

INFORMAÇÕES GERAIS DO TRABALHO

Título do Trabalho: Preparação e Caracterização de Supercapacitores Sólidos Baseados em Eletrodos de Nanotubos de Carbono e Eletrólito Polimérico Gel

Autor (es): Pedro Santos Candiotto de Oliveira (IC), Glaura Goulart Silva (PQ), Rodrigo Lassarote Lavall (PQ), João Paulo Campos Trigueiro (PQ)

Palavras-chave: supercapacitores, eletroquímica, nanotubos de carbono, eletrólito polimérico gel.

Campus: Betim (IFMG), UFMG - Campus Pampulha (Cooperação Técnica).

Área do Conhecimento (CNPq): 1.06.03.02-6 (Físico-química).

RESUMO

No presente trabalho construíram-se capacitores eletroquímicos de dupla camada (supercapacitores) de alto desempenho totalmente no estado sólido. Para isso, foi sintetizado um eletrólito polimérico gel a partir de um poli(líquido iônico) preparado por uma reação de troca iônica no polímero comercial cloreto de poli(dialildimetilamônio) (PILCI). O supercapacitor foi fabricado a partir de eletrodos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizados (f-MWCNT) e depositados sobre um coletor de corrente de aço inox. O eletrólito sintetizado apresentou condutividade de $3,2 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e janela de estabilidade eletroquímica de $2,8 \text{ V}$, determinadas por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e voltametria de varredura linear, respectivamente. O supercapacitor preparado apresentava-se totalmente no estado sólido, mecanicamente estável e de forma miniaturizada. O dispositivo foi caracterizado pelas técnicas eletroquímicas de EIE, voltametria cíclica (VC) em dois e em três eletrodos e por carga e descarga galvanostática com monitoramento simultâneo dos potenciais em 2,3 eletrodos. O supercapacitor exibiu uma janela eletroquímica de estabilidade de $2,5 \text{ V}$, capacitância de célula de $11,7 \text{ F g}^{-1}$ (o eletrodo positivo apresentou capacitância de $49,1 \text{ F g}^{-1}$ e o negativo de $41,2 \text{ F g}^{-1}$), densidade de energia de $9,8 \text{ W h Kg}^{-1}$, densidade de potência de 532 W kg^{-1} , e eficiências coulômbica e energética de $96,6 \%$ e $73,0 \%$, respectivamente.

INTRODUÇÃO:

Capacitores eletroquímicos de dupla camada ou Supercapacitores (SCs) são dispositivos de armazenamento de energia que adquiriram grande importância durante a última década considerando a demanda atual crescente por fontes de energia que causem cada vez menos impacto ambiental e também a necessidade de diminuir o consumo de fontes de energia não renováveis. SCs apresentam um importante papel na redução do consumo e desperdício de energia, uma vez que podem armazenar energia gerada a partir de outros processos. Tais dispositivos são compostos por um eletrodo, eletrólito, separador e um coletor de corrente, que conecta o dispositivo a um circuito externo. O material do eletrodo deve apresentar alta área superficial, poros acessíveis aos íons do eletrólito para formar uma boa e eficiente dupla camada elétrica e armazenar grandes quantidades de energia.¹

Nanomateriais de carbono são excelentes materiais para eletrodos devido ao fato de possuírem alta área superficial, baixa densidade e grande inércia química. Grafeno, carvão ativado e nanotubos de carbono são alguns exemplos desses materiais. Apesar de possuírem área superficial inferior à dos carvões ativados, os nanotubos de carbono possuem condutividade elétrica mais elevada devido à presença de átomos de carbono com hibridização sp^2 , que fornecem elétrons capazes de se mover e conduzir corrente elétrica, além de possuírem a capacidade de se auto organizarem em aglomerados, gerando grande quantidade de mesoporos (diâmetro de poro de 2 a 50 nm) capazes de serem acessados de forma eficiente por íons do eletrólito.²

Recentemente, supercapacitores têm sido utilizados em aplicações cada vez mais específicas e tecnológicas, principalmente devido ao fato de que tais dispositivos podem fornecer altas densidades de energia e potência, segurança e boa ciclabilidade. Outros requisitos da microeletrônica atual para tais dispositivos são a ausência de vazamentos e dispositivos totalmente no estado sólido.³

