

Operação em tempo real de estações de recarga de veículos elétricos: uma abordagem considerando gerenciamento pelo lado da demanda e recursos energéticos distribuídos

Aérton MEDEIROS* Luciane CANHA* Vinícius GARCIA* Juliano MOREIRA*
Rodrigo MOTTA ** Rodrigo DOS SANTOS***

*Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil, (Tel: (53)991223-7344; medeiros.aerton@gmail.com; lucianecanha@ufsm.br; viniciusjg@gmail.com; julianomoreira@ifsul.edu.br).

**Instituto Federal Sul-rio-grandense (IFSUL), Brasil, (e-mail:rodrigoazevedo@ifsul.edu.br)

*** Companhia Paranaense de Energia (COPEL), Brasil, (e-mail: rodrigo.braun@copel.com)

Abstract: The management of distributed energy resources has gained special attention in the field of research with the aim of exploiting the capacity of these resources to the maximum, where many expect from the correct management the solution to the problems of intermittence and increase participation of renewable energy sources. This work presents a management system for electric vehicle charging stations in the presence of distributed energy resources. In this context, uncertainties related to scheduled charges and the service of unscheduled charges are met by an algorithm that seeks to carry out the operation of the charging station in real-time. Furthermore, the ability of the proposed management system to meet the demand response signaling imposed by the distribution system operator is evaluated.

Resumo: O gerenciamento dos recursos energéticos distribuídos tem ganhado especial atenção no âmbito da pesquisa com o intuito de explorar ao máximo a capacidade destes recursos, onde muitos esperam a partir do correto gerenciamento a solução para os problemas de intermitência e maior participação das fontes renováveis de energia. Neste trabalho é apresentado sistema de gerenciamento para estações de recarga de veículos elétricos na presença de recursos energéticos distribuídos. Neste âmbito incertezas relacionadas as recargas agendadas e o atendimento de recargas não agendadas são atendidas por algoritmo que busca realizar a operação da estação de recarga em tempo real. Outrossim, é avaliado a capacidade do sistema de gerenciamento proposto atender a sinalização de resposta a demanda imposta pelo operador do sistema de distribuição.

Keywords: Charging station, distributed energy resources, energy management, electric vehicle, scheduled recharges.

Palavras-chaves: Estação de recarga, geração distribuída, gerenciamento de energia, recargas agendadas, veículo elétrico.

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, a geração de energia renovável e os veículos elétricos (VE) têm atraído cada vez mais a atenção da sociedade. O crescimento do uso da geração a partir dos recursos energéticos distribuídos (RED) com característica intermitente aliada ao crescimento do número de veículos elétricos exigirá dos futuros sistemas elétricos de distribuição a operação com maior nível de gerenciamento, visando a integração da flexibilidade existente nos diferentes recursos que constituem este sistema (Daryabari, Keypour e Golmohamadi, 2020; Singh, Chauhan e Singh, 2021). Juntamente com este crescimento, o número de estações de recarga de veículos elétricos (*Electric Vehicle Charging Station* - EVCS) em operação teve um aumento de aproximadamente 85% entre os anos de 2018-2019 e 45% em

2020, mesmo com todas as dificuldades impostas pela pandemia de COVID-19 (IEA, 2020; IEA, 2021). Embora a difusão dos VE e EVCS representem benefícios ao meio ambiente, ainda sim, uma operação descoordenada destes recursos podem acarretar problemas ao desempenho do sistema elétrico de potência.

Estações de recarga dotadas de RED de geração e armazenamento de energia permitem que técnicas de gerenciamento dos recursos energéticos no EVCS desempenhem um papel importante, capaz de integrar os aspectos técnicos das redes de distribuição, geração distribuída de pequena escala, armazenamento de energia por baterias (*Battery Energy Storage Systems* - BESS), VE e o consumo de energia em uma rede com tecnologias avançadas de informação e comunicação (Zahedmanesh, Muttaqi e Sutanto, 2021; Hou et al., 2019).

