

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DE SUPERCAPACITOR BASEADO EM NANOTUBOS DE CARBONO VERTICALMENTE ALINHADOS

Otávio Cristiano Vilas Boas¹

¹ Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Brasil

Autor correspondente: otaviob@unicamp.br

DOI: <https://doi.org/10.31496/retii.v3i1.2053>

RESUMO

Supercapacitores, também conhecidos como capacitores eletroquímicos, são dispositivos de armazenamento de energia que se destacam por sua elevada densidade de potência e longa vida útil, sendo promissores para diversas aplicações tecnológicas. Este trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar eletroquimicamente um supercapacitor baseado em eletrodos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas verticalmente alinhados (VAMWCNTs), crescidos diretamente sobre substratos metálicos por deposição química de vapor. Os materiais obtidos foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura e de transmissão, bem como por espectroscopia Raman, visando à análise de suas propriedades morfológicas e estruturais. O dispositivo foi montado em uma célula tipo moeda utilizando eletrólito aquoso e avaliado por voltametria cíclica, carga-descarga galvanostática e espectroscopia de impedância eletroquímica. Os resultados evidenciaram crescimento homogêneo dos nanotubos, estrutura gráfica com presença de defeitos e comportamento eletroquímico predominantemente capacitivo. As curvas de voltametria apresentaram formato aproximadamente retangular, enquanto as análises galvanostáticas indicaram comportamento linear de carga e descarga, com capacitância específica de 2,3 F/g. A espectroscopia de impedância revelou baixa resistência interna e resposta próxima ao comportamento capacitivo ideal. Conclui-se que a arquitetura baseada em VAMWCNTs é funcional para

aplicações em supercapacitores, apresentando desempenho coerente com a proposta exploratória do estudo e potencial para otimizações futuras.

Palavras-chave: supercapacitores; nanotubos de carbono; caracterização eletroquímica; armazenamento de energia; espectroscopia de impedância.

ABSTRACT

Supercapacitors, also known as electrochemical capacitors, are energy storage devices that stand out due to their high-power density and long cycle life, making them promising for a wide range of technological applications. This work aims to develop and electrochemically characterize a supercapacitor based on vertically aligned multi-walled carbon nanotube (VAMWCNT) electrodes grown directly on metallic substrates by chemical vapor deposition. The synthesized materials were characterized by scanning and transmission electron microscopy, as well as Raman spectroscopy, in order to evaluate their morphological and structural properties. The device was assembled in a coin cell configuration using an aqueous electrolyte and evaluated through cyclic voltammetry, galvanostatic charge–discharge, and electrochemical impedance spectroscopy. The results showed homogeneous nanotube growth, graphitic structure with the presence of defects, and predominantly capacitive electrochemical behavior. The voltammetry curves exhibited nearly rectangular shapes, while the galvanostatic measurements indicated linear charge–discharge profiles, with a specific capacitance of $2.3 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$. Impedance spectroscopy revealed low internal resistance and a response close to ideal capacitive behavior. It is concluded that the VAMWCNT-based architecture is functional for supercapacitor applications, presenting performance consistent with the exploratory nature of the study and potential for future optimization.

Keywords: supercapacitors; carbon nanotubes; electrochemical characterization; energy storage; impedance spectroscopy.

1 INTRODUÇÃO

Os capacitores constituem uma classe de dispositivos eletrônicos cuja principal função é o armazenamento de energia na forma de um campo eletrostático. Esses componentes são amplamente empregados em circuitos elétricos e eletrônicos, atuando, por exemplo, na filtragem de sinais e no fornecimento instantâneo de energia. Estruturalmente, são formados por dois eletrodos separados por um material dielétrico, de modo que, ao se aplicar uma diferença de potencial, ocorre a separação e o acúmulo de cargas elétricas de sinais opostos nos eletrodos. A quantidade de carga acumulada nos eletrodos está relacionada à diferença de potencial aplicada por meio da capacitância (C), conforme descrito pela Equação (1) (Halliday; Resnick; Walker, 2009):

$$Q = C \times V \quad (1)$$

em que:

Q = a carga elétrica;

C = a capacitância;

V = a diferença de potencial.

A capacitância depende diretamente das características físicas do dispositivo, sendo proporcional à área dos eletrodos e à permissividade do meio dielétrico, e inversamente proporcional à distância entre os eletrodos, conforme a Equação (2):

$$C = \frac{\varepsilon \times A}{d} \quad (2)$$

em que:

C = a capacitância (Farad);

ε = a permissividade do material dielétrico;

A = a área das placas;

d = a distância entre as placas do capacitor.

Capacitores convencionais, como os eletrolíticos e cerâmicos, apresentam valores de capacitância tipicamente na faixa de pico a mili-farads, o que limita sua aplicação em sistemas de armazenamento de energia devido à baixa densidade de energia associada (Johnson; Hilburn; Johnson, 1994).

Nesse contexto, os supercapacitores, também conhecidos como capacitores eletroquímicos ou capacitores de dupla camada elétrica (EDLC – *Electric Double-Layer Capacitor*), têm se destacado como uma alternativa promissora para aplicações que demandam elevada densidade de potência e rápida resposta de carga e descarga. Esses dispositivos diferenciam-se dos capacitores convencionais principalmente por sua arquitetura e pelo mecanismo de armazenamento de carga, que ocorre na interface eletrodo-eletrólito, permitindo a obtenção de capacitâncias significativamente mais elevadas, frequentemente na ordem de dezenas a milhares de Farads (Petreus *et al.*, 2008).