Líquidos iônicos são considerados bons eletrólitos dadas algumas de suas características de destaque tais como alta janela de estabilidade eletroquímica, estabilidade térmica, alta condutividade iônica e baixas pressão de vapor. É necessário, porém, estabelecer melhorias para os supercapacitores, principalmente no que diz respeito às propriedades mecânicas, para se obter um dispositivo final completamente sólido. Nesse contexto, destacam-se os chamados eletrólitos géis (preparados pela incorporação de um eletrólito em uma matriz polimérica) que superam características dos eletrólitos líquidos em muitos aspectos, tais como a ausência de vazamentos, reações indesejadas com materiais do eletrodo,

estabilidade, possibilidade de miniaturização e flexibilização dos dispositivos. Outro ponto de destaque se refere às boas propriedades de transporte, muitas vezes comparáveis às dos líquidos iônicos puros.⁴

Novas estratégias têm sido desenvolvidas na tentativa de se produzir eletrólitos sólidos avançados com propriedades superiores aos tradicionalmente preparados e com maior compatibilidade possível entre o líquido iônico, responsável pelas propriedades eletroquímicas do eletrólito, e a matriz polimérica, responsável pelas propriedades mecânicas dos eletrólitos. Entre essas estratégias, destaca-se a polimerização de líquidos iônicos, gerando os chamados poli(líquidos iônicos) ou PILs. Os PILs são polieletrólitos cuja unidade monomérica contém um cátion e um ânion derivado de um líquido iônico, ou seja, eles são uma classe de polieletrólitos sintetizados a partir de monômeros de líquidos iônicos. Poli(líquidos iônicos) apresentam algumas propriedades características dos líquidos iônicos como condutividade iônica, estabilidade térmica e química, juntamente com propriedades intrínsecas dos polímeros.

Para se obter eficientes eletrólitos do tipo poli(líquidos iônicos)/líquido iônico (PIL/IL) é necessário considerar a compatibilidade do líquido iônico e do poli(líquido iônico), bem como a quantidade de líquido iônico incorporado ao polímero, que deve ser a maior possível, objetivando a obtenção de um eletrólito com a maior condutividade possível, porém garantindo que o sistema permaneça no estado sólido.

Assim, presente trabalho teve como objetivo geral a construção de dispositivos de armazenamento e conversão de energia (supercapacitores) sólidos e miniaturizados utilizando nanotubos de carbono como materiais de eletrodos e eletrólitos do tipo poli(líquidos iônicos)/líquido iônico (PIL/IL).

METODOLOGIA:

Materiais e Reagentes:

Para a preparação dos eletrodos foram utilizados nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizados (f-MWCNT) adquiridos da empresa Nanocyl Belgium com 95% de pureza, comprimento < 1 µm e diâmetro externo de 9,5 nm segundo dados do fabricante.

Para preparação do eletrólito foi empregado o líquido iônico 1-metil-3-butimidazólio bis(trifluorometilsulfonil)imida (MBIMFSI) com 99% de pureza e teor de água inferior a 100 ppm, adquirido da empresa Suzhou Fluolyte Co., Ltd. Foi utilizado também o polímero comercial cloreto de poli(dialildimetilamônio) (PILCl) e o sal de bis(trifluorometilsulfonilamônio)imida de lítio (LiTFSI), ambos adquiridos da Aldrich Brasil. O coletor de corrente de aço inox tipo 304 de espessura igual a 0,1 mm foi obtido da Alfa Aesar.

Equipamentos

Para a caracterização eletroquímica dos sistemas foram empregados os potenciostatos BioLogic VMP3 Multicanais, Autolab PGSTAT30 e Solartron 1287. As caracterizações termogravimétricas foram executadas na termobalança TA Instruments TGA Q 5000. Os espectros de absorção no infravermelho foram obtidos em um espectrofotômetro modelo Nicolet 380 FTIR da Thermo Fischer Scientific.

Parte experimental

Os eletrodos de nanotubos de carbono foram preparados pelo gotejamento de uma dispersão de 9,0 mg de f-MWCNT em 15,0 mL de água destilada sobre uma área de 1,25 cm² do coletor de corrente de aço inox, disposto sobre a chapa aquecedora a 100 °C. Em seguida os eletrodos foram secos em estufa a 100 °C por 4 horas. As placas de aço inox foram pesadas antes e depois do gotejamento, a fim de se obter a massa exata de nanotubos de carbono presente em cada eletrodo.

