

Alocação de Medidores de Qualidade de Energia para Sistemas de Distribuição Utilizando Algoritmos Genéticos

Júlia O. Fernandes* João V. G. Araújo** Cleiton Sudré***
Jáder F. D. Breda**** José C. M. Vieira Jr.†

* *Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Janaúba, MG, (e-mail: julia.fernandes@ufvjm.edu.br)*

** *Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Janaúba, MG, (e-mail: joao.araujo@ufvjm.edu.br)*

*** *Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Janaúba, MG, (e-mail: cleiton.sudre@ufvjm.edu.br)*

**** *Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Janaúba, MG, (e-mail: jader.breda@ufvjm.edu.br)*

† *Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, (e-mail: jcarlos@sc.usp.br)*

Abstract: Considering the current energy scenario, technological developments and, especially, the global economic context, it is necessary that the power quality supplied by utilities is constantly monitored, since disturbances of the most diverse classes and orders affect the power distribution system. Therefore, the allocation of power quality meters in distribution system has been increasingly adopted to prevent and even impede major losses to consumers and the utilities itself. In addition, every system has locations where power quality measurement is even more relevant and which can be considered as strategic measurement points. Thus, this work proposes a method of allocation of power quality meters for power distribution systems through genetic algorithms in conjunction with the singular value decomposition technique, which establishes the position, quantity and type of meter to be allocated, be it voltage or current, in order to guarantee, in a more economical way, the total observability of the system. The methodology was validated through tests using the IEEE 34-bus distribution system through two different scenarios taking into account the strategic points of this system. In comparison with other related works used the same system scenarios for testing, the algorithm proved to be more effective by reducing the number of equipment to be installed to ensure total system observability.

Resumo: Considerando o cenário energético atual, as evoluções tecnológicas e, principalmente o contexto econômico mundial, faz-se necessário que a qualidade da energia elétrica fornecida pelas concessionárias seja constantemente monitorada, uma vez que distúrbios das mais diversas classes e ordens acometem o sistema de distribuição de energia elétrica. Diante disso, a alocação de medidores de qualidade de energia em sistemas de distribuição tem sido cada vez mais adotada para prevenir e, até mesmo, impedir grandes prejuízos aos consumidores e à própria concessionária. Além disso, todo sistema possui locais em que a medição da qualidade de energia é ainda mais relevante e que podem ser considerados como pontos estratégicos para medição. Assim, este trabalho propõe um método de alocação de medidores de qualidade de energia para sistemas de distribuição de energia através de algoritmos genéticos em conjunto com a técnica de decomposição em valores singulares, que estabelece a posição, a quantidade e o tipo de medidor a ser alocado, seja ele de tensão ou corrente, para garantir de maneira mais econômica a total observabilidade do sistema. A validação da metodologia se deu através de testes utilizando o sistema de distribuição de 34 barras do IEEE por meio de dois diferentes cenários levando em consideração os pontos estratégicos desse sistema. Em comparação com outros trabalhos correlatos e que utilizaram os mesmos cenários do sistema para testes, o algoritmo se mostrou mais eficaz reduzindo o número de equipamentos a serem instalados para garantir uma observabilidade total do sistema.

Keywords: Meters Allocation; Distribution System; Genetic Algorithms; Singular Value Decomposition; Power Quality.

Palavras-chaves: Alocação de Medidores; Sistema de Distribuição; Algoritmos Genéticos; Decomposição em Valores Singulares; Qualidade de Energia Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o conceito Qualidade de Energia Elétrica (QEE) tem ganhado cada vez mais espaço entre consumidores e concessionárias de energia elétrica em todo o mundo, com o intuito de caracterizar a energia fornecida pelas concessionárias estabelecendo um padrão de qualidade do produto entregue ao consumidor (Saini and Kapoor, 2012).

