

Um Método Híbrido de Otimização para Despacho Econômico e Alocação de GDs e Estações de Carregamento de Veículos Elétricos

Felipe Z. da Silva* Augusto C. Rueda-Medina**

* *Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ES, (e-mail: felipe.z.silva@aluno.ufes.br).*

** *Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ES, (e-mail: augusto.rueda@ufes.br)*

Abstract: The increasing yearn for sustainable energy resources and systems has resulted in the creation of new technologies and systems models, such as wind and PV generators; distributed generators systems; electrical vehicles; and many other. However, due to the great impact of these assets on the existing energy system, it is important to know the wiser form to insert them aiming to maximize its pros and minimize its cons. Therefore, this work has as main goal to introduce a hybrid optimization method to allocate electrical vehicles charging stations and synchronous distributed generators and realize the generators economic dispatch of energy, aiming the minimization of the grid operational cost. The method is consisted by two sections, the first is a optimization via Genetic Algorithms method, using the MATrix LABoratory (MATLAB) software, to solve the allocation problem and the second is via Interior Points method, using the A Mathematical Programming Language (AMPL) software, to solve the nonlinear programing problem that is the generators economic dispatch. The method has shown to be effective, reducing the operational cost by about 13.47%.

Resumo: A maior necessidade de fontes de energia e sistemas sustentáveis resultou no surgimento de novas tecnologias e modelos de sistemas, como geração eólica e solar; sistemas de Geradores Distribuídos (GDs); Veículos Elétricos (VEs); e muitos outros. Contudo, devido ao grande impacto desses ativos no sistema de energia existente, é importante saber a forma mais sábia para inserí-los objetivando maximizar seus prós e minimizar seus contras. Assim, o presente trabalho tem como principal objetivo introduzir um método de otimização híbrido para alocar Estações de Carregamento de VEs (ECVEs) e GDs síncronos e realizar o despacho de energia para minimizar os custos operacionais da rede. O método consiste em duas etapas, a primeira via otimização pelo método de Algoritmos Genéticos (AG), utilizando o software *MATrix LABoratory* (MATLAB), para resolver o problema de alocação, e o segundo via método de Pontos Interiores (PI), utilizando o software *A Mathematical Programming Language* (AMPL), para resolver o problema de programação não linear que é o despacho econômico de energia dos geradores. O método se mostrou eficaz em sua aplicação, reduzindo os custos operacionais em cerca de 13.47%.

Keywords: Nonlinear Programming; Genetic Algorithm; Economic Dispatch; Distributed Generation; Electrical Vehicles.

Palavras-chaves: Programação Não Linear; Algoritmo Genético; Despacho Econômico; Geração Distribuída; Veículos Elétricos.

NOMENCLATURA

t - Instante de Tempo - (h)
 T - N° Total de Horas Considerado - (h)
 B - N° de Barras
 B_i - Barra Emissora
 B_j - Barra Receptora
 G - N° de GDs
 E - N° de ECVEs

N - N° de VEs
 Δt - Período de Tempo entre dois Instantes Consecutivos - (h)
 C_s - Custo de Geração da Subestação - (R\$/kW)
 P_s - Potência Ativa Fornecida pela Subestação - (kW)
 Q_s - Potência Reativa Fornecida pela Subestação - (kVar)
 C_g - Custo de Geração do GD - (R\$/kW)
 d - Estado de Conexão do GD
 P_g - Geração de Potência Ativa do GD - (kW)

P_{gn} - Geração de Potência Ativa do GD de número 'n' - (kW)
 Q_g - Geração de Potência Reativa do GD - (kvar)
 Q_{gn} - Geração de Potência Reativa do GD de número 'n' - (kvar)
 P_{gM} - Potência Ativa Máxima Fornecida pelo GD - (kW)
 Q_{gM} - Potência Reativa Mínima Fornecida pelo GD - (kvar)
 Q_{gM} - Potência Reativa Máxima Fornecida pelo GD - (kvar)
 P_{g_n} - Capacidade de Fornecimento de Potência Ativa do GD no Ponto de N° 'n' - (kW)
 Q_{g_n} - Capacidade de Fornecimento de Potência Reativa do GD no Ponto de N° 'n' - (kvar)
 ΔP_{gd} - Máximo Decrescimento de Geração de Potência Ativa em Δt - (kW/h)
 ΔP_{gc} - Máximo Crescimento de Geração de Potência Ativa em Δt - (kW/h)
 P - Potência Ativa Fluindo no Ramo - (kW)
 Q - Potência Reativa Fluindo no Ramo - (kvar)
 P_j - Demanda de Potência Ativa da Barra Receptora - (kW)
 Q_j - Demanda de Potência Reativa da Barra Receptora - (kvar)
 R - Resistência do Ramo - ($k\Omega$)
 X - Reatância do Ramo - ($k\Omega$)
 Z - Impedância do Ramo - ($k\Omega$)
 V - Tensão na Barra - (kV)
 I - Corrente no Ramo - (A)
 I_M - Capacidade de Corrente do Ramo - (A)
 V_m - Tensão Mínima na Barra - (kV)
 V_M - Tensão Máxima na Barra - (kV)
 fp_m - Fator de Potência Capacitivo Mínimo da Subestação
 fp_M - Fator de Potência Indutivo Mínimo da Subestação
 b - Estado de Conexão das ECVEs
 c - Estado de Conexão do VE
 P_v - Potência de Carregamento do VE - (kW)
 P_{vM} - Máxima Potência de Carregamento do VE - (kW)
 ΔP_v - Máxima Variação da Potência de Carregamento do VE em Δt - (kW/h)
 Pen - Demanda de Potência da ECVE de N° 'n' - (kW)
 Ev - Carga do VE - (kWh)
 Ev_n - Carga Nominal do VE - (kWh)
 S_i - Estado de Carga Inicial do VE - (%)
 S_f - Estado de Carga Final Mínimo do VE - (%)
 fd - Fator de Demanda - (%)
 η - Eficiência de Carregamento da ECVE - (%)
 te - Intante de Tempo de Conexão do VE - (h)
 ts - Intante de Tempo de Desconexão do VE - (h)