O poli(líquido iônico) foi preparado a partir do polímero comercial PILCl e do sal de lítio LiTFSI através de uma reação de troca iônica. Para isso, foram preparadas soluções aquosas de LiTFSI (8,5g dissolvidos em 10 mL água deionizada) e PILCl (4,0 g dissolvidos em 100 mL de água deionizada). Em seguida as duas soluções foram misturadas sob agitação por 5 minutos a temperatura ambiente. Um sólido branco foi obtido, o qual foi filtrado, lavado com água e seco em estufa a vácuo a 60 °C por 12 horas (PILTFSI). Posteriormente, 850 mg desse sal foram dissolvidos em 3,0 mL de acetona anidra. A essa solução foi adicionado o líquido iônico MBIMFSI na proporção de 60 % m/m em relação ao PILTFSI, formando assim o eletrólito do tipo PIL/IL (PIL(MBIMFSI)).

A montagem do supercapacitor foi feita da seguinte maneira: o eletrólito PIL(MBIMFSI) ainda líquido dissolvido em acetona foi gotejado sobre o par de eletrodos de f-MWCNT, de modo a cobrir toda a superfície e permitir um bom contato eletrodo/eletrólito. Os eletrodos foram armazenados em dessecador

por 24 horas para permitir a evaporação da acetona. Posteriormente, o par foi sanduichado e selado com uma membrana de parafilme.

A caracterização eletroquímica do SC foi realizada por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), voltametria cíclica (VC) e carga e descarga galvanostática. A EIE foi realizada com uma amplitude de 10 mV, e intervalo de varredura de 1 MHz a 10 mHz no OCP. A voltametria cíclica foi realizada nas janelas de potencial de 0 a 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 e 3,5 V com velocidade de varredura de 50 mV s⁻¹. Os testes de carga/descarga galvanostáticos em 2,3 eletrodos foram feitos nas janelas de 0 a 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 e 3,5 V usando uma densidade de corrente de 0,50 A g⁻¹. Por fim, o desempenho do SC foi avaliado durante 1000 ciclos de carga e descarga galvanostática em 2 eletrodos a 0,50 A g⁻¹ em uma faixa de potencial de 0 a 2,5V.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Os polímeros PILCI e PILTFSI foram inicialmente caracterizados para comprovar o sucesso da síntese. A Figura 1 (a e b) mostra as curvas de TG e os espectros de infravermelho de ambos os polímeros, respectivamente. As diferenças observadas em ambas as curvas TG são devidas à influência do ânion na estrutura do polímero uma vez que o cátion é o mesmo em ambos os polímeros. O PILCI possui uma perda de massa de 17 % abaixo de 250 °C devido a saída de água de sua composição. Este polímero se decompõe em duas etapas. Já o PILTFSI possui maior estabilidade térmica, uma vez que inicia sua decomposição acima de 350 °C, o que representa uma grande vantagem, pois o sistema pode trabalhar em altas temperaturas.

Ao se compararem os espectros na região do infravermelho dos dois polímeros observam-se bandas correspondentes a estrutura do cátion poli(dialildimetilamônio) (estiramentos C-H, C-N e deformação C-H), o qual é a base da cadeia polimérica dos dois polímeros. Outro aspecto interessante é o desaparecimento da banda característica do PILCI (3391 cm⁻¹) no polímero PILTFSI, e o aparecimento de novas bandas, o que é um forte indício do sucesso da reação de síntese. O rendimento calculado para esta reação foi de 89 %.

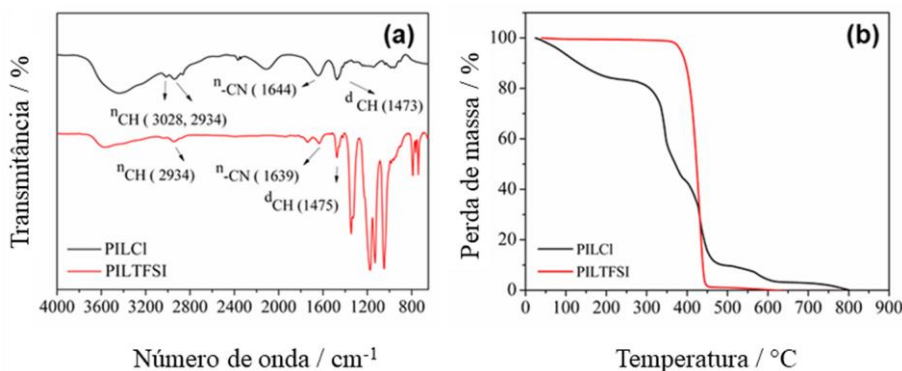


Figura 1. Curvas TG (a) e espectros de absorção na região do infravermelho (b) para os polímeros PILCI e PILTFSI.