Os elevados valores de capacitância observados em supercapacitores estão associados, sobretudo, à combinação de dois fatores principais: a redução da distância efetiva de separação de cargas para a escala nanométrica e o uso de materiais com elevada área superficial específica. Como consequência, há um aumento expressivo na energia armazenada, que pode ser descrita pela Equação (3):

$$E = \frac{1}{2} \times C \times V^2 \quad (3)$$

em que:

E = a energia armazenada;

C = a capacitância do dispositivo;

V = a tensão aplicada no dispositivo.

Apesar de apresentarem densidade de energia inferior à das baterias eletroquímicas, os supercapacitores possuem densidade de potência significativamente superior, ou seja, são capazes de fornecer ou absorver energia em taxas elevadas, além de apresentarem alta eficiência e longa vida útil, características que os tornam dispositivos complementares em diversas aplicações energéticas.

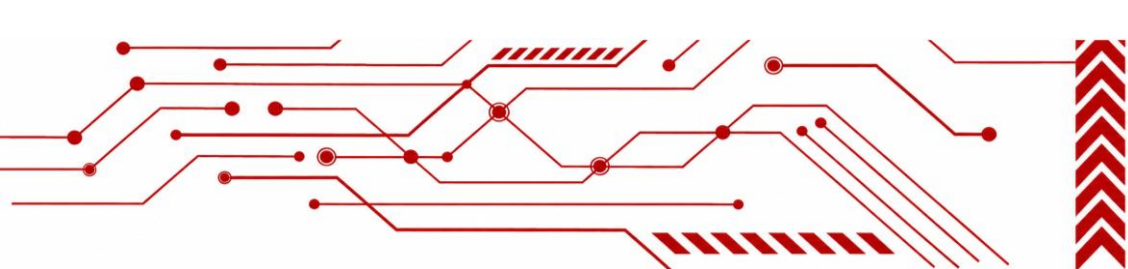
Do ponto de vista científico e tecnológico, a compreensão do comportamento eletroquímico desses dispositivos é fundamental para a avaliação de seu desempenho e para a otimização de seus componentes. Nesse sentido, técnicas como voltametria cíclica, análise galvanostática de carga-descarga e espectroscopia de impedância eletroquímica são amplamente empregadas na caracterização de supercapacitores, permitindo a análise de fenômenos como armazenamento de carga, resistências internas e dinâmica de transporte iônico (Vilas Boas, 2019).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e realizar a caracterização eletroquímica de um supercapacitor baseado em nanotubos de carbono, com ênfase na análise de seu comportamento capacitivo por meio de diferentes técnicas eletroquímicas. Busca-se, assim, correlacionar as propriedades do material ativo com o desempenho do dispositivo, contribuindo para a compreensão dos fenômenos envolvidos na operação de supercapacitores.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os supercapacitores, também conhecidos como capacitores eletroquímicos ou capacitores de dupla camada elétrica (EDLC), são dispositivos de armazenamento de energia cujo funcionamento está associado, principalmente, à formação de uma dupla camada elétrica na interface entre o eletrodo e o eletrólito. Diferentemente dos capacitores convencionais, nos quais a separação de cargas ocorre através de um dielétrico sólido, nos supercapacitores o armazenamento de carga se dá na interface eletrodo-eletrólito, permitindo a obtenção de elevados valores de capacitância (Zhang; Zhao, 2009).

De forma geral, esses dispositivos são constituídos por dois eletrodos porosos de alta área superficial, imersos em um eletrólito e separados por uma



membrana porosa eletricamente isolante e ionicamente condutora. Quando uma diferença de potencial é aplicada, íons presentes no eletrólito migram e se adsorvem nas superfícies dos eletrodos, formando duas regiões distintas na interface: a camada compacta (camada de Stern), onde os íons encontram-se fortemente adsorvidos, e a camada difusa, caracterizada por uma distribuição gradual de cargas no meio eletrolítico (Stern, 1924).

A elevada capacitância dos supercapacitores está diretamente relacionada à combinação entre a grande área superficial dos eletrodos e a pequena distância efetiva de separação de cargas, que passa a ser da ordem do raio dos íons hidratados. Além disso, o comportamento eletroquímico desses dispositivos pode ser descrito por meio de circuitos elétricos equivalentes, nos quais são considerados elementos como a capacitância da dupla camada elétrica, a resistência do eletrólito e a resistência de transferência de carga associada às interfaces eletrodo-eletrólito. Esses parâmetros são fundamentais para a interpretação de resultados obtidos por técnicas de caracterização eletroquímica, como a espectroscopia de impedância eletroquímica.

O desempenho de um supercapacitor depende fortemente das propriedades dos materiais utilizados em sua construção, especialmente dos eletrodos e do eletrólito. No que se refere aos eletrodos, materiais à base de carbono são amplamente empregados devido à sua elevada condutividade elétrica, alta área superficial específica, estabilidade eletroquímica e custo relativamente baixo (Conway; Pell, 2003).