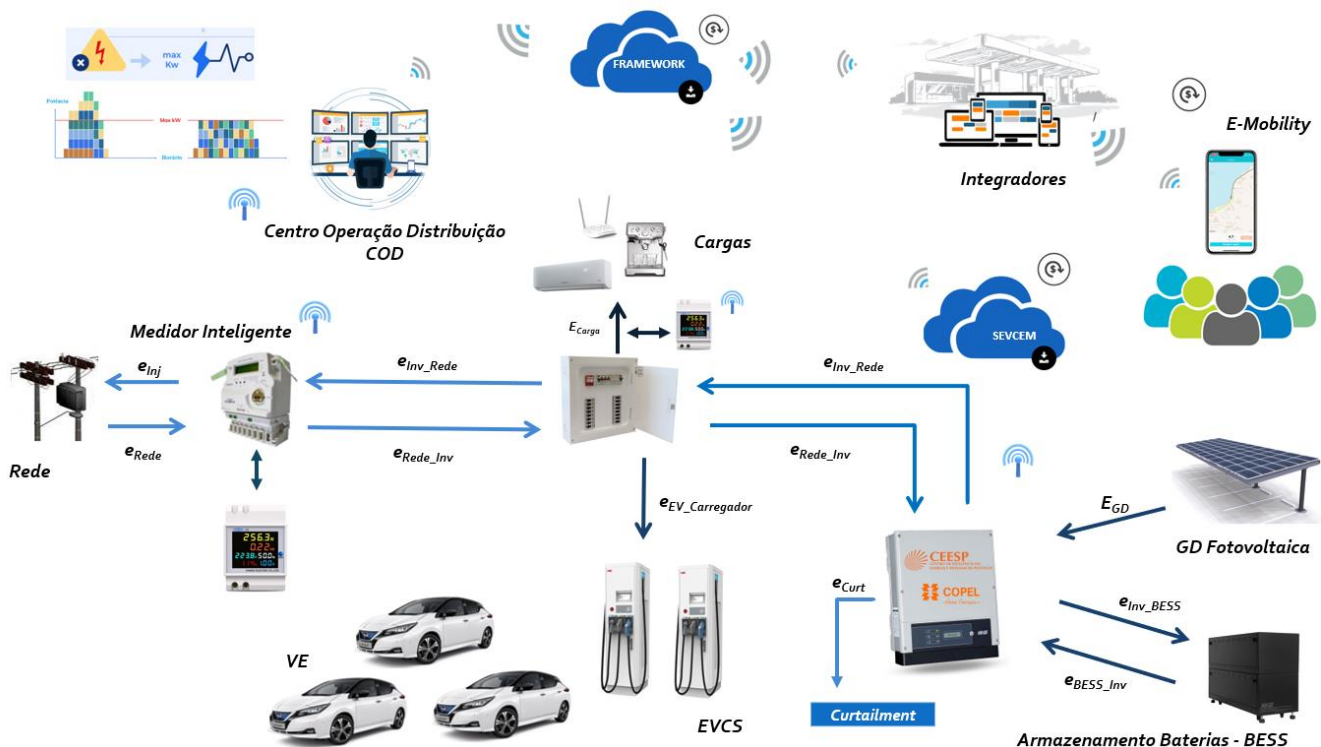


Fig. 1 Visão geral do EVCS

2. REVISÃO DA LITERATURA

Na literatura é possível encontrar diferentes abordagens tratando do problema de gerenciamento da infraestrutura de recarga no EVCS, porém grande parte destas bibliografias assumem que o tomador de decisão tem pleno conhecimento do estado operacional das condições de atendimento da recarga do VE durante a operação em tempo real, tomando como referência os sinais de operação obtidos na etapa de planejamento da operação (Zeng et al., 2020; Lasla et al., 2020; Singh, Verma e Al-Haddad, 2020; Wu et al., 2020). Assim, na grande parte das abordagens, os sistemas de gerenciamento não consideram que na etapa de efetivação das recargas, durante a operação em tempo real, podem ocorrer desvios que impliquem alterações contínuas das variáveis de operação utilizadas como referência para o atendimento das recargas.

