

Uma Estratégia Baseada em Duas Interfaces para Minimizar os Desvios de Tensão Controlando a Taxa de Recarga de Veículos Elétricos *Plug-In*

John J. A. Saldanha, Eduardo M. dos Santos, João P. Juchem Neto, Fernando G. K. Guarda,
Marcel Stalter, Alex Itczak

Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência, Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.
john.jefferson.as@gmail.com, eduardosantos@unipampa.edu.br, plinio@unipampa.edu.br, fernandokg@gmail.com,
marcelstalter@gmail.com, alex.itczak@gmail.com

Resumo — Os veículos elétricos *plug-in* (VEPs) são uma alternativa para reduzir a emissão de poluentes dos veículos movidos a combustão. Eles precisam ser conectados na rede elétrica para a recarga de suas baterias. Caso uma quantidade significativa de VEPs requisitem recarga simultaneamente, a rede elétrica poderá sofrer certas complicações. Assim, é importante controlar sua recarga. Este trabalho propõe uma estratégia baseada em duas interfaces para controle da recarga de VEPs, visando minimizar os desvios de tensão. Tal metodologia fundamenta-se em um sistema para realizar o controle da recarga e um método de otimização. Os resultados demonstram que a proposta é capaz de reduzir o impacto na rede elétrica, otimizando sua operação, beneficiando a concessionária local, a rede elétrica e o consumidor.

Palavras-chaves — Controle da recarga, desvio de tensão, lógica fuzzy, *smart grids*, veículo elétrico *plug-in*.

I. INTRODUÇÃO

As preocupações sobre os efeitos prejudiciais dos poluentes emitidos pelos veículos movidos à combustão têm sido crescentes. Os veículos elétricos *plug-in* (VEPs) aparecem como uma opção para reduzir estas emissões e, ao mesmo tempo, diminuir a dependência do setor automotivo por combustíveis fósseis.

Os VEPs são movidos por motores elétricos alimentados por energia armazenada em baterias. Eles podem ter somente motores elétricos (puramente elétricos) ou possuir motores a combustão, além dos motores elétricos (híbridos).

Ambos os tipos se caracterizam por serem *plug-in*, necessitando conectarem-se à rede elétrica para recarregar as baterias. Dessa forma, o veículo consumirá energia do sistema atuando como carga elétrica.

Caso uma quantidade significativa de VEPs requisitem recarga ao mesmo tempo e sem coordenação, o sistema poderá sofrer com certas complicações. Entre elas, conforme citam [1]-[4], a recarga não coordenada de VEPs pode gerar problemas de estabilidade, sobrecarga de linhas de distribuição e aumento da demanda durante períodos de pico. Esta última complicação pode ocasionar o despacho de plantas de geração caras e poluentes.

O VEP, visando o benefício da rede elétrica, também pode ser utilizado para prestar serviços auxiliares. Tais veículos

são denominados de V2G, do inglês *vehicle-to-grid* ou veículo-para-rede. Os V2Gs podem fornecer regulação de tensão e frequência, dar suporte para entrada de fontes alternativas de energia elétrica e minimizar perdas de energia em redes elétricas de distribuição, entre outros [5-7].

Dessa forma, visando mitigar impactos e beneficiar a rede elétrica, é importante realizar a recarga coordenada dos veículos elétricos *plug-in*. Nesse contexto, este trabalho propõe uma estratégia baseada em duas interfaces para controlar a recarga dos VEPs, visando minimizar os desvios de tensão da rede elétrica.

De acordo com trabalhos anteriores, verificou-se que nenhum considera diretamente se o consumidor está disposto a fornecer seu veículo para auxiliar a rede elétrica. Este trabalho também leva em consideração os requerimentos do consumidor em ter veículos totalmente recarregados dentro do período de recarga. Assim, define-se que o proprietário deve inserir uma prioridade na qual deseja que sua bateria seja totalmente recarregada dentro do período de conexão à rede elétrica.

Um sistema de decisão inteligente é necessário para cumprir com os requisitos de cada um dos VEPs, enquanto considerando as restrições da operação da rede elétrica. Este sistema é aplicado em uma interface entre a rede elétrica e uma frota de VEPs, denominados agregadores [8].

