

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIA**  
**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**Síntesis de Grafeno por medios químicos y construcción  
de supercondensadores basados en grafeno**

**Carlos Eugenio**

**Profesor Guía: DINESH PRATAP SINGH**

**Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos  
para obtener el título profesional de Ingeniero Físico.**

**Santiago - Chile**

**2016**

© 2016, Carlos Eugenio

**Algunos derechos reservados. Esta obra está bajo una Licencia  
Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartir Igual 3.0.**

**Sus condiciones de uso pueden ser revisadas en:**

**<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/cl/>.**



*Dedicado a...*

# Agradecimientos

# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>I Marco teórico</b>	<b>2</b>
<b>1. Nanomateriales</b>	<b>3</b>
1.1. Nanomateriales . . . . .	3
1.2. Síntesis . . . . .	4
1.3. Caracterización . . . . .	4
1.4. Aplicaciones . . . . .	4
<b>2. Grafeno</b>	<b>5</b>
2.1. Óxido reducido de grafeno (RGO) . . . . .	6
2.2. Síntesis . . . . .	6
2.3. Aplicaciones . . . . .	6
<b>3. Supercondensadores</b>	<b>7</b>
3.1. El condensador ideal . . . . .	8

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	<i>v</i>
3.2. El condensador real . . . . .	9
3.3. ¿Qué hace a un supercondensador? . . . . .	12
<b>II Cuerpo de la tesis</b>	<b>13</b>
<b>4. Síntesis de óxido de grafeno</b>	<b>14</b>
4.1. Procedimiento experimental . . . . .	14
4.2. Resultados . . . . .	14
<b>5. Reducción del óxido de grafeno</b>	<b>15</b>
5.1. Materiales . . . . .	15
5.2. Procedimiento . . . . .	15
5.3. Resultados . . . . .	15
<b>6. Construcción de supercondensadores</b>	<b>16</b>
6.1. Armado del dispositivo . . . . .	16
6.2. Celda de prueba de supercondensador . . . . .	18
6.3. Resultados . . . . .	18
<b>III Conclusiones</b>	<b>19</b>
<b>Anexo</b>	<b>20</b>
<b>Índice Analítico</b>	<b>22</b>

# Índice de cuadros

# Índice de figuras

3.1. Carga y descarga de un condensador ideal a corriente constante. . . . .	9
3.2. Carga y descarga de un condensador evidenciando el efecto de una ESR. . . . .	11
6.1. Armado de un supercondensador para realizar pruebas.① Lámina metálica de 1 cm de ancho sobre un trozo de vidrio. ② Cinta auto adhesiva para limitar el área a 1 cm <sup>2</sup> . . . . .	17



# Resumen

# Introducción

# **Parte I**

## **Marco teórico**

# Capítulo 1

## Nanomateriales

---

*"There's Plenty of Room at the Bottom."*

**Richard Feymann**

---

### 1.1. Nanomateriales

Generalmente la denominación nano es atribuida a materiales en que algunas de sus dimensiones estén en la escala nanométrica, entre 1-100 nm [1]. Ésta definición resulta práctica para fines

## **1.2. Síntesis**

## **1.3. Caracterización**

## **1.4. Aplicaciones**

# Capítulo 2

## Grafeno

---

*“What is important about graphene is the new physics it has delivered.”*

**Andre Geim**

---

por átomos de carbono hibridizados  $sp^2$ , en una red de panel de abeja hexagonal [2-6]