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento da preocupação com a emissão de gases poluidores despertou a demanda por fontes de energia limpas com menor custo de geração. Dessa forma, especialistas consideraram a implementação de geração distribuída em junção com fontes renováveis de energia como uma forma de remediar a poluição intrínseca ao sistema de geração de energia atual, majoritariamente alimentada por combustíveis fósseis, ao mesmo tempo em que visa reduzir os custos da energia fornecida pelos grandes geradores convencionais e melhorar a confiabilidade e

eficiência do sistema [Wang et al. (2018), Poudineh and Jamasb (2014), Rabiee et al. (2016)].

Assim, o sistema de energia convencional, onde uma geração centralizada injeta grandes quantidades de potência na rede, dará lugar a um novo sistema em que a metodologia de geração convencional coexistirá com sistemas de geração distribuída aplicando conceitos como despacho econômico, resposta à demanda e armazenamento de energia, elementos esses que são cruciais para o planejamento, custo e operação do sistema [Poudineh and Jamasb (2014)].

Também em conformidade com essa demanda por fontes de energia mais limpas, com preço e dependência de combustíveis fósseis menores, houve um aumento no interesse em VEs como uma solução de longo prazo para o transporte sustentável, dado que o sistema de transporte atual é um dos maiores emissores de gases poluentes. Dentre os diversos tipos de veículos elétricos, os tipo *Plug-in Hybrid Electric Vehicles* (PHEVs) se tornaram um dos melhores modelos de VEs, com potencial para ser muito eficiente e, por consequência, obter grande economia de combustível. Este modelo de veículo consiste em um sistema de energia que pode ser extraída tanto da geração interna do próprio veículo, através do seu motor a combustão ou sistema de frenagem, quanto pelo carregamento direto da rede de energia [Haidar et al. (2014)].

Para que as tecnologias e os conceitos citados possam ser introduzidos ao sistema de energia de maneira eficaz faz-se necessário a utilização de técnicas de otimização. Para a solução destes tipos de problemas percebe-se uma maior frequência das técnicas meta-heurísticas, métodos bastante empregados quando não se possui um método analítico mais eficiente para realizar a otimização, as quais consistem na busca, em uma vizinhança de soluções possíveis, da solução incumbente para o problema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em conformidade com as técnicas e conceitos supracitados, o trabalho apresentado em [Wang et al. (2018)], emprega o método AG para a realização do gerenciamento ótimo de uma microrrede inteligente constituída de geradores fotovoltaicos; sistemas combinados de potência, aquecimento e resfriamento; sistemas de armazenamento e resposta à demanda visando minimizar o custo operacional. Em [Rabiee et al. (2016), Ahmadian et al. (2016) e Jamian et al. (2015)], são utilizados diferentes versões do método de Enxame de Partículas (EP) para lidar, respectivamente, com a redução de custos operacionais e emissões de uma microrrede com presença de geração eólica e fotovoltaica considerando o agendamento ótimo de VEs e resposta à demanda, o autor propõe que os VEs sejam utilizados para corte de picos de demanda e alterações na curva de carga, e que a resposta à demanda propicie uma reserva de energia para compensar as incertezas dos GDs; para lidar com o planejamento de geração distribuída eólica baseada em uma geração flexível visando contornar problemas relacionados à regulação de tensão advindos das incertezas intrínsecas ao carregamento de VEs e à geração eólica; e para lidar com o despacho dos GDs, objetivando a minimização das perdas. E em [Cailian et al. (2015) e Ali et al. (2018)], são utilizadas variações do método de Colônia de Formigas (CF) para alocar e definir a capaci-

dade dos GDs no fornecimento de potência reativa com o objetivo de diminuir perdas e melhorar o perfil de tensão, além da alocação e do dimensionamento dos GDs com foco na diminuição das perdas.

Portanto, no presente trabalho tem-se como objetivo apresentar um método híbrido para a alocação de ECVEs e GDs síncronos em uma rede de distribuição de energia elétrica, além de realizar o despacho econômico ótimo desses geradores, ou seja, a minimização dos custos operacionais. O método híbrido consiste na utilização dos AG para realizar a alocação dos GDs e ECVEs, e do método de PI para a solução de problemas de programação não linear com o objetivo de realizar o despacho econômico dos GDs e da subestação. Desta forma, este método de otimização utilizará uma meta-heurística para a realização da alocação dos GDs e ECVEs, retornando uma solução de excelente qualidade, enquanto o despacho é realizado por um método analítico retornando a solução ótima para dado perfil de alocação.

A alocação ótima é definida através do MATLAB pelo método de AG, enquanto o despacho dos GDs e da subestação é realizado através do AMPL utilizando o *solver Interior Point Optimizer* (ipopt) que faz uso do método de PI para solucionar problemas de programação linear e não linear.