Dentre os mais variados tipos de distúrbios que podem ocorrer na rede elétrica, às distorções harmônicas têm chamado bastante atenção das concessionárias devido as sérias consequências sofridas pelos usuários. Juntamente com as variações de tensão de curta duração, as distorções harmônicas representam atualmente um dos grandes desafios a serem mitigados nos sistemas elétricos de potência (SEPs). A ocorrência dessas distorções se deve principalmente à presença de cargas não lineares (ou perturbadoras), oriundas dos setores residencial, comercial e industrial. E, devido ao aumento de geradores distribuídos conectados ao longo da rede elétrica por meio de inversores nos últimos anos, os níveis de distorções harmônicas aumentaram significativamente (Wang, 2011).

Diante desse cenário, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), responsável por garantir que o setor elétrico se desenvolva de forma adequada, incentiva e fornece informações sobre as condições de operação e monitoramento para os operadores do sistema elétrico (Saini and Kapoor, 2012).

Desta forma, para que seja feito o devido monitoramento das redes de distribuição e transmissão, é necessário que seja realizado um certo investimento financeiro em equipamentos, como medidores de qualidade de energia elétrica (MQEE), que garantam uma observabilidade completa de todo o sistema.

Todavia, devido ao alto custo desses medidores, busca-se por soluções mais econômicas com eficiência similar, que também garantam uma completa observabilidade do sistema. A literatura fornece variadas técnicas capazes de solucionar tal questão, como através da programação linear (Branco et al., 2015) - (de O. Silva et al., 2016), além de métodos de otimização utilizando algoritmos evolutivos (Won and Moon, 2008), (Ketabi et al., 2012). Contudo, como o método de alocação de medidores é caracterizado por possuir uma natureza combinatória, neste trabalho será utilizado o método de Algoritmos Genéticos (AGs) para sua solução, assim como também feito em (Harik et al., 1999) - (Breda et al., 2021).

De acordo com (Breda et al., 2021) pode-se observar que, mesmo se utilizando de AGs e levando em consideração a presença de distorção harmônica em todo o sistema, os autores em questão não levam em consideração um posicionamento estratégico prévio dos medidores, antes

mesmo da aplicação do AG, o que poderá potencializar e tornar ainda mais eficiente o processo de alocação.

Então, ao realizar modificações na modelagem do AG proposto em (Breda et al., 2021), e também considerando a metodologia de (Araujo et al., 2020) para diagramar estrategicamente e definir previamente algumas posições adequadas para os MQEEs, o intuito é que o sistema se torne completamente observável com um menor número de medidores instalados no sistema e, conseqüentemente, ocorra uma redução de investimento nos equipamentos a serem adquiridos pela própria concessionária de energia local.

Portanto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um algoritmo eficiente para uma precisa alocação de MQEEs em sistemas de distribuição por meio de AGs em conjunto com a técnica de Decomposição em Valores Singulares (DVS), considerando indicações de posições prévias e estratégicas de alocação, para que haja um melhor aproveitamento dos medidores. Além de garantir uma total observabilidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica, utilizando um menor número de MQEEs se comparado a literatura atual semelhante.

2. ALOCAÇÃO DE MEDIDORES DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Em SEPs, o monitoramento da QEE é importante tanto para os consumidores, quanto para as concessionárias de transmissão e distribuição de energia. Especificamente, do ponto de vista das concessionárias de distribuição, a QEE deve obedecer a determinados parâmetros de validade legal, como por exemplo, no Brasil, o módulo 8 do Prodist (ANEEL, 2021), que teve sua última revisão entrando em vigência no início de 2021. Ao mesmo tempo, o monitoramento da QEE por parte dessas concessionárias permite que o sistema detecte eventos adversos, e que assim possa agir de uma forma mais rápida e eficiente em sua correção, evitando a aplicação de multas pelas agências reguladoras, como a Aneel no Brasil (Silva et al., 2016).

Em relação aos consumidores, principalmente do setor industrial, sabe-se que eventos adversos de QEE, como afundamentos de tensão, sobretensões e distorções harmônicas causam grande perturbação devido ao grande número de componentes eletrônicos suscetíveis a esses fenômenos e, conseqüentemente, a grandes prejuízos financeiros desse setor (Almeida and Kagan, 2011). Esses aspectos em conjunto acabam por validar a importância do uso de MQEE para monitoramento, que se trata do foco deste trabalho.