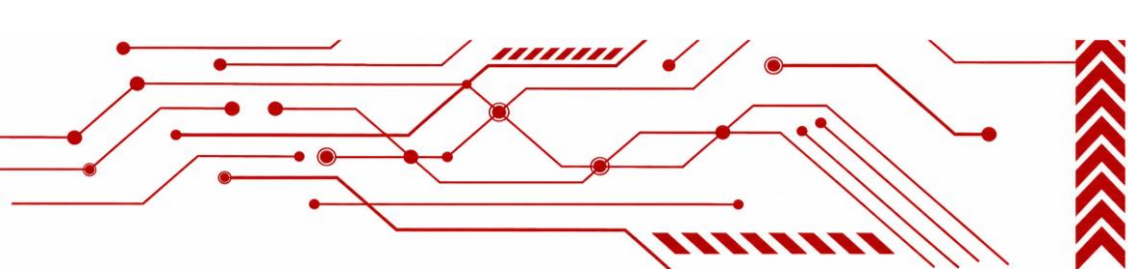
A versatilidade do carbono, decorrente de suas diferentes formas de hibridização, permite a obtenção de estruturas com variadas dimensionalidades, sendo D referente ao número de dimensões espaciais predominantes da estrutura, como fulerenos (0D), nanotubos (1D), grafeno (2D) e materiais amorfos, como o carvão ativado, com estrutura tridimensional (3D)

Entre esses materiais, o carvão ativado é o mais utilizado comercialmente, principalmente devido à sua elevada área superficial e facilidade de processamento. Entretanto, outros materiais, como os nanotubos de carbono, têm sido amplamente investigados em virtude de suas propriedades estruturais e elétricas diferenciadas, que podem favorecer o transporte eletrônico e a acessibilidade iônica, influenciando diretamente o comportamento eletroquímico dos dispositivos.

O eletrólito também desempenha papel fundamental no funcionamento dos supercapacitores, sendo responsável pelo transporte iônico entre os eletrodos. De maneira geral, os eletrólitos podem ser classificados em aquosos e não aquosos. Eletrólitos aquosos, baseados em soluções de ácidos, bases ou sais inorgânicos, apresentam elevada condutividade iônica, o que contribui para a redução de perdas ôhmicas e elevada eficiência do dispositivo (Yu; Chabot; Zhang, 2013).

Além disso, o menor tamanho dos íons facilita o acesso aos poros dos eletrodos, podendo resultar em maiores valores de capacitância (Zhang; Zhao, 2009).





Entretanto, esses eletrólitos apresentam uma janela de estabilidade eletroquímica limitada, tipicamente em torno de 1,23 V, devido à decomposição da água (Galinski; Lewandowski; Stepniak, 2006).

Por outro lado, eletrólitos não aquosos, como os orgânicos e líquidos iônicos, permitem a operação em janelas de potencial mais amplas, podendo atingir valores superiores a 6 V, o que favorece o aumento da energia armazenada. No entanto, esses eletrólitos geralmente apresentam maior resistividade, maior custo e podem exigir condições de manuseio mais rigorosas (Bockris; Reddy, 1970).

Além dos eletrodos e do eletrólito, o separador é um componente essencial na construção dos supercapacitores, sendo responsável por evitar o contato elétrico direto entre os eletrodos, prevenindo curtos-circuitos, ao mesmo tempo em que permite o transporte de íons. Normalmente, são utilizadas membranas poliméricas porosas que combinam propriedades de isolamento elétrico com boa permeabilidade iônica (Tsuda; Husser, 2007).

Por fim, a avaliação do desempenho de supercapacitores é realizada por meio de técnicas eletroquímicas que permitem investigar diferentes aspectos do comportamento do dispositivo. A voltametria cíclica possibilita a análise do mecanismo de armazenamento de carga e da reversibilidade dos processos eletroquímicos; as análises galvanostáticas de carga e descarga permitem a determinação de parâmetros como capacitância e eficiência; e a espectroscopia de impedância eletroquímica fornece informações detalhadas sobre resistências internas e processos de transporte de carga, sendo uma ferramenta essencial para a compreensão dos fenômenos envolvidos na operação desses dispositivos.

3 METODOLOGIA

Com o objetivo de investigar os princípios de construção, operação e caracterização de um supercapacitor, foi realizada a montagem de um dispositivo eletroquímico em configuração de célula tipo moeda. Os eletrodos foram preparados por meio da síntese de nanotubos de carbono de paredes múltiplas verticalmente alinhados (VAMWCNTs – Vertically Aligned Multi-Walled Carbon Nanotubes), crescidos diretamente sobre discos de aço inoxidável (AISI 304L) com diâmetro de 15,7 mm e espessura de 0,9 mm, utilizando um forno de deposição química por vapor (CVD)

Para a síntese, empregou-se uma solução precursora composta por cânfora (54,5% m/m) diluída em álcool etílico (43,5% m/m), contendo nitrato de níquel (2% m/m) como precursor catalítico. A cânfora constituiu a principal fonte de carbono para a formação dos nanotubos, uma vez que, sob as elevadas temperaturas empregadas no processo de CVD, suas moléculas sofrem decomposição térmica, originando espécies carbonáceas que interagem com as partículas catalíticas de níquel e promovem a nucleação e o crescimento dos nanotubos. O álcool etílico, além de atuar como solvente, também pode



contribuir como fonte secundária de carbono durante sua decomposição térmica. O vapor da solução precursora foi transportado em atmosfera de nitrogênio, promovendo o crescimento dos nanotubos verticalmente alinhados sobre o substrato metálico.

Os materiais obtidos foram caracterizados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), com o objetivo de avaliar a morfologia, o alinhamento e a estrutura interna dos nanotubos. Adicionalmente, realizou-se a caracterização por espectroscopia Raman utilizando um espectrômetro Renishaw inVia, empregando diferentes comprimentos de onda de excitação e suas respectivas energias: 785 nm (1,58 eV), 632,8 nm (1,96 eV), 514,5 nm (2,41 eV), 488 nm (2,54 eV) e 325 nm (3,81 eV). A calibração dos espectros foi realizada utilizando diamante monocristalino como referência, e as medidas foram conduzidas à temperatura ambiente. Utilizou-se uma objetiva de 40× para a excitação no ultravioleta (325 nm) e uma objetiva de 100× para os demais comprimentos de onda. Os espectros Raman foram ajustados por funções Lorentzianas e normalizados em relação à intensidade da banda G.

