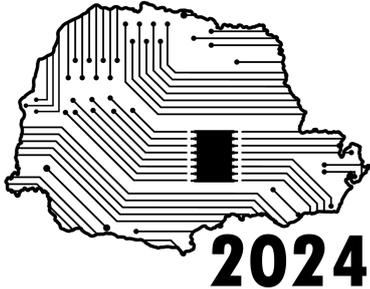


SeMicro-PR



Modelagem Comportamental de Sistema de Transferência de Energia Sem Fio por RF para Aplicações de IoT sem Bateria: Uma Abordagem Resumida

P. C. Lacerda¹, A. A. Mariano¹, G. Brante², O. L. A. López³
K. Mikhaylov³, R. D. Souza⁴

¹GICS-DELT Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

²DAELT Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

³CWC Universidade de Oulu, Oulu, Finlândia

⁴EEL Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil
polyana.camargo@ufpr.br

Resumo - Este trabalho apresenta uma abordagem resumida da modelagem comportamental de um sistema de transferência de energia sem fio (WPT - Wireless Power Transfer) por radio frequência (RF) para aplicações de IoT sem bateria. O modelo considera o uso de um supercapacitor como elemento armazenador de energia, descrevendo analiticamente seu comportamento durante a coleta de energia e a transmissão de informações. Uma comparação do modelo com resultados experimentais foi realizada, destacando a importância de incluir os efeitos dos elementos do circuito que antecedem e sucedem o supercapacitor, os quais impactam no tempo de recarga, e consequentemente, nos ciclos de carregamento e transmissão.

I. INTRODUÇÃO

Com a evolução das tecnologias de comunicação, novas aplicações para a Internet das Coisas (IoT) têm emergido, com a previsão de que o número de dispositivos IoT conectados em todo o mundo alcance aproximadamente 32,1 bilhões em 2030 [1]. Entretanto, como grande parte dos dispositivos IoT é alimentada por baterias, o aumento significativo na sua quantidade apresenta desafios relacionados aos custos de reparo e substituição, além de problemas ambientais associados ao descarte de baterias [2]. Ainda, devido à crescente demanda, há uma previsão de que ocorra uma escassez global de materiais para a fabricação de baterias, como o lítio [3].

Dentro deste cenário, uma alternativa ao uso de baterias para alimentar dispositivos IoT é a adoção de supercapacitores como elemento armazenador de energia em circuitos que coletem energia (EH - Energy Harvesting) de sinais de RF, pois apresentam ciclos de vida mais longos, menor tempo de recarga, baixa manutenção e maior sustentabilidade [4].

Este trabalho está organizado do seguinte modo: a Seção II apresenta o modelo do sistema e a Seção III apresenta as equações relacionadas às fases de operação do sistema. Os resultados dos cálculos realizados a partir do modelo e a comparação com resultados experimentais são apresentados na Seção IV, e a Seção V conclui este artigo.

II. MODELO DO SISTEMA

O diagrama de blocos que representa o receptor EH considerado para o sistema de transferência de energia sem fio é mostrado na Fig. 1. A retena (*rectifying antenna*) é composta pela rede de casamento de impedâncias e pelo retificador que converte os sinais RF em DC. A energia do sinal DC é então armazenada no supercapacitor. O conversor *boost* ajusta a tensão necessária para alimentar a carga com a energia armazenada no supercapacitor. Esta carga representa um dispositivo IoT que usa essa energia para realizar as suas tarefas, tais como a coleta de dados, o processamento e a transmissão da informação. Além disso, os dispositivos IoT podem utilizar tecnologias de comunicação como BLE (*Bluetooth Low Energy*), LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), 6TiSCH (*IPv6 over the Time Slotted Channel Hopping mode of IEEE 802.15.4e*), etc.

Na condição em que um sinal RF é transmitido continuamente ao receptor EH, e de acordo com a aplicação específica do dispositivo IoT, a operação do sistema é caracterizada pela fase de carregamento do supercapacitor (fase EH) e a fase de descarregamento do supercapacitor (fase TX).

A Fig. 2 ilustra o funcionamento do sistema em fases EH e TX. Inicialmente, ocorre a fase EH, durante a qual o supercapacitor é carregado desde $V_{D_0} = 0$ V até atingir a tensão alvo V_{target} . Quando o nível de tensão no supercapacitor atinge V_{target} , o conversor *boost* é ativado, permitindo que a energia armazenada no supercapacitor seja utilizada pela carga na fase TX. Durante essa fase, o fornecimento de energia para a carga continua até que o nível de tensão no supercapacitor diminua e atinja um valor mínimo V_{min} . Nesse ponto, o conversor *boost* é desligado, interrompendo o fornecimento de energia para a carga.

