

CAPACITORES ELETROQUÍMICOS DE DUPLA CAMADA ELÉTRICA: AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE ELETRODOS DE NANOTUBOS DE CARBONO

Otávio Cristiano Vilas Boas¹

¹ Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP

Autor Correspondente: otaviob@unicamp.br

RESUMO

Os capacitores eletroquímicos de dupla camada elétrica (EDLCs), também conhecidos como supercapacitores, destacam-se como dispositivos promissores para armazenamento de energia devido à sua elevada capacidade de potência, rápida resposta de carga e descarga e longa vida útil. O desempenho desses dispositivos depende fortemente da área superficial e da condutividade elétrica dos eletrodos empregados. Neste trabalho, foi realizada uma avaliação comparativa de eletrodos de nanotubos de carbono obtidos por duas rotas distintas: deposição química por vapor (CVD) e aplicação de tinta condutora à base de nanotubos. Os eletrodos foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia Raman, enquanto o desempenho eletroquímico foi analisado por voltametria cíclica e testes de carga e descarga galvanostáticos. As imagens de MEV evidenciaram crescimento vertical e alinhado dos nanotubos nos eletrodos obtidos por CVD, enquanto os eletrodos produzidos por tinta apresentaram morfologia mais irregular, com formação de aglomerados. Os resultados eletroquímicos indicaram maior capacitância total para os dispositivos com eletrodos CVD (7,9 mF) em comparação aos de tinta condutora (3,3 mF). As diferenças observadas foram atribuídas à organização estrutural dos nanotubos e à influência da matriz polimérica presente na tinta, que contribui para maior resistência interna. Os resultados demonstram que, embora a técnica CVD proporcione melhor desempenho eletroquímico, a tinta condutora apresenta vantagens em termos de simplicidade e potencial de escalabilidade, evidenciando a importância da escolha do método de fabricação conforme a aplicação pretendida.

Palavras-chave: capacitores eletroquímicos de dupla camada elétrica; nanotubos de carbono; caracterização eletroquímica; armazenamento de energia.

ABSTRACT

Electrochemical double-layer capacitors (EDLCs), also known as supercapacitors, stand out as promising energy storage devices due to their high power capability, fast charge–discharge response, and long cycle life. The performance of these devices strongly depends on the surface area and electrical conductivity of the electrodes employed. In this work, a comparative evaluation of carbon nanotube electrodes obtained by two different routes was carried out: chemical vapor deposition (CVD) and the application of carbon nanotube-based conductive ink. The electrodes were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and Raman spectroscopy, while the electrochemical performance was analyzed by cyclic voltammetry and galvanostatic charge–discharge tests. SEM images revealed vertically aligned growth of nanotubes in the CVD electrodes, whereas electrodes produced by conductive ink exhibited a more irregular morphology with the formation of agglomerates. The electrochemical results indicated higher total capacitance for the devices with CVD electrodes (7.9 mF) compared to those with conductive ink electrodes (3.3 mF). The observed differences were attributed to the structural organization of the nanotubes and to the influence of the polymeric matrix present in the ink, which contributes to higher internal resistance. The results demonstrate that although the CVD technique provides better electrochemical performance, conductive ink offers advantages in terms of simplicity and scalability potential, highlighting the importance of selecting the fabrication method according to the intended application.

Keywords: electrochemical double-layer capacitors; carbon nanotubes; electrochemical characterization; energy storage.

1 INTRODUÇÃO

Os capacitores eletroquímicos de dupla camada elétrica (EDLCs), frequentemente referidos como supercapacitores, são dispositivos de armazenamento de energia que se destacam devido à sua alta capacidade de potência, longa vida útil e rápida taxa de carga e descarga. Ao contrário das baterias convencionais, que operam por meio de reações químicas, os EDLCs utilizam mecanismos não faradâicos, baseados na formação de dupla camada iônica na interface eletrodo-eletrólito. Esse processo permite uma resposta rápida e uma durabilidade superior, tornando os EDLCs particularmente atraentes para aplicações em que o ciclo de vida e a eficiência energética são críticos, como em sistemas de recuperação de energia e dispositivos móveis (González *et al.*, 2016).

Com o crescente avanço das tecnologias e a demanda por sistemas mais eficientes de armazenamento de energia, os capacitores eletroquímicos se

tornam cada vez mais essenciais. Eles têm um papel fundamental em diversas áreas, como na integração de energias renováveis (solar, eólica), em veículos elétricos, em dispositivos móveis e até em sistemas de *backup* de energia. A capacidade de fornecer altas potências rapidamente, sem a degradação associada ao uso prolongado, é um dos fatores que faz dos supercapacitores uma solução ideal para essas aplicações. Além disso, com o aumento da necessidade por sistemas de armazenamento energético em resposta à crescente demanda por energia limpa e sustentável, os supercapacitores têm se mostrado uma tecnologia crucial no apoio à transição energética (Lu; Béguin; Frackowiak, 2013).