O desenvolvimento de tais ferramentas utiliza um grande número de variáveis de entrada com um número indefinido de veículos requisitando recarga. As referências [9]-[11] resolveram problemas similares, onde as programações estocástica, quadrática e dinâmica foram aplicadas.

Assim, este trabalho propõe uma estratégia baseada em duas interfaces para recarregar os VEPs, visando minimizar os desvios de tensão nas barras da rede elétrica. Pesquisas em metodologias utilizadas anteriormente indicam que a lógica fuzzy é muito útil para incorporar conhecimento humano [12]-[14]. Dessa forma, ela é adequada para criar a interface de controle da recarga.

Por fim, ressalta-se que este artigo apresenta a estratégia proposta e as principais considerações da mesma. Na sequência, os principais resultados extraídos são mostrados e discutidos, bem como são expostas as considerações finais.

II. ESTRATÉGIA BASEADA EM DUAS INTERFACES PARA CONTROLAR A RECARGA DE VEPs

Esta seção apresenta a estratégia baseada em duas interfaces para controlar a recarga de VEPs. Primeiramente, apresenta-se a estrutura geral proposto. Na sequência, a metodologia de cálculo das potências mínima e máxima é introduzida. Após, o controlador lógico fuzzy é abordado. Por fim, a função objetivo e a aplicação do método de otimização são relatados.

A. Estrutura geral proposta

O sistema para o controle da recarga proposto é dividido em duas interfaces: o centro de operação da distribuição (COD) e o agregador. O COD atua para cumprir as exigências de todos os agregadores sob seu comando, determinando um valor de potência que otimize a operação da rede. Já o agregador é responsável por reunir informações dos VEPs e dos consumidores, recebendo um valor de potência do COD para distribuir entre os veículos, atendendo as prioridades definidas. O esquema geral da estratégia proposta entre um COD e um agregador é apresentado na Fig. 1.

Cada VEP comunica ao seu agregador os seguintes dados no momento da conexão para a recarga: o estado de carga da bateria (SOC_o), o horário da conexão (t_o) e a capacidade da bateria (B_{cap}). Em adição, o proprietário do veículo informa os seguintes dados: o estado de carga desejado da bateria ao final da recarga (SOC_f), o horário de desconexão da recarga (t_f) e a prioridade desejada para a bateria ser recarregada até o SOC_f durante o tempo de conexão para recarga (p).

Após receber as informações de todos os VEPs sob seu comando, o agregador determina as demandas de potências mínima e máxima, P_{min} e P_{max} , respectivamente, que deve receber da rede elétrica. A potência mínima informa quanto o agregador deverá receber da rede para atender uma certa quantia de veículos com prioridades elevadas. Já a potência máxima relata o valor necessário para atender todos os VEPs, independente das prioridades.

Com as potências mínimas e máximas de todos os agregadores, o centro de operação da distribuição realiza o cálculo da distribuição de potência visando otimizar alguma função objetivo. Neste processo, o COD utiliza informações sobre o sistema elétrico de potência sob estudo. Os valores

otimizados de potências são repassados para cada agregador j (P_j).

De posse do valor de potência recebido, o agregador utiliza um controlador lógico fuzzy para calcular as taxas de recarga de cada veículo elétrico *plug-in* da sua frota.

As três subseções seguintes apresentam detalhes das principais etapas do sistema: o cálculo das potências máximas e mínimas, o projeto do controlador lógico fuzzy e a aplicação da estratégia de otimização.

B. Potências mínima e máxima

A potência mínima descreve um valor mínimo de potência que o agregador requisitará para garantir a recarga de apenas uma parcela dos VEPs, especialmente os que possuem maior prioridade de recarga. Este valor é obtido em função da potência requisitada por cada VEP e as prioridades inseridas pelos consumidores, dado conforme (1).

$$P_{min} = w_1 \left[\sum_i \left[p \geq 0,50 \right] P_{VEP_i} \right] + w_2 \left[\sum_i \left[0,30 \leq p < 0,50 \right] P_{VEP_i} \right] + w_3 \left[\sum_i \left[0,10 \leq p < 0,30 \right] P_{VEP_i} \right] + w_4 \left[\sum_i \left[p < 0,10 \right] P_{VEP_i} \right] \quad (1)$$

Em (1), w_1 , w_2 , w_3 e w_4 são os pesos que definem qual parcela de cada intervalo de prioridade será computada na potência mínima e P_{VEP_i} é a potência requisitada pelo VEP i .