A partir do momento em que o supercapacitor atinge V_{min} , uma nova fase EH é iniciada para recarregá-lo novamente o supercapacitor até V_{target} . Esse processo possibilita o fornecimento de energia à carga durante a próxima fase TX, com o sistema seguindo assim em ciclos de carga e descarga.

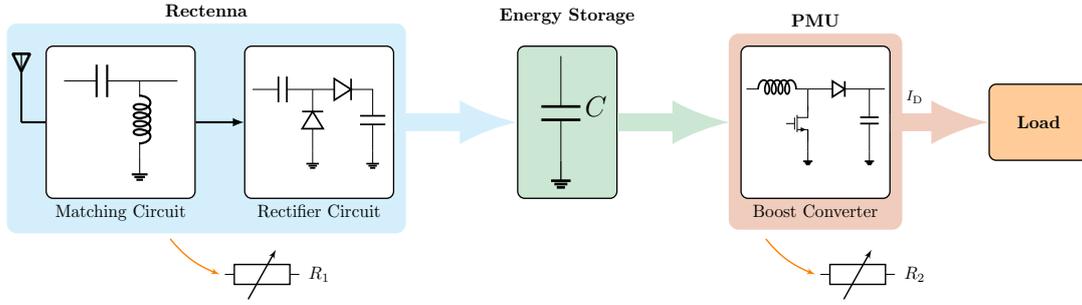


Figura 1: Diagrama de Blocos do receptor RF-EH [5].

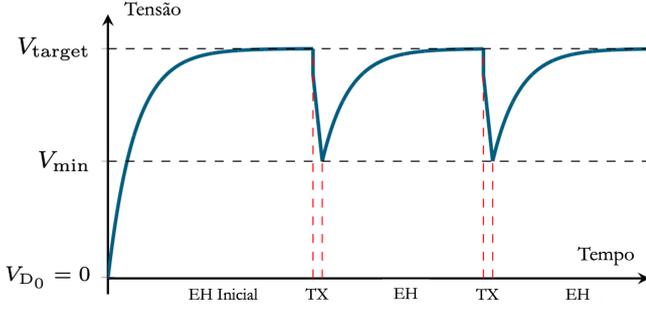


Figura 2: Comportamento do supercapacitor durante as fases de operação do sistema [5].

III. MODELO DE CARGA/DESCARGA

Os modelos de conversão de RF para DC em geral são específicos para cada circuito e obtidos por meio de ajuste de curva com base em dados medidos. Com o uso da função não-linear apresentada em [6], a potência total coletada rectena é descrita como:

$$P_{DC} = \frac{M(\psi - \Omega)}{1 - \Omega}, \quad (1)$$

onde M representa a constante que determina a saturação da potência DC de saída em condições de alta potência de entrada RF, limitada pela ruptura da junção do diodo; Ω é uma constante responsável por assegurar uma resposta nula para condições de entrada e saída zero; e ψ corresponde a uma função logística que está relacionada à potência RF recebida, sendo descrita como:

$$\psi = \frac{1}{1 + \exp[-a(P_{RF} - b)]}. \quad (2)$$

Neste contexto, a e b são constantes que representam, respectivamente, a taxa de carregamento não linear em relação à potência de entrada e a tensão mínima necessária para que a corrente comece a fluir através do diodo que compõe um circuito típico de conversão RF/DC. Por fim, a relação entre Ω , a e b é dada por:

$$\Omega = \frac{1}{1 + \exp(ab)}. \quad (3)$$

A. Fase EH - Modelo de Carregamento

Geralmente, os circuitos que compõem a rectena possuem componentes passivos (resistores, capacitores e indutores) e

ativos (diodos e transistores), os quais recebem a energia dos sinais RF antes do elemento de armazenamento de energia. Esses circuitos impactam no tempo de carregamento do supercapacitor, deste modo, a resistência equivalente, representada por R_1 na Fig. 1, deve ser considerada. Além disso, como esses circuitos podem ser discretos ou parte de um circuito integrado, e apresentarem diferentes topologias, R_1 é uma resistência variável equivalente. Outro fator considerado é a corrente de fuga nos dispositivos, que também é modelada em R_1 . Assim, R_1 funciona como um fator de ajuste que captura a influência dos componentes e das topologias de circuito no tempo de carregamento, incluindo a corrente de fuga do supercapacitor, o que impacta a duração da fase EH.