A partir dessa ideia de monitoramento, como abordagem inicial, pode-se pensar na alocação de MQEE em todos os possíveis pontos de instalação da rede, o que garantiria uma observabilidade total do sistema, permitindo assim a percepção de qualquer evento indesejado. No entanto, alocar medidores em todos os pontos do sistema é impraticável quando se considera o custo de tal sistema de

monitoramento, principalmente do próprio equipamento de medição (Silva et al., 2016).

Portanto, uma possível proposta alternativa para um método de alocação de MQEE se trata da utilização de um estimador de estado harmônico (EEH), que é uma ferramenta importante para a identificação das fontes harmônicas nos sistemas de distribuição e obtenção de perdas técnicas, favorecendo a gestão do SEP (Dalmas, 2015). De fato, o resultado obtido pelo EEH pode ser utilizado de forma mais eficiente para tornar o sistema completamente observável da forma mais econômica possível, conforme ilustrado na seção a seguir sobre a metodologia aplicada em conjunto com o método de Decomposição em Valores Singulares (DVS).

3. METODOLOGIA PROPOSTA

Nesta seção será apresentada a metodologia de alocação para medidores de qualidade de energia elétrica (AMQEEs), bem como o novo algoritmo desenvolvido a partir do que foi proposto em (Breda et al., 2021), que se trata de um trabalho baseado no princípio da estimação de estado harmônico para sistemas de distribuição trifásicos, utilizando o método de Decomposição em Valores Singulares.

O equacionamento para o EEH, segundo a topologia de rede, pode ser expresso por meio da matriz admitância trifásica do sistema para cada ordem harmônica e local dos pontos de medição, como barras e linhas de distribuição (ou transmissão)(Breda et al., 2021).

O método DVS em questão tem a capacidade de indicar as barras e linhas de distribuição que necessitam ser monitoradas pelos medidores, sem uma análise prévia do sistema, o que garantirá que ele se torne completamente observável. Portanto, para cada conjunto de dados obtidos, sempre haverá uma solução (Breda et al., 2021).

Quando se conhece a topologia do sistema de distribuição, através da sua matriz admitância e do cálculo do fluxo de carga para simular os valores lidos pelos medidores na frequência fundamental (se necessário), pode-se equacionar o problema de estimação de estado trifásico. De maneira geral, o método de AMQEEs aplicando AGs pode ser resumido conforme o diagrama da Figura 1.

3.1 Alterações realizadas na metodologia proposta em (Breda et al., 2021)

Com o intuito de minimizar o custo financeiro, a problemática que envolve este procedimento é uma devida alocação dos MQEEs e a possível redução em seu número. Assim, através da utilização de Algoritmos Genéticos (AGs), que se trata de uma alternativa simples e eficiente, é possível que o sistema se torne completamente observável (Breda et al., 2021). Portanto, AGs serão utilizados para solucionar o problema também neste presente trabalho.

Para tanto, cada ponto possível de medição do sistema (barra ou linha de distribuição) será tratado como um cromossomo, representado por um vetor, em que cada elemento (gene) corresponde a uma informação sobre a presença ou ausência de medição, que será manipulado até

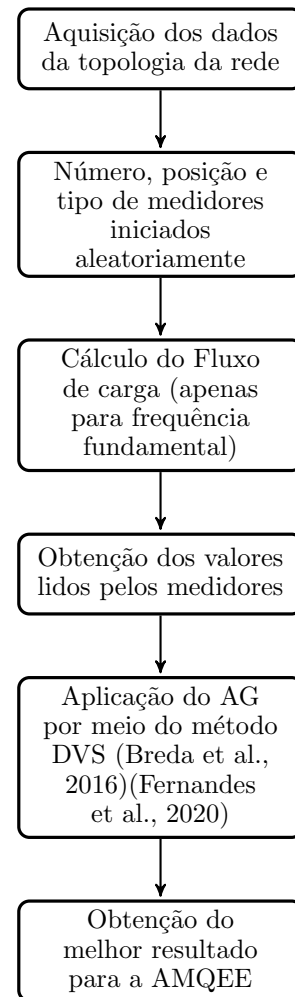


Figura 1. Diagrama de blocos da implementação do algoritmo de AMQEE.

se alcançar a melhor resposta para o método de AMQEE (Breda et al., 2021).