A eficiência dos EDLCs depende principalmente de dois fatores: a área superficial do eletrodo e a condutividade elétrica do material utilizado. Nesse contexto, os nanotubos de carbono (CNTs) têm emergido como materiais promissores, devido à sua elevada área superficial específica, alta condutividade elétrica e estabilidade estrutural. A utilização de CNTs em eletrodos para EDLCs pode, teoricamente, proporcionar uma significativa melhoria no desempenho desses dispositivos, tornando-os mais eficientes em termos de armazenamento e entrega de energia. No entanto, a produção de eletrodos de CNTs de alta qualidade e com boa performance eletroquímica ainda apresenta desafios técnicos, especialmente quando se considera a escala de produção e a custo-benefício (Zhong *et al.*, 2015).

Dentre as diversas rotas para obtenção de eletrodos à base de CNTs, destacam-se a síntese dos nanotubos por deposição química por vapor (CVD) e a preparação de tintas condutoras contendo suspensões de nanotubos de carbono. A técnica CVD, embora altamente eficaz na obtenção de eletrodos com nanotubos alinhados, está limitada em termos de escalabilidade e custo. Em contrapartida, a tinta condutora oferece uma alternativa mais simples e escalável, mas os desafios relacionados à homogeneidade e à condutividade dos eletrodos ainda precisam ser superados (ZHONG *et al.*, 2015).

Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação comparativa de eletrodos de nanotubos de carbono obtidos por deposição química por vapor (CVD) e por meio da formulação de tinta condutora, aplicados em capacitores eletroquímicos de dupla camada elétrica (EDLCs). A comparação concentra-se nas características estruturais e morfológicas dos eletrodos e em seu desempenho eletroquímico nos dispositivos desenvolvidos, buscando correlacionar o método de fabricação com o comportamento observado nos EDLCs. Dessa forma, pretende-se compreender como cada rota de obtenção influencia a formação da dupla camada elétrica e o desempenho global dos dispositivos, contribuindo para o aprimoramento de sistemas de armazenamento de energia baseados em nanotubos de carbono.

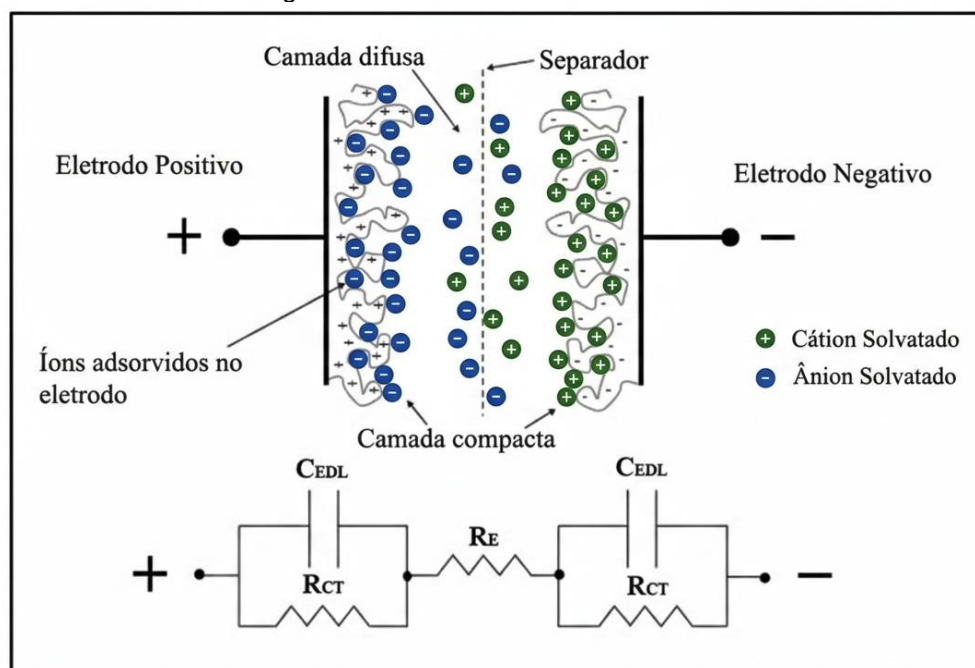
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os capacitores eletroquímicos de dupla camada elétrica (EDLCs), frequentemente conhecidos como supercapacitores, são dispositivos de armazenamento de energia que se destacam por sua alta densidade de potência, rápida taxa de carga e descarga, e vida útil superior quando comparados a baterias convencionais. Ao contrário das baterias, que operam por meio de reações químicas, os EDLCs funcionam por meio de um processo não faradáico, baseado na formação de uma dupla camada de íons na interface entre o eletrodo e o eletrólito. Esse processo ocorre quando íons do eletrólito se acumulam na superfície do eletrodo, criando uma camada de carga de alta densidade. Esse fenômeno, conhecido como a formação da dupla camada elétrica, é fundamental para o funcionamento dos EDLCs, pois permite a acumulação de energia de maneira eficiente e não destrutiva. A grande vantagem desse processo é sua durabilidade superior e alta eficiência em ciclos de carga e descarga, o que confere aos EDLCs uma vida útil mais longa em comparação com as baterias convencionais.

