



**MODELAGEM MATEMÁTICA DOS ELEMENTOS DE DEMANDA E DE
GERAÇÃO PARA ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE
GERENCIAMENTO DE ENERGIA**

**MATHEMATICAL MODELING OF DEMAND AND GENERATION ELEMENTS FOR ANALYSIS
OF THE APPLICATION OF AN ENERGY MANAGEMENT SYSTEM**

Matias Alles Hubert², Maurício de Campos³, João Manoel Lenz Viana⁴

¹ Projeto de pesquisa desenvolvido na Unijuí

² Bolsista Taxa PROSUC/CAPES; Estudante do curso de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da Unijuí

³ Prof. Dr. do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da Unijuí

⁴ Prof. Dr. do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da Unijuí

RESUMO

Fontes de energia renováveis são formas de reduzir as emissões de gases do efeito estufa. Aliada a elas, tem-se a eletrificação dos meios de transporte, processo que está em plena expansão desde o início da última década. Porém, os veículos elétricos acabam por introduzir uma nova carga ao sistema elétrico de potência e, especialmente a residências e conjuntos habitacionais. Essas novas cargas podem sobrecarregar o atual sistema elétrico se não forem devidamente administradas. Assim, atualmente sistemas de gerenciamento de energia elétrica vem sendo estudados e desenvolvidos, com a finalidade de reduzir o consumo de energia e o pico de demanda no sistema. O objetivo deste trabalho é simular os modelos matemáticos que compõem um sistema de gerenciamento de energia para permitir uma análise da curva de demanda resultante da adição do carregamento de um veículo elétrico à carga residencial.

Palavras-chave: Modelo um diodo; Bateria elétrica; Demanda residencial.

ABSTRACT

Renewable energy sources are ways to reduce greenhouse gas emissions. Allied to them, there is the electrification of means of transport, a process that has been in full expansion since the beginning of the last decade. However, electric vehicles end up introducing a new load to the electric power system and, especially, to residences and housing projects. These new loads can overwhelm the current electrical system if not properly managed. Thus, currently, electrical energy management systems have been studied and developed, in order to reduce energy consumption and peak demand in the system. The objective of this work is to simulate the mathematical models that compose an energy management system to allow an analysis of the demand curve resulting from the addition of the charging of an electric vehicle to the residential load.

Keywords: One-diode model; Electric battery model; Residential demand.



INTRODUÇÃO

A redução da emissão de gases é um dos principais motivos para a eletrificação dos meios de transporte. Como um exemplo, temos o cenário europeu, o qual possui limitações de emissões de gases para os próximos anos, 2025 e 2030. Essas limitações já requerem um mercado massivo para a introdução parcial de veículos elétricos (VEs). Além de reduzir as emissões, agregam-se benefícios com as metas estipuladas para 2030: redução de pelo menos 40% nos gases do efeito estufa, aumento de 27% de participação de energias renováveis e 27% de melhorias em eficiência energética (ERTRAC, 2017). Portanto, espera-se que esses benefícios provenientes da introdução de veículos elétricos impactem diretamente na qualidade do ar e também em mudanças climáticas benéficas, mas, isso deve ocorrer apenas se a energia elétrica utilizada for de fontes de baixo carbono ou carbono neutro, como é o caso da energia solar, eólica e geotérmica.

A necessidade de carregamento de veículos elétricos é um dos grandes desafios da inclusão dos VEs em larga escala, principalmente pelo fato da rede elétrica de modo geral não ter sido projetada para essa carga. A ideia é que o usuário de um veículo elétrica nunca precise “parar para abastecer” (recarregar o VE), havendo disponibilidade de carregadores nos pontos em que este parar, sendo os principais: áreas comerciais, de trabalho e residência (IEA, 2021)

No caso do carregamento de VEs em residências, este pode acabar por afetar a operação dos atuais transformadores em redes de distribuição, devido a simultaneidade dos carregamentos e da elevação do pico de demanda. Dessa forma, alterações na rede por parte da distribuidora podem ser necessárias. Conforme apresentado por Sausen (2017), uma introdução de 50% de veículos elétricos é o suficiente para exceder a capacidade nominal dos atuais transformadores.