Assim, após a conversão RF para DC, a potência P_{DC} relacionada ao tempo de carregamento t_{EH} do supercapacitor, com capacitância C , para atingir V_{target} , é definida por:

$$P_{DC} = \frac{C V_{target}^2}{2 t_{EH}}, \quad (4)$$

o que resulta na seguinte tensão de carregamento no supercapacitor após t_{EH}

$$V_C = V_{target} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{EH}}{\tau_C}\right) \right]. \quad (5)$$

A constante de tempo é dada por

$$\tau_C = C (R_{esr} + R_1), \quad (6)$$

onde R_{esr} é a resistência equivalente em série (ESR) do supercapacitor.

B. Fase TX - Modelo de Descarregamento

Durante a fase TX, o supercapacitor é descarregado enquanto alimenta a carga com uma tensão regulada fornecida pelo conversor *boost*. Como o conversor *boost* também possui componentes passivos e ativos e pode ser de diferentes topologias, a resistência equivalente variável R_2 , indicada na Fig. 1 é inserida no equacionamento para considerar o efeitos desses componentes na fase de descarregamento. Deste modo, a queda de tensão no supercapacitor durante a fase TX é

$$\Delta V = I_D (R_{esr} + R_2) + \frac{I_D t_{TX}}{C}, \quad (7)$$

onde t_{TX} é o tempo da fase TX e I_D é a corrente demandada pela carga. Então, a tensão de descarregamento do supercapacitor após a fase TX, $V_D = V_C - \Delta V$ é dada por:

$$V_D = V_C - I_D \left(R_{esr} + R_2 + \frac{t_{TX}}{C} \right). \quad (8)$$

C. Ciclos de Fases EH e TX

A Fig. 2 ilustra o cenário onde as fases EH e TX ocorrem em ciclos. Com $n = 1$ representando a fase inicial EH, com um tempo maior t_{EH_1} para carregar o supercapacitor. Ao logo dos ciclos, a tensão de carregamento em cada fase é definida como

$$V_{C_n} = \Delta V_n \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{EH_n}}{\tau_C}\right) \right] + V_{D_{n-1}}, \quad (9)$$

onde $\Delta V_n = V_{\text{target}} - V_{D_{n-1}}$ é a diferença de tensão entre a tensão alvo V_{target} e a tensão $V_{D_{n-1}}$ decorrente da fase TX anterior.

Assume-se que a duração de t_{TX} é fixa e depende do protocolo de comunicação utilizado pela carga (dispositivo IoT), enquanto t_{EH_n} , deve ser suficiente para recuperar um nível de tensão adequado no supercapacitor, garantindo o funcionamento do sistema. O tempo necessário para o primeiro carregamento do supercapacitor, t_{EH_1} , pode ser calculado por (5). Já t_{EH_n} pode ser otimizado de acordo com o nível de tensão $V_{D_{n-1}}$ atingido na fase TX anterior e do nível de tensão V_{target} desejado, de modo que

$$t_{EH_n} = -\tau_C \ln\left(\frac{V_{\text{target}} - V_{C_n}}{V_{\text{target}} - V_{D_{n-1}}}\right). \quad (10)$$

Por fim, a tensão remanescente após cada fase TX é determinada como

$$V_{D_n} = V_{C_n} - I_D \left(R_{\text{esr}} + R_2 + \frac{t_{TX}}{C} \right) + V_{\text{target}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{TX}}{\tau_C}\right) \right], \quad (11)$$

onde o termo $V_{\text{target}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{TX}}{\tau_C}\right) \right]$ representa o carregamento do supercapacitor durante a fase TX.

IV. RESULTADOS

O modelo apresentado na seção anterior, validado em [5], é comparado com os resultados experimentais apresentados em [7]. A Fig. 3 apresenta o diagrama simplificado do experimento, onde foram utilizados kits de desenvolvimento para emular o sistema WPT e o dispositivo IoT. Para o sistema WPT, o transmissor utilizado foi o TX9150B, e para o receptor EH, a placa P2110CSR-EVB, ambos da Powercast [8]. Já para o dispositivo IoT, foi empregado o kit BLE CC2652R1 da Texas Instruments [9].

As medições descritas em [7] foram realizadas em três etapas distintas. Inicialmente, o supercapacitor de 50 mF presente no receptor EH (P2110CSR-EVB) foi carregado por meio da coleta de energia dos sinais RF transmitidos pelo

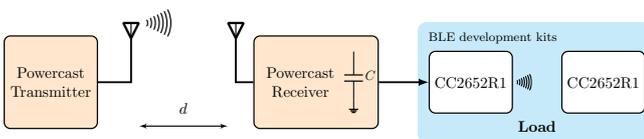


Figura 3: Diagrama simplificado do experimento realizado por [7].

