



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

**Gabriel Comini de Assis**

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO EM QUÍMICA TECNOLÓGICA:  
DESENVOLVIMENTO DE SUPERCAPACITORES FLEXÍVEIS COM  
POTENCIAL PARA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS  
VESTÍVEIS**

**Belo Horizonte, fevereiro, 2025**



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

**Gabriel Comini de Assis**

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO EM QUÍMICA TECNOLÓGICA:  
DESENVOLVIMENTO DE SUPERCAPACITORES FLEXÍVEIS COM  
POTENCIAL PARA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS  
VESTÍVEIS**

Estágio realizado no Grupo de Estudo em  
Materiais e Armazenamento de Energia  
(GEMAtE) do Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais, Av.  
Amazonas, 5253 - Nova Suíça, Belo  
Horizonte - MG, 30421-169

**Belo Horizonte, fevereiro, 2025**



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO EM QUÍMICA TECNOLÓGICA:  
DESENVOLVIMENTO DE SUPERCAPACITORES FLEXÍVEIS COM  
POTENCIAL PARA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS  
VESTÍVEIS**

---

Gabriel Comini de Assis

---

João Paulo Campos Trigueiro

**Belo Horizonte, fevereiro, 2025**



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO EM QUÍMICA TECNOLÓGICA:  
DESENVOLVIMENTO DE SUPERCAPACITORES FLEXÍVEIS COM  
POTENCIAL PARA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS  
VESTÍVEIS**

**DECLARAÇÃO**

Eu, João Paulo Campos Trigueiro, como supervisor do estágio obrigatório, estou ciente deste relatório de estágio supervisionado, redigido pelo estagiário Gabriel Comini de Assis, concordo com as informações descritas, conforme sua veracidade e aprovo as mesmas. Autorizo a publicação deste relatório no site do curso de Química Tecnológica do CEFET-MG.

---

João Paulo Campos Trigueiro

**Belo Horizonte, fevereiro, 2025**

## Sumário

<b>1.</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>Revisão da literatura .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.</b>	<b>Supercapacitores .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.</b>	<b>Tipos de supercapacitores .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1.</b>	<b>Supercapacitores de dupla camada elétrica (EDLC) .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2.2.</b>	<b>Pseudocapacitores .....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.</b>	<b>Eletrólitos sólidos .....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.1.</b>	<b>Eletrólitos poliméricos géis .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.2.</b>	<b>Utilização de polilíquido iônico como eletrólito sólido redox .....</b>	<b>10</b>
<b>3.</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1.</b>	<b>Rotinas de um laboratório de pesquisa .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2.</b>	<b>Síntese do polilíquido iônico (PI) .....</b>	<b>12</b>
<b>3.3.</b>	<b>Preparação da célula eletroquímica .....</b>	<b>12</b>
<b>3.4.</b>	<b>Caracterizações eletroquímicas .....</b>	<b>12</b>
<b>3.4.1.</b>	<b>Voltametria Cíclica .....</b>	<b>12</b>
<b>3.4.2.</b>	<b>Carga e Descarga.....</b>	<b>13</b>
<b>4.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>13</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>15</b>
	<b>Referências.....</b>	<b>15</b>

## **1. Introdução**

O estágio obrigatório neste documento descrito, se realizou por meio do projeto de pesquisa desenvolvido no laboratório do Grupo de Estudo em Materiais e Armazenamento de Energia, (GEMAtE) localizado no Campus Gameleira do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) e se refere às atividades desenvolvidas no período de 23/10/2024 a 22/02/2025. O grupo conta com dois laboratórios, sendo o primeiro de via úmida que contém equipamentos básicos de laboratório, como vidrarias, chapas, capela, entre outros, destinados principalmente a síntese, manipulação e preparação de amostras. O segundo (instrumental) contém diversos equipamentos modernos como potenciostatos e cicladores multicanais, voltados para a caracterização completa de sistemas eletroquímicos.

Atualmente, o grupo conta com cinco alunos de iniciação científica, um doutorando e um pesquisador com mestrado, todos orientados por um professor e doutor em eletroquímica. Neste grupo são desenvolvidos 6 projetos P&D (financiados por Empresas, CNPq ou FAPEMIG), além de três projetos de conclusão de curso de Química Tecnológica do CEFET-MG. O grupo se mostra bastante coeso, alinhado e com conhecimento nivelado periodicamente.