A Figura 2a mostra o voltamograma de varredura linear para o eletrólito PIL/IL obtido. Este eletrólito apresentou uma janela eletroquímica de estabilidade de 2,8 V (-1,15 a +1,63 V). Essa janela é menor em relação à do líquido iônico puro (3,6 V), o que é um resultado esperado devido à adição de novos compostos para a preparação do eletrólito. A condutividade do eletrólito foi obtida por EIE em diversas temperaturas conforme mostrado na Tabela 1. Observa-se o aumento linear da condutividade com a temperatura. A partir dos dados de condutividade nas diversas temperaturas construiu-se o diagrama de Arrhenius para o eletrólito o qual é mostrado na Figura 2b. Através do gráfico de Arrhenius foi possível calcular a energia de ativação do sistema (12,7 J mol⁻¹). Além disso, esse resultado evidenciou que existe uma interação satisfatória entre as espécies componentes do eletrólito, indicando um mecanismo de condução por *Hopping*, no qual a matriz polimérica não influencia na condutividade, servindo apenas como um suporte mecânico ao líquido iônico, responsável pela condutividade.

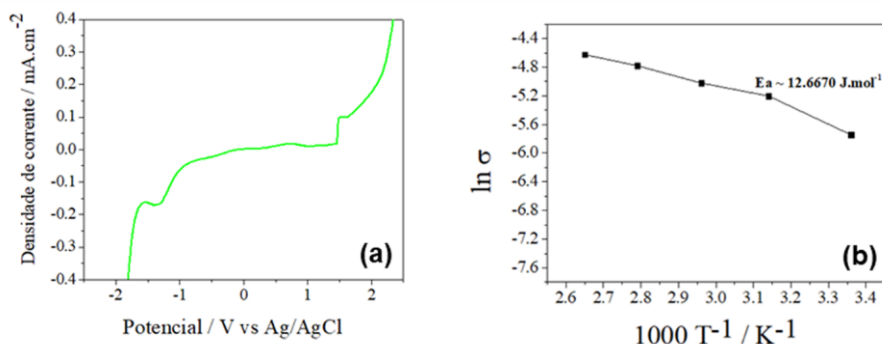


Figura 2. Janela eletroquímica de estabilidade para o eletrólito PIL(MBIMFSI) (a). Gráfico de Arrhenius para o eletrólito PIL(MBIMFSI) (b).

Tabela 1. Valores de condutividade para o eletrólito PLI(MBIMFSI)

| Temperatura (°C) | Condutividade (S cm ⁻¹) |
|------------------|-------------------------------------|
| 25 | $3,2 \times 10^{-3}$ |
| 45 | $5,5 \times 10^{-3}$ |
| 65 | $6,6 \times 10^{-3}$ |
| 85 | $8,4 \times 10^{-3}$ |
| 105 | $9,8 \times 10^{-3}$ |

A Figura 3a mostra o espectro de EIE obtido para o supercapacitor. Através desse gráfico pode-se notar um comportamento típico de um supercapacitor que pode ser descrito pelos seguintes eventos: em baixas frequências, observa-se o aparecimento de um pequeno semicírculo, que indica as resistências do eletrodo e do eletrólito, bem como a influência do coletor de corrente sobre todo o sistema. Em frequências altas o comportamento capacitivo é evidenciado por um comportamento linear do gráfico com uma inclinação próxima de 90°, o que demonstra a concordância do sistema com modelos teóricos. A técnica de voltametria cíclica em dois eletrodos também foi utilizada na caracterização do dispositivo em diferentes faixas de potencial (Figura 3b). É possível identificar um comportamento retangular das curvas, característico da formação da dupla camada elétrica (DCEL), que é o principal mecanismo de armazenamento de carga em SCs. Em janelas de potencial mais extensas evidencia-se a presença de processos de oxirredução, que podem proporcionar aumento de capacitância.