Para a montagem do dispositivo, utilizou-se como eletrólito uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH) 2 mol·L⁻¹. Previamente à montagem, os eletrodos foram submetidos a tratamento por plasma DC de oxigênio durante 1 minuto, com o objetivo de melhorar a molhabilidade superficial dos nanotubos, originalmente hidrofóbicos. Em seguida, foram depositados 20 µL do eletrólito sobre cada eletrodo e também sobre uma membrana separadora mesoporosa de celulose. O conjunto foi então montado e encapsulado em uma célula tipo moeda (CR2032). A Figura 1 ilustra o processo de montagem do dispositivo.

A caracterização eletroquímica foi realizada utilizando um potenciostato Ametek VersaSTAT4, por meio de técnicas de voltametria cíclica, carga e descarga galvanostática e espectroscopia de impedância eletroquímica. As voltametrias cíclicas foram conduzidas em uma janela de potencial de 0,9 V, sob diferentes taxas de varredura, sendo as correntes normalizadas pela massa total de material ativo dos eletrodos. As medidas galvanostáticas foram realizadas para correntes específicas de 2,5 A/g, 3,3 A/g e 4,1 A/g. A capacitância específica da célula foi determinada a partir da média dos valores obtidos nessas condições, utilizando a relação:

$$C = \frac{I}{\left(\frac{dV}{dt}\right) \times M} \quad (4)$$

em que:

C = a capacitância específica da célula;

I = a corrente elétrica de descarga;

dV/dt = a taxa de variação da tensão em relação ao tempo;

M = a massa de nanotubos de carbono nos dois eletrodos.

Figura 1 – Montagem do Supercapacitor



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

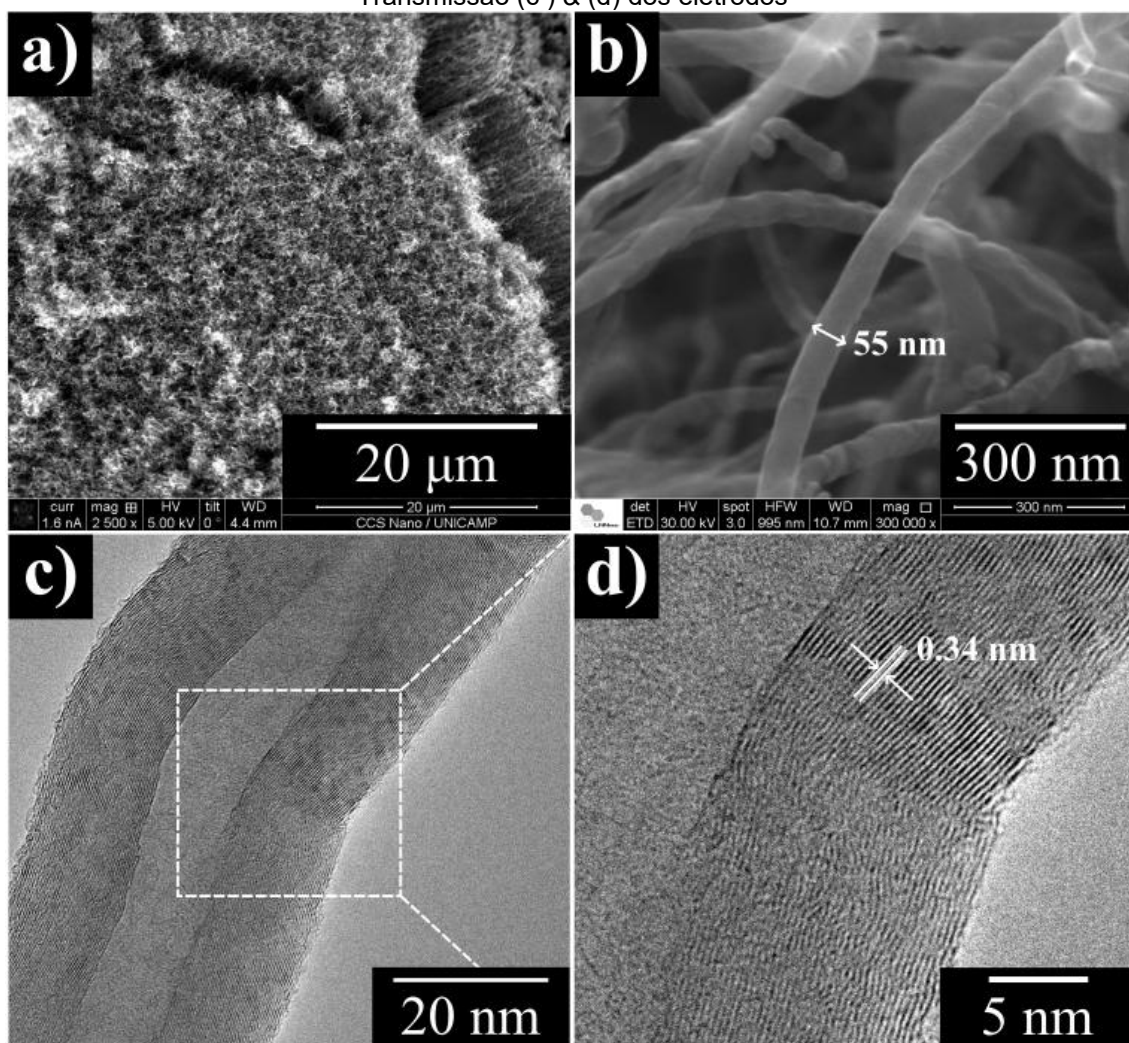
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados foi conduzida de forma integrada, considerando aspectos estruturais, morfológicos e eletroquímicos dos eletrodos à base de nanotubos de carbono, de modo a correlacionar suas propriedades com o desempenho do supercapacitor desenvolvido.

A caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) revela que o método de síntese empregado possibilitou o crescimento de nanotubos de carbono de paredes múltiplas verticalmente alinhados (VAMWCNTs) de forma homogênea sobre os discos de aço inoxidável. Conforme ilustrado na Figura 2 - a & b, observa-se uma distribuição uniforme dos nanotubos ao longo da superfície do substrato, característica desejável para aplicações em supercapacitores, uma vez que favorece a maximização da área superficial eletroquimicamente ativa e contribui para a redução das resistências internas do dispositivo. A figura também evidencia um diâmetro externo médio dos nanotubos da ordem de 55 nm.

A análise complementar por microscopia eletrônica de transmissão (MET) (Figura 2 - c & d) permitiu observar a estrutura interna dos nanotubos, confirmando sua natureza de múltiplas paredes e evidenciando distâncias entre as múltiplas paredes da ordem de 0,34 nm. A utilização conjunta de MEV e MET reforça a obtenção de uma arquitetura estrutural adequada para aplicações eletroquímicas, combinando organização morfológica com características estruturais compatíveis com o transporte eficiente de carga.

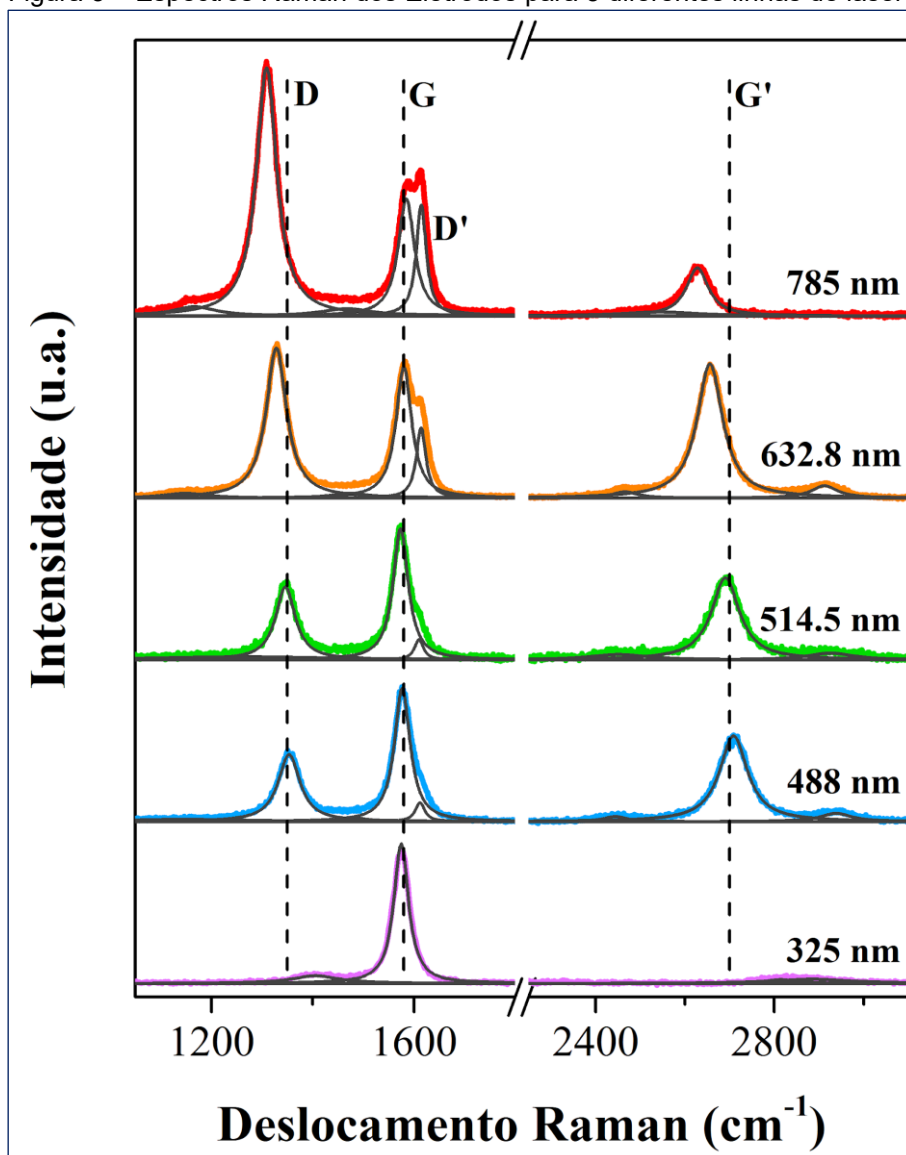
Figura 2 – Microscopia Eletrônica de Varredura (a) & (b) e Microscopia Eletrônica de Transmissão (c) & (d) dos eletrodos



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

A caracterização por espectroscopia Raman, apresentada na Figura 3, evidencia a presença das bandas características de materiais gráfiticos. Na representação dos espectros, a abscissa corresponde ao deslocamento Raman, expresso em cm^{-1} , que indica a diferença de energia entre a radiação incidente e a radiação espalhada e está associado aos modos vibracionais característicos do material. A ordenada representa a intensidade Raman normalizada, relacionada à intensidade relativa do sinal espalhado para cada modo vibracional. A banda D está associada à presença de defeitos estruturais nas hibridizações sp^2 do carbono, enquanto a banda G está relacionada aos modos vibracionais do plano basal de estruturas gráfiticas ordenadas (Ferrari; Basko, 2013). Observa-se que a posição da banda G permanece praticamente inalterada para as diferentes energias de excitação empregadas, indicando comportamento não dispersivo e sugerindo a preservação das características estruturais dos domínios gráfiticos (Thomsen; Reich, 2000).