Dentre todos os projetos executados no grupo de pesquisa, o autor deste relatório participa, como principal integrante e responsável por todas as atividades experimentais do projeto, como síntese dos materiais, caracterizações eletroquímicas, montagem dos eletrodos e dispersões, que visam a construção de um supercapacitor contendo um eletrólito polimérico gel redox à base de poli(líquido iônico) para aplicação em dispositivos eletrônicos vestíveis,

## **2. Revisão da literatura**

### **2.1. Supercapacitores**

Os supercapacitores são dispositivos de armazenamento eletroquímico formados por dois eletrodos altamente condutivos e com grande área superficial, frequentemente compostos por materiais como carbono, polímeros condutores ou óxidos metálicos. Esses eletrodos estão em contato com um eletrólito de alta

condutividade iônica e são separados por um material isolante, que impede o curto-circuito da célula, permitindo apenas a migração de íons para garantir a neutralidade do sistema (SHAO et al., 2018)

A quantidade de energia armazenada de um supercapacitor é conhecida por capacitância e pode ser estimada da seguinte maneira:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\epsilon_0$  = Permissividade elétrica do vácuo

$\epsilon_r$  = Permissividade relativa do eletrólito

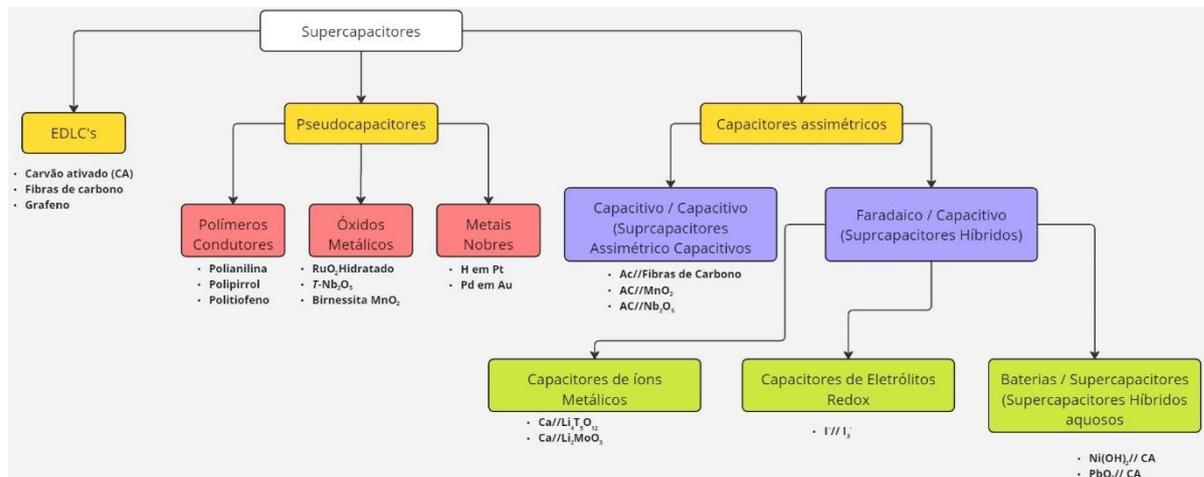
$A$  = Área superficial efetiva dos materiais que compõe os eletrodos

$d$  = distância de separação de cargas entre as duplas camadas elétricas

## 2.2. Tipos de supercapacitores

Os avanços na ciência dos materiais e no armazenamento de energia têm impulsionado o desenvolvimento de supercapacitores, levando à montagem de dispositivos com diversos materiais para eletrodos e eletrólitos. Isso resultou em uma ampla variedade de configurações, cada uma projetada para aplicações específicas, com base em suas propriedades únicas (SHAO et al., 2018). Dessa forma, surgem diferentes classificações de supercapacitores, que podem ser organizados de acordo com o mecanismo de armazenamento de energia, o tipo de montagem e os materiais utilizados nos eletrodos e eletrólitos, conforme descrito a seguir:

**Figura 1:** Esquema que mostra a classificação de supercapacitores



**Fonte:** Adaptado de Shao et al. 2018

Fica evidente então, a existência de três principais grupos, sendo o primeiro composto por supercapacitores de dupla camada elétrica, o segundo por pseudocapacitores e o terceiro por supercapacitores assimétricos, que é subdividido em capacitivos e híbridos.