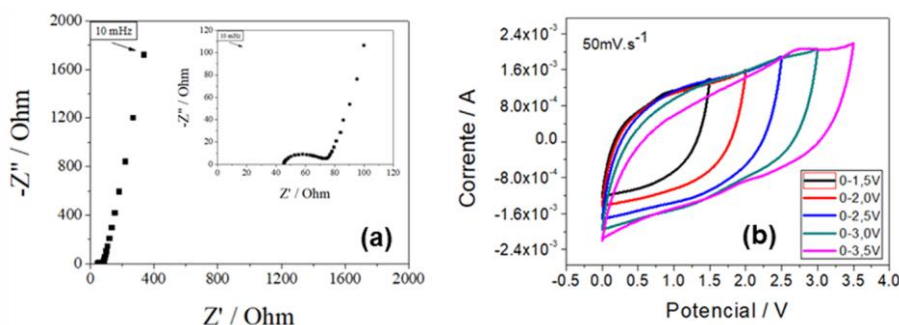


Figura 3. Espectro de EIE para o supercapacitor construído a partir do eletrólito PIL(MBIMFSI) (a). Curvas de voltametria cíclica em diferentes janelas de potencial para o supercapacitor preparado (b).

A Figura 4a mostra curvas de VC em sistema de 3 eletrodos. Pode-se perceber, para o eletrodo negativo, a formação de uma dupla camada extremamente eficiente, com formato retangular quase perfeito, indicando que processos de oxirredução possuem baixa ou nenhuma ocorrência. Em contrapartida, para o eletrodo positivo, evidencia-se a presença de reações farádicas, o que provoca um aumento de capacitância. A maior área sob a curva de VC para o eletrodo positivo é indicativo da maior capacitância. A

Figura 4b mostra o gráfico de carga/descarga galvanostática em 2,3 eletrodos em uma janela de 2,5 V. A partir desse gráfico é possível calcular todos os parâmetros de desempenho capacitivo do dispositivo, utilizando as equações de 1 a 8. Os resultados estão expressos na Tabela 2.

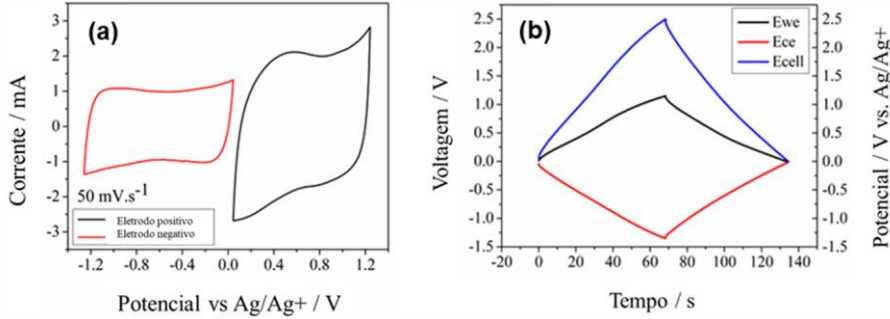


Figura 4. Curvas de voltametria cíclica em 3 eletrodos em janela de potencial de 2,5 V para o supercapacitor preparado (a). Curva de carga e descarga galvanostática em 2,3 eletrodos na janela de potencial de 2,5 V para o supercapacitor preparado (b).

$$C_{sp,cell} = \frac{2I(\int V dt)_{discharge}}{(m_+ + m_-)V_{discharge}^2} \quad (1)$$

$$E_{real} = \frac{I(\int V dt)_{discharge}}{(m_+ + m_-)} \quad (2)$$

$$P_{real} = \frac{E_{real}}{\Delta t_{discharge}} \quad (3)$$

$$C_{sp,+} = \frac{2I(\int U_+ dt)_{discharge}}{(m_+)U_{discharge}^2} \quad (4)$$

$$C_{sp,-} = \frac{2I(\int U_- dt)_{discharge}}{(m_-)U_{discharge}^2} \quad (5)$$

$$ESR = \frac{V_{max,charge} - V_{discharge}}{I} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta t_{discharge}}{\Delta t_{charge}} \times 100 \quad (7)$$

$$EE = \frac{(\int V dt)_{discharge}}{(\int V dt)_{charge}} \times 100 \quad (8)$$

em que I é a corrente aplicada, V é a voltagem, U é o potencial dos eletrodos, m_+ e m_- são a massa de material ativo no eletrodo positivo e negativo, respectivamente, Δt_{charge} é o tempo de carga e $\Delta t_{discharge}$ é o tempo de descarga, $V_{max,charge}$ é a máxima voltagem alcançada pelo supercapacitor durante a carga e $V_{discharge}$ é a máxima voltagem descontando a queda ôhmica.