O valor a ser requisitado da rede elétrica para que todos os VEPs de um agregador sejam completamente recarregados dentro do período de conexão, independentemente das prioridades, é a potência máxima. Seu valor é determinado somando-se as potências individuais requeridas por cada VEP, conforme apresenta (2).

$$P_{max} = \sum_i^{n_{VEP}} P_{VEP_i} \quad (2)$$

Em (2), n_{VEP} é o número de VEPs no agregador.

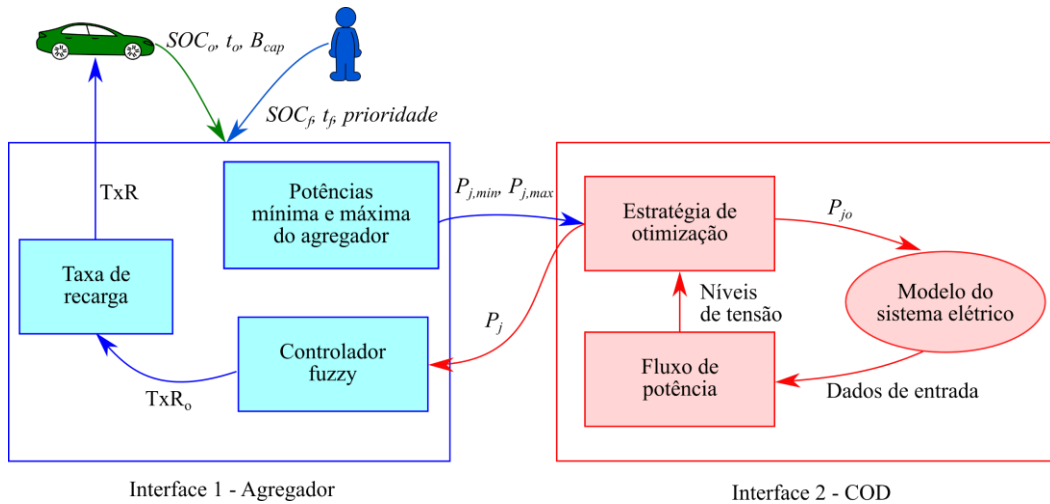


Fig. 1. Estrutura geral da estratégia proposta.

C. Controlador lógico fuzzy

Em cada agregador atua um controlador lógico fuzzy estruturado conforme a Fig. 2. Ele é responsável por calcular a taxa de recarga de cada VEP através da porcentagem do SOC a ser recarregada (ΔSOC) e da prioridade do consumidor.

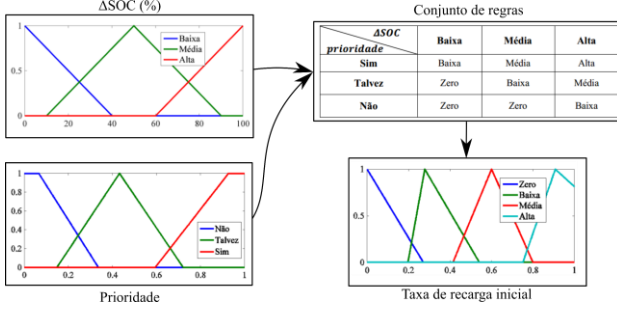


Fig. 2. Controlador lógico fuzzy de cada agregador.

O método de inferência utilizado foi o de Mandani, sendo utilizado o operador de minimização como os métodos AND e o de implicação, e o operador de maximização como o método de agregação. Para a defuzzificação, utilizou-se o método do centroide. Mais detalhes do projeto do controlador lógico fuzzy e o cálculo da taxa de recarga final podem ser encontrados em [15].