Em locais em que a disponibilidade de painéis fotovoltaicos é limitada, como o caso de apartamento residenciais ou comerciais com alta densidade de pessoas, faz-se necessário a utilização de um sistema de gerenciamento de energia elétrica com a finalidade de garantir o melhor aproveitamento das fontes disponíveis sem comprometer as necessidades do consumidor, diminuindo ao máximo a demanda da rede (RAFIQUE *et al*, 2021). No geral, o uso de sistemas de gerenciamento de energia traz economia em torno de 11% a 22%, para edifícios, ultrapassando os 30% de economia para casas (IEA, 2021).



Portanto, busca-se formas de melhorar a eficiência do sistema atual a fim de reduzir os possíveis impactos negativos da introdução dos veículos elétricos na rede de distribuição. Uma maneira, é a utilização do VE, quando em disponibilidade, como fonte de energia para a rede (KIKUSATO *et al*), operando no modo *Vehicle-to-Grid* (V2G), ou no caso de residência no modo *Vehicle-to-Home* (V2H). Dessa forma, o sistema de gerenciamento de energia busca a melhor relação para a operação entre as possíveis fontes de energia (painéis fotovoltaicos, baterias estacionárias, bateria do VE, dentre outros), restando a sua predefinição, por exemplo, pelo critério de minimizar os custos, consumo de energia, pico de carga etc (RAFIQUE *et al*, 2019).

Assim, uma análise das necessidades de demanda residencial e geração distribuída (fotovoltaica), introduzindo-se as possíveis cargas dos VEs, é ponto de partida indispensável para um planejamento adequado dos sistemas de gerenciamento de energia.

Portanto, o objetivo deste trabalho é simular os modelos matemáticos que compõem um sistema de gerenciamento de energia (modelo elétrico do painel fotovoltaico, modelo da bateria elétrica e modelo da demanda residencial), analisar a curva de demanda resultante da adição do carregamento de um veículo elétrico à carga residencial e propor um cenário ou EMS que possa solucionar possíveis picos de demanda.

METODOLOGIA

Busca-se através de uma revisão da literatura, apresentar em um cenário residencial a necessidade da implementação de sistemas de gerenciamento de energia, e desenvolver em simulação os modelos matemáticos que o compõem, tais como: perfil de carga residencial, modelo matemático de 1 diodo representativo do painel fotovoltaico e, ainda, o modelo de carregamento de uma bateria elétrica de um VE.

A união desses modelos nos possibilita dimensionar as necessidades de energia e nos leva a analisar os modos de operação do sistema de gerenciamento de energia, com a finalidade de redução de custos, melhoria da eficiência ou redução de pico de carga.

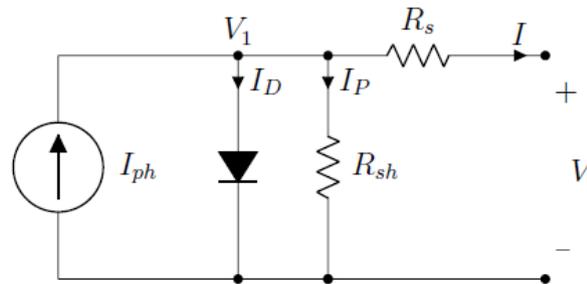
MODELO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Para o desenvolvimento da simulação em *Matlab*, utilizou-se o modelo matemático para representar a geração fotovoltaica denominado modelo de 1 diodo, apresentado em Villalva,



Gazoli, Filho (2009) e Sauthier *et al* (2019). Os autores apresentam o esquema de funcionamento de uma célula fotovoltaica e modelos representativos, sendo eles: o modelo ideal, o 1 diodo e o 2 diodos. Utiliza-se aqui o modelo 1 diodo, pois, aproxima-se bem dos valores reais de geração e é capaz de representar bem as resistências naturalmente existentes entre as conexões das células que compõem o painel. A modelagem resta sobre a aplicação da lei de Kirchoff, em que o equacionamento considera características físicas, variações climáticas (irradiância e temperatura). O circuito representativo do modelo de 1 diodo é apresentado na Figura 1.

Figura 1. Modelo de 1 diodo.