Embora outros métodos possam ser utilizados para a solução deste problema, este método se diferencia por não utilizar somente métodos meta-heurísticos, ele usufrui das características dos métodos clássicos e das meta-heurísticas permitindo, assim, a otimalidade de parte da solução e sua utilização em alimentadores com um maior número de barras, com um menor número de variáveis e tempo de processamento. Conforme averiguado através de simulações, caso fosse feito totalmente pelo método clássico, de acordo com as características do problema formulado e condições de convexidade no espaço de busca, poderia se obter a solução ótima de todo o problema, contudo o número de variáveis e o tempo de processamento poderiam vir a ser inviáveis.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Método de Algoritmos Genéticos

Os AG são um método de otimização meta-heurístico baseado na teoria da evolução de Charles Darwin e é definido pela sua organização, adaptabilidade e aprendizado. Ele busca informações das características evolucionárias da população de soluções, através de funções de avaliações (*fitness*) e faz uso das regras de probabilidade para definir sua direção de busca, através dos cruzamentos entre soluções bem avaliadas (*crossover*) e variações aleatórias nas soluções oriundas desses cruzamentos (mutações) [Wang et al. (2018)]. Como um método meta-heurístico, ele busca a melhor solução na vizinhança das soluções encontradas anteriormente e não garante a solução ótima de um problema, mas sim a possibilidade de se chegar a soluções de excelente qualidade. O processo chega ao fim ao se atingir o número máximo de novas soluções criadas ou quando a variação da avaliação das melhores soluções encontradas é menor que uma tolerância especificada. Mais detalhes so-

bre os operadores supracitados são explicitadas em [Wang et al. (2018)].

3.2 Método de Pontos Interiores

O método de PI corresponde aos Métodos de Programação Não-linear, utilizados para resolver problemas de otimização onde a função objetivo e suas restrições possuem pelo menos uma expressão não linear. Existem diversos métodos para a solução desse tipo de problema e sua vantagem consiste no retorno da solução ótima desde que o problema cumpra com as condições de otimalidade. O método de PI, em suma, consiste na realização da busca da solução ótima internamente à região factível ao invés de suas fronteiras, como realizado no método Simplex. Sua vantagem está em sua velocidade, onde o número de iterações é proporcional à raiz quadrada do número de variáveis e ao número de equações de restrições [Lesaja (2009)].

A solução do despacho econômico dos GDs foi realizada pela linguagem de programação AMPL através do *solver ipopt* que soluciona problemas de programação não linear pelo método de PI.

4. METODOLOGIA

Inicialmente, são apresentadas as considerações do problema, seguida do modelo de solução do processo de otimização pelo método de AG, a função objetivo do problema e, por fim, as equações de restrições do processo de otimização aplicando o método de PI.

As restrições do problema estão divididas em quatro grupos: o primeiro, de balanço de potência; o segundo, de fornecimento da subestação; o terceiro, da geração dos GDs síncronos; e o quarto, da demanda das ECVEs. Essas equações elencadas a seguir são baseadas nas apresentadas em [Rueda-Medina et al. (2013)].

4.1 Considerações do Problema

As principais suposições do problema são elencadas a seguir:

- É considerado que o sistema de distribuição é equilibrado e a otimização é realizada em seu equivalente monofásico;
- Nenhum GD e ECVE pode ser alocado na mesma barra que outro elemento pertencente ao mesmo grupo;
- É considerado que o detentor dos GDs e das ECVEs também é detentor operacional do alimentador;
- A função de avaliação *fitness* é o custo operacional do despacho econômico, que deve ser minimizado, para o perfil de alocação representado pela solução gerada.

4.2 Solução do Problema de Alocação dos GDs e ECVEs usando Algoritmos Genéticos

O processo de otimização foi implementado na linguagem de programação MATLAB e é apresentado na Figura 1. Cada solução possui um número de variáveis que representam as barras onde um ativo será alocado. Essas variáveis são divididas em duas seções, a primeira representa a alocação dos GDs Síncronos e a segunda, a alocação das ECVEs, conforme explicitado na Figura 2.

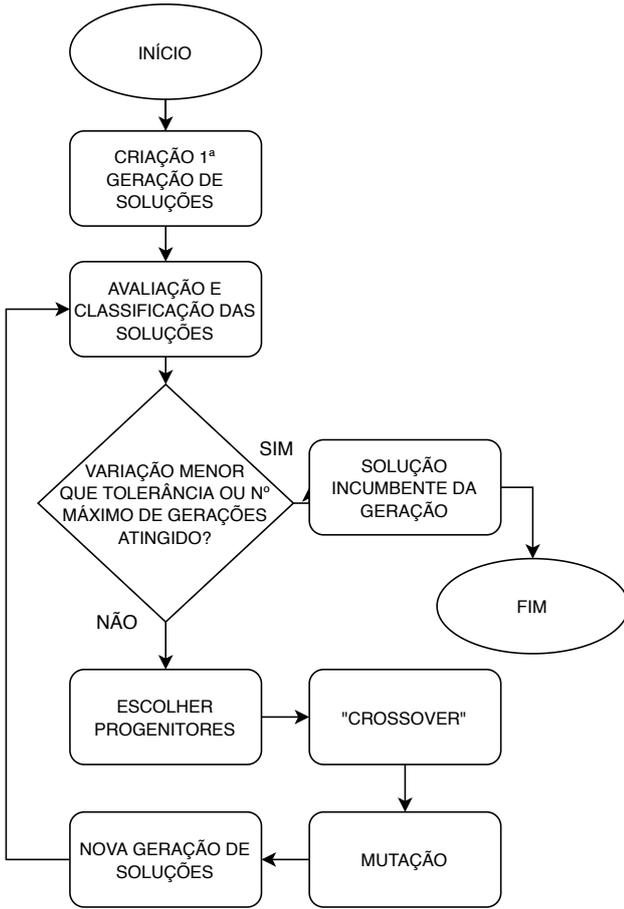


Figura 1. Diagrama do processo de otimização do Algoritmo Genético [Autor].



