# UMA METAHEURÍSTICA VNS APLICADA NA OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE PMUS COM INFRAESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO

Marco R. Cruz, M. H. M. Paiva, M. E. V. Segatto, J. F. Fardin, H. R. O. Rocha, Universidade Federal do Espírito Santo LabTel, Departamento de Eng. Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo Av. Fernando Ferrari 514 - Goiabeiras -Vitória - ES CEP 29075-910 marco.cruz@aluno.ufes.br

## RESUMO

Este trabalho apresenta um novo método de alocação ótima de Unidades de Medição Fasorial usando a metaheurística Busca em Vizinhança Variável. A Busca em Vizinhança Variável é uma metaheurística que não foi aplicada em nenhum trabalho prévio ao problema de alocação de Unidades de Medição Fasorial. Um algoritmo simples e eficaz, baseado nesta metaheurística é desenvolvido e simulado nas principais redes de potência. Mostra-se que o algoritmo, em comparação com trabalhos similares, é mais escalável e mais eficiente, pois é simulado desde pequenas redes de potência até sistemas de grande porte, como o brasileiro de 5804 barras, com bom tempo computacional. Por fim, complementa-se o algoritmo com uma rotina de otimização de custos da Infraestrutura de Comunicação entre os medidores, ao se otimizar os menores caminhos para os cabos de fibra ótica, e tendo apresentado também melhores resultados que a literatura.

PALAVRAS CHAVE. Busca em Vizinhança Variável, Unidade de Medição Fasorial, Infraestruturas de Comunicação, Sistemas de Monitoramento em Grandes Áreas.

Tópicos: PO na Área de Energia, Metaheurísticas, Teoria e Algoritmos em Grafos.

#### ABSTRACT

This work presents a metaheuristic applied to the optimal allocation of PMUs (phasor measurement unit). The Variable Neighbourhood Search is a metaheuristic that has not been applied in any prior work to PMUs allocation problem. A simple and effective algorithm based on this metaheuristic is developed and simulated in known power networks. The algorithm, compared with similar works, is more scalable and efficient, performing simulations from small networks to large systems such as the Brazilian 5804 bus, with good computational time. Finally, the algorithm is complemented with an optimization routine for PMU Communications Infrastructure costs, searching the shortest paths for optical cables, and with better results than other published methods.

**KEYWORDS.** Variable Neighborhood Search, phasor measurement unit, communication infrastructure, Wide Area Measurement Systems .

Paper topics : Operation Research in the energy sector, Metaheuristics, Algorithms based on Graph Theory .



# 1. Introdução

O impacto das energias renováveis, o acesso livre às redes de transmissão e a desregulação do setor elétrico têm alterado a natureza dos sistemas de potência. Esta realidade traz mais estresse à operação destes sistemas, tornando cada vez mais importante a melhoria de sistemas de controle e proteção oferecidos pelas WAMS (*Wide Area Measuremet Systems*) baseadas em PMUs (Phasor Measurement Unit) [Phadke e Thorp, 2006].

A Estimação de Estados (EE) é um processo imperativo para a monitoração de sistemas de potência, garantindo a segurança do sistema considerando contingências e fluxos adequados de potência. Até há bem pouco tempo, unidades terminais remotas (UTRs) eram responsáveis por recolher medidas de fluxos de potência ativa e reativa, injeção de potência ativa e reativa e módulo de tensão nos barramentos para o sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), que por sua vez fornecia dados para o Estimador de Estado [de Oliveira Rocha et al., 2013]. A introdução de PMUs em 1990 trouxe uma vantagem comparativa uma vez que as medições são sincronizadas pela utilização do Sistema de Posicionamento Global (GPS), o que permite constituir WAMS eficientes no controle e operação [Gupta e Pandey, 2014]. Outra vantagem é a alta amostragem de PMUs conjugada com a estimação de estados, o que assegura controle rápido da tensão, comparado com o sistema SCADA/ESM [Mohammadi-Ivatloo e Hosseini, 2008]. Porém, a utilização da tecnologia de PMUs acarreta um custo considerável e, por isso, cedo se colocou o problema de otimizar a alocação destas unidades numa rede de transmissão, sem comprometer a EE. Muitos algoritmos de otimização de alocação de PMUs têm sido propostos, levando em consideração critérios de observabilidade, contingências como perdas de PMU e perdas de linha, e medidas e conjuntos críticos [Nazari-Heris e Mohammadi-Ivatloo, 2015].