### 2.2.1. Supercapacitores de dupla camada elétrica (EDLC)

EDLC é a sigla para *Electrical Double Layer Capacitors* (Capacitor de Dupla Camada Elétrica), um sistema composto por dois eletrodos porosos de grande área superficial em contato com um eletrólito condutor. Durante o processo de carga, um dos eletrodos adquire carga positiva (+q), enquanto o outro adquire carga negativa (-q). Os íons do eletrólito tendem a se acumular em regiões de cargas opostas: os íons positivos migram em direção ao eletrodo negativo, e os íons negativos, ao eletrodo positivo (TICIANELLI; GONZALEZ, 1998).

A energia armazenada nesse sistema é resultado da formação de uma camada de íons sobre os eletrodos, onde permanecem até o momento da descarga. Esse mecanismo de armazenamento é possível devido à adsorção reversível dos íons do eletrólito, sem transferência de elétrons. Por essa razão, materiais com alta área superficial efetiva são amplamente utilizados nesses estudos.

A dupla camada ocorre inicialmente com o plano interno de Helmholtz, que é uma cama onde existe uma aproximação forte das partículas com carga contrária à do eletrodo, formando uma primeira camada rígida de íons. Após a formação desta

primeira camada de íons, ocorre a aproximação de íons com carga igual ao do eletrodo, pois o plano formado com carga contrária é intenso, atraindo essas espécies que estão no eletrólito, formando uma segunda camada de íons, dessa vez, com carga igual ao do eletrodo. Após este segundo plano, inicia-se a camada difusa, oriunda do campo elétrico gerado pela dupla camada elétrica citada anteriormente (TICIANELLI; GONZALEZ, 1998).

### **2.2.2. Pseudocapacitores**

Os pseudocapacitores são capacitores nos quais o armazenamento de energia ocorre por meio de reações eletroquímicas reversíveis na superfície dos eletrodos. Devido à mudança de valência como mecanismo de armazenamento de energia, materiais eletroativos, como óxidos, polímeros condutores e sulfetos, têm despertado grande interesse em pesquisas voltadas para o desenvolvimento de supercapacitores pseudocapacitivos. As reações faradáicas, ou seja, reações que envolvem a transferência de elétrons, nesse sistema permitem alcançar valores maiores de capacitância específica, pois os processos deixam de ser restritos à superfície, como a formação de dupla camada elétrica, ocorrendo também no interior do material, através de reações de oxirredução (TICIANELLI; GONZALEZ, 1998).

Embora os processos redox nesses capacitores possam causar decomposição estrutural dos eletrodos ao longo de muitos ciclos, resultando em perda de capacitância, a densidade de energia alcançada é extremamente elevada em comparação aos capacitores de dupla camada elétrica. Por essa razão, os pseudocapacitores não são mais vistos apenas como complementares à dupla camada elétrica, mas sim como componentes essenciais no desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia (SHAO et al., 2018).

### **2.3. Eletrólitos sólidos**

Nos últimos anos, eletrólitos sólidos têm se destacado como uma alternativa interessante na construção de supercapacitores devido a características interessantes como maior estabilidade térmica, eletroquímica e maior segurança. Este tipo de eletrólito evita problemas comuns dos eletrólitos líquidos como, vazamento, volatilidade, inflamabilidade e diminuição da toxicidade. Por estes fatores, tal classe se mostram promissoras para o desenvolvimento de supercapacitores voltados para

dispositivos portáteis, flexíveis e dobráveis, cada vez mais procurados no mercado global (AMARAL et al., 2022).

Entretanto, os eletrólitos sólidos tradicionais apresentam alguns desafios, pois apresentam uma baixa condutividade iônica, devido a dificuldade de transportar íons através da matriz sólida. Por este motivo, a aplicação destes sistemas tem sido limitada. Para superar tais desafios, alternativas como os eletrólitos poliméricos géis surgem como possível solução, pois combina propriedades mecânicas dos eletrólitos sólidos e o eficiente transporte de íons dos líquidos (AMARAL et al., 2022).

### **2.3.1. Eletrólitos poliméricos géis**

Os eletrólitos poliméricos géis (GPEs) são matrizes poliméricas que retêm um eletrólito líquido, proporcionando um meio eficiente para a condução iônica. Esse sistema possuem alta condutividade iônica, estabilidade mecânica e flexibilidade, o que os torna adequados para aplicações em supercapacitores flexíveis e dispositivos portáteis. Além disso, os GPEs podem ser moldados em diferentes formatos, permitindo a adaptação a diversas configurações de dispositivos, como os utilizados em eletrônicos vestíveis (ZHAO et al., 2024).