A estrutura de um capacitor eletroquímico de dupla camada elétrica (EDLC) é composta por dois eletrodos, geralmente feitos de materiais com alta área superficial, como os nanotubos de carbono, grafeno ou carvão ativado, que são essenciais para maximizar a quantidade de carga armazenada. Esses eletrodos estão imersos em um eletrólito, que pode ser aquoso, orgânico ou iônico, e desempenha um papel crucial na formação da dupla camada elétrica. O eletrólito fornece os íons necessários para a formação das camadas de carga na interface eletrodo-eletrólito. Entre os dois eletrodos, encontra-se um separador, geralmente feito de um material poroso, como a fibra de vidro, que tem a função de impedir o contato direto entre os eletrodos, evitando curtos-circuitos, enquanto permite a passagem de íons para facilitar o processo de carga e descarga. A combinação desses elementos – os eletrodos com alta área superficial, o eletrólito e o separador – resulta em um dispositivo eficiente, capaz de armazenar e liberar grandes quantidades de energia de maneira rápida, com ciclos de vida prolongados (Vilas Boas, 2019).

A figura 1 ilustra a estrutura interna de um EDLC.

Figura 1 - Estrutura interna de um EDLC



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A capacidade de armazenamento de energia de um EDLC está diretamente relacionada à área superficial do eletrodo, já que a quantidade de íons que pode ser adsorvida é maior quanto maior for a área disponível na superfície do material. Para otimizar essa área, materiais com alta área superficial e boa condutividade elétrica são necessários. Nesse contexto, os nanotubos de carbono (CNTs) têm atraído grande atenção, pois apresentam excelentes propriedades elétricas e mecânicas, incluindo alta condutividade elétrica, resistência à corrosão e estabilidade química. Além disso, a estrutura dos CNTs oferece uma grande área de superfície para adsorção de íons, o que os torna ideais para o uso em eletrodos de EDLCs.

Os nanotubos de carbono podem ser classificados em duas categorias: nanotubos de carbono de paredes simples (SWCNTs) e nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs). Ambos os tipos possuem propriedades excepcionais, mas a escolha entre um ou outro depende da aplicação específica. A organização e a orientação dos nanotubos nos eletrodos são aspectos cruciais para otimizar a condutividade e a eficiência na adsorção de íons. O alinhamento controlado dos nanotubos pode melhorar significativamente o desempenho dos EDLCs, permitindo que a carga seja armazenada de forma mais eficiente e que a condução elétrica seja otimizada. Para esse fim, técnicas como a deposição química por vapor (CVD) têm sido amplamente utilizadas. A CVD permite um controle preciso sobre o crescimento dos nanotubos, resultando em uma estrutura organizada e bem alinhada, ideal para a fabricação de eletrodos de alto desempenho (Simon; Gogotsi, 2008).

No entanto, a técnica CVD, embora eficaz, enfrenta desafios em termos de escalabilidade e custo, limitando sua aplicação em larga escala. Em contrapartida, a produção de eletrodos utilizando tinta condutora, que envolve a suspensão de nanotubos de carbono em um veículo condutor como resinas ou vernizes, oferece uma alternativa mais acessível e escalável. A aplicação de tinta condutora permite a fabricação de eletrodos sobre diferentes substratos metálicos de maneira mais simples e econômica. No entanto, a tinta condutora também apresenta desafios relacionados à distribuição homogênea dos nanotubos e à resistência adicional causada pela resina, o que pode reduzir a eficiência de condução elétrica e a interação íon-material, impactando negativamente o desempenho dos dispositivos (Simon; Gogotsi, 2008).

A escolha entre as técnicas de fabricação de eletrodos, como CVD e tinta condutora, depende de uma série de fatores, como o custo, a escalabilidade e o desempenho desejado. Embora a CVD proporcione melhores resultados em termos de morfologia e condutividade elétrica, a tinta condutora se destaca pela flexibilidade e facilidade de produção em grande escala, tornando-a uma opção vantajosa para aplicações em que o custo e a produção em massa são prioridades (Zhang; Zhao, 2009).

Em resumo, os capacitores eletroquímicos de dupla camada elétrica representam uma alternativa promissora para o armazenamento de energia, oferecendo vantagens como alta potência e durabilidade. O desempenho desses dispositivos depende da otimização da área superficial dos eletrodos e da condutividade elétrica dos materiais empregados. Os nanotubos de carbono, devido às suas características excepcionais, desempenham um papel crucial no aprimoramento do desempenho dos EDLCs. A escolha das técnicas de fabricação, como CVD ou tinta condutora, deve ser cuidadosamente considerada para maximizar a eficiência e a escalabilidade dos dispositivos (Vilas Boas, 2019).

3 METODOLOGIA

Neste estudo, foram investigadas duas abordagens distintas para a preparação dos eletrodos de nanotubos de carbono: a deposição química por vapor (CVD) e a produção de tinta condutora. A preparação dos eletrodos por CVD foi realizada utilizando um forno de CVD térmico, desenvolvido especificamente para o crescimento de nanotubos de carbono. A solução utilizada como fonte de carbono consistia de cânfora (54,5%w/w) diluída em álcool etílico (43,5%w/w), sendo o nitrato de níquel (2%w/w) empregado como catalisador. O vapor dessa solução foi transportado por gás nitrogênio, permitindo a deposição dos nanotubos de carbono sobre substratos metálicos de aço inox, alumínio e cobre. O processo de crescimento foi conduzido a 750°C durante 30 minutos, com a aplicação de um gradiente de pressão para otimizar a deposição. Uma foto do forno CVD utilizado pode ser observada na Figura 2.