D. Método de otimização

O método de otimização gera valores de potências para cada agregador sob comando do COD dentro dos limites mínimos e máximos estipulados. Após executada a otimização, o método retorna o valor de potência otimizada que cada agregador receberá da rede.

Com estes valores de potência para cada agregador, o método garante a otimização de alguma função objetivo do problema. Nesta aplicação, considera-se como objetivo a minimização dos desvios de tensão em todas as barras do sistema elétrico sob avaliação, conforme (3). Esta minimização é realizada a cada intervalo de tempo Δt .

$$\min \sum_{b=1}^{n_b} \sqrt{(V_b - V_d)^2} \quad (3)$$

s. a. $P_{\min j} \leq P_j \leq P_{\max j}$

Em (3), V_b é a tensão na barra b , V_d é a tensão desejada, n_b é o número de barras da rede elétrica sob estudo, $P_{\min j}$ é a potência mínima do agregador j , $P_{\max j}$ é a potência máxima do agregador j e P_j é a potência do agregador j .

As demais restrições do sistema (balanço de potência da carga e geração, módulo da tensão em cada barra, taps dos transformadores e dos reguladores de tensão, potência reativa capacitiva e carregamento dos circuitos) são levadas em consideração na ferramenta de execução do fluxo de potência.

As restrições de desigualdade de (3) são incorporadas na função objetivo através da função de penalidade global, formando a nova função exposta em (4).

$$C = \min \left[k_1 \sum_{b=1}^{n_b} \sqrt{(V_b - V_d)^2} + k_2 \sum_{j=1}^{n_A} \left(\frac{1}{P_j - P_{\min j}} + \frac{1}{P_{\max j} - P_j} \right) \right] \quad (4)$$

Em (4), k_1 e k_2 são constantes de escala e n_A é o número de agregadores sob comando do COD.

O problema de otimização deste trabalho foi resolvido aplicando o algoritmo genético (AG). Tal escolha foi motivada pela consagrada utilização do método e, também, pela sua robustez em lidar com espaços de buscas complexos.

O espaço de busca do AG para a estratégia proposta consiste nos intervalos de potências mínimas e máximas dos agregadores, sendo a potência mínima a *string* '0000...0' e a potência máxima '1111...1'. Cada potência é codificada em uma palavra de bits pelo processo de normalização, respeitando o intervalo descrito. Um cromossomo é então formado concatenando todas potências dos agregadores.

Após a codificação, uma população inicial é gerada e os três operadores do AG (reprodução, recombinação e mutação) são aplicados. Como este é um problema de minimização, o cromossomo com o menor valor da função objetivo recebe a maior parcela na roleta, conforme (5).

$$prob_k = \frac{C_{\min}/C_k}{\sum_{k=1}^{n_p} C_{\min}/C_k} \quad (5)$$

Em (5), $prob_k$ é a probabilidade atribuída ao cromossomo k , $C_{\min}$ é o menor valor de aptidão na população, C_k é o valor de aptidão do cromossomo k e n_p é o tamanho da população.

Após um número determinado de gerações, a evolução da população para. O cromossomo com o menor valor de aptidão contém os valores das potências dos agregadores. A *string* de bits é então decodificada para obter o valor otimizado de cada potência.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O controlador lógico fuzzy foi definido no toolbox de lógica fuzzy do MATLAB®. Já a rede elétrica foi criada e executada no simulador de sistemas de distribuição OpenDSS, onde o fluxo de potência foi resolvido. O sistema proposto também foi programado no ambiente MATLAB®, onde efetuou-se a comunicação com o OpenDSS.

A. Controlador lógico fuzzy

Avaliou-se o controlador lógico fuzzy através de simulações com uma frota de VEPs requisitando recarga. Os veículos caracterizam-se por diferentes requisitos de recarga, como porcentagens variadas de SOC_f e prioridades, entre outros.

A Fig. 3 apresenta a evolução do estado de carga de alguns veículos selecionados da frota. De acordo com a Fig. 3, visualiza-se que, quanto maior a prioridade, maior será a taxa de recarga do veículo e, consequentemente, a bateria será recarregada mais rapidamente.