Figura 2. Codificação de um indivíduo para o Método de Algoritmos Genéticos [Autor].

4.3 Formulação Matemática do Problema

4.3.1 Função Objetivo do Problema de Otimização

A função objetivo é a minimização dos custos operacionais definido na Equação (1).

$$\sum_{t=1}^T [Cs(t) * Ps(t)] + \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^G [Cg(g,t) * Pg(g,t)] \quad (1)$$

$$t \in [1, T]; g \in [1, G];$$

Onde o somatório no tempo do custo de geração de potência ativa da subestação multiplicado pela potência ativa fornecida pela mesma é adicionada ao somatório no tempo dos custos de geração de cada GD multiplicado pela sua geração de potência ativa para toda barra do alimentador.

4.3.2 Balanço de Potência

Para garantir o balanço de potência ativa e reativa em todas as barras é necessário realizar o fluxo de potência no alimentador, ou seja, deve-se garantir que a potência entrante na barra adicionada à potência nela injetada deve ser igual à potência saiente somada à demanda da mesma. As restrições de balanço de potência ativa e reativa para cada barra i em cada instante de tempo t são explicitados em (2) e (3), respectivamente.

$$\sum_{j=1}^B P(j, i, t) - \sum_{j=1}^B [P(i, j, t) + R(i, j) * I(i, j, t)^2] + Ps(t) + \sum_{g=1}^G [d(i, g) * Pg(g, t)] = Pd(i) * fd(t) + \sum_{e=1}^E \sum_{v=1}^N [b(i, e) * c(e, v, t) * Pv(v, t)]; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^B Q(j, i, t) - \sum_{j=1}^B [Q(i, j, t) + X(i, j) * I(i, j, t)^2] + Qs(t) + \sum_{g=1}^G [d(i, g) * Qg(g, t)] = Qd(i) * fd(t); \quad (3)$$

$$\forall t \in [1, T]; \forall i \in [1, B];$$

$$\forall j \in [1, B]; \forall g \in [1, G]; \forall e \in [1, E]; \forall v \in [1, N];$$

As equações (2) e (3) garantem que, dado uma barra i em um instante de tempo t , a potência proveniente das barras j a montante de i somada à potência injetada em i pela subestação e GDs a ela conectados e subtraídas da potência que flui de i para as barras a jusante j e das perdas de potência nos ramos a jusante seja igual à demanda da barra i somada à demanda de carregamento das ECVEs.

Além das restrições de balanço de potência, as seguintes restrições, apresentadas em (4) e (5), são necessárias para garantir o correto nível de tensão e corrente em cada barra e ramo, respectivamente.

$$(V(i, t))^2 - 2 * [R(i, j) * P(i, j, t) + X(i, j) * Q(i, j, t)] - Z(i, j) * (I(i, j, t))^2 - (V(j, t))^2 = 0; \quad (4)$$

$$(I(i, j, t))^2 * (V(j, t))^2 = (P(i, j, t))^2 + (Q(i, j, t))^2; \quad (5)$$

$$\forall t \in [1, T]; \forall i, j \in [1, B];$$

Por fim, têm-se as restrições de limites de magnitude da tensão nas barras e corrente nos ramos, conforme (6) e (7). A corrente de ramo deve ser sempre inferior à capacidade de corrente do ramo e a tensão da barra deve sempre permanecer dentro dos limites regulatórios.

$$0 \leq (I(i, j, t))^2 \leq (I_M(i, j))^2; \quad (6)$$

$$(V_m)^2 \leq (V(i, t))^2 \leq (V_M)^2; \quad (7)$$

$$\forall t \in [1, T]; \forall i, j \in [1, B];$$

4.3.3 Fornecimento da Subestação

As seguintes restrições, explicitadas em (8) e (9), são necessárias para garantir a positividade do fornecimento de potência ativa da subestação e que a geração de potência reativa garanta o respeito à regulamentação do fator de potência.

$$Ps(t) \geq 0; \quad (8)$$

$$-Ps(t) * \tan(\cos^{-1}(fp_m)) \leq Qs(t) \leq Ps(t) * \tan(\cos^{-1}(fp_M)); \quad (9)$$

$$\forall t \in [1, T];$$

Assim, na barra da subestação, para todo instante de tempo t , a potência ativa fornecida pela subestação é positiva e a reativa deve estar sempre dentro do limite para garantir que o fator de potência nunca esteja abaixo ou acima de seus respectivos valores mínimo e máximo.

4.3.4 Geração dos Geradores Distribuídos Síncronos

A curva de capacidade de geração para um gerador síncrono é explicitada na Figura 3. É possível notar que, dado um valor de geração de potência ativa (Pg), a capacidade do gerador para fornecer ou consumir potência reativa (Qg) é limitada pelas correntes de campo, de armadura e pelo limite de subexcitação do gerador. Contudo, mesmo que tais limites sejam não lineares é viável linearizá-los através da aproximação da curva em uma composição de diversas retas lineares para facilitar o seu processamento.

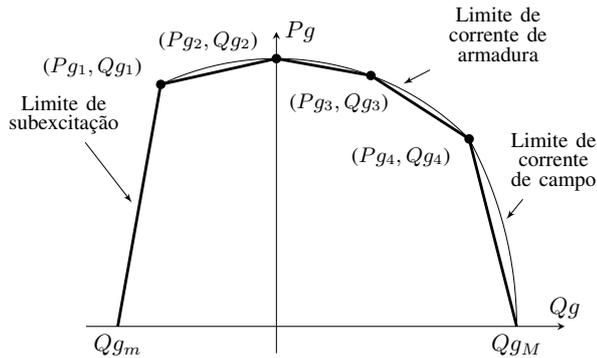


Figura 3. Curva de Capacidade de Geração de um Gerador Síncrono Linearizada [Rueda-Medina et al. (2013)].