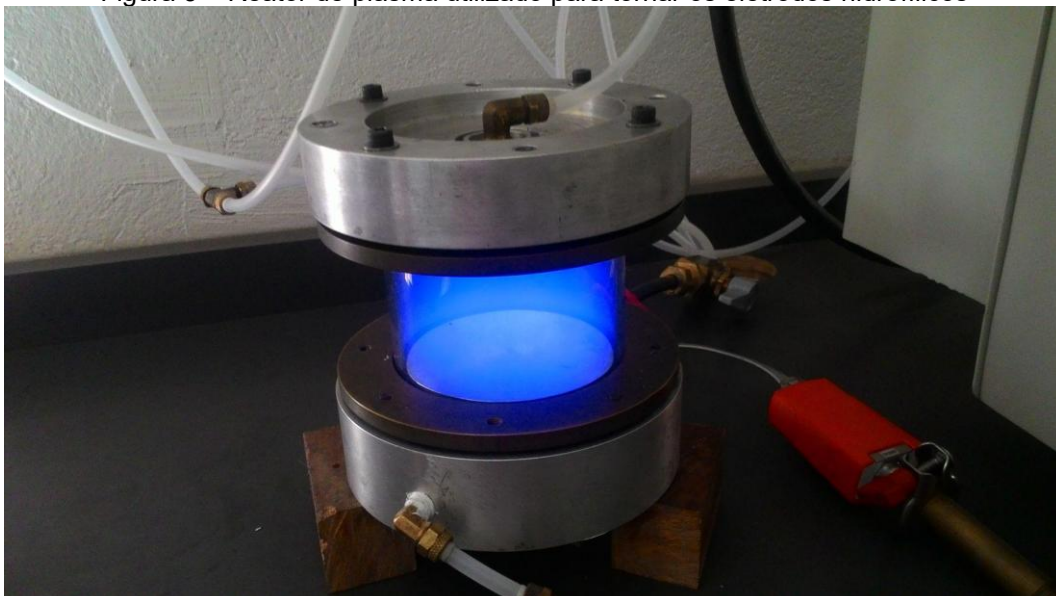
Figura 2 - Foto do Forno CVD utilizado



Fonte: Arquivo pessoal do autor (2026).

Após o crescimento, os nanotubos de carbono crescidos sobre os substratos de aço inox eram evidentemente hidrofóbicos. Para garantir que os eletrodos de nanotubos se tornassem hidrofílicos, para a melhor molhabilidade do eletrólito, estes foram submetidos a um tratamento com plasma de oxigênio por 2 minutos. O reator de plasma utilizado pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Reator de plasma utilizado para tornar os eletrodos hidrofílicos

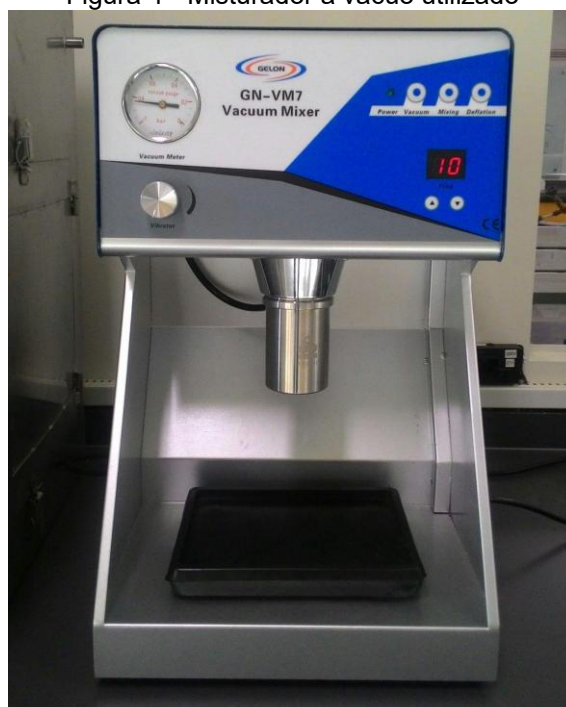


Fonte: Arquivo pessoal do autor (2026).

Por outro lado, para a produção dos eletrodos com tinta condutora, o pó de nanotubos de carbono foi misturado com um verniz automotivo comercial utilizado na pintura de chassis de veículos, que garante boa aderência sobre

materiais metálicos. A mistura foi realizada em um misturador a vácuo para assegurar a homogeneização da suspensão. Tal misturador pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Misturador à vácuo utilizado

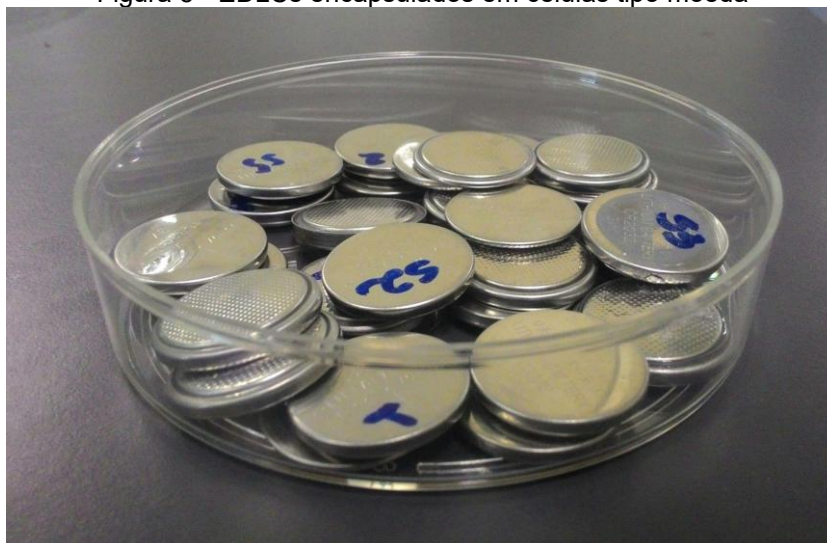


Fonte: Arquivo pessoal do autor (2026).