Neste sentido, o cromossomo será representado pelo vetor de tensão X (Equação 1), binário e constituído de n elementos, onde n é o número de barras do sistema mais duas vezes o número de linhas de distribuição do sistema, uma vez que as linhas de distribuição podem receber medidores em ambas extremidades. Além do cromossomo, é importante definir um segundo vetor C (Equação 2), também com dimensão n , que representa o custo de instalação para cada medidor em seu ponto de instalação (Breda et al., 2021).

$$X = [x(1)x(2)x(3)...x(n)]^T \quad (1)$$

$$C = [c(1)c(2)c(3)...c(n)] \quad (2)$$

A fim de se obter soluções factíveis para o sistema de monitoramento, a população inicial foi adotada como sendo com 1000 cromossomos, no intuito de garantir uma melhor cobertura do domínio do problema em comparação com populações em menores escalas (Breda et al., 2021).

Após a geração da população inicial, cada cromossomo passará pelo processo de avaliação, representado pela Figura

2, que ilustra de forma objetiva o desenvolver do AG desde o início da aplicação do EEH utilizando a técnica DVS para obtenção dos valores singulares, até o cálculo final da função objetivo de cada cromossomo durante a etapa de avaliação a partir da indicação (ou não) de barras não observáveis no sistema, levando em consideração também as restrições impostas (Breda et al., 2021).

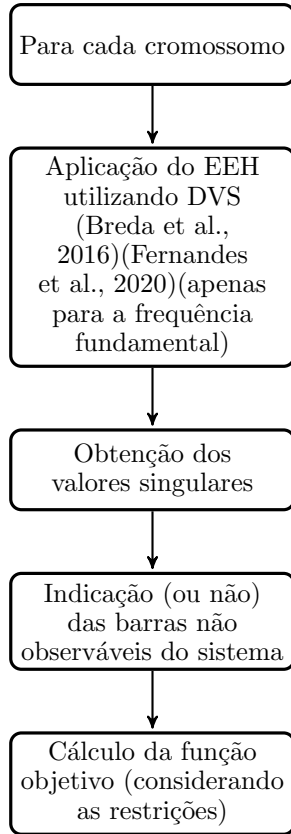


Figura 2. Diagrama do método de avaliação para cada indivíduo da população total.

A seguir, será apresentada a modelagem matemática do algoritmo proposto nesse trabalho. Assim, serão ilustradas a função objetivo e as duas restrições consideradas, de modo a destacar as alterações realizadas em comparação a (Breda et al., 2021), e que resultaram na construção de uma nova estrutura para o AG em si.

- **Função Objetivo:** O propósito deste método de alocação é minimizar o custo total do sistema de medição, bem como otimizar o monitoramento dos sistemas de distribuição para que sejam completamente observáveis a partir dos MQEES alocados. Diferentemente do que foi realizado em (Breda et al., 2021), este trabalho leva em consideração, na função objetivo, apenas o custo do número total de medidores ($C \times X$) somados à quantidade de valores singulares nulos (r) obtidos para cada configuração, conforme a Equação 3 a seguir:

$$\min f(x) = \left[\sum_{i=1}^n c(i)x(i) \right] + r = [C * X] + r \quad (3)$$

Por se tratar de um problema de minimização, a melhor configuração escolhida (indivíduo mais forte)

é aquela com o menor valor da função objetivo para cada iteração do algoritmo.