Figura 3 – Espectros Raman dos Eletrodos para 5 diferentes linhas de lasers



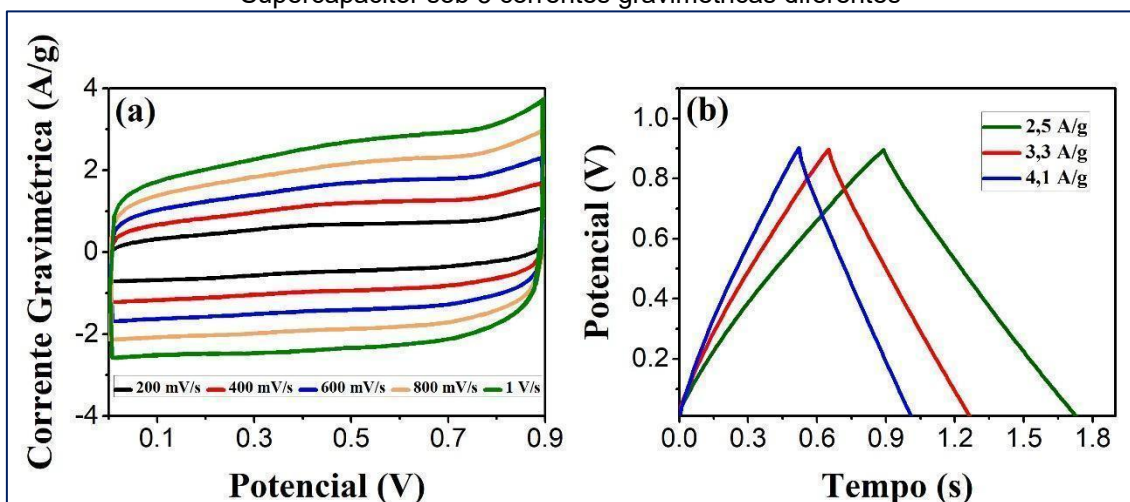
Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

A caracterização eletroquímica do dispositivo foi inicialmente realizada por voltametria cíclica, com o objetivo de avaliar a janela de estabilidade eletroquímica e o comportamento capacitivo do sistema. As medidas foram conduzidas em uma faixa de potencial de 0 a 0,9 V, utilizando diferentes taxas de varredura. Na Figura 4(a), a abscissa representa o potencial aplicado ao dispositivo, expresso em volts (V), enquanto a ordenada corresponde à corrente gravimétrica, expressa em amperes por grama (A/g), obtida pela normalização da corrente elétrica pela massa de material ativo dos eletrodos. Os voltamogramas apresentam formato aproximadamente retangular, característico de um comportamento predominantemente capacitivo, indicando armazenamento de carga majoritariamente associado à formação da dupla camada elétrica.

Adicionalmente, observa-se que o formato dos voltamogramas é preservado mesmo com o aumento da taxa de varredura, indicando boa resposta do sistema e sugerindo baixa limitação por difusão iônica dentro da faixa de operação analisada. Esse comportamento é indicativo de uma boa acessibilidade do eletrólito à superfície dos eletrodos e de uma adequada condução eletrônica no material ativo.

Na Figura 4(b), correspondente aos ensaios galvanostáticos de carga e descarga, a abscissa representa o tempo de carga e descarga, expresso em segundos (s), enquanto a ordenada corresponde ao potencial do dispositivo, expresso em volts (V). As medidas foram realizadas empregando diferentes correntes gravimétricas, de 2,5, 3,3 e 4,1 A/g.

Figura 4 – (a) Voltametrias Cíclicas sob diferentes taxas de varredura. (b) Carga-descarga do Supercapacitor sob 3 correntes gravimétricas diferentes



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

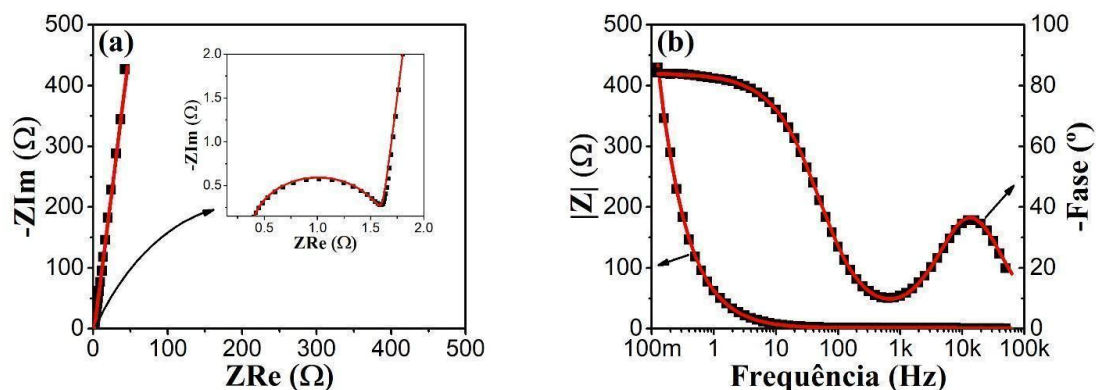
As análises galvanostáticas de carga e descarga, realizadas sob três diferentes correntes gravimétricas e apresentadas na Figura 4(b), corroboram os resultados obtidos por voltametria cíclica. As curvas exibem perfis aproximadamente lineares e simétricos durante as etapas de carga e descarga, comportamento característico de sistemas com resposta predominantemente capacitiva. A partir dessas curvas, foi determinada uma capacitância específica média de 2,3 F/g para o dispositivo, considerando-se as diferentes correntes gravimétricas aplicadas.