Para resolver o problema da otimização da alocação de PMUs, pode-se dividir as técnicas de otimização em dois grupos: as determinísticas e as metaheurísticas. A programação linear [Gou, 2008; Donmez e Abur, 2011], a programação binária [Amin e Banejad, 2013] e a programação quadrática [Manousakis e Korres, 2013] estão entre as técnicas determinísticas usadas. De igual modo, vários algoritmos baseados em metaheurísticas têm sido desenvolvidos até a presente data: *Simulated Annealing*, Algoritmo Genético, *Imperialistic Competition Algorithm* (ICA), Busca Tabu, Otimização Binária Enxame de Partícula (BPSO), Colônia de Formigas e métodos híbridos são alguns dos principais algoritmos [Nazari-Heris e Mohammadi-Ivatloo, 2015].

O problema de alocar um conjunto mínimo de PMUs na monitoração de um sistema inteiro é um problema da Teoria de Grafos, muito relacionado ao bem conhecido problema de recobrimento e dominação de vértices [Haynes et al., 2002]. Desta forma, este trabalho procurou tratar o problema da observabilidade de uma rede elétrica usando estes conhecimentos, embora outros trabalhos relacionados existam, como [Meghanathan, 2015]. Pelas várias restrições e condições que o problema de alocação de PMUs traz e, para melhor abordá-lo, propõe-se o uso de métricas da Teoria dos Grafos tais como grau, grau médio e *betweenness* (que são explicadas mais à frente) em um novo algoritmo baseado na metaheurística VNS (*Variable Neighbourhood Search*). Na literatura revista, não foram identificados trabalhos que usassem a metaheurística VNS na otimização da alocação de PMUs.

Também, a Infraestrutura de Comunicação (IC) pode ter um peso maior nos custos de um sistema de monitoração que o de PMUs. Em [Shahraeini et al., 2012] e [Mohammadi et al., 2016], procura-se otimizar o custo total de tais sistemas, que inclui não só o de PMUs, mas de cabos de transmissão OPGW (*optical power ground wire*), *switchs* e roteadores. Alguns autores tais como [Rather et al., 2015] também têm procurado fazer uma otimização que leve em conta outros custos. Igualmente, em nosso algoritmo, propõe-se para além de alocar as PMUs, otimizar a IC no sentido de reduzir os custos das WAMS e otimizar os custos totais. Este problema pode ser relacionado ao Problema do Conjunto Dominante Conexo Minimal abordado na Teoria dos Grafos e aplicado em problemas de redes sem fio como roteamento, *broadcasting* e controle de topologia [Ding et al.,



2010]. Entretanto, como explicitado a seguir, o problema aqui abordado não é precisamente o problema do Conjunto Dominante Conexo Minimal, mas o problema de determinar um Conjunto Dominante Minimal, onde serão alocadas as PMUs e, em seguida, interligar os elementos desse conjunto por meio de uma árvore de custo mínimo, formando a Infraestrutura de Comunicação.

Um conjunto dominante de um grafo G=(V,E) constituído por um conjunto V de vértices e por um conjunto E de arestas, é um subconjunto D contido em V tal que cada elemento de V ou pertence a D ou é vizinho de algum elemento de D. Quando se requer que o subgrafo induzido pelos vértices de D seja conexo, tem-se um conjunto dominante conexo. O desafio em muitos trabalhos é minimizar a cardinalidade deste conjunto, a fim de obter um conjunto dominante conexo minimal. Em [Guha e Khuller, 1998] são apresentadas duas abordagens para resolver de forma aproximada o problema do Conjunto Dominante Conexo Minimal (CDCM), que em geral é NPdifícil. A primeira delas usa um algoritmo guloso para construir um CDCM em uma única fase a partir do crescimento de uma árvore, começando de um vértice de grau máximo. A segunda abordagem utiliza uma fase inicial para encontrar um conjunto dominante minimal, e uma segunda fase para conectar os elementos desse conjunto através de uma Árvore de Steiner. Esta segunda abordagem vem sendo cada vez mais usada [Liu et al., 2016] e é mais adequada ao problema deste trabalho (alocação de PMUs e otimização da IC), uma vez que há um claro objetivo de determinar um conjunto dominante conexo minimal para a IC, mas também de identificar o conjunto dominante minimal, que corresponde aos vértices onde serão alocadas as PMUs. Entretanto, o problema de determinar uma Árvore de Steiner interligando o conjunto dominante minimal obtido na primeira fase também é NP-difícil e em geral é resolvido por meio de heurísticas [Du et al., 2013].