- **Restrição de observabilidade:** Esta restrição tem como intuito garantir a observabilidade completa do sistema, uma vez que todas as variáveis de estado (tensões complexas nas barras) são obtidas a partir da estimação de estado. Assim, os cromossomos que apresentem barras não observáveis do sistema, após a estimação, serão prontamente descartados. Para que isso ocorra, como explicitado na Figura 2, a técnica DVS é aplicada para a frequência fundamental, e é verificado se todos os valores singulares obtidos pelo algoritmo para cada um dos cromossomos não são nulos, seguindo um certo limite de tolerância de $1 \times 10^{-9} p.u.$. Esta análise é realizada para todas as três fases do sistema analisado (Breda et al., 2021).
- **Restrição do número de canais de medição de corrente:** Antes presente na função objetivo como uma ponderação no trabalho (Breda et al., 2021), a limitação do número de canais será considerada neste trabalho como sendo uma restrição. Essa modificação foi realizada ao se analisar os equipamentos de medição de QEE disponíveis comercialmente, que apresentam apenas um canal de medição trifásico de corrente disponível para cada equipamento. Assim, mesmo que existam mais de uma linha partindo de uma barra que contenha equipamento de medição, essa restrição limita que apenas uma linha possa também ter a medição de corrente atrelada (Breda et al., 2021).

As demais etapas implementadas no AG, como Seleção, Crossover, Mutação, Elitismo e o Critério de Parada, seguem os mesmos parâmetros utilizados em (Breda et al., 2021).

Apenas a taxa de Mutação utilizada neste trabalho foi modificada para 80%, uma vez que o espaço de busca é de 2^n possibilidades. Sendo que, nesse caso, n é igual a 34 (números de barras do sistema) mais 66 (2 vezes o número de linhas de distribuição do sistema). Ou seja, o espaço de busca apresenta 2^{100} possibilidades. Assim, como sugerem os trabalhos (Carvalho, 2017) e (Nunes, 2018), em situações de espaços de busca com grande número de possibilidades, um aumento na taxa de Mutação pode acarretar numa convergência do algoritmo alcançada com maior velocidade, o que de fato foi observado ao longo das simulações. Contudo, maiores detalhes sobre a modelagem do AG utilizado podem ser encontrados em (Breda et al., 2021).

Neste trabalho, porém, será dado destaque de maneira mais específica sobre as alterações feitas em (Breda et al., 2021) que resultaram em um novo algoritmo, como a adoção de alocação de medidores de QEE em pontos estratégicos do sistema, assim como em (Araujo et al., 2020).

3.2 Escolha de pontos estratégicos para o sistema de distribuição de 34 barras do IEEE segundo (Araujo et al., 2020)

Em (Araujo et al., 2020), os autores também realizaram testes de validação utilizando o sistemas de distribuição de 34 barras do IEEE (Kersting, 2001) e, a partir da metodologia proposta, adotaram como sendo pontos estratégicos

para esse sistema, as barras 800, 832, e 836. O critério utilizado para tal escolha, foi o resultado da simulação realizada em (Breda et al., 2021). Assim, a barra seria considerada um ponto estratégico se ao possuir um MQEE alocado, fornecesse como resultado a estimação de valores de tensão em pelo menos duas outras barras conectadas através de uma linha de distribuição (ou qualquer outro tipo de conexão elétrica) com a mesma.

3.3 Cenários considerados para validação do algoritmo de AMQEE

Para que seja possível avaliar o desempenho do algoritmo de AMQEE desse trabalho, de maneira mais eficiente e completa, foram realizadas as simulações de dois cenários diferentes, também utilizando o sistema de distribuição de 34 barras do IEEE (Kersting, 2001). Os cenários escolhidos e seus respectivos critérios são descritos a seguir:

- **Cenário 1:** Para o primeiro cenário, assim como em (Breda et al., 2021), adotou-se apenas a restrição do número de canais de medição de corrente e desconsiderou-se a adoção de pontos estratégicos para a alocação de medidores, ou seja, todos os MQEE serão alocados de acordo apenas com a indicação do próprio AG.
- **Cenário 2:** No segundo cenário, assim como em (Araujo et al., 2020), adotou-se os pontos estratégicos para a alocação de medidores, bem como também a restrição do número de canais de medição de corrente, ou seja, inicialmente alguns medidores serão alocados nos pontos estratégicos do sistema e, apenas, posteriormente, serão alocados outros MQEEs de acordo com a indicação do AG em outros pontos de modo a alcançar a observabilidade completa.