Na Fig. 4, ilustra-se a recarga de um VEP sob diferentes prioridades. Evidencia-se que, com uma prioridade maior, a taxa de recarga também é maior e a bateria se recarrega mais rápido quando comparado com uma prioridade baixa. Dessa forma, a prioridade influencia diretamente no cálculo da taxa de recarga.

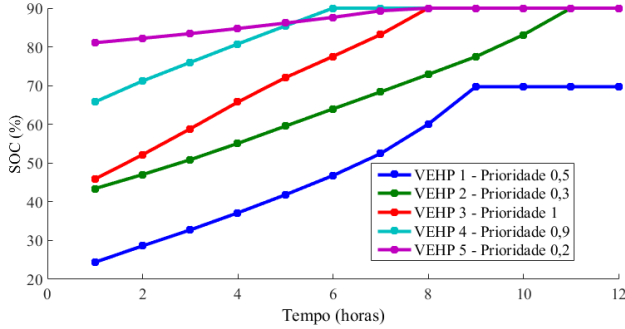


Fig. 3. Estados de carga atualizados para alguns dos VEPs da frota sob estudo.

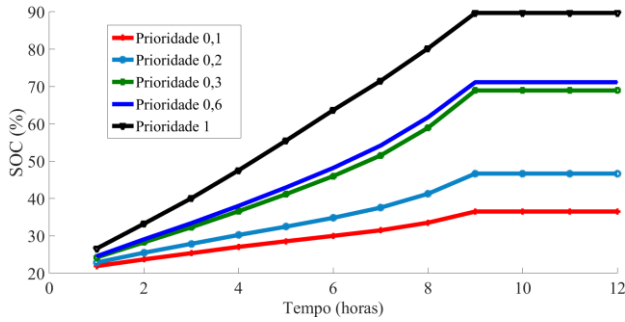


Fig. 4. Estados de carga de um VEP com sua prioridade alterada, mas demais parâmetros inalterados.

B. Método de otimização

Alocaram-se nove frotas de VEPs no alimentador de 34 barras do IEEE Power & Energy Society para testes, conforme exibido na Fig. 5. Cada agregador possui um controlador lógico fuzzy realizando a recarga de sua frota. Já o COD coordena todas as frotas, definindo os valores de potência que cada agregador receberá.

Cada potência dos agregadores foi codificada em uma palavra de 12 bits, formando um cromossomo de 108 bits. A função objetivo de (4) foi avaliada em cada cromossomo do AG e seu valor atribuído como a aptidão deste mesmo cromossomo. A simulação teve uma população de 20 cromossomos, uma taxa de mutação de 2% e foram consideradas 30 gerações. A tensão desejada foi estabelecida como 1 p.u.

Computaram-se os fluxos de potência da rede elétrica pelo OpenDSS para as seguintes situações: 1) sem a inserção de nenhum VEP, 2) com os valores de potências mínimas para cada agregador, 3) com os valores das potências máximas de cada agregador e, 4) com os valores de potências dos agregadores determinados pelo AG.

A Tabela I apresenta os principais dados e resultados encontrados para os casos sem otimização. Consideram-se, respectivamente, nenhuma inserção de VEPs, agregadores