Neste trabalho, a solução para o problema de alocação das PMUs e otimização da IC é construída em duas fases. Usa-se a metaheurística VNS para encontrar o conjunto dominante e na segunda fase conecta-se este conjunto através da combinação dos algoritmos de Floyd-Warshall e Kruskal. O algoritmo de *Floyd-Warshall* é utilizado na determinação de um subgrafo contendo os caminhos mínimos interligando todos os pares de vértices do conjunto dominante, e o algoritmo de *Kruskal* é utilizado para encontrar uma árvore geradora mínima desse subgrafo. O algoritmo proposto foi testado nas redes IEEE 14, 24, 30, 57, 118 e 300 [Washington, 2016], e a avaliação do seu desempenho também foi feita numa grande rede, a saber, a do sistema elétrico brasileiro de 5804 barras [ONS, 2016]. O artigo é organizado como segue. A Seção 2 apresenta os desafios do dimensionamento das WAMS e os custos relacionados. A Seção 3 explica o funcionamento da heurística proposta. A Seção 4 apresenta os resultados obtidos e as discussões, e a Seção 5 traz as conclusões.

## 2. O problema da Otimização nas WAMS

As WAMS são compostas por: 1) PMUs, 2) PDC (concentrador de dados), 3) rede de comunicação e 4) Centro de Comunicação do Sistema de Potência. Estes componentes são mostrados na Fig. 1. Os dados sincronizados e medidos pelas PMUs são enviados via rede de comunicação para o PDC que tem a função de organizá-los com base no registro de tempo do GPS e envia-los para o centro de controle do sistema de potência para a estimação de estado [Bhonsle e Junghare, 2015]. Esta última fase de processamento de aplicativos não será considerada neste trabalho.

## 2.1. Alocação ótima de PMUs

PMU é um equipamento de medida colocado em alguns barramentos da rede para registar a magnitude e fase da tensão e corrente naquele barramento e nos ramos incidentes. Para a observabilidade topológica de uma rede, não é necessário equipar todos os barramentos da rede com PMU [Bhonsle e Junghare, 2015], o que proporciona redução de custos. O objetivo da alocação de PMUs é determinar e localizar um número mínimo de PMUs nos barramentos de uma rede que





Figura 1: Arquitetura geral de uma WAMS.

permita observar topologicamente toda a rede. Para além de condições normais de observabilidade, outras restrições foram adicionadas à otimização como perdas de medidas, mudanças topológicas e presença de barras de passagem (ZIB - *Zero Injection Bus*) [Nazari-Heris e Mohammadi-Ivatloo, 2015]. O problema de otimização da alocação de PMUs em condições normais é formulado a seguir:

$$\operatorname{Minimizar} \sum_{i=1}^{N} c_i x_i, \tag{1}$$

Sujeito a:
$$A(X) \ge b$$
, (2)

onde, N é o número de PMUs necessário,  $c_i$  é o custo de implantação do PMU no i-ésimo barramento. X é o vetor da localização de PMUs, cujos elementos  $x_i$  são definidos como:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se PMU \acute{e} necessária na barra i;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$
(3)

A é a matriz definida como:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se barra i está ligada à barra j;} \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases}$$
(4)

e b é o vetor unitário

$$b = [111...1]^T. (5)$$

#### 2.2. Otimização do dimensionamento de IC nas WAMS

Os sistemas de comunicação são responsáveis pelo envio de dados medidos ao longo da rede elétrica, e desta forma se mostram de fundamental importância para uma adequada e segura operação, controle e monitoração dos sistemas de potência. Os novos sistemas de comunicação são baseados na arquitetura de camadas: física, enlace de dados, rede, transporte, sessão, apresentação