A combinação da energia renovável com os sistemas de armazenamento nas estações de recarga de veículos elétricos fornece uma promissora solução para aliviar a demanda de energia, permitindo assim a realização de resposta a demanda como mecanismo para atender critérios técnicos restritivos do ponto de vista operacional do sistema de distribuição, conforme mostram os estudos em Wu et al. (2020), Solanke et al. (2020) e Mohammad e Zamora (2020).

A perspectiva da implementação de sistemas capazes de realizar o gerenciamento de recursos energéticos existentes em estações de recargas de veículos elétricos se apresenta com diferentes desafios. Em Zeng (2020) e Wu (2020) são realizados estudos para a operação em tempo real de uma estação de recarga onde os maiores desafios estão relacionados as incertezas quanto ao horário de chegada do EV à estação de recarga e quanto à demanda de energia para recarga.

Em Farias et al. (2021) é apresentado um modelo de gerenciamento de EVCS baseado no atendimento de recargas agendadas e não agendadas em sistemas com RED. Neste estudo os autores adotam uma discretização de 30 minutos para operação em tempo real, que tem lógica de controle baseada em regras para operação do BESS. Os desvios relativos ao estado de cargas inicial dos VE agendados assim como o desvio quanto ao horário de chegada do VE no EVCS são desconsiderados.

Em Daryabari, Keypour e Golmohamadi (2020) o tema gerenciamento de estações de recarga é elaborado através de abordagem estocástica multi-estágio com a exploração do conceito de veículo para a rede (*Vehicle-to-Grid - V2G*) para transação de energia elétrica dos VE estacionados. Na abordagem, os autores consideram que os VE permanecem grande parte do dia conectados ao carregador, o que é uma realidade mais adequada para estacionamentos. No presente trabalho é considerado que o sistema de gerenciamento desenvolvido do EVCS atende recargas que são agendadas com antecedência para promover maior confiabilidade para os usuários de VE. Adicionalmente, também atende recargas de veículos não agendados que chegam ao EVCS ao longo do dia. Para atender estas recargas é desenvolvido sistema de gerenciamento para operação em tempo real capaz de atender aos desvios de operação observados na efetivação das recargas agendadas. O modelo apresenta flexibilidade quanto a discretização do sistema, podendo operar com discretização na casa dos segundos por utilizar abordagem de execução rápida através de modelagem baseada em programação linear inteira mista (PLIM).

3. METODOLOGIA DESENVOLVIDA

O atendimento da recarga de veículos elétricos é abordado em inúmeros trabalhos, sendo o assunto tratado sob diferentes aspectos e com diferentes objetivos. Na abordagem desenvolvida neste trabalho o gerenciamento do EVCS visa o atendimento de recargas de veículos elétricos dadas de duas formas: *i.* recargas agendadas e *ii.* recargas não agendadas.

As recargas agendadas são modos de recargas onde o cliente do EVCS informa a estação de recarga que pretende realizar uma recarga em um período futuro (*day ahead*), de maneira que o EVCS reserva um ponto de recarga para aquele veículo por um determinado período, conforme a necessidade do usuário do VE, das condições técnicas do veículo, do custo da energia e condições técnicas operativas do EVCS.

As recargas não agendadas são aquelas que devem ser atendidas pelo EVCS de forma impestiva, ou seja, conforme a necessidade de recargas de veículos sem que seja necessária qualquer informação antecipada a chegada do veículo na estação de recarga.

Para atender o funcionamento da estação de recarga proposta é considerada, ainda, a existência de RED instalados no EVCS através de geração renovável fotovoltaica (PV) e BESS. Os RED são considerados ligados ao sistema elétrico do EVCS através de inversor híbrido. Como carga do EVCS tem-se os carregadores dos VE e a carga auxiliar do EVCS, necessários para alimentação dos equipamentos de infraestrutura básica do EVCS, tais como: computadores, iluminação, monitoramento, ar-condicionado. O sistema elétrico considerado é representado na Figura 1, onde as conexões elétricas assumidas entre os diferentes elementos que compõem o EVCS são representadas.