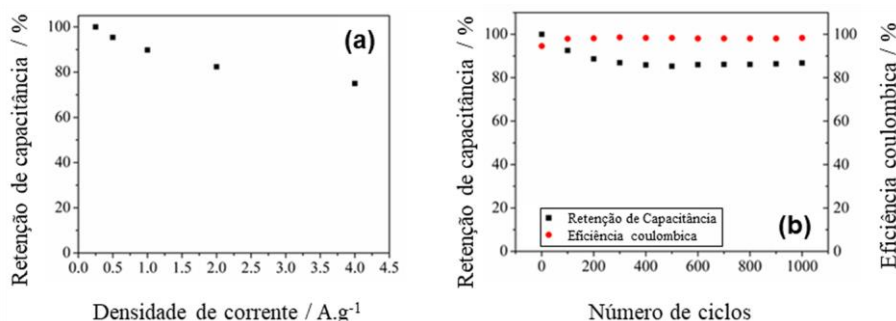
Tabela 2. Parâmetros de desempenho capacitivo do supercapacitor preparado.

| Célula | Janela / V | C _{esp, cél} / F g ⁻¹ | C _{esp, +/} / F g ⁻¹ | C _{esp, -/} / F g ⁻¹ | E _{real} / Wh Kg ⁻¹ | P _{real} / W Kg ⁻¹ | ε / % | η/ % |
|-------------------|---------------|--|---|---|--|---|-------------|-------------|
| MBIM ⁺ | 0-1.5 | 10.7 | 41.9 | 39.3 | 3.2 | 340 | 97.2 | 77.5 |
| | 0-2.0 | 11.6 | 47.6 | 41.3 | 6.2 | 444 | 97.4 | 77.3 |
| FSI ⁻ | 0-2.5 | 11.7 | 49.1 | 41.2 | 9.8 | 532 | 96.6 | 73.0 |
| | 0-3.0 | 13.0 | 54.0 | 51.6 | 15.6 | 596 | 90.2 | 58.1 |
| | 0-3.5 | 14.6 | 55.4 | 53.4 | 23.2 | 652 | 86.1 | 46.7 |

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2 é possível notar um aumento na capacitância da célula com o aumento da janela eletroquímica de potencial, devido aos processos oxirredução que ocorrem na superfície dos materiais do eletrodo. No entanto, esses processos de oxirredução causam uma diminuição nos valores de eficiências coulômbica (ε) e eficiência energética (η) (a eficiência coulômbica deve estar acima de 95% e a energética dos 70% para aplicações práticas). Considerando tais valores, pode-se determinar que a janela eletroquímica de potencial ideal para este supercapacitor é de 2,5 V. Os valores obtidos para os outros parâmetros mantiveram-se constantes ao longo dos ciclos de carga e descarga. Outro ponto importante a ser destacado é que os valores de densidade de energia aumentaram com a janela de potencial, uma vez que a densidade de energia é proporcional ao potencial aplicado ($CV^2/2$). Entretanto, esses valores mais elevados de densidade de energia também não se mantiveram constantes ao longo dos ciclos de carga e descarga, mostrando que não é vantajoso trabalhar com uma janela de potencial acima de 2,5 V para este dispositivo preparado.

Considerando a janela de 2,5 V, observa-se que a capacitância da célula foi de 11,7 F g⁻¹, sendo que o eletrodo positivo apresentou capacitância de 49,1 F g⁻¹ e o negativo de 41,2 F g⁻¹. O dispositivo completo também mostrou uma densidade de energia de 9,8 W h Kg⁻¹ e densidade de potência de 532 W kg⁻¹. Os valores encontrados são considerados satisfatórios e comparáveis a valores da literatura^{1,2}. É interessante notar que apesar das massas dos eletrodos positivo e negativo serem idênticas e feitas do mesmo material, as capacitâncias de ambos os eletrodos são diferentes. Essa assimetria se justifica pela formação de compostos supramoleculares devido à estrutura complexa dos líquidos iônicos, que favorece a inserção das cargas positivas ou negativas nos respectivos poros de cada eletrodo de nanotubos de carbono. Neste dispositivo o ânion FSI⁻ é capaz de se inserir melhor no eletrodo positivo do que o cátion MBIM⁺ no eletrodo negativo, explicando as diferenças de capacitância observadas.