e aplicação [Li et al., 2011]. A primeira camada, a física, é responsável por estabelecer e definir um meio de transmissão que permite fazer uma conexão física entre um emissor e um receptor. Os meios de transmissão numa WAMS são divididos em duas categorias [Shahraeini et al., 2010]: os dependentes e os independentes. Os meios dependentes são parte dos elementos do sistema de potência, como Power Line Communication (PLC), All-Dielectric Self Supporting (ADSS) e a OPGW. Os meios independentes não são parte dos elementos do sistema de potência e são disponibilizados para todos os usuários (por exemplo: comunicação por wifi e por satélite) ou oferecidos por serviços de empresas especializadas [Shahraeini et al., 2012]. Contudo, o atraso que ocorre nos meios de transmissão independentes faz com que os meios dependentes sejam os mais usados nas WAMS, onde se destaca a OPGW pelas vantagens que traz no que concerne a alta capacidade do canal e taxa de transferência, baixas perdas de transmissão e imunidade a interferências eletromagnéticas [Mohammadi et al., 2016]. Geralmente, o custo da IC é assim calculado [Shahraeini et al., 2012]:

$$Custo_{IC} = C_{passivo} + C_{ativo},\tag{6}$$

onde Cativo representa o custo de elementos passivos, como switchs e roteadores instalados nos barramentos. O Cpassivo depende do comprimento do elemento de transmissão, que neste caso será o de cabos OPGW [Mohammadi et al., 2016]. Embora o cálculo do custo de um sistema WAMS seja complexo e dependa de outros elementos tais como, o PDC e os aplicativos, será considerado aqui uma arquitetura centralizada [Gore e Kande, 2015] onde todos estes elementos estão agregados, mas que não serão objeto deste estudo. Portanto, neste artigo será otimizado o custo da IC, partindo do princípio que se trata de um sistema de transmissão dependente, neste caso, cabos OPGW, com uma arquitetura centralizada, tendo um único PDC. A localização do PDC não será otimizada. A otimização da IC depende da alocação das PMUs. Em [Shahraeini et al., 2012] comparouse os resultados de otimizar o custo total considerando as duas variáveis (PMU e IC), de forma independente ou simultânea. As duas técnicas diferenciam-se no fato que, na independente, faz-se primeiro a otimização de PMUs e em seguida a otimização das IC, e na simultânea há uma única otimização, que procura combinar a otimização dos dois custos ao mesmo tempo. Neste trabalho também se faz uma otimização independente, onde se procura encontrar um conjunto de PMUs que possibilite a observabilidade de todo o sistema e em seguida se faz a otimização do trajeto dos cabos OPGW que ligam as PMUs com mínimo custo total. Embora é dito que a otimização é independente, existe uma certa dependência entre as duas fases pois a otimização da alocação de PMUs já leva em conta as distâncias das barras da rede elétrica, procurando PMUs em barras que estejam mais próximos. O problema de otimização é definido a seguir:

 $Min.(custo_{PMU} + custo_{IC}),$ s.a.
Observabilidade de PMU, e
(conexão OPGW,PMU) ser grafo conexo.
(7)

## 3. Algoritmo de Otimização

Para resolver o problema da otimização, propõe-se usar uma metaheurística, o VNS e em seguida, combina-se algoritmos *Floyd-Warshall* e *Kruskal* para obter uma árvore geradora mínima (Minimum Spanning Tree – MST) de ligações OPGW que conectem todas as PMUs. MST é uma das bem conhecidas abordagens usadas para dimensionar redes *backbone* [Shahraeini et al., 2012]. Em seguida estes algoritmos são abordados.



## 3.1. Variable Search Neighbourhood (VNS)

O VNS é uma metaheurística que se baseia em mudanças sistemáticas da vizinhança das soluções para resolver problemas de otimização combinatória. Este tem dois estágios na procura de novas soluções cada vez mais longe de ótimos locais: (1) *Shaking* (perturbação) que permite mudar progressivamente a solução corrente; (2) *Descend* que é um procedimento de busca local. Esta metaheurística tem compromisso com a simplicidade e a eficiência, e usa algumas métricas conhecidas da Teoria de grafos [Meghanathan, 2015], como *grau, grau médio*, e *betweenness*, na busca de melhores soluções. O grau de um vértice é o número de conexões que este tem com outros vértices. O grau médio de um grafo é a média dos graus de todos os vértices e corresponde a duas vezes o número de arestas dividido pelo número de vértices do grafo. *Betweenness* é também uma medida de centralidade de um vértice de um grafo. É proporcional ao número de menores caminhos de todos os vértices para todos os outros vértices que passam através daquele vértice. Para além destas, e como contribuição deste trabalho, uma nova métrica - o *grau médio de vizinhos* - é proposta para tornar mais eficiente a otimização. O *grau médio de vizinhos* de um vértice se que tem conexões a este vértice.