A partir do sistema elétrico apresentado na Figura 1 é desenvolvido o modelo matemático utilizado para representar o fluxo de energia do sistema, conforme as equações 1-2.

$$e_{Rede_Inv(i)} = e_{Inv_Rede(i)} - E_{GD(i)} + e_{Inv_BESS(i)} - e_{BESS_Inv(i)} + e_{Curt(i)} \quad (1)$$

$$e_{Rede(i)} = E_{Carga(i)} + e_{Rede_Inv(i)} - e_{Inv_Rede(i)} + e_{Inj(i)} + e_{VE_Carregador(i)} \quad (2)$$

O sistema de armazenamento BESS é modelado conforme as equações 3-6.

$$SOC_{BESS(i)} = SOC_{BESS(i-1)} + (\eta_{carga} \times e_{Inv_BESS(i)}) - \left(\frac{e_{BESS_Inv(i)}}{\eta_{descarga}} \right) \quad (3)$$

$$0 \leq e_{Inv_BESS(i)} \leq P_{Max(i)}^{Carga} \times T_d \quad (4)$$

$$0 \leq e_{BESS_Inv(i)} \leq P_{Max(i)}^{Descarga} \times T_d \quad (5)$$

$$SOC_{BESS_min(i)} \leq SOC_{BESS(i)} \leq SOC_{BESS_max(i)} \quad (6)$$

O fluxo de energia para o atendimento das recargas dos VE é representado nas equações 7-15. Na modelagem desenvolvida é considerado que o EVCS pode ter NC carregadores, onde cada um destes pode ter no máximo um ponto de recarga CC e um ponto de recarga CA, podendo ser o uso destes pontos

simultâneos ou não, com potência limitada pela potência nominal do carregador e de cada tomada.

$$e_{VE_Carregador(i)} = \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^{NC} e_{Carga_VE(n,i)} \quad (7)$$

$$e_{Carga_VE(n,i)} = e_{Carga_CA(n,i)} + e_{Carga_CC(n,i)} \quad (8)$$

$$e_{Carga_VE(n,i)} \leq e_{Carregador_nom(n,i)} \quad (9)$$

$$e_{Carga_CA(n,i)} \leq e_{Carregador_CA_nom(n,i)} \quad (10)$$

$$e_{Carga_CC(n,i)} \leq e_{Carregador_CC_nom(n,i)} \quad (11)$$

$$SOC_{EV_CC(n,i)} = SOC_{EV_CC(n,i-1)} + (\eta_{carga} \times e_{Carga_CC(n,i)}) \quad (12)$$

$$SOC_{EV_CA(n,i)} = SOC_{EV_CA(n,i-1)} + (\eta_{carga} \times e_{Carga_CA(n,i)}) \quad (13)$$

$$0 \leq e_{Carga_CC(n,i)} \leq P_{Carga_CC(n,i)}^{max} \times T_d \quad (14)$$

$$0 \leq e_{Carga_CA(n,i)} \leq P_{Carga_CA(n,i)}^{max} \times T_d \quad (15)$$

Para maior estabilidade do modelo contra inviabilidades numéricas de solução do algoritmo de otimização, causadas por não atendimento de restrições relativas aos processos de recargas dos VE dentro do período estipulado ou por não atendimento de sinalizações de limite de demanda impostas ao EVCS, a modelagem apresentada neste trabalho insere penalidades pelo não atendimento destas condições de operação, conforme equações 16-18.

$$SOC_{EV_CC(n,i)} \geq SOC_{EV_CC_dep(n,i)} + Penal_{desvio_CC(n,i)} \quad (16)$$

$$SOC_{EV_CA(n,i)} \geq SOC_{EV_CA_dep(n,i)} + Penal_{desvio_CA(n,i)} \quad (17)$$

$$e_{Rede(i)} \leq E_{RD_max(i)} + Penal_{RD_desvio(i)} \quad (18)$$

Para obtenção dos sinais de operação dos RED, que consiste nos sinais de referência de carga e descarga do BESS, controle para recarga dos VE e do atendimento de sinalização de limitação de demanda, o problema de otimização é orientado pela função objetivo (F.O.) apresentada nas equações 19-20.