Fonte: Sauthier (2019).

Neste modelo, R_{sh} modela a corrente de fuga, R_s a resistência série das perdas internas nas conexões, I_{ph} a corrente fotovoltaica decorrente da incidência da irradiação sobre a camada semicondutora do painel. Portanto, temos que a corrente gerada pela célula é dada pela Equação 1:

$$I = I_{ph} - I_D - I_P \quad \text{Equação 1}$$

Utilizando-se dessa modelagem apresentada por Villalva, Gazoli, Filho (2009) e Sauthier (2019), é possível desenvolver a simulação em *Matlab*. Porém, naturalmente o painel não atinge a potência máxima, fazendo-se necessário o uso de um rastreador de ponto de potência, neste caso, utilizou-se um do tipo “perturba e observa” (P&O). Esse rastreador, realiza medições sucessivas de corrente e tensão do painel, calculando a potência instantânea ($P_{(k)}$), assim, são realizados pequenos incrementos/decrementos na tensão de referência do conversor *boost* a fim de atingir o ponto de potência máxima. Uma análise de algoritmos P&O é desenvolvida por Manna, Akella (2021).



MODELO DA BATERIA ELÉTRICA

A modelagem da bateria do veículo elétrico foi realizada através de um modelo elétrico presente na biblioteca do *Matlab/Simulink*, denominado modelo *Battery*. Este modelo inclui a dinâmica elétrica de diversos tipos de baterias presentes no mercado, e neste trabalho, considerou-se um veículo elétrico alimentado por uma bateria de Lítio-Íon, a qual possui comportamento para carga e descarga descrito nas equações (1) e (2), respectivamente:

$$f(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{it + 0,1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-B \times it) \quad \text{Equação 2}$$

$$f(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-B \times it) \quad \text{Equação 3}$$

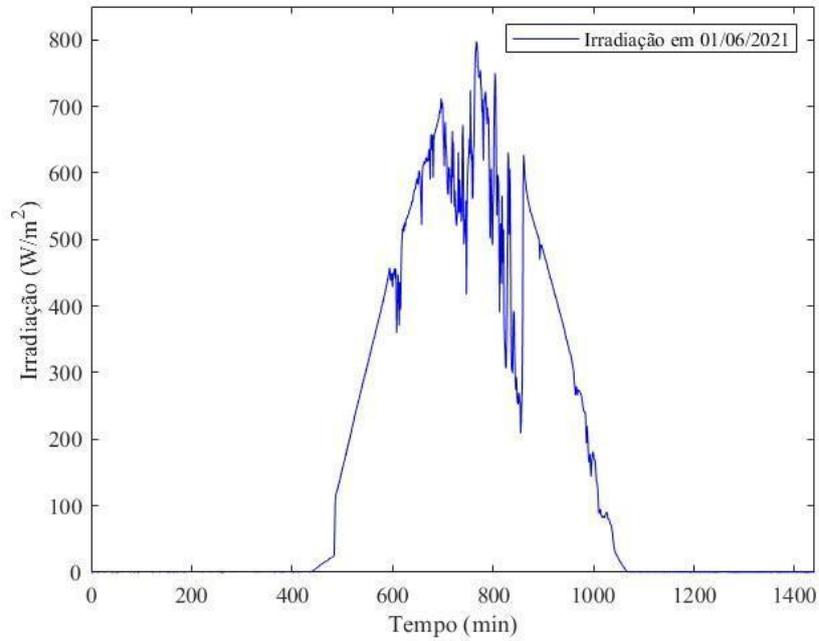
A parametrização é feita conforme Brondani (2015) utilizando-se dados de catálogo fornecido pelos fabricantes, neste caso, utilizou-se como referência para o VE uma bateria Li-Ion da GS Yuasa, com 88 células em série, capacidade de carga de 50 Ah, capacidade energética de 16 kWh, possuindo cada célula tensão nominal de 3,7 V, tensão de *cut-off* 2,75 V e tensão máxima de 4,1 V.

DADOS PARA SIMULAÇÃO

Para a geração fotovoltaica (8x2 painéis Kyocera KD210GX-LPD, 210 Wp), utiliza-se o modelo matemático de 1 diodo, alimentado com dados meteorológicos do dia 01 de junho de 2021, obtidos de um piranômetro instalado na sede da Unijuí em Ijuí-RS, conforme Figura 1.