Estas métricas foram escolhidas porque o problema de alocação de PMUs se relaciona ao problema conhecido de Dominação de um Grafo. Um vértice v de um grafo G domina um vértice u se estes vértices são adjacentes ou u=v. Desta forma, um conjunto S de vértices em um grafo G é um conjunto dominante de G se todo vértice de G pertence a S ou é adjacente a algum vértice de S. Portanto, intuitivamente, um conjunto dominante com mínimo número de vértices pode ser obtido priorizando-se vértices com elevado grau mas com média de grau de vizinhos baixo. Betweenness também foi usado por ser uma métrica que tem dado bons resultados na abordagem de vários problemas de grafos [Meghanathan, 2015].

Na construção da solução inicial e na fase da perturbação o algoritmo procura alocar PMUs nas barras com maior grau. Na fase da busca local, procura-se soluções que envolvam barras com maiores *grau médio de vizinhos* e de *betweenness*. Usa-se 32% das barras pois simulações feitas anteriormente em vários sistemas de testes mostraram que cerca de um quarto a um terço das barras de um sistema precisam ser atribuídas PMUs para atender o critério da observabilidade [Baldwin et al., 1993].

#### 3.2. Algoritmo Floyd-Warshall e Kruskal

Para o dimensionamento ótimo da IC é necessário que todas as PMUs estejam ligadas entre si, pelo menor caminho, sendo que os cabos OPGW serão instalados na estrutura da rede elétrica. Para esta implementação se usará o algoritmo *Floyd–Warshall* que busca os menores caminhos, e o algoritmo de *Kruskal-MST* que produz uma árvore geradora mínima. Em [Mohammadi et al., 2016] se otimizou a IC usando o algoritmo *Dijkstra* de caminhos mínimos. Porém mostra-se neste mesmo trabalho que adicionar ao algoritmo de caminhos mínimos o *Kruskal* obtém-se melhores resultados. O funcionamento do *Floyd–Warshall* consiste, de forma análoga ao *Dijkstra*, em buscar de forma iterativa e subsequente os nós que estão mais próximos do predecessor até chegar no destino.

Para otimizar a IC, se implementa a rotina *Floyd–Warshall* que identifica todos os menores caminhos entre todas as PMUs, o que resulta num subgrafo conexo. Em seguida o algoritmo *Kruskal* é aplicado sobre este subgrafo para obter uma árvore mínima, otimizando uma rede mínima de comunicação entre PMUs. A Fig. 2 mostra um grafo que após se aplicar o VNS, aloca-se três PMUs (b). De seguida, o algoritmo *Floyd-Warshall* obtem as conexões entre as três PMUs, ligando seis barras através de cinco ramos (c), e finalmente com *Kruskal* (d) se eliminam dois ramos desnecessários.





Figura 2: Aplicação do Algoritmo Floyd-Warshall e Kruskal. (a) Rede elétrica sem PMUs. (b) Alocação das PMUs. (c) Aplicação de Floyd-Warshall. (d) Obtenção das ligações finais após Kruskal.



Figura 3: Fluxograma da fase de alocação das PMUs.

#### 3.3. Fluxograma do algoritmo

Na Figura 3 se apresenta o fluxograma do algoritmo, com duas fases: alocação das PMUs e otimização da IC.

## 4. Resultados da simulação

O algoritmo foi implementado e simulado, e os resultados divididos em diferentes secções para mostrar a eficiência do método. Na primeira, o método é implementado em condições normais, com e sem barra de passagem (ZIB). Na segunda, mostra-se a otimização das infraestruturas de comunicação e dos custos totais. Na terceira, considera-se condições contingenciais N-1. Na quarta seção mostra-se a eficiência do algoritmo para grandes sistemas.



As simulações são implementadas nas redes IEEE de 14, 24, 30, 57 e 118 barras. Para esta execução se considerou que estas redes não têm nenhuma medida convencional ou comunicação. Para estabelecer as distâncias das linhas para cada rede, assumiu-se que todas as linhas de transmissão têm o mesmo condutor e configuração. Assim, as distâncias relativas entre todos os barramentos são extraídas da matriz de admitância do sistema [Washington, 2016].

Para fins de comparação com trabalhos similares, assume-se:

- Que o comprimento total das linhas de transmissão para as redes IEEE 30, 57 e 118 são os considerados no trabalho (Shahraeini et al. 2012), ou seja, 3000, 5712 e 9884 km, respectivamente.
- O custo de cada PMU totaliza US\$40.000, e cada km de cabo OPGW custa US\$10.000.