Em seguida, a tinta foi aplicada sobre substratos metálicos de aço inox utilizando pincel e espátula, o que permitiu a produção de eletrodos em uma variedade de materiais, com a vantagem de maior escalabilidade no processo.

Os dispositivos de capacitores eletroquímicos de dupla camada elétrica (EDLCs) foram montados em células tipo moeda. Para isso, os eletrodos foram imersos em uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 2,5 mol/L, que atuou como eletrólito. Entre os eletrodos, foi utilizado um separador de fibra de vidro mesoporosa para evitar o contato direto entre eles, permitindo a passagem dos íons. A célula foi então selada no formato de moeda, o que possibilitou a obtenção de protótipos compactos para as análises subsequentes. A figura 5 retrata os dispositivos montados em célula tipo moeda CR2032.

Figura 5 - EDLCs encapsulados em células tipo moeda



Fonte: Arquivo pessoal do autor (2026).

A caracterização dos materiais utilizados para os eletrodos foi realizada por diversas técnicas, com o objetivo de avaliar a morfologia, estrutura e propriedades dos nanotubos de carbono, bem como a eficiência dos eletrodos. A morfologia e a distribuição dos nanotubos foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando um microscópio eletrônico de varredura de alta resolução. As propriedades vibracionais dos nanotubos de carbono foram investigadas por Espectroscopia Raman, fornecendo informações sobre a qualidade do material, defeitos e o grau de ordenamento estrutural dos nanotubos.

Para avaliar o desempenho eletroquímico dos eletrodos, foram realizados testes de Voltametria Cíclica (CV) e de Cargas e Descargas Galvanostáticas. No teste de Voltametria Cíclica, as células foram submetidas a taxas de varredura de 100 mV/s para obter o perfil de capacitância dos dispositivos, e os resultados foram analisados para identificar o comportamento típico de um EDLC. Já nos testes de Carga e Descarga Galvanostáticas, foi aplicada uma corrente constante de 250 μA para analisar a eficiência de carga e descarga dos dispositivos, permitindo também calcular a capacitância dos mesmos e avaliar a resistência ôhmica e o comportamento de descarga.

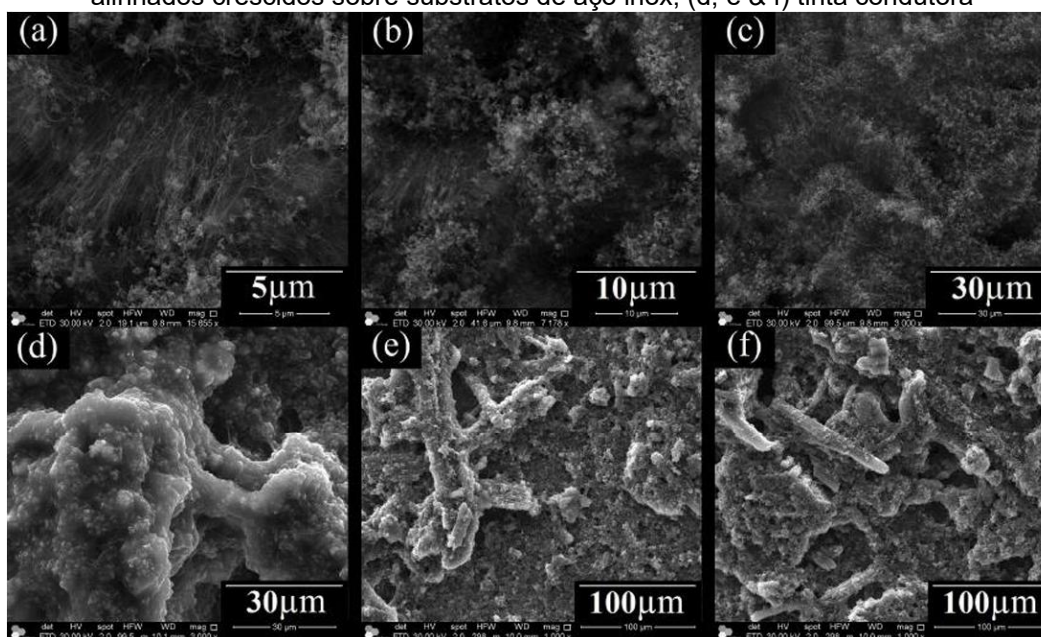
Por fim, os resultados dos testes eletroquímicos foram analisados para comparar o desempenho dos dispositivos fabricados com os dois tipos de eletrodos. Foram calculadas as capacitâncias específicas de cada tipo de eletrodo, com o objetivo de avaliar a capacidade de armazenamento de carga e a eficiência na entrega de energia dos dispositivos. Esses dados foram fundamentais para determinar a viabilidade de cada técnica de fabricação e seu impacto no desempenho dos capacitores eletroquímicos de dupla camada elétrica (EDLCs), permitindo uma