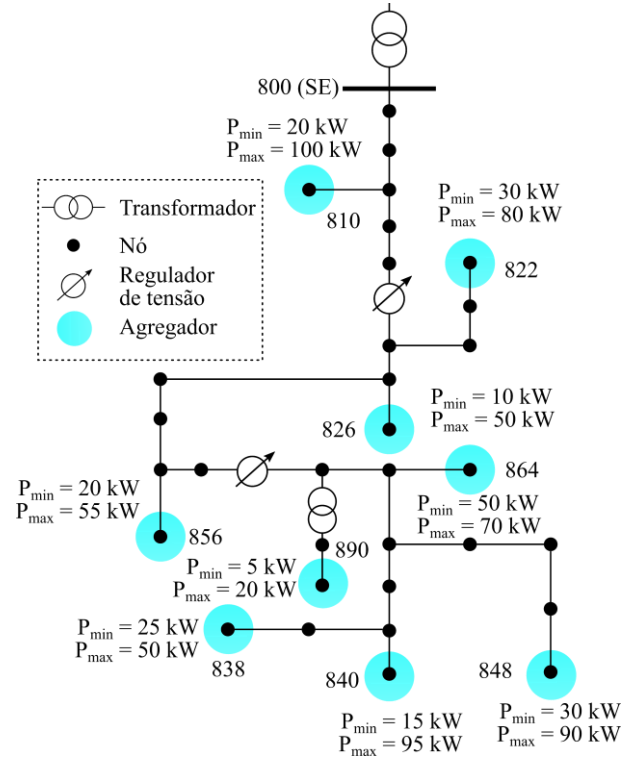


Fig. 5. Frotas de VEPs alocadas no sistema teste IEEE 34 barras.

recebendo potência mínima e agregadores recebendo potências máximas.

Após os casos sem otimização, computaram-se novos fluxos de potências com o AG determinando as potências dos agregadores, ou seja, os casos otimizados. Das simulações realizadas, extraíram-se três situações. Estes casos foram os que apresentaram os menores desvios de tensão e retornaram os maiores somatórios das potências totais dos agregadores. Os dados extraídos são expostos na Tabela II. Indicam-se o somatório da potência total demandada pelos agregadores, a porcentagem de inserção dos VEPs em relação a carga total instalada e o somatório dos desvios de tensão registrados.

TABELA I. DADOS OBTIDOS PARA OS TRÊS CASOS SEM OTIMIZAÇÃO.

	Sem VEP	Agregadores com P_{min}	Agregadores com P_{max}
$\sum P_j(kW)$	0	205	610
$\sum P_j(\%)$	0	10,49	26,50
$\sum \sqrt{(V_b - V_d)^2}$	0,95	0,83	2,11

TABELA II. DADOS OBTIDOS PARA OS TRÊS CASOS COM OTIMIZAÇÃO.

	Caso otimizado 1	Caso otimizado 2	Caso otimizado 3
$\sum P_j(kW)$	341,77	390,01	403,65
$\sum P_j(\%)$	16,34	18,23	18,74
$\sum \sqrt{(V_b - V_d)^2}$	0,68	0,69	0,79

Graficamente, as tensões nas barras para os casos sem VEP, com potência mínima, com potência máxima e otimizado selecionado são apresentados na Fig. 6.

Os outros dois casos otimizados mostram que valores similares de desvio total de tensão foram observados, mas os casos 2 e 3 apresentaram valores maiores. Entretanto, em ambos os casos, as potências totais dos agregadores é consideravelmente maior que o caso otimizado 1. Dessa forma, além de minimizar o desvio de tensão pode-se buscar maximizar a energia total entregue às frotas de VEPs.

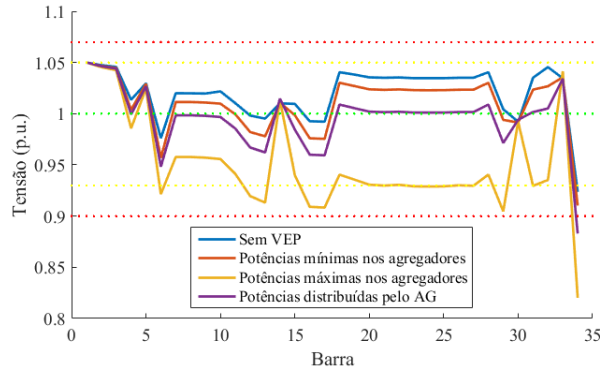


Fig. 6. Tensões nas barras para os casos simulados.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma estratégia para o controle da recarga de veículos elétricos *plug-in* visando o benefício do sistema elétrico de potência. Consideraram-se informações como os estados de carga da bateria, o período de conexão para a recarga, a prioridade do consumidor e os parâmetros da rede elétrica.

Verificou-se através dos resultados obtidos que a metodologia proposta auxilia os agregadores e o COD a reduzir o impacto e auxiliar a rede elétrica, realizando a recarga de forma planejada, controlada e otimizada. Esta metodologia também pode ajudar a avaliar como os veículos elétricos podem contribuir para serviços auxiliares e quais serviços seriam os mais adequados.