O algoritmo também foi testado através de simulações em grandes redes como IEEE 300 barras e no sistema brasileiro de transmissão de 5804 barras [ONS, 2016].

## 4.1. Resultado de simulação para condições normais

A metaheurística VNS conseguiu, para condições de observabilidade e em condições normais, atingir a eficiência dos melhores resultados de outros algoritmos na literatura (Tab. 1 e 2), sendo que o tempo computacional é melhor que nos outros trabalhos (Tab. 3).

Sistema	Alocação ótima de PMUs	Nr. de PMUs
IEEE14	2,6,7,9	4
IEEE24	2,8,10,16,21,23,24	7
IEEE30	2,4,6,9,10,12,18,23,25,29	10
IEEE57	1,5,9,12,15,17,21,23,28,30,	17
	36,40,44,48,49,52,56	
IEEE118	1,5,9,12,15,17,20,23,28,30,	32
	36,40,44,46,50,52,56,62,63,	
	68,71,75,77,80,85,86,90,	
	94,102,105, 110,115	

Tabela 1: Alocação ótima de PMUs para condições normais sem considerar ZIB.

Tabela 2: Comparação de alocação de PMUs	s com outros métodos, sem considerar ZIB.
--	---

Métodos	IEEE14	IEEE24	IEEE30	IEEE57	IEEE118
Proposto	4	7	10	17	32
[Roy et al., 2012]	4	7	10	17	32
[Xu e Abur, 2004]	4	7	10	17	32

Tabela 3: Comparação do tempo computacional na obtenção de soluções ótimas.	
---	--

Métodos	IEEE14	IEEE24	IEEE30	IEEE57	IEEE118
Proposto	0.05s	0.18s	0.27s	0.45s	1.32s
[Roy et al., 2012]	0.66s	0.76s	0.83s	0.87s	1.34s

Considerando o problema com a presença de barras de passagem, ([Roy et al., 2012]) apresenta as barras onde estão alocadas as ZIB, geralmente usadas na literatura como referência de testes. Neste caso, como é compreensível, o número de PMUs ótimo é menor que no caso de



labela 4: Comparação de alocação de PMUs com outros metodos, considerando ZIB.							
Métodos	IEEE14	IEEE24	IEEE30	IEEE57	IEEE118		
Proposto	3	6	7	11	28		
[Roy et al., 2012]	3	6	7	11	28		
[Mohammadi-Ivatloo e Hosseini, 2008]	3	-	7	12	29		

T-1-1-4.C 

ausência de ZIB. O número de PMUs alcançado na otimização se iguala ao dos melhores trabalhos similares (Tab. 4), o que demonstra a eficácia do método também neste caso.

# 4.2. Resultado de otimização de custos totais

Nesta seção, apresentam-se os resultados de simulação da otimização dos custos globais, que leva em consideração os custos de IC e os custos de alocação de PMUs. A Tabela 5 compara estes resultados com dois trabalhos similares. O método proposto apresenta melhores resultados em comparação com os dois trabalhos similares. A única exceção é para o caso IEEE 30 barras, onde o trabalho de [Mohammadi et al., 2016] apresentou o comprimento total de OPGW e custo muito menor que o calculado pela metodologia aqui proposta e o calculado em [Shahraeini et al., 2012]. Uma ressalva tem de ser feita aqui, pois este terceiro método não foi simulado exatamente nas mesmas condições (presença de ZIB) uma vez que esta proposta e o segundo método foram simulados com ZIB, o que resulta em um número de PMUs maior, com reflexos nas distâncias e nos custos totais.

Tabela 5: Comparação com outros trabalhos da otimização de custos (PMU e IC)						
Sistema	Métodos	Nr. PMU	Km total de OPGW	US\$(milhões)		
	proposto	10	748.8	7.9		
IEEE30	[Shahraeini et al., 2012]	10	804.6	8.4		
	[Mohammadi et al., 2016]	7	129.3	1.6		
	proposto	32	2052.0	21.8		
IEEE118	[Shahraeini et al., 2012]	39	3012.6	31.7		
	[Mohammadi et al., 2016]	30	2428.0	25.5		