Dessa forma, em (10) é garantida a positividade da potência ativa do GD e o respeito ao seu limite máximo, e em (11) a (15) são apresentadas as equações das cinco retas de linearização da curva de capacidade que limita a geração de cada GD.

$$0 \leq Pg(g, t) \leq Pg_M(g, t); \quad (10)$$

$$Pg(g, t) \leq \frac{Pg_1(g)}{Qg_1(g) - Qg_m(g)} * [Qg(g, t) - Qg_m(g)]; \quad (11)$$

$$Pg(g, t) \leq \frac{Pg_2(g) - Pg_1(g)}{Qg_2(g) - Qg_1(g)} * [Qg(g, t) - Qg_2(g)] + Pg_2(g); \quad (12)$$

$$Pg(g, t) \leq \frac{Pg_3(g) - Pg_2(g)}{Qg_3(g) - Qg_2(g)} * [Qg(g, t) - Qg_3(g)] + Pg_3(g); \quad (13)$$

$$Pg(g, t) \leq \frac{Pg_4(g) - Pg_3(g)}{Qg_4(g) - Qg_3(g)} * [Qg(g, t) - Qg_4(g)] + Pg_4(g); \quad (14)$$

$$Pg(g, t) \leq \frac{Pg_4(g)}{Qg_4(g) - Qg_M(g)} * [Qg(g, t) - Qg_M(g)]; \quad (15)$$

$$\forall t \in [1, T]; \forall g \in [1, G];$$

Finalmente, a restrição descrita em (16) refere-se à mudança de estado de geração dos GDs. Ou seja, o gerador síncrono possui um tempo de resposta para aumentar ou diminuir a sua potência gerada. Assim, é definido que a variação de potência ativa fornecida pelo GD entre dois instantes de tempo consecutivos deve respeitar o limite máximo de decrescimento e crescimento de potência ativa.

$$\Delta Pg_a * \Delta t \leq Pg(g, t) - Pg(g, t - 1) \leq \Delta Pg_c * \Delta t; \quad (16)$$

$$\forall t \in [1, T]; \forall g \in [1, G];$$

4.3.5 Demanda das Estações de Carregamento de Veículos Elétricos

As demandas de potência ativa das ECVEs são definidas pela somatória da potência de carregamento dos VEs a elas conectados em um instante de tempo. Cada VE possui um estado de carga inicial e um período no qual ele estará conectado a alguma ECVE. Este período de tempo de conexão deve ser, no mínimo, suficiente para que o veículo seja desconectado com um estado de carga final predefinido.

A primeira restrição para a demanda das ECVEs é apresentada em (17). Ela garante a positividade da potência de carregamento do veículo e que seu valor seja inferior à potência máxima entregue pela estação para cada veículo.

$$0 \leq c(e, v, t) * Pv(v, t) \leq c(e, v, t) * Pv_M(e); \quad (17)$$

$$\forall t \in [1, T]; \forall e \in [1, E]; \forall v \in [1, N];$$

A restrição apresentada em (18) define que no momento de conexão de um VE a sua potência de carregamento

deve ser igual à máxima variação de potência permitida pela estação em um período; e a apresentada em (19) define que em qualquer instante de tempo t posterior à conexão de um VE, a sua potência de carregamento deve ser igual a potência de carregamento necessária para carregar totalmente a bateria do VE no período de tempo Δt ; ou a potência de carregamento no instante de tempo anterior $t - 1$ somada ao máximo acréscimo de potência de carregamento permitida pela estação em um período de tempo Δt ; ou a máxima potência de carregamento suportada pela estação. Sendo tomado como valor de potência de carregamento no instante de tempo atual (t) o menor valor dentre os três supracitados. Esta equação garante o carregamento dos VEs ao nível desejado ao fim de um período de tempo.

$$c(e, v, t) * Pv(v, t) = c(e, v, t) * \Delta Pv(e); \quad (18)$$

$$\forall t = te(v); \forall e \in [1, E]; \forall v \in [1, N];$$

$$c(e, v, t) * Pv(v, t) = c(e, v, t) * \min\left\{\left[\frac{Ev_n(v) - Ev(v, t-1)}{\Delta t}\right]; [Pv(v, t-1) + \Delta Pv(e)]; [Pv_M(e)]\right\}; \quad (19)$$

$$\forall t > te(v) \forall e \in [1, E]; \forall v \in [1, N];$$

A última restrição relacionada à demanda das ECVEs é que, quando desconectado, a potência de carregamento do veículo deve permanecer nula, conforme apresentado em (20).

$$Pv(v, t) = 0 \quad (20)$$

$$\forall t \leq te(v) \cup t \geq ts(v); \forall e \in [1, E]; \forall v \in [1, N];$$

As quatro últimas restrições, apresentadas em (21) a (24), dizem respeito à variação do estado de carregamento da bateria de cada VE no tempo. Elas definem, respectivamente, que a carga da bateria seja inferior à nominal e positiva; que a carga nos momentos posteriores ao de conexão do veículo seja igual à carga no momento anterior somada à potência de carregamento do período multiplicado pelo período de tempo e pela eficiência de carregamento; que a carga no momento de conexão de um VE deve ser igual à carga inicial deste veículo; e que, no momento de desconexão do veículo, sua carga deve ser superior ao estado final de carregamento desejado.