$$minimize Z = \sum_{i=0}^N C_{Total(i)} \quad (19)$$

$$C_{Total(i)} = e_{Rede(i)} \times T_{compra(i)} - e_{Inj(i)} \times T_{venda(i)} + e_{Curt(i)} \times T_{venda(i)} + SOC_{desvio_CC(n,i)} \times T_{desvio_recarga(i)} + SOC_{desvio_CA(n,i)} \times T_{desvio_recarga(i)} + E_{RD_desvio(i)} \times T_{desvio_RD(i)} \quad (20)$$

O algoritmo de otimização do sistema de gerenciamento proposto para operação em tempo real é solucionado dinamicamente, sendo executado a cada período de tempo discretizado por T_d . A partir da definição de T_d tem-se o número de períodos N em que as 24 horas do dia é discretizada.

A modelagem utilizada para representar o funcionamento do EVCS é baseada em programação linear inteira mista (PLIM), a fim de proporcionar um bom desempenho e possibilitar o gerenciamento otimizado da operação em tempo real.

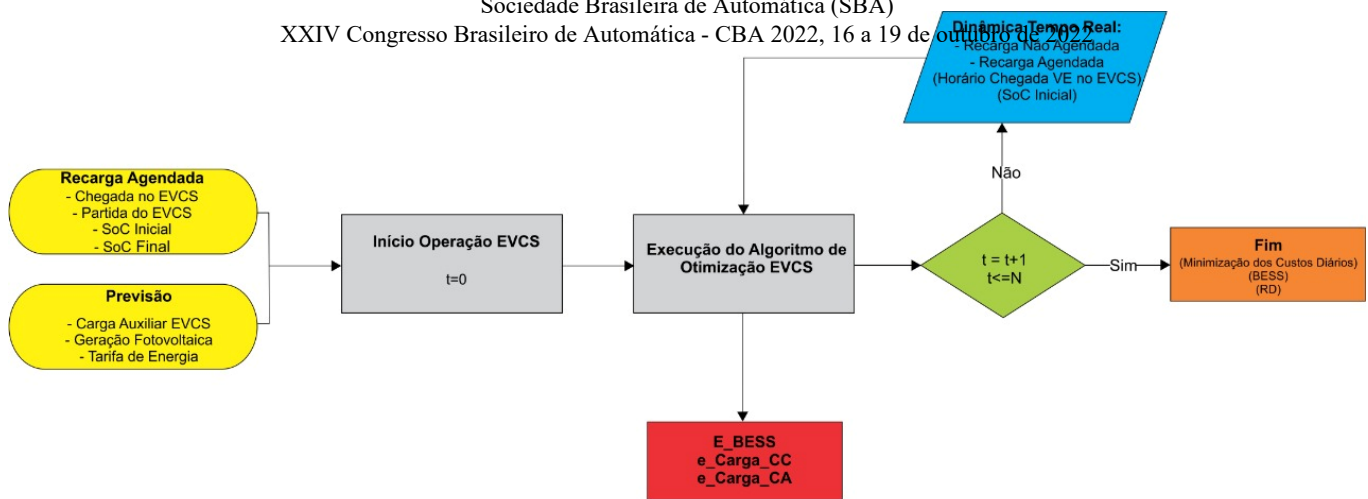


Fig. 2 Fluxo de execução do algoritmo do EVCS

A execução dinâmica do algoritmo é realizada com base no fluxograma apresentado na Figura 2. A partir da execução do algoritmo em tempo real os desvios de operação relativos ao horário de chegada e o estado de carga (*State of Charge – SoC*) inicial dos EV com recarga agendada, assim como as novas recargas não agendadas que o EVCS deve atender, são atualizadas sistematicamente à dinâmica de operação do EVCS para que sejam integrados a rotina de otimização do gerenciamento do EVCS. Com este modo de operação são também atualizadas as condições reais das variáveis monitoradas e das variáveis controladas, de maneira que o algoritmo consegue obter os resultados sempre a partir de valor reais, como os SoC monitorados dos VE e BESS.