compreensão mais aprofundada das vantagens e limitações de cada abordagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização morfológica dos eletrodos foi realizada utilizando técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia Raman. As imagens de MEV dos eletrodos de nanotubos de carbono crescidos por deposição química de vapor (CVD) revelaram um crescimento vertical bem alinhado dos nanotubos sobre substratos metálicos (Figura 6 a, b, c). Esse alinhamento é vantajoso, pois oferece uma área superficial maior, o que facilita a adsorção de íons e proporciona uma condução elétrica mais eficiente. Em contraste, os eletrodos produzidos com tinta condutora apresentaram uma morfologia mais irregular, com aglomerados de nanotubos de carbono (Figura 6 d, e, f). Esses aglomerados indicam uma distribuição não homogênea dos nanotubos, o que pode impactar negativamente a eficiência da adsorção de íons e, conseqüentemente, a condução elétrica (Meysami *et al.*, 2013).

Figura 6 - Microscopia Eletrônica de varredura: (a, b & c) Nanotubos de carbono verticalmente alinhados crescidos sobre substratos de aço inox; (d, e & f) tinta condutora



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

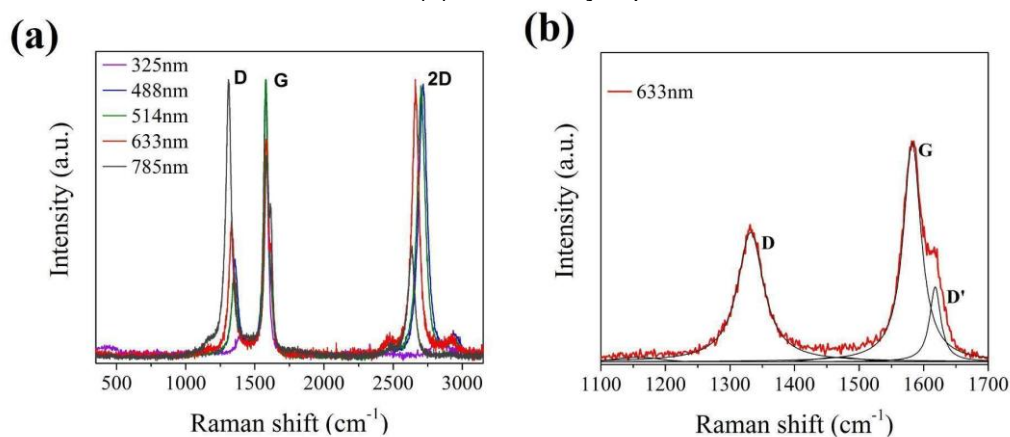
Os Nanotubos de Carbono também foram caracterizados utilizando-se um Espectroscópio Raman equipado com 5 diferentes linhas de excitação: 785nm, 633nm, 514nm, 488nm e 325nm. Com intuito de se visualizar o deslocamento de bandas devido às 5 fontes de excitação, foi elaborado um gráfico que demonstra a sobreposição dos espectros para as 5 linhas de lasers. A Figura 7-(a) apresenta a sobreposição dos espectros Raman obtidos para as 5 linhas de

laser, evidenciando-se os picos centrados em $\sim 1350\text{ cm}^{-1}$, $\sim 1580\text{ cm}^{-1}$ e $\sim 2700\text{ cm}^{-1}$, conhecidos na literatura como bandas D, G e G' (2D) respectivamente. A banda D é atribuída aos defeitos nas hibridizações sp^2 do Carbono (Shimodaira; Masui, 2002).

Relatando de forma breve, essa hibridização pode ser entendida como três ligações Sigma do Carbono a outros três átomos de carbono em ângulo de 180° (plano basal) e outra ligação Pi. A banda G é atribuída a um dos dois modos E_{2g} correspondentes às vibrações de estiramento no plano basal (domínios sp^2) de grafite monocristalino ou grafeno (Callister Jr.; Rethwisch, 2007).

Fica evidente que as bandas G nos espectros Raman obtidos através de tais linhas de excitação não apresentam desvio. Em outras palavras, independente do comprimento de onda do laser que excitou a amostra o deslocamento Raman do plano basal dos nanotubos é o mesmo. Isso não acontece para a banda D, uma vez que quanto maior a Energia de excitação ($E = h \times f$), maior o deslocamento Raman. A banda 2D ou G' é coincidente numericamente com o dobro do deslocamento da banda D, estando, contudo, relacionada com a fase cristalina do material. Já a Figura 7-(b) exemplifica uma das deconvoluções realizadas (linha de 633nm) onde observa-se a chamada banda D', não evidente no espectro sem a deconvolução.

Figura 7 - (a) Sobreposição dos espectros Raman dos Nanotubos de Carbono para 5 diferentes linhas de lasers. (b) Deconvolução para a linha de 633nm.