$$0 \leq c(e, v, t) * Ev(v, t) \leq c(e, v, t) * Ev_n(v); \quad (21)$$

$$\forall t \in [1, T]; \forall e \in [1, E]; \forall v \in [1, N];$$

$$c(e, v, t) * Ev(v, t) = c(e, v, t) * Ev(v, t-1) + c(e, v, t) * Pv(v, t) * \eta * \Delta t; \quad (22)$$

$$\forall t \geq te(v); \forall e \in [1, E]; \forall v \in [1, N];$$

$$c(e, v, t) * Ev(v, t) = c(e, v, t) * Ev_n(v) * \frac{S_i(v)}{100}; \quad (23)$$

$$\forall t = te(v); \forall e \in [1, E]; \forall v \in [1, N];$$

$$c(e, v, t) * Ev(v, t) \geq c(e, v, t) * Ev_n(v) * S_f; \quad (24)$$

$$\forall t = ts(v); \forall e \in [1, E]; \forall v \in [1, N];$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tomando a metodologia apresentada, foram realizadas simulações para a alocação de quatro GDs síncronos com geração máxima de 250kW e com a capacidade de fornecer potência reativa entre -147 e 222.65 kvar, para os GDs 1 e 2, e -250 e 188.75 kvar, para os GDs 3 e 4. Os custos de geração para cada GD é 10.44, 11.35, 11.36 e 12.33 R\$/kW, respectivamente. Os custos de geração dos GDs são constantes e inferiores ao custo de geração da subestação, como é comum para geradores síncronos distribuídos, onde o custo de geração está ligado ao valor do combustível utilizado.

Também foram alocados sete ECVEs com a potência máxima de carregamento para cada VE definido em 4 kW, com uma variação de potência de 0.25kW no período e com capacidade para até 10 veículos carregando simultaneamente. No total, foram alocados 52 VEs nas estações de forma aleatória, sendo que cada ECVE foi conectada por 10, 6, 7, 5, 8, 9 e 7 VEs, respectivamente. A carga nominal das baterias dos VEs é de 20 kWh, valor típico para baterias de carros elétricos, os seus estados de carga inicial foram definidos, aleatoriamente, entre 5% e 85% e o período de tempo de conexão, também aleatório, é, no mínimo, suficiente para que a bateria atinja 90% de estado de carga. Os valores de potência de carregamento correspondem a uma recarga lenta.

O alimentador utilizado corresponde a um sistema de distribuição radial de 37 barras adaptado do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), cujos parâmetros são apresentados na Tabela 1. Informações sobre o sistema original é encontrada em [Rueda-Medina et al. (2013)]. O número de VEs alocados foi definido de forma que suas demandas somadas equivalem a, aproximadamente, 10% da demanda de potência ativa do alimentador, valor este estimado como possível incremento de demanda de um sistema com a inserção de VEs [UFRJ (2014)]. Além disso, a barra 1 é onde se localiza a subestação, portanto é a barra de referência do alimentador onde sua tensão é sempre nominal e seu ângulo é sempre zero. Vale destacar que, para este alimentador, as barras com maior concentração de demanda de potência ativa, acima de 100 kW, são as barras 2, 9, 15, 26, 33 e 37.

Assim, a otimização pelo método de AG entregou como solução os seguintes vetores de alocação: barras 33, 37, 26 e 19 para os quatro GDs, respectivamente, e barras 4, 37, 20, 34, 1, 22 e 36 para as sete ECVEs, respectivamente. Dessa forma, para tal perfil de alocação, a otimização pelo método de PI retornou os valores de potência ativa e reativa indicados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente, para a subestação e GDs síncronos. Além disso, na Tabela 2, também está indicado o custo de geração por hora para a subestação e, na Tabela 3, está indicada a variação diária do fator de demanda para o alimentador.

É explicitado, na Tabela 4, o somatório, para cada instante de tempo, da demanda de carregamento dos VEs alocados em cada uma das sete ECVEs que foram inseridas nas

barras retornadas pela solução da etapa de otimização pelo método de AG.

O custo operacional do sistema com o perfil de alocação apresentado (Sistema Otimizado) é de R\$ 458767.00. Além disso, para fins de comparação, é possível calcular o custo operacional do sistema para o alimentador operando somente com sua demanda original, antes da alocação das ECVEs e dos GDs (Sistema 1). Também foi realizado o cálculo para o sistema com os GDs alocados nas barras de maior concentração de carga (2, 9, 33 e 37) no alimentador (Sistema 2) e para o sistema com o alimentador operando sem a alocação das ECVEs (Sistema 3). Além dos custos operacionais, também foram calculadas as perdas para cada um dos sistemas, ambas as informações estão explicadas na Tabela 5.

Tabela 1. Parâmetros do Alimentador

B_i	B_j	$R (\Omega)$	$X (\Omega)$	I_{max}	P_j	Q_j
0	1	-	-	-	0	0
1	2	1.19392	1.22615	800	210	105
2	3	0.86346	0.89846	800	0	0
3	4	1.80447	0.58011	800	0	0
3	5	1.18726	1.23539	800	0	0
3	6	0.83753	0.47759	800	28.33	13.33
4	7	1.44364	0.46411	800	81	44.67
4	8	1.08265	0.34806	800	78.33	43.33
5	9	1.08265	0.34806	800	144	74
5	10	1.39586	0.79598	800	28.33	13.33
6	11	1.20977	0.68986	800	0	0
9	12	0.65137	0.37144	800	14	7
10	13	0.46529	0.26533	800	0	0
11	14	0.36084	0.116	800	12.67	6
11	15	1.86114	1.0613	800	128.33	63.33
12	16	1.26307	0.40606	800	14	7
12	17	0.90224	0.29006	800	42	21
13	18	1.39586	0.79598	800	38.33	23.33
13	19	0.74449	0.42454	800	0	0
13	20	1.39586	0.79598	800	78.33	43.33
14	21	2.34587	0.75417	800	95.33	53.33
15	22	1.39586	0.79598	800	0	0
15	23	4.15034	1.33428	800	0	0
19	24	1.44364	0.46411	800	14	7
19	25	0.74449	0.42454	800	28.33	13.33
22	26	1.26307	0.40606	800	114	70
23	27	0.5414	0.17405	800	53.67	26.67
23	28	3.42853	1.10223	800	14	7
25	29	1.30282	0.74292	800	84	47
29	30	2.34587	0.75417	800	0	0
29	31	1.4889	0.84903	800	46.67	23.33
30	32	5.77425	1.85634	800	14	7
30	33	0.90224	0.29006	800	170.33	84
31	34	0.93057	0.53065	800	0	0
34	35	0.93057	0.53065	800	0	0
35	36	0.90224	0.29006	800	78.33	43.33
35	37	0.93057	0.53065	800	214	170