Correlacionou-se diretamente a influência da prioridade inserida pelo consumidor na recarga da bateria. Verificou-se ainda que uma prioridade maior implica em uma taxa de recarga maior e, consequentemente, o estado de carga sendo atualizado mais rápido.

Além disso, foi testada a importância da estratégia de otimização no alimentador teste do IEEE de 34 barras. Assim, observou-se que o método aplicado reduziu os desvios de tensão nas barras do circuito, sendo seu valor inferior ao do caso sem a inserção de VEPs.

Entre as diversas alternativas de expansão deste trabalho, pode-se incluir outros critérios de otimização, como maximizar o lucro do veículo recarregando-o em períodos de baixo custo, bem como considerar o fluxo de energia bidirecional entre o VEP e a rede elétrica, permitindo que o veículo forneça compensação reativa, além de aplicar outra estratégia para calcular os pesos da potência mínima do agregador e faixas de prioridades. Além disso, determinar o parâmetro prioridade conforme a condição de cada VEP (seu horário de desconexão, por exemplo) ao invés do usuário escolher o mesmo.

V. REFERÊNCIAS

- [1] L. Kelly, A. Rowe, and P. Wild, "Analyzing the impacts of plugin electric vehicles on distribution networks in british Columbia," in *IEEE Electrical Power & Energy Conference*, Montreal, 2009.
- [2] J. Taylor, A. Maitra, M. Alexander, D. Brooks, and M. Duvall, "Evaluations of plug-in electric vehicle distribution system impacts," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Minneapolis, 2010.
- [3] T. Odun-Ayo, and M. Crow, "An Analysis of the Impact of Plug-In Hybrid Electric Vehicles on Power System Stability," in *North American Power Symposium*, Starkville, 2009.
- [4] M. Yilmaz, and P.T. Krein, "Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distributions systems and utility interfaces," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol 28, no. 12, pp. 5673-5689, 2013.
- [5] W. Kempton, and J. Tomić, "Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy," *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 280-294, 2005.
- [6] R. Wang, Y. Li, P. Wang, and D. Niyato, "Design of a V2G aggregator to optimize PHEV charging and frequency regulation control," in *Proc. of the IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, Vancouver, 2013.
- [7] S. Han, S. H. Han, and K. Sezaki, "Design of an optimal aggregator for vehicle-to-grid regulation service," in *Proc. of the Innovative Smart Grid Technologies*, Gaithersburg, 2010.
- [8] J. Xu, and V. W. S. Wong, "An approximate dynamic programming approach for coordinated charging control at vehicle-to-grid aggregator," in *Proc. IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, Brussels, 2011.
- [9] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 371-380, 2009.
- [10] E. Sortomme, M.M. Hindi, S.D.J. MacPherson, and J.J. Venkata, "Coordinated Charging of Plug-In Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 198-205, 2010.
- [11] S.G. Li, S.M. Sharkh, F.C. Walsh and, C.N. Zhang, "Energy and Battery Management of a Plug-In Series Hybrid Electric Vehicle Using Fuzzy Logic," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 8, pp.3571-3585, 2011.
- [12] R. Puska, Y. Ait-Amirat, A. Berthon and, J.M. Kauffmann, "Fuzzy-logic based control applied to a hybrid electric vehicle with four separate wheel drives," *Proc. of the IEEE Control Theory and Applications*, pp.73-81, 2004.
- [13] M. Landi and, G. Gross, "Measurement Techniques for Online Battery State of Health Estimation in Vehicle-to-Grid Applications," *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 5, pp.1224,1234, 2014.
- [14] N. Denis, M.R. Dubois and, A. Desrochers, "Fuzzy-based blended control for the energy management of a parallel plug-in hybrid electric vehicle," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 9, no. 1, pp.30,37, 2015.
- [15] J.J.A. Saldanha, A.P.C. de Mello and, E.M. dos Santos, "Controle da recarga de veículos elétricos plug-in utilizando a lógica fuzzy", in *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Natal, 2016.