TX9150B. O carregamento ocorreu até a tensão alvo $V_{\text{target}} = 2$ V, com medições do nível de tensão e tempo de carregamento realizadas para diferentes distâncias de referência d entre o transmissor e o receptor. Neste primeiro experimento, o kit BLE estava desconectado do receptor EH. Os resultados das medidas coletadas e da curva teórica, calculada pelo modelo apresentado na Seção III-A, estão indicados na região A da Fig. 4.

No segundo experimento, o kit BLE foi conectado ao receptor EH, enquanto o transmissor TX9150B foi desligado. Dessa forma, o supercapacitor presente no receptor EH alimentou a placa CC2652R1 do kit BLE, configurada para transmitir pacotes para a outra placa CC2652R1 alimentada via porta USB de um computador. Quando o supercapacitor foi descarregado de V_{target} até atingir a tensão $V_{\text{min}} = 1,02$ V, o conversor *boost* foi desligado e cessou a alimentação da placa CC2652R1 que transmitia os pacotes. As medições desta fase de descarregamento, juntamente com a curva teórica calculada pelo modelo apresentado Seção III-B, são mostradas na região B da Fig. 4.

No terceiro experimento, o transmissor TX9150B foi ligado novamente para carregar o supercapacitor da placa P2110CSR-EVB, e desta vez com a placa CC2652R1 do kit BLE conectada ao receptor EH. Quando o supercapacitor foi carregado de V_{min} e alcançou a tensão de ativação do conversor *boost* $V_C = 1,20$ V, a energia foi novamente fornecida à placa CC2652R1 do kit BLE. Com o envio de pacotes, o supercapacitor foi descarregado até V_{min} , mesmo com a permanência da transmissão de sinais RF pelo TX9150B ao receptor EH. O conversor *boost* foi desligado novamente e foi iniciada outra fase EH. Assim, foram mantidos os ciclos alternados entre as fases EH e TX. Os resultados de medidas e a curva teórica, calculada pelo modelo apresentado Seção III-C, estão na região C da Fig. 4. Os tempos medidos e relacionados à fase TX da região B e dos ciclos de fases EH e TX da região C, também são indicados na Fig. 4.

Os parâmetros do experimento apresentado em [7], e utilizados para realizar os cálculos baseados nas equações apresentadas na Seção III, estão listados na Tabela 1.

O tempo da fase EH inicial calculado foi de $t_{EH_1} = 1394,2$ s (aproximadamente 23 min). Os valores obtidos para a cons-

Tabela 1: Parâmetros utilizados nos cálculos das curvas do modelo [7].

Parâmetro	Valor
(P_{DC})	190.1 μ W
Constante (a)	90
Constante (b)	1 mV
Saturação de (P_{DC}) (M)	12.9 mW
Tensão alvo inicial (V_{target})	2 V
ESR do supercapacitor (R_{esr})	160 m Ω
Capacitance do supercapacitor (C)	50 mF
Distancia entre o TX e o RX da Powercast (d)	0.5 m
Tensão de alimentação do CC2652R1 (V_{reg})	3.3 V
Consumo médio do CC2652R1 (P_D)	5.9 mW
Tensão de ativação do <i>boost</i> (V_C)	1.2 V
Tensão mínima (V_{min})	1.02 V

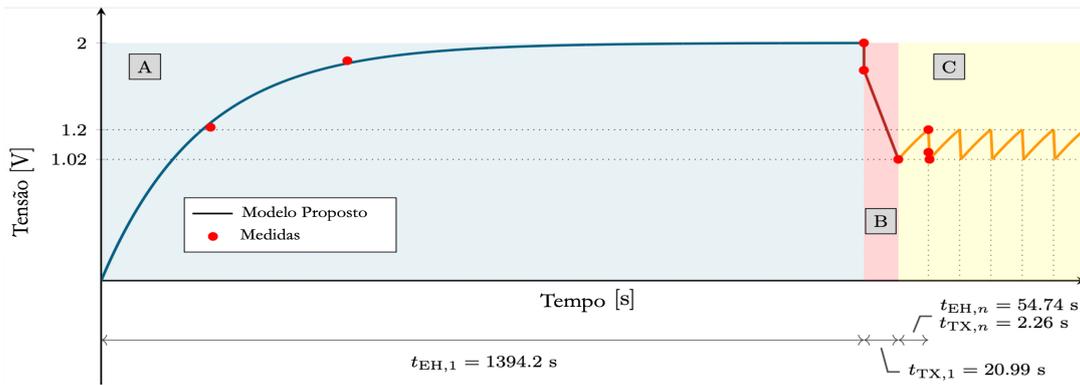


Figura 4: Tensão no supercapacitor em função do tempo, comparação dos resultados experimentais de [7] com o modelo apresentado na seção III. A região A representa a fase EH inicial, a região B é a fase TX sem a coleta de energia pelo receptor EH, e a região C representa os ciclos alternados das fases EH e TX [5].