4. RESULTADOS

Foi utilizado o *software* MATLAB para implementação do AG em questão, e, é importante salientar também, que os custos de todos os MQEEs foram considerados iguais, ou seja, o vetor responsável pelo custo C é constituído apenas por valores unitários. Além disso, como dito anteriormente, a validação do algoritmo de AMQEE, foi realizada através de simulações utilizando o sistema distribuição de 34 barras do IEEE (Kersting, 2001).

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos pelos dois cenários considerados no presente trabalho, bem como uma tabela resumindo os resultados alcançados e comparados-os a dois outros trabalhos correlatos que simularam a mesma situação, (Breda et al., 2021) e (Araujo et al., 2020). Nas figuras que seguem, o sistema de 34 barras (Kersting, 2001) é exibido ilustrando os locais apontados pelo algoritmo de AMQEE para alocação dos medidores trifásicos de tensão e corrente.

No cenário 1, que não leva em consideração a alocação prévia de MQEEs nos pontos estratégicos, de acordo com o resultado final obtido pelo algoritmo de AMQEE, foram alocados 23 medidores trifásicos de tensão e 14 medidores trifásicos de corrente para que o sistema se tornasse completamente observável, como mostra a Figura 3. Nota-se que para essa situação, o algoritmo se mostra mais eficiente em comparação com os resultados obtidos em

(Breda et al., 2021), onde o algoritmo desenvolvido sugere que sejam alocados 25 medidores trifásicos de tensão e 11 medidores trifásicos de corrente. Vale destacar que, apesar do número de medidores trifásicos de corrente ter aumentado, isso não acarretaria em custo adicional para a instalação, uma vez que os equipamentos de medição de QEE disponíveis comercialmente já dispõem de, no mínimo, um canal trifásico de medição de corrente atrelado ao equipamento.

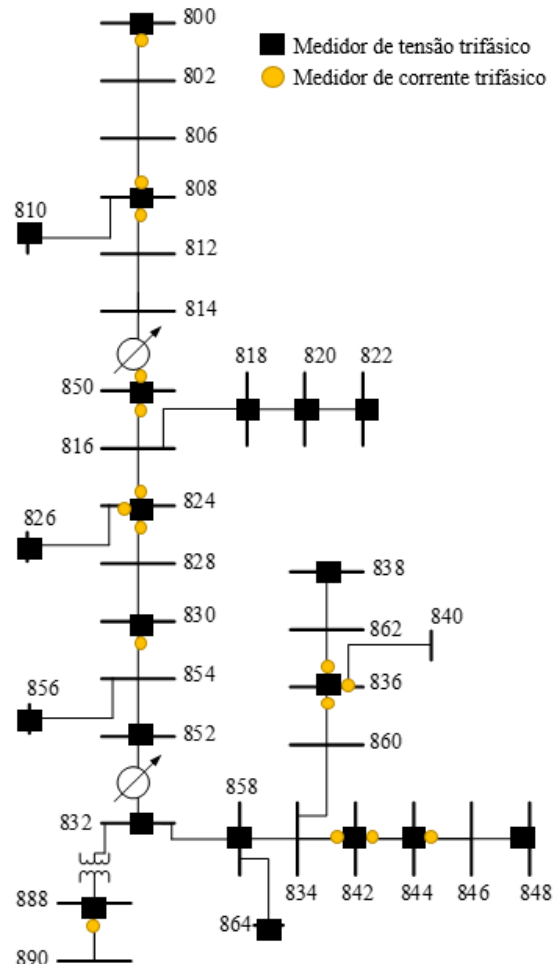


Figura 3. Resultado da AMQEE do sistema do IEEE de 34 barras, segundo o para o cenário 1.