A construção de um GPE envolve a escolha de um polímero hospedeiro, como PVA ou Polilíquido Iônico (PI), podendo ser combinado com sais condutores ou outros compostos que facilitam a mobilidade iônica. A interação entre os íons do sal e os grupos funcionais da matriz polimérica aumenta a condutividade iônica e melhora a estabilidade estrutural. Essa categoria de eletrólitos também é frequentemente utilizada em combinação com aditivos redox para aumentar a capacitância específica dos dispositivos, uma vez que possibilitam reações eletroquímicas adicionais na interface eletrodo-eletrólito (ZHAO et al., 2024)

### **2.3.2. Utilização de polilíquido iônico como eletrólito sólido redox**

Uma possível variação na matriz polimérica de um eletrólito polimérico gel, é a utilização de um polímero capaz de realizar reações de oxirredução. Neste cenário, surge como alternativa os polilíquidos iônicoa, PIL (do inglês poly(ionic liquid)), que apresentam uma elevada condutividade eletrônica e é capaz de realizar reações redox. É possível incorporar líquido iônico nesta matriz polimérica para potencializar o sistema e formar o eletrólito polimérico gel.(HE et al., 2023)

Os polilíquidos iônicos oferecem vantagens como alta estabilidade térmica, ampla janela de potencial e baixa volatilidade. Eles permitem a criação de eletrólitos com excelente condutividade iônica, mantendo a integridade estrutural do material durante múltiplos ciclos de carga e descarga além de serem flexíveis. Além disso, a combinação com materiais condutores, como nanotubos de carbono e óxido de grafeno reduzido (rGO), pode otimizar ainda mais o desempenho eletroquímico de um supercapacitor, permitindo a integração desses sistemas em dispositivos flexíveis e duráveis (YAZAR et al., 2023)

Tendo em mente a aplicabilidade dos Líquidos iônicos, ou mais especificamente, dos poli(líquidos iônicos), é possível propor a utilização de uma matriz polimérica flexível a base de PIL para a aplicação em supercapacitores flexíveis, uma vez que além de apresentar uma elevada estabilidade e desempenho eletroquímico, os filmes poliméricos são potencialmente promissores para a utilização em sistemas eletrônicos vestíveis. Dessa forma, este projeto busca construir um supercapacitor, cujo eletrólito seja um polímero gel condutor e flexível a base de PIL.

### **3. Metodologia**

#### **3.1. Rotinas de um laboratório de pesquisa**

O bom desempenho de uma pesquisa ou de uma rotina de análise depende diretamente da organização do espaço de trabalho. Por este motivo, o estagiário deste laboratório é responsável por tarefas básicas e importantes de organização, além da rotina de análises.

Na pesquisa não é diferente, sendo necessário, a verificação periódica de reagentes, além da realização de orçamentos e compras, calibração de equipamentos de rotina, como condutivímetro, pHmetro e balança. O treinamento de novos integrantes do grupo de pesquisa também foi uma das tarefas desenvolvidas nesse projeto, além claro de todas as etapas de uma análise de rotina, como preparação de suspensões, soluções, filmes poliméricos, eletrodos e execução de técnicas rotineiras como voltametria cíclica, carga e descarga e impedância eletroquímica. O tratamento, análise e interpretação dos dados também é uma atividade corriqueira neste projeto.

### **3.2. Síntese do polilíquido iônico (PI)**

O processo de síntese, descrito inicialmente por Azaceta e colaboradores e Hernández e colaboradores, basicamente, consistiu em realizar a polimerização do líquido iônico, o qual é um sal líquido a temperatura ambiente devido ao grande volume de seu cátion e ânion constituinte. Após realizar a polimerização da cadeia orgânica constituinte do cátion, foi realizada a troca do ânion presente na estrutura por moléculas orgânicas que são eletroquimicamente ativas, dando origem a um eletrólito chamado de PIL-A e o outro será chamado de PIL-B (o qual foi gerado com a troca do ânion por outra molécula eletroquimicamente ativa e diferente de A). Foram realizadas duas variações, trocando estes íons por dois compostos distintos, formando assim, um poli(líquido iônico) sólido capaz de participar reações de oxirredução.

### **3.3. Preparação da célula eletroquímica**

A montagem de uma célula eletroquímica, utilizada para os testes, iniciou-se com preparação de eletrodo de trabalho de material carbonáceo, podendo este ser óxido de grafeno reduzido ou nanotubos de carbono de paredes múltiplas.