Dessa forma, comparando o custo operacional do Sistema Otimizado com o do Sistema 1, é possível observar que o resultado do algoritmo causou uma diminuição de 13.47% no custo operacional e de 75.55% nas perdas do sistema. Quando comparado com o Sistema 2, observa-se que, embora o Sistema 2 possua um custo operacional 0.187% superior ao Sistema Otimizado, as suas perdas são 21.17% superior. Por fim, ao comparar com Sistema 3, observa-se que a remoção das ECVEs causou uma diminuição de 2.42% nas perdas e de 2% no custo operacional.

Ademais, é possível observar que o método de AG realizou a alocação tanto dos GDs (barras 33, 37, 26 e 19), quanto das ECVEs (barras 4, 37, 20, 34, 1, 22 e 36) nas proximidades das seções com maior concentração de carga do alimentador (barras 2, 9, 15, 26, 33 e 37). Isto pode ser explicado pois, ao alocar as novas cargas e gerações próximos dos centros de cargas, é possível diminuir o fluxo de potência pelos ramos do alimentador e, por consequência, os custos operacionais advindos das perdas no sistema.

Tabela 2. Geração de Potência Ativa

t	Pss	Pgd1	Pgd2	Pgd3	Pgd4	Cs
1	1125.51	175	207.59	73.3	234.63	15.88
2	846.3	175	184.95	150.63	234.63	16.10
3	838.29	175	223.59	72.41	234.63	15.57
4	974.63	175	213.78	86.4	234.63	16.03
5	1058.12	175	225.88	55.76	234.63	15.71
6	1128.94	200.66	225.88	0	234.63	15.14
7	1039.98	178.91	225.88	60.84	234.63	15.23
8	1035.37	189.94	225.88	39.72	234.63	15.75
9	958.59	175	194.15	150.63	234.63	16.54
10	988.88	180.96	225.88	59.15	234.63	15.63
11	918.67	175	195.05	138.2	234.63	16.35
12	619.42	203.39	225.88	37	234.63	15.73
13	0	225.88	230.07	20.67	234.63	15.43
14	0	43.51	250	0	239.38	16.33
15	0	8.16	250	0	239.38	16.89
16	0	0	248.09	0	239.38	16.45
17	0	50.49	250	0	239.38	15.42
18	0	88.27	250	0	239.38	16.33
19	124.05	175	225.88	139.05	234.63	16.53
20	885.1	175	208.88	105.96	234.63	15.81
21	1155	175	225.88	37.42	234.63	16.14
22	1123.09	175	223.7	40.27	234.63	15.52
23	1134.02	175	225.88	33.86	234.63	15.08
24	1091.92	175	175	150.63	232.96	16.51

Tabela 3. Geração de Potência Reativa

t	Qss	Qgd1	Qgd2	Qgd3	Qgd4	fd
1	545.11	178.5	132.78	162.9	0	98.4
2	409.88	178.5	164.54	135.63	0	86.4
3	406	178.5	110.33	163.21	0	83.4
4	472.04	178.5	124.09	158.28	0	90.4
5	512.47	178.5	107.13	169.08	0	93.5
6	546.77	142.5	107.13	188.75	0	95
7	503.69	173.01	107.13	167.29	0	92
8	501.45	157.55	107.13	174.74	0	91
9	464.27	178.5	151.63	135.63	0	90.2
10	478.94	170.14	107.13	167.89	0	89.5
11	444.93	178.5	150.37	140.01	0	88.7
12	300	138.68	107.13	175.7	0	70.4
13	0	107.13	88.48	181.46	0	36.8
14	0	198.17	0	147.33	-71.88	26.7
15	0	187.98	0	139.1	-71.88	24.9
16	0	177.19	8.47	134.18	-71.88	24.2
17	0	199.39	0	148.22	-71.88	26.9
18	0	200.37	0	173.01	-71.88	29.4
19	60.08	178.5	107.13	139.71	0	47.6
20	428.68	178.5	130.97	151.38	0	86.4
21	559.39	178.5	107.13	175.55	0	98.4
22	543.94	178.5	110.17	174.55	0	97.2
23	549.23	178.5	107.13	176.81	0	97.6
24	528.84	178.5	178.5	135.63	2.69	99

6. CONCLUSÃO

Como mencionado no início do presente trabalho, a inserção de geração distribuída e carregamento de VEs em um

sistema de distribuição causa grande impacto na operação do sistema e é importante saber como melhor aplicá-los para usufruir de todas as suas vantagens sem prejudicar a operação da rede.