## **4.3.** Resultados de otimização com a contingência de perda de PMU

T + 1 + (C) = -1 + 1 + 2		
Tapela p. Comparação de alocação	o de PIVILIS com olífros metodos (	com perda de PIVILLE considerando ZIB
Tubera o. Comparação de alocação		com perdu de l'inte e considerando Lib.
1 3 3	,	1

Métodos	IEEE14	IEEE24	IEEE30	IEEE57	IEEE118
Proposto	7	12	16	27	64
[Roy et al., 2012]	7	13	15	26	64
[Xu e Abur, 2004]	7	N/A	17	26	65

No caso de perda de PMU com presença de ZIB, a Tabela 6 mostra bons resultados deste método proposto diante de outros trabalhos conceituados da literatura, sendo menos eficaz no caso das redes IEEE 30 e 57, com uma PMU a mais, mas igualando os resultados nas demais redes e superando os outros na rede IEEE24.



## 4.4. Resultado de otimização para grandes sistemas de transmissão

O VNS também se mostrou muito eficaz ao ser implementado em grandes sistemas, para o citério simples de observabilidade sem ZIB. A Tabela 7 compara o método proposto com a programação linear inteira desenvolvida por [dos Reis, 2012]. Para a rede IEEE 300, o VNS conseguiu encontrar o mesmo número de PMUs. Usando sistemas ainda maiores, a metodologia de [dos Reis, 2012] foi aplicado numa rede de transmissão brasileira de 2834 barras, tendo obtido 982 PMUs, e o método aqui proposto foi aplicado numa rede brasileira ainda maior, de 5804 barras (BR5804), tendo alocado 1997 PMUs, conseguindo um tempo computacional próximo aos sete minutos, semelhante ao outro trabalho, mas com a vantagem de simular um sistema duas vezes maior.

Tabela 7: Comparação de alocação de PMUs e tempos computacionais para grandes sistemas.

Método	IEEE300	BR2834	BR5804
Proposto	87 (5.4s)	N/A	1997 (423s)
[dos Reis, 2012]	87 (7.4s)	982 (418.5s)	N/A

Para avaliar se o método é eficiente na alocação de PMUs na rede BR5804, uma vez que não há dados comparativos na literatura, mostra-se na Tabela 8 que existe uma tendência de correlação negativa entre a média do grau das barras de uma rede e o percentual de barras onde se alocam PMUs. Na Fig. 4, a rede BR5804 tem uma média de graus mais próxima da rede IEEE30 que de IEEE118, ou seja, se ajusta à tendência da linha de regressão linear dos outros resultados, pelo que a otimização de 34% das barras com PMUs mostra ser um bom resultado.

Tabela 8: Comparação de alocação de PMUs com vários métodos, sem considerar ZIB.

Sistema	IEEE30	IEEE57	IEEE118	IEEE300	BR 2834	BR 5804
N <sup>o</sup> . PMU	10	17	32	87	982	1997
% de Barras com PMU	33%	30%	27%	29%	35%	34%
Grau médio	2.73	2.74	3.03	2.73	N/A	2.44



Figura 4: Correlação Linear entre o Grau de uma rede e o % de PMUs alocadas.



## 5. Conclusão

Neste trabalho um novo método de alocação de PMUs numa rede de transmissão foi apresentado. O método, baseado na metaheurística VNS, nunca antes tinha sido aplicado neste tipo de problema. Este foi simulado em várias redes tendo igualado os resultados dos melhores trabalhos da literatura, mas com melhor tempo computacional. Este método também é mais escalável e flexível que outros métodos anteriores, uma vez que pôde ser simulado desde pequenos sistemas de 14 barras até grandes sistemas como o brasileiro de 5804 barras, com bom tempo computacional e eficácia. Por último, a otimização foi complementada com o dimensionamento da Infraestrutura de Comunicação dos medidores, com o objetivo de minimizar os custos globais. Também neste quesito o algoritmo foi comparado a literatura, tendo superado os mesmos.