Outra questão importante a ser destacada é que o algoritmo de gerenciamento do EVCS desenvolvido possibilita o gerenciamento de recargas em tempo real de forma otimizada, controlando as recargas tanto em potência máxima quanto no modo de recarga em modo inteligente (*smart charging*), garantindo que a operação do EVCS seja otimizada considerando as condições atuais observadas em tempo real e dos sinais de previsão considerados para as variáveis de carga auxiliar, tarifas de energia e geração solar.

4. ESTUDO DE CASO

Para avaliar o algoritmo desenvolvido é apresentado estudo de caso com o intuito de verificar o comportamento em relação a dois aspectos: atendimento de recargas em tempo real considerando os desvios de operação para recargas agendadas e atendimento da sinalização de resposta a demanda durante a operação em tempo real.

Para elaboração do estudo de caso foram utilizados dados de previsão de carga, tarifas de compra e venda de energia e geração fotovoltaica com discretização de 5 minutos, desconsiderando as incertezas destes dados. Os dados utilizados para simular os processos de recargas agendadas e não agendadas dos VE foram criados a fim de simular processos genéricos de recarga, sendo simuladas tanto recargas em potência máxima quanto com alguma flexibilidade, para tornar possível processos de recarga em modo *smart charging*, assumindo que a recarga poderia ser realizada em potência média inferior a potência máxima de recarga.

Foi considerado neste estudo de caso que o EVCS possui características semelhantes ao do primeiro posto de recarga

com carregador ultrarrápido do estado do Rio Grande Sul, instalado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) a partir de projeto de P&D (P022/2019) financiado pela ANEEL e COPEL e desenvolvido em parceria com a UFSM. O referido EVCS será utilizado para teste prático do sistema de gerenciamento apresentado neste trabalho, sendo composto por carregador ABB 93kW, sistema de geração fotovoltaica e sistema de armazenamento com baterias de íons de Lítio integrados junto a rede de distribuição através de um inversor híbrido.

Para simular os desvios durante a operação em tempo real das variáveis relacionadas às recargas agendadas foram gerados desvios a partir de processo de Monte Carlo, com desvio máximo de 15 minutos no horário de chegada do VE no EVCS e de até 10% de variação do SoC inicial previsto no início das recargas agendadas.

Na Figura 3 são apresentados o perfil das recargas agendadas, da forma prevista inicialmente, e das recargas atendidas na operação em tempo real. O perfil de recarga agendada é utilizado como parâmetro inicial de referência para estabelecer o agendamento do BESS e, quando possível, das recargas em modo *smart charging* para cada um dos passos de operação futuro. No entanto, é esperado que o perfil de operação do EVCS, durante a operação ao longo do dia, seja diferente do previsto inicialmente, como é mostrado na linha em cor azul na Figura 3. Neste o perfil de recarga que foi efetivamente atendido pelo EVCS em tempo real para recarga dos VE é demonstrado, considerando os desvios de horário inicial de recarga e o SoC inicial de recarga, mais as recargas não agendadas.

Observando a Figura 3 nota-se no início das recargas deslocamentos temporais referentes aos desvios simulados para avaliação do algoritmo na operação em tempo real. Assim, confirmou-se que o algoritmo desenvolvido é capaz de se ajustar aos desvios de operação que devem acontecer em tempo real em relação ao horário chegada do VE no EVCS, que pode ocorrer em avanço, atraso ou no instante correto, e em relação ao SoC inicial de recarga, que pode ser menor, igual ou maior ao SoC previsto no momento do agendamento.

É importante salientar que os eventos mais críticos estão relacionados a chegada do VE em atraso e com SOC inicial menor, pois estes dois desvios comprometem o atendimento total da recarga agendada quando o agendamento foi realizado considerando a recarga em potência máxima, pois neste caso

será mais difícil do EVCS alcançar o SoC final pretendido. No entanto a partir da utilização de penalidades no modelo desenvolvido, eventuais não atendimentos das restrições que orientam a efetivação das recargas, o modelo mantém a sua viabilidade operativa enquanto busca atender todas as recargas observando os valores das penalidades impostas para cada uma das restrições não atendidas.