Tabela 4. Demanda das ECVEs

t	Pe1	Pe2	Pe3	Pe4	Pe5	Pe6	Pe7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	3	0	0	0	0
3	2	0	6.97	0	0	1	1
4	3	1	10.9	0	1	2	1.99
5	4.98	1.99	9.21	0	3	3	2.98
6	5.98	3.97	8.41	0	6.99	4.98	4.96
7	6.97	6.93	3.5	2	11.94	6.97	5.96
8	7.04	5.45	3	3.98	14.13	9.93	4.25
9	5.98	6.91	3.97	6.95	14.37	10.95	3.95
10	7.93	3.54	3.98	7.2	11.23	5.9	1.09
11	5.5	5	3.64	6.97	4.69	4.24	0.01
12	5.99	7.95	0.03	7.02	3.98	2.02	2
13	9.92	10.7	1	4	1.27	3.98	3.98
14	11.98	7.84	1.99	4.24	1.01	7.95	6.95
15	10.98	0.72	2.98	3.02	3.99	10.95	7.03
16	7.88	0.01	3.96	4.97	6.78	10.05	8.96
17	4.46	0	3.97	6.93	6	12.91	10.92
18	2.02	0	1.1	6.4	7.94	12.21	7.11
19	2.96	0	1.99	0.91	7.95	7.65	5.98
20	1.64	0	2.97	0.01	5.51	5.82	5.02
21	1.02	0	3.94	0	0.05	3.66	1.65
22	1.98	0	0.3	0	0	0.03	0.02
23	1.21	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 5. Custo Operacional e Perdas para os Sistemas

Sistemas	Custo (R\$)	Perdas (kWh)
Sistema Otimizado	458767.00	309.307
Sistema 1	530173.00	1264.902
Sistema 2	459627.00	374.803
Sistema 3	449589.00	301.822

Dessa forma, este trabalho apresentou um método híbrido de otimização para a alocação das ECVEs e GDs síncronos em um alimentador; além da definição do despacho econômico ótimo dos GDs e da subestação. O método realiza a alocação através dos AG, onde a função objetivo é o despacho econômico ótimo do sistema que é realizado através do método de PI. Deste jeito, o algoritmo se mostrou eficaz e coerente no cumprimento de seu objetivo para a alocação dos GDs e ECVEs no alimentador, baseando sua decisão no despacho econômico ótimo para dado perfil de alocação.

O algoritmo mostrou-se coerente ao alocar tanto os GDs, quanto as ECVEs na proximidade aos centros de carga do alimentador aliviando a demanda da subestação e reduzindo as perdas no alimentador em 75.55%, garantindo sua eficácia na redução dos custos operacionais em mais de 13.47% (R\$ 71406.00). Ademais, quando comparado a outra usual solução para este tipo de problema, que consiste em alocar os GDs nas barras com maior concentração de cargas, o resultado se mostrou melhor pois, embora ambos tivessem uma próxima redução do custo operacional, apresentou perdas inferiores.

Por fim, vale explicitar que, no futuro, é desejado tratar, também, a alocação dos GDs e das ECVEs como um problema de programação não linear resolvido de forma

conjunta, para que, tanto a alocação, quanto o despacho econômico sejam soluções ótimas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Ahmadian, A., Sedghi, M., Aliakbar-Golkar, M., Fowler, M., and Elkamel, A. (2016). Two-layer optimization methodology for wind distributed generation planning considering plug-in electric vehicles uncertainty: A flexible active-reactive power approach. *ELSEVIER Energy Conversion and Management*, 124, 231–246.
- Ali, E.S., Elazim, S.M.A., and Abdelaziz, A.Y. (2018). Optimal allocation and sizing of renewable distributed generation using ant lion optimization algorithm. *SPRINGER Electrical Engineering*, 100, 99–109.
- Cailian, G., Jianwei, J., Li, L., and Cheng, G. (2015). Research on improvement method of distributed generation optimization configuration. *27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 5039–5043.
- Haidar, A.M.A., Muttaqi, K.M., and Sutanto, D. (2014). Technical challenges for electric power industries due to grid-integrated electric vehicles in low voltage distributions: A review. *ELSEVIER Energy Conversion and Management*, 86, 689–700.
- Jamian, J.J., Mustafa, M.W., and H.Mokhlis (2015). Optimal multiple distributed generation output through rank evolutionary particle swarm optimization. *ELSEVIER Neurocomputing*, 152, 190–198.
- Lesaja, G. (2009). Introducing interior-point methods for introductory operations research courses and/or linear programming courses. *The Open Operational Research Journal*, 3, 1–12.
- Poudineh, R. and Jamasb, T. (2014). Distributed generation, storage, demand response and energy efficiency as alternatives to grid capacity enhancement. *ELSEVIER Energy Policy*, 67, 222–231.
- Rabiee, A., Sadeghi, M., Aghaei, J., and Heidari, A. (2016). Optimal operation of microgrids through simultaneous scheduling of electrical vehicles and responsive loads considering wind and pv units uncertainties. *ELSEVIER Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 721–739.
- Rueda-Medina, A.C., Franco, J.F., Rider, M.J., Padilha-Feltrin, A., and Romero, R. (2013). A mixed-integer linear programming approach for optimal type, size and allocation of distributed generation in radial distribution systems. *ELSEVIER Electric Power Systems Research*, 97, 133–143.
- UFRJ (2014). Relatório técnico de mobilidade elétrica. Disponível: <http://www.provedor.nuca.ie.ufrj.br/estudos/reltec4.pdf>. Acesso em: 20 de abr. de 2020.
- Wang, Y., Huang, Y., Wang, Y., Zeng, M., Li, F., Wang, Y., and Zhang, Y. (2018). Energy management of smart micro-grid with response loads and distributed generation considering demand response. *ELSEVIER Journal of Cleaner Production*, 197, 1069–1083.