Os parâmetros de *rate capability*, capacitância e eficiência coulômbica também foram avaliados ao longo de 1000 ciclos de carga e descarga do supercapacitor. A *rate capability* permite monitorar a variação da capacitância com relação a densidade de corrente aplicada ao dispositivo (Figura 5a). Pode-se perceber uma capacidade de retenção de 75% a 4,0 A g⁻¹. O dispositivo também mostrou uma manutenção de 87 % de sua capacitância e uma eficiência coulombica de aproximadamente 97% após 1000 ciclos de carga e descarga (Figura 5b). Esses resultados são condizentes com dados da literatura para sistemas semelhantes.


Figura 5. Desempenho capacitivo do supercapacitor preparado. *Rate capability* (a), capacitância e eficiência coulômbica em função do número de ciclos (b).

No presente trabalho foi possível caracterizar um supercapacitor preparado a partir de poli(líquido iônico) e do líquido iônico comercial 1-metil-3-butimidazólio bis(trifluorometilsulfonil)imida. O eletrólito sintetizado apresentou-se mecanicamente estável e com condutividade apreciável. O supercapacitor mostrou bom desempenho capacitivo, evidenciado pelos altos valores de capacitâncias de eletrodo ($49,1 \text{ F g}^{-1}$ para o positivo e $41,2 \text{ F g}^{-1}$ para o negativo), boa densidade de energia ($9,8 \text{ W h kg}^{-1}$) e excelente densidade de potência (532 W kg^{-1}) a 0,50 e 2,50 V (que foi a janela de trabalho mais adequada para o sistema), considerando que os valores de eficiência coulômbica e energética foram mantidos superiores a 95 % e 70 %, respectivamente. O dispositivo também mostrou boa ciclabilidade após 1000 ciclos de carga e descarga.

Os supercapacitores no estado sólido construídos a partir de poli(líquido iônico)/líquido iônico são sistemas de destaque na microeletrônica atual e para aplicações de alta tecnologia uma vez que são seguros, miniaturizáveis e sem risco de vazamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. SIMON, P.; GOGOTSI, Y.. Materials for electrochemical capacitors. **Nature Materials**, v. 7, n.11, p. 845-854, 2008.
2. ROLDAN, S.; GONZALEZ, Z.; BLANCO, C.; GRANDA, M.; MENEDEZ, R.; SANTAMARIA, R. Redox-active electrolyte for carbon nanotube-based electric double layer capacitors. **Electrochimica Acta**, v. 56, n.9, p. 3401-3405, 2011.
3. BRACHET, M.; GABORIAU, D.; GENTILE, P.; FANTINI, S.; BIDAN, G.; SADKI, S.; BROUSSE, T.; LE BIDEAU, J. Solder-reflow resistant solid-state micro-supercapacitors based on ionogels, **Journal of Materials Chemistry A**, v. 4, n.30, p.11835-11843, 2016
4. HAN, J. H.; LEE, J. Y.; SUH, D. H.; HONG, Y. T.; KIM, T. H. Electrode-Impregnable and Cross-Linkable Poly(ethylene oxide)-Poly(propylene oxide)-Poly(ethylene oxide) Triblock Polymer Electrolytes with High Ionic Conductivity and a Large Voltage Window for Flexible Solid-State Supercapacitors, **Acs Applied Materials & Interfaces**, v. 9, n.39, p. 33913-33924, 2017.
5. YUAN, J. Y.; ANTONIETTI, M. Poly(ionic liquid)s: Polymers expanding classical property profiles, **Polymer**, v. 52, n.7, p. 1469-1482, 2011.

Participação em Congressos, publicações e/ou pedidos de proteção intelectual:

- XXXI Encontro Regional da Sociedade Brasileira de Química – Itajubá/MG: premiação de melhor pôster na seção de Eletroquímica e Eletroanalítica
- Artigo submetido na revista European Journal of Polymers: "PIL/IL gel polymer electrolytes: the influence of the IL ions on the properties of solid-state supercapacitors".