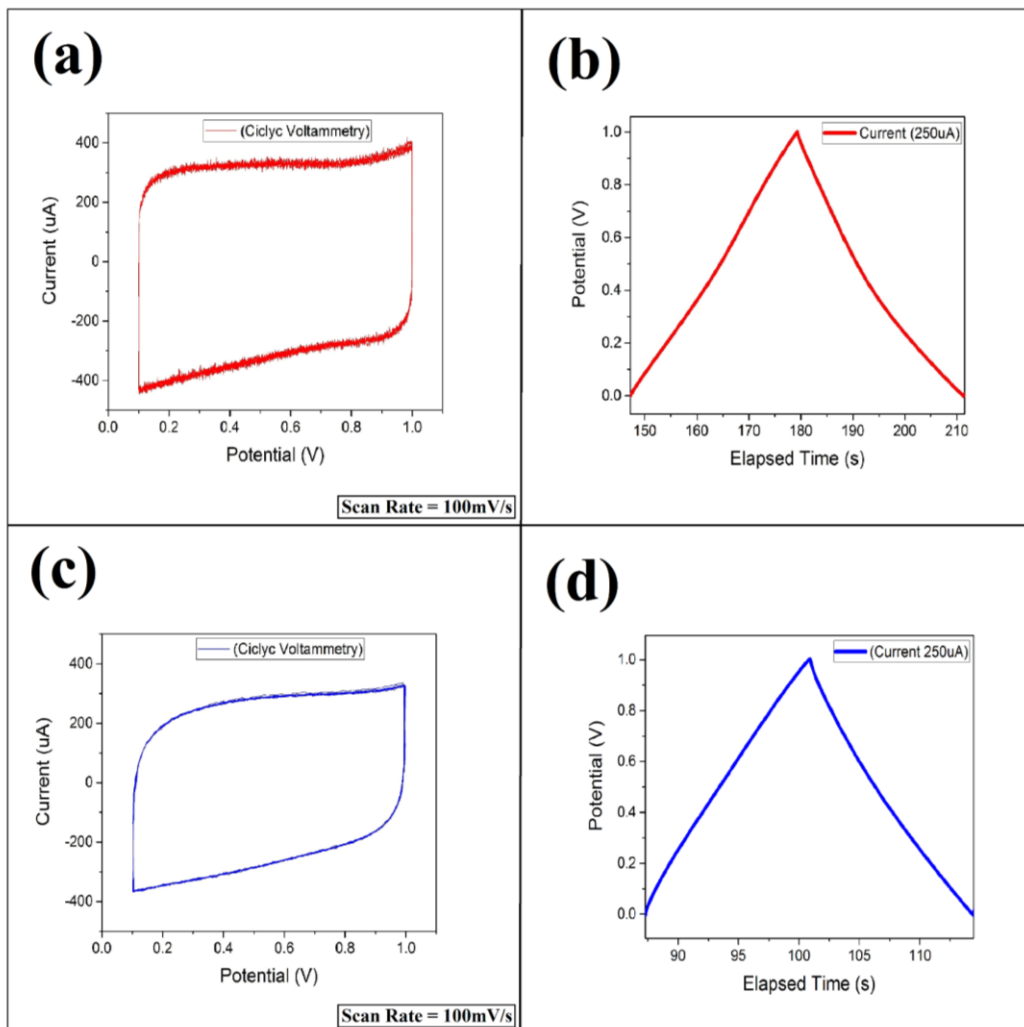


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A técnica de voltametria cíclica (CV) foi realizada para avaliar o comportamento capacitivo dos dispositivos. Os resultados mostraram que ambos os tipos de eletrodos apresentaram um perfil de voltametria cíclica típico de capacitores eletroquímicos de dupla camada elétrica, com uma curva retangular que indica a formação da camada de íons na interface eletrodo-eletrólito. A análise da voltametria revelou uma maior área de ciclo para os dispositivos fabricados com eletrodos CVD, sugerindo uma maior capacidade de armazenamento de carga.

Em comparação, os dispositivos com eletrodos de tinta condutora apresentaram uma curva de voltametria mais comprimida, indicando um desempenho inferior. As voltametrias cíclicas obtidas podem ser visualizadas na figura 8 - a & c.

Figura 8 - (a) e (b) denotam respectivamente a Voltametria Cíclica e Carga/descarga do EDLC com eletrodo obtido via CVD; (c) e (d) denotam a Voltametria Cíclica e a Carga/descarga do EDLC com eletrodo de tinta, respectivamente



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Os testes de carga e descarga galvanostáticos foram realizados para calcular a capacitância dos dispositivos, com base no período de descarga. A fórmula utilizada foi a seguinte:

$$i(t) = C \cdot dV/dt \quad (I)$$

Em que:

$i(t)$ = corrente de descarga;

C = a capacitância do EDLC;

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

Os dispositivos com eletrodos obtidos por CVD apresentaram uma capacitância de 7,9 mF, enquanto os dispositivos com eletrodos produzidos a partir de tinta condutora apresentaram uma capacitância de 3,3 mF. Essa diferença pode ser atribuída, em parte, à maior massa de material ativo presente nos eletrodos obtidos por CVD, bem como à morfologia mais organizada e alinhada dos nanotubos de carbono crescidos diretamente sobre o substrato. Essa estrutura favorece a acessibilidade da superfície ativa e facilita a adsorção de íons do eletrólito, contribuindo para um melhor desempenho eletroquímico.