Para avaliar o comportamento do EVCS em situações de sinalização de resposta a demanda é apresentado cenário na qual o EVCS recebe da concessionária a sinalização para redução da demanda consumida da rede por um período definido entre 13:30h e 16:00h, conforme é apresentado na Figura 4. Para evidenciar a importância de se ter maior flexibilidade no atendimento as recargas, e o impacto que esta flexibilidade tem no gerenciamento das recargas dos VE, é considerado para este cenário que todas as recargas atendidas podem ser realizadas em um tempo até 25% maior do que se comparado com a recarga em potência máxima, permitindo que o *smart charging* possa ser explorado na operação do EVCS. Com isto, verificou-se que a partir do gerenciamento do EVCS realizado pelo sistema de gerenciamento desenvolvido obteve-se a redução da demanda máxima do EVCS no período de RD de aproximadamente 80 kW para próximo de 35 kW, evidenciando que comportamento desejado para o EVCS.

mostrou ter a capacidade de gerenciar os recursos RED disponíveis no EVCS e de controlar as recargas dos VE no modo *smart charging* para fornecer ao sistema elétrico uma operação flexível, a partir do atendimento de sinalização de resposta a demanda imposta pela concessionária ao EVCS. Assim, conclui-se que o sistema de gerenciamento proposto atende aos critérios de operação pretendido.

Contudo, sabe-se que o modelo desenvolvido pode ser aprimorado para garantir uma operação ainda mais eficiente e confiável. Para os próximos passos prevê-se a necessidade de integrar ao modelo de gerenciamento a dinâmica de comportamento do sistema de gerenciamento (*Battery Management System – BMS*) das baterias do VE ao modelo de planejamento das recargas, para assumir no processo de otimização o comportamento dinâmico deste elemento. Outro aspecto esperado para os próximos passos é a implementação prática deste modelo para gerenciar o Carport instalado na universidade federal de Santa Maria, o que deve ocorrer até meados do ano de 2022, onde outros aprimoramentos devem ocorrer no modelo para que o mesmo atenda a operação prática de veículos elétricos.

