a um sistema real de escala maior. Pretendemos também realizar testes em uma base de dados de maior escala, como a base de problemas de cobertura disponibilizada por Beasley.

## REFERÊNCIAS

Ahmadi, A., Alinejad-Beromi, Y., Moradi, M. (2011), "Optimal PMU placement for power system observability using binary particle swarm optimization and considering measurement redundancy", *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 6, p. 7263–7269.

Baldwin, T. L., Mili, L., Boisen, M. B., Adapa, R. (1993), "Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement", *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 8, n. 2, 707–715.

Bedekar, P. P., Bhide, S. R., Kale, V. S. (2011), "Optimum PMU placement considering one Line/ One PMU outage and maximum redundancy using genetic algorithm", *The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011*, 688–691.

Hajian, M., Ranjbar, A. M., Amraee, T., Mozafari, B. (2011), "Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a modified BPSO algorithm", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 33, n. 1, 28–34.

Huang, J., Wu, N. E. (2013), "Fault-tolerant placement of phasor measurement units based on control reconfigurability", *Control Engineering Practice*, v. 21, n. 1, 1–11.

Hui-Ling, Z., Yuan-Xiu, D., Xiao-Pan, Z., Huan, Q., Cheng-Xun, H. (2013), "Hybrid of MST and Genetic Algorithm on Minimizing PMU Placement", *2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*, 820–823.

Jamuna, K., Swarup, K. S. (2011), "Power system observability using biogeography based optimization", *International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems*,

384–389.

Jamuna, K., Swarup, K. S. (2012), "Multi-objective biogeography based optimization for optimal PMU placement", *Applied Soft Computing*, v. 12, n. 5, 1503–1510.

Koutsoukis, N. C., Manousakis, N. M., Georgilakis, P. S., Korres, G. N. (2013), "Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive tabu search method", *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 7, n. 4, 347–356.

Lam, A. Y. S., Li, V. O. K. (2010), "Chemical-reaction-inspired metaheuristic for optimization", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 14, n. 3, 381–399.

Lam, A. Y. S., Li, V. O. K. (2011), "Chemical Reaction Optimization for Task Scheduling in Grid Computing", *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, v. 22, n. 10, 1624–1631.

Lam, A. Y. S., Li, V. O. K. (2012), "Chemical Reaction Optimization: A tutorial", *Memetic Computing*, v. 4, n. 1, 3–17.

Mohammadi-Ivatloo, B. (2009), "Optimal Placement of PMUs for Power System Observability Using Topology Based Formulated Algorithms", *Journal of Applied Sciences*, v. 9, n. 13, 2463-2468.

Mohammadi, M. B., Hooshmand, R. A., Fesharaki, F. H. (2016), A new approach for optimal placement of PMUs and their required communication infrastructure in order to minimize the cost of the WAMS", *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 7, n. 1, 84–93.

Saha Roy, B. K., Sinha, A. K., Pradhan, A. K. (2012), "An optimal PMU placement technique for power system observability", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 42, n. 1, 71–77.

Su, C.; Chen, Z. (2010), "Optimal Placement of Phasor Measurement Units with New Considerations", *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 1–4.

Xu, J., Wen, M. H. F., Li, V. O. K., Leung, K.C. (2013), "Optimal PMU Placement for Wide-Area Monitoring Using Chemical Reaction Optimization", *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 1-6.

## A CHEMICAL REACTION OPTIMIZATION ALGORITHM FOR PHASE MEASUREMENT UNITS PLACEMENT

**Abstract.** *Optimal PMU (Phase Measurement Unit) Placement (OPP) problems aim to minimize PMUs installation cost at the same time that maintains transmission systems observability. Synchronized phasor data supply more quality information about electrical system at higher frequencies than RTUs (Remote Terminal Units), what leads to faster than real time state estimators, despite to higher costs. Allows SCADA systems replacement for automatic monitoring and operation systems that add reliability, efficiency and resilience to smart grids systems. Due to systems malleability and large scale transmission networks, heuristic methods have been frequently applied at OPP problems. In this paper a Chemical Reaction Optimization (CRO) algorithm is presented to minimize PMU placement maintaining system observability through topological verification. CRO parameterization and local search strategies are presented. The developed algorithm was tested at IEEE test systems (14, 30, 57 and 118 bus), and the results are compared to the output found when applying a reference work model. Optimal results were reached at low computation time for all test systems.*

**Keywords:** *Phase Measurement Unit, Observability, Chemical Reaction Optimization, Smart grids.*