tante de tempo τ_C e a resistência equivalente variável R_1 foram de 183,42 e 3668,24 Ω , respectivamente. Como o valor de $P_{DC} = 190,1 \mu W$, calculado a partir das medidas de tempo e tensão apresentados na região A da Fig. 4, foi calculada uma $P_{RF} = 341,7 \mu W$ recebida na entrada da rectena.

Em relação à fase TX, apresentada na região B da Fig. 4, e com base nos valores da potência média $P_D = 5,9 mW$ e da tensão regulada $V_{reg} = 3,3 V$ da carga (placa CC2652R1), foi calculada a corrente $I_D = 1,79 mA$ e a resistência variável equivalente $R_2 = 127,53 \Omega$. A partir das curvas teóricas apresentadas na Fig. 4 e dos parâmetros calculados, constata-se que foi obtido um ajuste preciso em relação aos resultados experimentais.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma abordagem resumida do modelo para descrever o comportamento de sistemas de transferência de energia RF para aplicações de IoT sem bateria. A comparação com resultados experimentais foi realizada, evidenciando que o modelo forneceu uma resposta consistente. Foi demonstrada que, a inclusão de parâmetros no modelo que levem em conta o comportamento físico de circuitos eletrônicos é essencial para auxiliar no projeto e análise da operação de sistemas WPT. Desse modo, torna-se possível compreender como será o comportamento do elemento armazenador de energia, conforme o perfil da carga (potência consumida, tensão de alimentação, tempo necessário para realizar as tarefas) e do nível de energia disponível para ser coletada pelo receptor EH.

As futuras abordagens para o contínuo aperfeiçoamento do modelo podem envolver a análise do comportamento do sistema sob diferentes valores da tensão V_C de ativação do conversor *boost*, a incorporação de parâmetros que permitam descrever de forma mais precisa a influência da eficiência da conversão RF para DC no carregamento do supercapacitor, e da relação de tensão do conversor *boost* no descarregamento.

REFERÊNCIAS

[1] STATISTA. Number of IoT connected devices worldwide from 2019 to 2030. 2023. Disponível em: [https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-](https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/)

[connected-devices-worldwide/](https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/). Acesso em: 5 nov. 2024.

[2] Chun, A. C. C.; Ramiah, H.; Mekhilef, S. *Wide Power Dynamic Range CMOS RF-DC Rectifier for RF Energy Harvesting System: A Review*. IEEE Access, v. 10, p. 23.948-23.963, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3217346.

[3] STATISTA RESEARCH DEPARTMENT. Projection of lithium demand worldwide from 2020 to 2035. Statista, Tech. Rep., 2023. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/452025/projected-total-demand-for-lithium-globally>. Acesso em: 5 nov. 2024.

[4] DIGI-KEY. Understanding supercapacitors and their relationship with batteries. Disponível em: <https://www.digikey.com.br/pt/articles/understanding-supercapacitors-and-their-relationship-with-batteries>. Acesso em: 30 out. 2024.

[5] Lacerda, P. C.; Mariano, A. A.; Brante, G.; López, O. L. A.; Mikhaylov, K.; Souza, R. D. *Behavioral Modeling of a Radio Frequency Wireless Power Transfer System for Batteryless Internet of Things Applications*, in IEEE Access, vol. 12, pp. 86974-86984, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3416702.

[6] Boshkovska, E.; NG, D. W. K.; Zlatanov, N.; Schober, R. *Practical non-linear energy harvesting model and resource allocation for SWIPT systems*, IEEE Communications Letters, v. 19, n. 12, p. 2082–2085, 2015.

[7] Warnakulasuriya, D. A.; Mikhaylov, K.; López, O. L. A. *Wireless power transfer for Bluetooth Low Energy based IoT device: an empirical study of energy performance*. International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 14., 2022.

[8] POWERCAST CORPORATION, P21XX Powerharvester Chipset Reference Design Evaluation Board, 2018.

[9] TEXAS INSTRUMENTS, CC2652R SimpleLink™ Multiprotocol 2.4 GHz Wireless MCU, 2023.