Embora o valor de capacitância obtido seja inferior ao reportado para dispositivos comerciais baseados em carvão ativado, os resultados são consistentes com a proposta do trabalho, que busca avaliar o comportamento eletroquímico de eletrodos baseados em VAMWCNTs diretamente crescidos sobre o substrato, sem etapas adicionais de otimização estrutural ou incorporação de materiais pseudocapacitivos.

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foi empregada para uma análise mais detalhada dos mecanismos de transporte de carga e das

resistências internas do dispositivo. Os diagramas de Nyquist e Bode, apresentados nas Figuras 5(a) e 5(b), respectivamente, juntamente com o ajuste por circuito elétrico equivalente, permitem descrever o comportamento do sistema em diferentes faixas de frequência. No diagrama de Nyquist [Figura 5(a)], a abscissa corresponde à componente real da impedância, Z_{Re} (Ω), associada predominantemente aos elementos resistivos do sistema, enquanto a ordenada representa o negativo da componente imaginária da impedância, $-Z_{Im}$ (Ω), relacionada à resposta reativa, especialmente ao comportamento capacitivo do dispositivo. O detalhe inserido na figura amplia a região de baixa impedância, permitindo melhor visualização dos fenômenos que ocorrem em altas frequências. No diagrama de Bode [Figura 5(b)], a abscissa representa a frequência do sinal alternado aplicado, expressa em hertz (Hz) e apresentada em escala logarítmica. A ordenada à esquerda corresponde ao módulo da impedância, $|Z|$ (Ω), enquanto a ordenada à direita representa o ângulo de fase, expresso em graus ($^\circ$). Esses parâmetros permitem avaliar a dependência da resposta eletroquímica do dispositivo com a frequência.

Figura 5 - Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE). (a) - Diagrama de Nyquist. (b) - Diagrama de Bode.



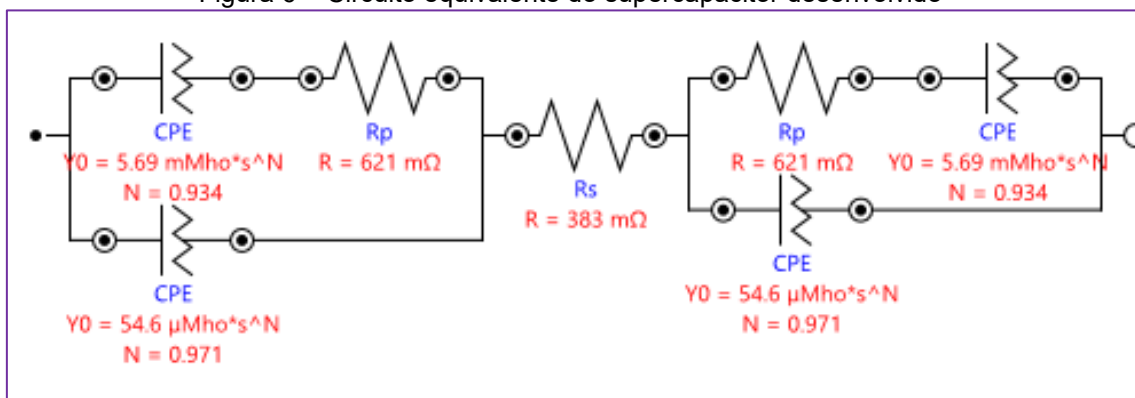
Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

No diagrama de Nyquist, observa-se uma reta aproximadamente vertical na região de baixas frequências, característica de sistemas com comportamento capacitivo dominante, confirmando a formação da dupla camada elétrica. Na região de altas frequências, próxima à origem, identifica-se a presença de um semicírculo, associado à resistência de transferência de carga nas interfaces eletrodo-eletrólito (Lu; Béguin; Frackowiak, 2013).

O circuito equivalente utilizado para o ajuste dos dados (Figura 6) foi obtido através do software *Nova* da Autolab, e inclui a resistência do eletrólito (R_s), com valor de aproximadamente 383 m Ω , e elementos associados à transferência de carga (R_p), além de elementos de fase constante (CPE), que foram empregados para representar desvios do comportamento capacitivo ideal. Os valores de expoente dos CPEs próximos da unidade indicam que o sistema

apresenta comportamento próximo ao de capacitores ideais, com pequenas variações atribuídas à rugosidade e heterogeneidade superficial dos eletrodos.