Inicialmente foi preparado uma suspensão contendo um solvente e o material de carbono e em seguida, este material foi gotejado na superfície do coletor de corrente até que se atingisse a massa necessária para que seja realizada as análises eletroquímicas.

Posteriormente, o eletrólito polimérico gel foi preparado adicionando uma quantidade do poli(líquido iônico), solvente e uma determinada quantidade de líquido iônico. Esta mistura foi gotejada na superfície do eletrodo de trabalho à base de material de carbono até que um filme polimérico fosse formado nessa superfície. Por fim a célula de três eletrodos contendo um eletrodo de referência de  $\text{Ag}^+/\text{AgCl}$  foi montada e submetida às análises.

### **3.4. Caracterizações eletroquímicas**

#### **3.4.1. Voltametria Cíclica**

As velocidades de varredura aplicada nos ensaios de voltametria cíclica foram 5, 10, 25, 50 e 75  $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ , em uma faixa de potencial de -1,6 V à 0,6 V para o material

de carbono contendo PIL-A como eletrólito e -1,5 V à 1,5 V para o outro material carbonáceo contendo PIL-B como eletrólito. Todas as medidas eletroquímicas foram realizadas no Potenciostato/Galvanostato *Biologic* SP-200 e SP-300.

### **3.4.2. Carga e Descarga**

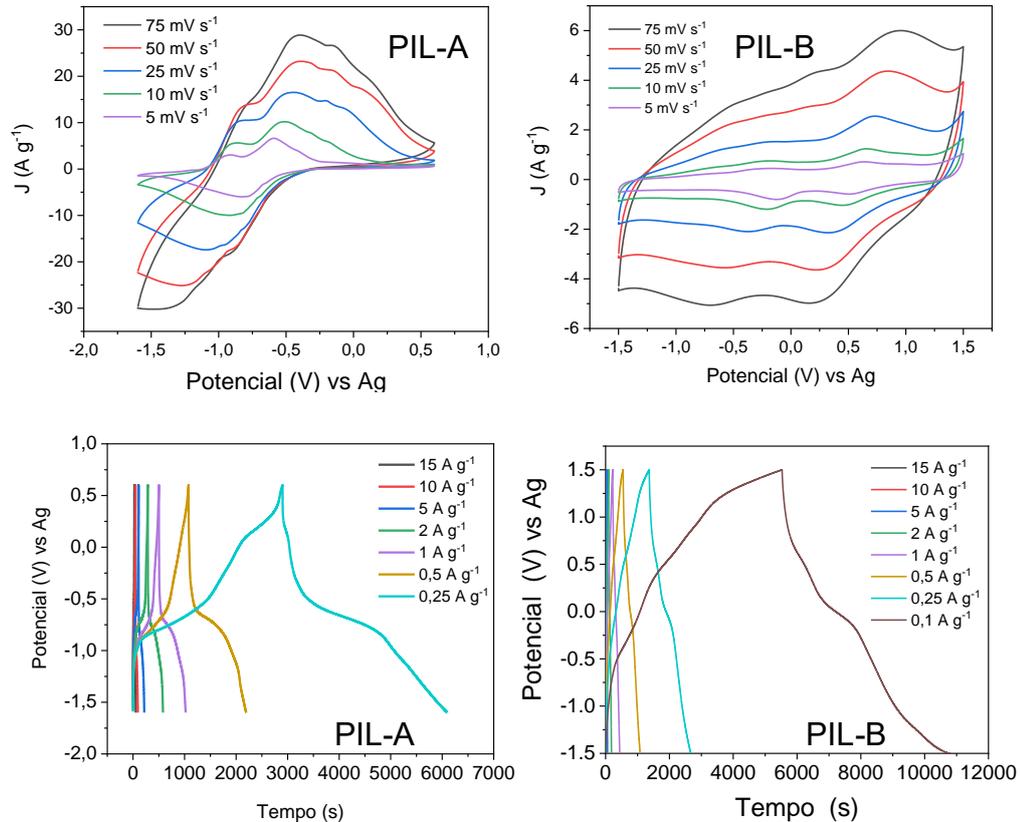
Já os ensaios galvanostáticos de carga e descarga foram realizados nas densidades de corrente de 0,1, 0,25, 0,5, 1, 2, 5, 10, e 15 A.g<sup>-1</sup> em relação a massa ativa do eletrodo de trabalho que é a soma da massa do material de trabalho (material carbonáceo condutor). A janela de potencial utilizada, foi a mesma descrita no item anterior.