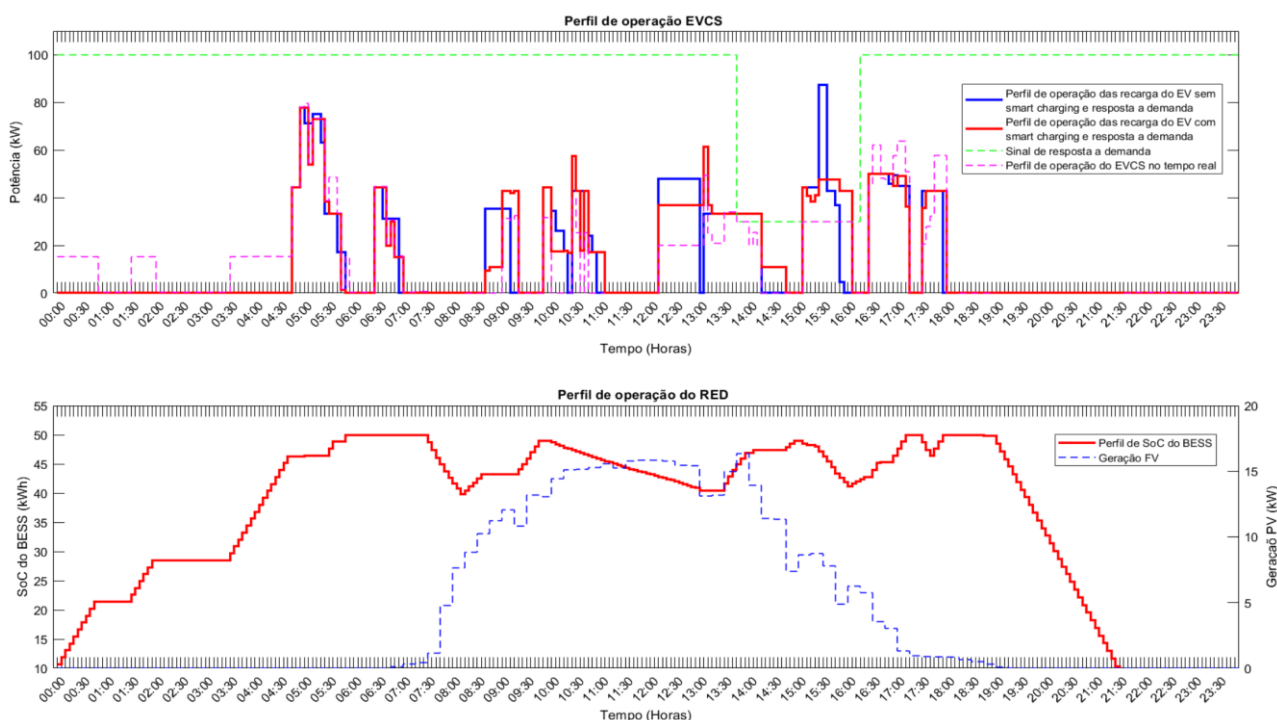


Fig. 4 Perfil de operação do EVCS durante RD

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado sistema de gerenciamento de EVCS com RED que mostrou ser capaz de atender as recargas dos VE durante a operação de tempo real onde foram considerados desvios de operação de condições inicialmente previstas durante a etapa inicial da operação, a partir das recargas agendadas. Além da garantia do atendimento das recargas dos VE, o sistema de gerenciamento proposto

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de P&D ANEEL Chamada P022, à Copel-Dis pelo suporte financeiro através do projeto PD 2866-0519/2019, Interface de Inovação Multi Agente Envolvendo a Indústria Automobilística, os Sistemas de Energia e Infraestruturas de Mobilidade Elétrica para Eletrovias Inteligentes, à Universidade Federal de Santa

Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001. Também são gratos pelo apoio financeiro do CNPq 465640/2014-1, processo CAPES no. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1.

REFERÊNCIAS

- Daryabari, M.K., Keypour, R., Golmohamadi, H. (2020). Stochastic energy management of responsive plug-in electric vehicles characterizing parking lot aggregators. *Applied Energy* 279.
- Farias, H.E.O. (2021). Combined framework with heuristic programming and rule-based strategies for scheduling and real time operation in electric vehicle charging stations. *Energies* 14, 1370.
- Hou, X., Wang, J., Wang, T., Wang, P. (2019). Smart Home Energy Management Optimization Method Considering Energy Storage and Electric Vehicle. *IEEE Access* 7, 144010–144020.
- I. E. A. IEA, (2020). Global EV Outlook 2020. Tech. Rep., International Energy Agency, Paris. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>.
- I. E. A. IEA, (2021). Global EV Outlook 2021. Tech. Rep., International Energy Agency, Paris. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.
- Lasla, N., Al-Ammari, M., Younis, M. (2020). Blockchain Based Trading Platform for Electric Vehicle Charging in Smart Cities. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems* 1, 80–92.
- Mohammad, A., Zamora, R., Lie, T.T. (2020). Integration of electric vehicles in the distribution network: A review of PV based electric vehicle modelling. *Energies* 13.
- Singh, B., Verma, A., Al-Haddad, K. (2020). Implementation of Solar PV-Battery and Diesel Generator Based Electric Vehicle Charging Station. *IEEE Transactions on Industry Applications. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 4007–4016.
- Singh, S., Chauhan, P., Singh, N.J. (2021). Feasibility of Grid-connected Solar-wind Hybrid System with Electric Vehicle Charging Station. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 9, 295–306.
- Solanke, T.U., Ramachandaramurthy, V.K., Rajagopalan, A. (2020). A review of strategic charging–discharging control of grid-connected electric vehicles. *Journal of Energy Storage*.
- Wu, Y. (2020). Real-time energy management of photovoltaic-assisted electric vehicle charging station by markov decision process. *Journal of Power Sources*, volume 476.
- Zahedmanesh, A., Muttaqi, K.M., Sutanto, D. (2021). A Cooperative Energy Management in a Virtual Energy Hub of an Electric Transportation System Powered by PV Generation and Energy Storage. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, volume 7, 1123–1133.
- Zeng, B. (2020). Bilevel Robust Optimization of Electric Vehicle Charging Stations with Distributed Energy Resources. *IEEE Transactions on Industry Applications* volume 56, 5836–5847.