Já para o cenário 2, que leva em consideração a alocação prévia de MQEEs nos pontos estratégicos (barras 800, 832, e 836), bem como a restrição do número de canais de medição de corrente, foi sugerida a alocação de 23 medidores trifásicos de tensão e 15 medidores trifásicos de corrente para que seja possível uma observabilidade completa do sistema, conforme a Figura 4. Ainda considerando os resultados obtidos em (Araujo et al., 2020), onde foram sugeridos 25 medidores trifásicos de tensão e 11 medidores trifásicos de corrente, pode-se perceber que o algoritmo de AMQEE desenvolvido no presente trabalho a partir de (Breda et al., 2021) também se mostrou mais eficiente, assim como no Cenário 1. A mesma observação feita para o número de medidores trifásicos de corrente ter aumentado para o Cenário 1 também vale para o Cenário 2, ou seja, isso não acarretaria em custo adicional para a alocação.

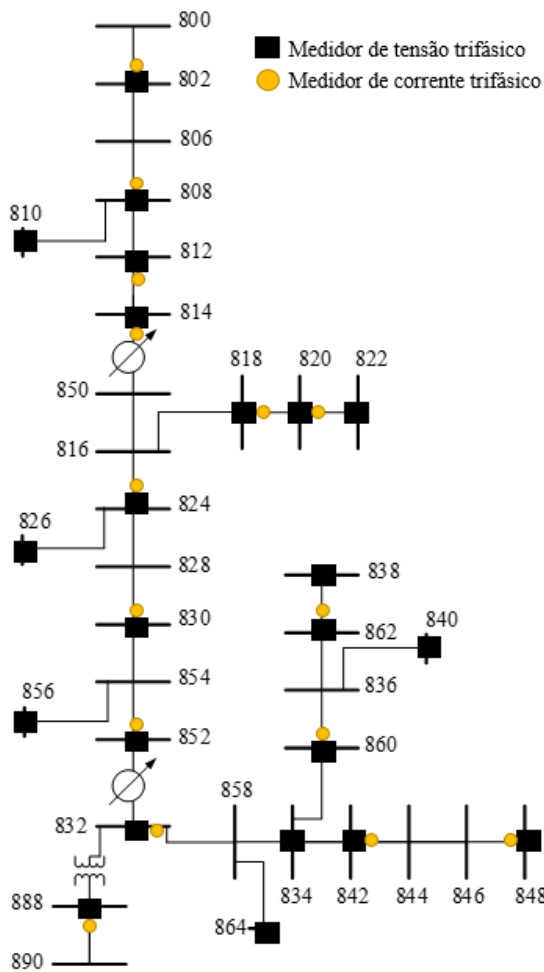


Figura 4. Resultado da AMQEE do sistema do IEEE de 34 barras, segundo o para o cenário 2.

Ainda é possível observar, na Tabela 1, para uma melhor análise e comparação, os resultados obtidos pelos AMQEE em (Breda et al., 2021), (Araujo et al., 2020) e pelo presente trabalho para o sistema de distribuição de 34 barras do IEEE.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi desenvolvido um algoritmo de alocação de medidores de QEE para sistemas de distribuição de energia utilizando AGs em conjunto com a técnica DVS, a partir de alterações realizadas no algoritmo de (Breda et al., 2021), de modo a posicionar, estabelecer a quantidade de medidores a serem alocados e, ainda qual tipo de medição utilizar em determinada localidade para cada situação.

Para a validação do algoritmo de AMQEE desenvolvido foram considerados dois diferentes cenários para o sistema de distribuição de 34 barras do IEEE, o primeiro apenas considerando a necessidade de uma observabilidade completa do sistema após estimação e o outro considerando também uma prévia alocação de MQEEs em pontos considerados como estratégicos no sistema de 34 barras, conforme sugeridos em (Araujo et al., 2020).

Os resultados obtidos pelo presente trabalho se mostram satisfatórios, pois quando comparados a outros dois tra-

balhos correlatos (Breda et al., 2021) e (Araujo et al., 2020), o AMQEE desenvolvido neste trabalho se mostrou mais eficiente em ambos os cenários considerados e da mesma maneira garantindo a observabilidade completa do sistema.