## Referências

- Amin, N. e Banejad, M. (2013). Generalized formulation for optimal placement of PMUs considering single unit or single branch outage. In 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), p. 1–5.
- Baldwin, T. L., Mili, L., Boisen, M. B., e Adapa, R. (1993). Power system observability with minimal phasor measurement placement. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(2):707–715. ISSN 0885-8950.
- Bhonsle, J. S. e Junghare, A. S. (2015). An optimal PMU-PDC placement technique in wide area measurement system. In *Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM), 2015 International Conference on*, p. 401–405.
- de Oliveira Rocha, H. R., de Souza, J. C. S., e Do Coutto Filho, M. B. (2013). Planning high quality metering systems for state estimation through a constructive heuristic. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 52:34–41.
- Ding, L., Gao, X., Wu, W., Lee, W., Zhu, X., e Du, D. Z. (2010). Distributed construction of connected dominating sets with minimum routing cost in wireless networks. In *Distributed Computing Systems (ICDCS), 2010 IEEE 30th International Conference on*, p. 448–457.
- Donmez, B. e Abur, A. (2011). A computationally efficient method to place critical measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(2):924–931. ISSN 0885-8950.
- dos Reis, D. C. S. (2012). Alocação de Monitores de Qualidade de Energia e Unidades de Medição Fasorial Usando Programação Dinâmica Aproximada. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, The address of the publisher. An optional note.
- Du, D.-Z., Smith, J., e Rubinstein, J. H. (2013). *Advances in Steiner trees*, volume 6. Springer Science & Business Media.
- Gore, R. e Kande, M. (2015). Analysis of wide area monitoring system architectures. In *Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on*, p. 1269–1274.
- Gou, B. (2008). Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(3):1099–1104. ISSN 0885-8950.
- Guha, S. e Khuller, S. (1998). Approximation algorithms for connected dominating sets. *Algorithmica*, 20(4):374–387.
- Gupta, D. K. e Pandey, R. K. (2014). Grid stabilization with PMU signals A survey. In *Power* Systems Conference (NPSC), 2014 Eighteenth National, p. 1–6.



- Haynes, T. W., Hedetniemi, S. M., Hedetniemi, S. T., e Henning, M. A. (2002). Domination in graphs applied to electric power networks. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 15(4):519–529.
- Li, Y., Li, D., Cui, W., e Zhang, R. (2011). Research based on OSI model. In *Communication* Software and Networks (ICCSN), 2011 IEEE 3rd International Conference on, p. 554–557.
- Liu, X., Wang, W., Kim, D., Yang, Z., Tokuta, A. O., e Jiang, Y. (2016). The first constant factor approximation for minimum partial connected dominating set problem in growth-bounded graphs. *Wireless Networks*, 22(2):553–562.
- Manousakis, N. M. e Korres, G. N. (2013). A weighted least squares algorithm for optimal PMU placement. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3):3499–3500. ISSN 0885-8950.
- Meghanathan, N. (2015). Use of centrality metrics to determine connected dominating sets for real-world network graphs. In *Information Technology New Generations (ITNG), 2015 12th International Conference on*, p. 243–248.
- Mohammadi, M. B., Hooshmand, R. A., e 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*, 7(1):84–93. ISSN 1949-3053.
- Mohammadi-Ivatloo, B. e Hosseini, S. H. (2008). Optimal PMU placement for power system observability considering secondary voltage control. In *Electrical and Computer Engineering*, 2008. CCECE 2008. Canadian Conference on, p. 000365–000368.
- Nazari-Heris, M. e Mohammadi-Ivatloo, B. (2015). Application of heuristic algorithms to optimal PMU placement in electric power systems: An updated review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50:214–228.
- ONS (2016). Sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil. http://www.ons.org.br/conheca\_sistema/o\_que\_e\_sin.aspx. Acessado: 2016-04-18.
- Rather, Z. H., Chen, Z., Thøgersen, P., Lund, P., e Kirby, B. (2015). Realistic approach for phasor measurement unit placement: Consideration of practical hidden costs. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(1):3–15. ISSN 0885-8977.
- Roy, B. S., Sinha, A., e Pradhan, A. (2012). An optimal PMU placement technique for power system observability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42(1):71–77.
- Shahraeini, M., Ghazizadeh, M. S., e Javidi, M. H. (2012). Co-optimal placement of measurement devices and their related communication infrastructure in wide area measurement systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(2):684–691. ISSN 1949-3053.
- Shahraeini, M., Javidi, M., e Ghazizadeh, M. (2010). A new approach for classification of data transmission media in power systems. In *Power System Technology (POWERCON)*, 2010 International Conference on, p. 1–7. IEEE.
- Washington, U. (2016). Power system test case archive. https://www.ee.washington. edu/research/pstca/. Acessado: 2016-04-18.
- Xu, B. e Abur, A. (2004). Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs. In *Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES*, p. 943–946 vol.2.