Por outro lado, os eletrodos obtidos a partir da tinta condutora contêm uma matriz polimérica proveniente da resina do verniz automotivo utilizado como ligante. A presença dessa resina pode promover o bloqueio parcial dos poros da estrutura formada pelos nanotubos de carbono, reduzindo a área superficial efetivamente acessível ao eletrólito. Como consequência, ocorre uma menor penetração dos íons do eletrólito na estrutura porosa do eletrodo, o que resulta em uma diminuição da capacitância observada para esses dispositivos.

Além disso, a presença da matriz polimérica também contribui para o aumento da resistência ôhmica do eletrodo, reduzindo a eficiência durante os processos de carga e descarga, conforme pode ser observado pela comparação das curvas apresentadas na Figura 8 (b) e (d). A inclinação das curvas de descarga evidencia ainda diferenças importantes entre os dois tipos de eletrodos. Nos dispositivos com eletrodos de tinta condutora, observa-se uma queda inicial de tensão mais acentuada durante a descarga, característica associada a uma maior resistência interna.

Esse comportamento também é corroborado pelos resultados de voltametria cíclica, que indicam uma maior resistência ôhmica nos dispositivos com eletrodos de tinta condutora. Tal efeito está relacionado, principalmente, à redução da acessibilidade dos íons do eletrólito à superfície ativa do material, causada pelo bloqueio parcial dos poros dos nanotubos de carbono pela resina presente na tinta.

Em termos de custo e escalabilidade, a produção de eletrodos com tinta condutora apresenta vantagens significativas sobre o método CVD. A tinta condutora permite a fabricação de eletrodos de forma mais simples e acessível, com maior flexibilidade no controle das dimensões do dispositivo. No entanto, a qualidade do eletrodo obtido por CVD, especialmente no que se refere à morfologia e condutividade, supera a dos eletrodos produzidos com tinta, o que resulta em um desempenho superior em termos de capacitância.

5 CONCLUSÕES

Este estudo comparou a fabricação de eletrodos de nanotubos de carbono por dois métodos distintos: deposição química por vapor (CVD) e produção de tinta condutora. Os resultados demonstraram que, embora ambos os métodos sejam viáveis para a fabricação de capacitores eletroquímicos de dupla camada elétrica (EDLCs), o método CVD apresenta desempenho superior em termos de capacitância, devido à maior homogeneidade e organização estrutural dos nanotubos de carbono.

Os dispositivos com eletrodos CVD apresentaram capacitância total mais alta, alcançando 7,9 mF, em comparação com 3,3 mF para os eletrodos de tinta condutora. Essa diferença pode ser atribuída à maior massa de material ativo nos eletrodos CVD e à melhor condutividade elétrica, que facilita a adsorção de íons do eletrólito e melhora a eficiência do armazenamento de carga. Por outro lado, os eletrodos de tinta condutora mostraram maior resistência ôhmica e uma menor capacidade de adsorção de íons, devido à presença de resina que bloqueia os poros do material ativo.

Em termos de escalabilidade e custo, a utilização da tinta condutora representa uma alternativa promissora, pois permite a fabricação de eletrodos sobre uma maior variedade de substratos e em maior escala, sem a necessidade de equipamentos especializados como o forno de CVD. Embora os eletrodos de tinta condutora não apresentem desempenho superior ao CVD, eles oferecem uma abordagem mais simples e acessível para a produção de dispositivos de supercapacitores.

Este estudo abre caminho para futuras investigações, visando a melhoria da performance dos eletrodos de tinta condutora, com foco na redução da resistência ôhmica e na melhor distribuição dos nanotubos. Além disso, a experimentação com diferentes tipos de eletrólitos e membranas mesoporosas pode potencializar o desempenho dos dispositivos e permitir o aumento da capacitância e eficiência geral dos capacitores eletroquímicos.

REFERÊNCIAS

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering**: an introduction. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

GONZÁLEZ, A.; GOIKOLEA, E.; ANDONI, J.; MYSYK, R. Review on supercapacitors: technologies and materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1189–1206, 2016.

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

MEYSAMI, S. S.; DILLON, F.; KOÓS, A. A.; ASLAM, Z.; GROBERT, N. Aerosol-assisted chemical vapour deposition synthesis of multi-wall carbon nanotubes: I. Mapping the reactor. **Carbon**, v. 58, p. 151-158, 2013.

SHIMODAIRA, N.; MASUI, A. Raman spectroscopic investigations of activated carbon materials. **Journal of Applied Physics**, v. 92, n. 2, p. 902-909, 2002.

SIMON, P.; GOGOTSI, Y. Materials for electrochemical capacitors. **Nature Materials**, v. 7, n. 11, p. 845-854, 2008.

STERN, O. Zur Theorie der elektrolytischen Doppelschicht. **Zeitschrift für Elektrochemie**, v. 30, p. 508–516, 1924.

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/Detail/1091480>. Acesso em: 3 mar. 2026.

ZHANG, L. L.; ZHAO, X. S. Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. **Chemical Society Reviews**, v. 38, n. 9, p. 2520-2531, 2009.

ZHONG, C.; DENG, Y.; HU, W.; QIAO, J.; ZHANG, L.; ZHANG, J. A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors. **Chemical Society Reviews**, v. 44, p. 7484-7499, 2015.