Para trabalhos futuros, a fim de melhorar os resultados obtidos, podem ser feitos ajustes nos parâmetros do AG. Além disso, a metodologia proposta de AMQEE desenvolvida pode também ser realizada para sistemas de distribuição com um maior número de barras, para que haja uma validação ainda mais abrangente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) por toda estrutura e suporte fornecidos durante a execução desse trabalho. Esta pesquisa recebeu apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), bolsa 421310/2018-9.

REFERÊNCIAS

- Almeida, C.F. and Kagan, N. (2011). Harmonic state estimation through optimal power quality monitoring. In *21 international conference on electricity distribution*, 1–4.
- ANEEL (2021). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – prodist, módulo 8 – qualidade da energia elétrica. rev 12. *Agência Nacional de Energia Elétrica*.
- Araujo, J.V., Fernandes, J.O., Breda, J., and Vieira, J.C. (2020). Power quality meters allocation considering strategic positions in distribution systems and using genetic algorithms. In *2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D LA)*, 1–6. IEEE.
- Branco, H., Oleskovicz, M., Delbem, A., Coury, D., and Silva, R. (2015). Optimized allocation of power quality monitors in transmission systems: A multiobjective approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 156–166.
- Breda, J.F., Vieira, J.C.M., and Oleskovicz, M. (2016). Three-phase harmonic state estimation for distribution systems by using the svd technique. In *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5. doi:10.1109/PESGM.2016.7741789.
- Breda, J., Vieira, J., and Oleskovicz, M. (2021). Power quality monitor allocation based on singular value decomposition and genetic algorithm. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32(1), 175–185.
- Carvalho, W.L.d.O. (2017). *Estudo de parâmetros ótimos em algoritmos genéticos elitistas*. Master's thesis, Brasil.
- Dalmas, M. (2015). *Avaliação de algoritmos visando medição de sincrofasores de componentes harmônicas*. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- de O. Silva, L.G., da Silva, A.A.P., and de Almeida-Filho, A.T. (2016). Allocation of power-quality monitors using the p-median to identify nontechnical losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31, 2242–2249.
- Fernandes, J.O., de Araújo, J.V.G., Breda, J.F.D., and Júnior, J.C.d.M.V. (2020). Estimação de estado harmônico

Tabela 1. Comparação dos resultados obtidos pelos algoritmos de AMQEE para o sistema de distribuição de 34 barras do IEEE

	(Breda et al., 2021)		(Araujo et al., 2020)		Presente Trabalho	
	Medidores de Tensão	Medidores de Corrente	Medidores de Tensão	Medidores de Corrente	Medidores de Tensão	Medidores de Corrente
Cenário 1	25	11	Não se aplica	Não se aplica	23	14
Cenário 2	Não se aplica	Não se aplica	25	11	23	15

para sistemas de distribuição de energia elétrica frente a condições reais de monitoramento. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, 1(1).

- Harik, G., Lobo, F., and Goldberg, D. (1999). The compact genetic algorithm. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3, 287–297.
- Kersting, W. (2001). Radial distribution test feeders. In *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, volume 2, 908–912 vol.2. doi:10.1109/PESW.2001.916993.
- Ketabi, A., Sheibani, M.R., and Nosratabadi, S.M. (2012). Power quality meters placement using seeker optimization algorithm for harmonic state estimation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43, 141–149.
- Nunes, J.R.d.O. (2018). *Avaliação de taxas de cruzamento e mutação em um algoritmo genético baseado em ordem aplicado ao problema do caixeiro viajante*. B.S. thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Saini, M.K. and Kapoor, R. (2012). Classification of power quality events – a review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43, 11–19.
- Silva, A., Silva, L., and Almeida Filho, A. (2016). Meters allocation in distribution systems based on the load importance. *IEEE Latin America Transactions*, 14, 1786–1791.
- Wang, H. (2011). Harmonic impact of modern residential loads on distribution power system and mitigation solutions. *ERA: Education and Research Archive*.
- Won, D.J. and Moon, S.I. (2008). Optimal number and locations of power quality monitors considering system topology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23, 288–295.