## **4. Resultados**

Através das técnicas de caracterização eletroquímica, foi observado o sucesso nas etapas de síntese e preparação dos eletrodos de trabalhos e filmes poliméricos.

A voltametria cíclica é uma técnica que registra a variação de corrente em função variação de potencial. Sendo assim, é possível observar qual mecanismo de armazenamento de energia está sendo predominante em determinada amostra. Um voltamograma do tipo retangular ou tipo caixa, é característico de armazenamento através da formação de dupla camada elétrica, enquanto a presença de picos, indica a presença de eventos faradáicos, que elevam os valores de capacitância. Para os materiais sintetizados, era esperado e, foi observado a presença de picos referentes a oxidação e redução das moléculas orgânicas adicionadas ao poli(líquido iônico), mas também era esperado uma aparência de caixa, devido a formação de dupla camada elétrica de íons do líquido iônico na superfície do material de carbono.

O processo de armazenamento de energia através de dupla camada elétrica se traduz em um caráter triangular em uma curva de carga e descarga galvanostática (CDG), enquanto os picos de oxidação e redução são visualizados através de patamares. Como já citado anteriormente, para as curvas CDG do eletrólito sólido gel redox era esperado ambos os comportamentos, como mostrado experimentalmente nas curvas obtidas abaixo.

**Figura 2:** Resultados de carga e descarga para as células eletroquímicas

**Fonte:** Autor Próprio

Tais observações indicam o sucesso deste projeto até o presente momento, uma vez que os eventos redox e capacitivos esperados, foram observados nos ensaios eletroquímicos

Conhecer, executar e entender técnicas de caracterizações eletroquímicas, como voltametria cíclica e carga e descarga, foram um dos principais resultados deste estágio, uma vez que na grade curricular do curso, a eletroquímica aplica a armazenamento de energia não é presente. Ademais, realizar estas caracterizações de forma rotineira permite compreender o dia a dia de um laboratório de pesquisa.

Outro resultado foi aplicar conceitos importantes como, polimerização, preparação de amostras, utilização de técnicas de caracterização, preparação de suspensões e eletrodos de trabalho. Conceitos estes que são trabalhos dentro de disciplinas obrigatórias da grade curricular do curso de Química Tecnológica do CEFET-MG.

## 5. Conclusão

Assim, conclui-se que com este estágio, foi possível compreender e aplicar conceitos importantes aprendidos ao longo do curso, tais como, preparação de amostras, sínteses orgânicas, técnicas de caracterizações e fundamentos de eletroquímica. Além de ser possível desenvolver práticas rotineiras de um laboratório químico como preparação de solução, controle de estoque, compras de reagentes e gerenciamento de laboratório de maneira geral.

## Referências

- AMARAL, M. et al. Recent advances on quasi-solid-state electrolytes for supercapacitors. **JOURNAL OF ENERGY CHEMISTRY**, v. 67, p. 697–717, abr. 2022.
- AZACETA, E. et al. Synthesis and characterization of poly(1-vinyl-3-alkylimidazolium) iodide polymers for quasi-solid electrolytes in dye sensitized solar cells. **ELECTROCHIMICA ACTA**, v. 56, n. 1, p. 42–46, 15 dez. 2010.
- HE, X. et al. An innovative poly(ionic liquid) hydrogel-based anti-freezing electrolyte with high conductivity for supercapacitor. **CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL**, v. 466, 15 jun. 2023.
- HERNÁNDEZ, G. et al. Redox-active poly(ionic liquid)s as active materials for energy storage applications. **JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A**, v. 5, n. 31, p. 16231–16240, 21 ago. 2017.
- SHAO, Y. et al. Design and Mechanisms of Asymmetric Supercapacitors. **Chemical Reviews**, v. 118, n. 18, p. 9233–9280, 26 set. 2018.
- YAZAR, S. et al. A biocompatible and flexible supercapacitor for wearable electronic devices. **JOURNAL OF ENERGY STORAGE**, v. 74, 25 dez. 2023.
- ZHAO, Y. et al. Recent Advances in Flexible Wearable Technology: From Textile Fibers to Devices. **CHEMICAL RECORD**, v. 24, n. 3, mar. 2024.