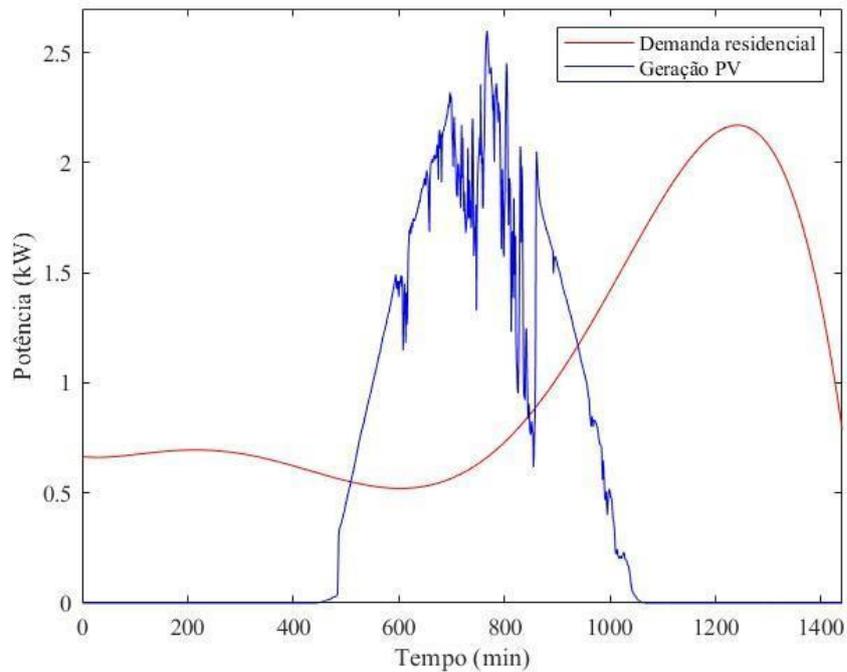
Figura 1. Dados de irradiação de entrada para o modelo de 1 diodo do painel fotovoltaico.



Fonte: autor.

E, para as curvas de demanda e geração, temos:

Figura 2. Curvas de demanda e geração residencial.

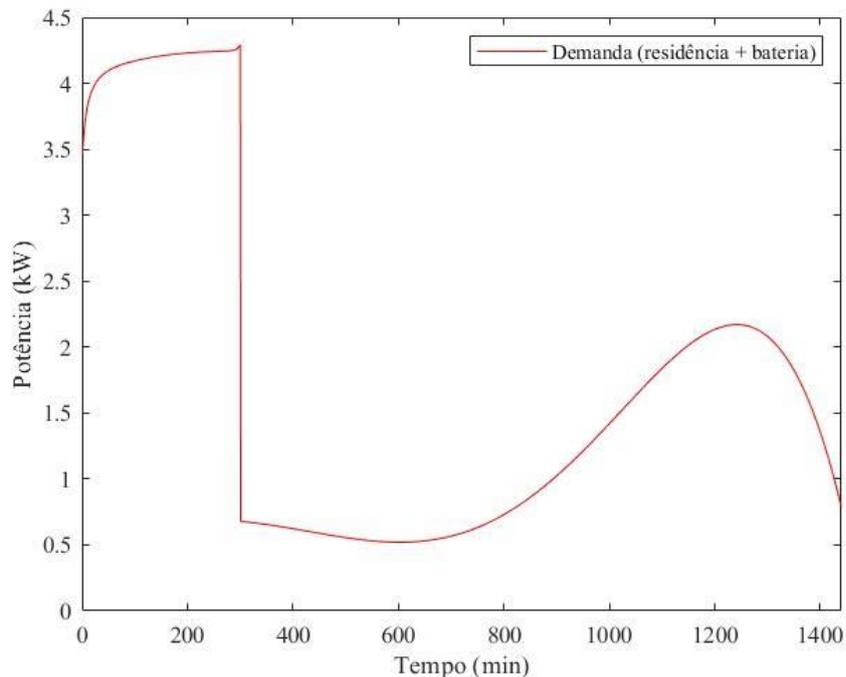


Fonte: autor.