Figura 6 – Circuito equivalente do supercapacitor desenvolvido

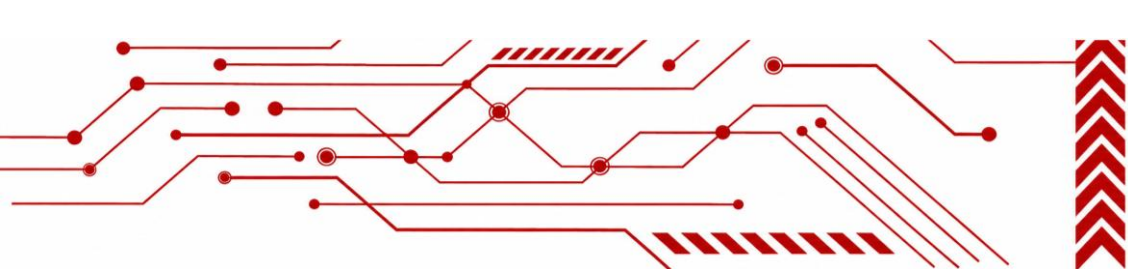


Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

De forma geral, os resultados de EIE confirmam que o dispositivo apresenta baixa resistência interna e comportamento predominantemente capacitivo, em concordância com os resultados obtidos por voltametria cíclica e carga-descarga galvanostática. Esses resultados evidenciam que a arquitetura baseada em VAMWCNTs crescidos diretamente sobre o substrato metálico é funcional do ponto de vista eletroquímico, embora apresente limitações em termos de capacitância específica, possivelmente associadas à ausência de processos de ativação ou de estratégias adicionais para otimização da área superficial eletroquimicamente acessível.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento e a caracterização de um supercapacitor baseado em eletrodos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas verticalmente alinhados (VAMWCNTs), crescidos diretamente sobre substratos metálicos por deposição química de vapor. A abordagem adotada possibilitou a obtenção de eletrodos sem a necessidade de etapas adicionais de deposição do material ativo ou do emprego de ligantes, contribuindo para a simplificação do processo de fabricação do dispositivo. As análises estruturais e morfológicas confirmaram a formação de nanotubos com organização adequada e características compatíveis com aplicações eletroquímicas, enquanto a espectroscopia Raman evidenciou a presença de domínios grafíticos bem definidos, ainda que com defeitos estruturais inerentes ao processo de síntese. Do ponto de vista eletroquímico, o dispositivo apresentou comportamento predominantemente capacitivo, com resposta estável em diferentes condições de operação, conforme observado nas análises de voltametria cíclica e carga-descarga galvanostática.



A espectroscopia de impedância eletroquímica permitiu uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos envolvidos, evidenciando baixa resistência interna e formação eficiente da dupla camada elétrica, além de um comportamento próximo ao ideal em termos capacitivos. Esses resultados demonstram que a arquitetura proposta é funcional e adequada para estudos de dispositivos de armazenamento eletroquímico de energia.

Embora os valores de capacitância específica obtidos ainda sejam inferiores aos de sistemas comerciais otimizados, os resultados são coerentes com a proposta exploratória do trabalho e indicam que melhorias no desempenho podem ser alcançadas por meio de estratégias como ativação dos eletrodos, modificação da estrutura superficial ou incorporação de materiais pseudocapacitivos.

Dessa forma, o estudo contribui para a compreensão do comportamento eletroquímico de eletrodos baseados em VAMWCNTs e reforça o potencial desses materiais para aplicações em supercapacitores. Como perspectivas para trabalhos futuros, destacam-se a otimização das condições de síntese, a avaliação de diferentes eletrólitos e a integração dos VAMWCNTs com outros materiais ativos, com o objetivo de investigar possíveis melhorias no desempenho eletroquímico dos dispositivos, incluindo sua capacitância específica e densidade de energia.

REFERÊNCIAS

BOCKRIS, J. O'M.; REDDY, A. K. N. **Modern electrochemistry**. New York: Plenum Press, 1970.

CONWAY, B. E.; PELL, W. G. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 7, p. 637-644, 2003.

FERRARI, A. C.; BASKO, D. M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene. **Nature Nanotechnology**, v. 8, p. 235–246, 2013.

GALINSKI, M.; LEWANDOWSKI, A.; STEPNIAK, I. **Electrochimica Acta**, v. 51, p. 5567-5580, 2006.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: eletromagnetismo**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v. 3.

JOHNSON, D. E.; HILBURN, J. L.; JOHNSON, J. R. **Fundamentos de análise de circuitos elétricos**. 4. ed. [S.l.]: [s.n.], 1994.

LU, M.; BÉGUIN, F.; FRACKOWIAK, E. (ed.). **Supercapacitors: materials, systems and applications**. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.



PETREUS, D.; MOGA, D.; GALATUS, R.; MUNTEANU, R. A. **Advances in Electrical and Computer Engineering**, v. 8, n. 1, p. 15-22, 2008.

STERN, O. **Zeitschrift für Elektrochemie**, v. 30, p. 508–516, 1924.

THOMSEN, C.; REICH, S. Double resonant Raman scattering in graphite. **Physical Review Letters**, v. 85, p. 5214-5217, 2000.

TSUDA, T.; HUSSER, C. L. **The Electrochemical Society Interface**, v. 16, p. 42-49, 2007.

VILAS BOAS, O. C. **Desenvolvimento de eletrodos de carvão ativado para aplicação em capacitores eletroquímicos de eletrólitos aquosos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/1091480>. Acesso em: 31 mar. 2026.

YU, A.; CHABOT, V.; ZHANG, J. **Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery: fundamentals and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2013.

ZHANG, L. L.; ZHAO, X. S. **Chemical Society Reviews**, v. 38, p. 2520–2531, 2009.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro, por meio do Projeto Jovem Pesquisador, Processo nº 2017/03640-1, que possibilitou a realização deste trabalho.