A inserção do carregamento do VE a partir das 0h (meia noite), a fim de evitar o pico de demanda residencial e considerando um horário que normalmente o veículo elétrico não estará em uso:

Figura 3. Curva de demanda residencial somada a demanda do carregamento do VE.



Fonte: autor.

O sistema PV poderia ser dimensionado para suprir toda a demanda residencial, porém, solucionaria apenas o problema do ponto de vista de custo com energia elétrica do consumidor, mas não o problema de pico da rede. A inclusão do carregamento do veículo elétrico, partindo de um estado de carga (*SoC – State of Charge*) de 60% até 100%, em corrente constante de 10 A, acarreta em um incremento de 166% (3,61 kW) em relação ao pico da curva de demanda da residência (que possui pico de 2,17 kW) e, sabendo que o transformador costuma operar próximo da região nominal para maior eficiência, esse aumento da demanda resulta em sobrecarga, prejudicando a eficiência do sistema.

Uma forma de melhorar esse cenário, seria a implementação de um carregamento mais lento, reduzido para uma corrente constante de 5 A, o que aumentaria o tempo de carregamento, mas diminuiria o pico. Ainda, um conjunto de baterias estacionárias carregadas a partir da



geração fotovoltaica da residência, poderia fornecer energia na parte da noite para o carregamento da bateria do VE, porém, essa topologia deve estar aliada à uma análise econômica, visto que este custo estaria à cargo do proprietário. Também, um sistema preditivo de demanda pode ser utilizado, o qual, trabalhando em conjunto com um EMS deve reduzir os gastos com energia elétrica ao consumidor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A introdução de veículos elétricos em grande escala deverá sobrecarregar o atual sistema elétrico. Pode-se observar que, a partir das simulações apresentadas, existe a necessidade de um gerenciamento da demanda residencial, principalmente a fim de reduzir o pico de demanda. Neste trabalho, foi apresentado os modelos necessários para a elaboração de um sistema de gerenciamento de energia elétrica, a fim de minimizar o impacto da inclusão de veículos elétricos no sistema elétrico de potência. A partir dos modelos apresentados, diversos cenários podem ser estudados no sentido de se tentar mitigar o consumo de energia elétrica do ponto de vista do consumidor, porém do ponto de vista da distribuidora, a redução do pico de demanda é mais complicada. assim como trabalhos futuros pretende-se estudar sistemas do tipo agregador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRONDANI, M. F. *Modelagem Matemática do Tempo de Vida de Baterias de Lítio Íon Polímero utilizando Algoritmos Genéticos*. Dissertação de mestrado, Universidade Regional do Noroeste do estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, Ijuí, Brasil, 2015.

ERTRAC EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORMS. *European Roadmap Electrification of Road Transport*. [S.l.], 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World Energy Outlook 2021*. 2021.

KIKUSATO, H. et al. *Electric Vehicle Charge–Discharge Management for Utilization of Photovoltaic by Coordination Between Home and Grid Energy Management Systems*, v. 10, p. 3186–3197, 2019.

MANNA, S. AKELLA, A. K. *Comparative analysis of various P&O MPPT algorithm for PV system under varying radiation condition*. 1st International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPEE50452.2021.9358690.



RAFIQUE, S. et al. *Energy management systems for residential buildings with electric vehicles and distributed energy resources*. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/EEEIC.2019.8783753.

RAFIQUE, S. et al. *Energy management systems for residential buildings with electric vehicles and distributed energy resources*. IEEE Access, v. 9, p. 46997–47007, 2021.

SAUSEN, J. P. et al. *Probabilistic analysis of electric vehicle insertion on distribution transformer load curve*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017.

SAUTHIER, L. F. *Modelagem Matemática de Módulos Fotovoltaicos Aplicados a Ambientes de Simulação de Geração Distribuída*. Dissertação de mestrado, Universidade Regional do Noroeste do estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, Ijuí, Brasil, 2019.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 24, n. 5, 2009.

ZILLES, R. et al. *Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica*. Oficina de Textos. São Paulo, 2012.