## **2.1. Óxido reducido de grafeno (RGO)**

## **2.2. Síntesis**

## **2.3. Aplicaciones**

## Capítulo 3

# Supercondensadores

---

*"The force is strong with this one."*

**Darth Vader**

---

El almacenar energía eléctrica es uno de los mayores problemas a la hora de diseñar sistemas electrónicos tanto móviles como estacionarios, los requerimientos varían de acuerdo a las necesidades de cada uno, en general es un *trade-off* entre densidad de energía (cuánta energía se puede almacenar) y densidad de potencia (que tan rápido puede ser entregada la energía almacenada). Las celdas de combustible (*Fuel Cells*), entregan la mayor densidad de energía, pero son complicadas, mientras que las baterías poseen mayor densidad de potencia, pierden capacidad con los ciclos de carga y descarga. Los supercondensadores van un



paso más allá, aumentado la densidad de potencia y aportando mayor vida útil, entregando una nueva posibilidad a la hora de diseñar sistemas eléctricos, ya como fuente de energía por sí mismo, o en sistemas híbridos combinados con otras tecnologías[7].

### 3.1. El condensador ideal

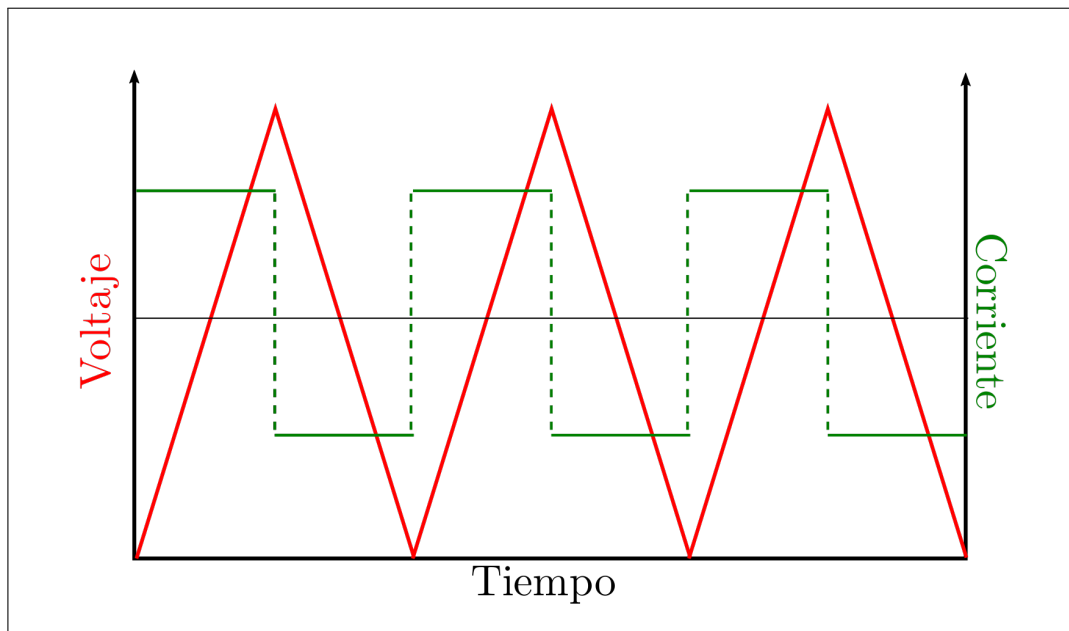
Generalmente un condensador se modela como un par de placas paralelas separadas por un dieléctrico, es definido por su capacitancia, la que refleja la capacidad de almacenar energía. Del modelo de placas paralelas se desprende la definición de capacitancia  $C$  como la razón entre la magnitud de carga en cada placa  $Q$  y el voltaje entre los terminales  $V$ :

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3.1)$$

Para fines prácticos, el condensador ideal como componente electrónico es modelado por la ecuación que relaciona la corriente con el voltaje, considerando que  $i = dq/dt$ :

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (3.2)$$

Para corrientes constantes, el voltaje varía linealmente como en la carga y descarga de la figura 3.1.



**Figura 3.1:** Carga y descarga de un condensador ideal a corriente constante.

### 3.2. El condensador real

Un condensador ideal almacenaría energía al cargarse y la entregaría al descargarse sin ninguna disipación, es decir, su eficiencia sería del 100 %, podría soportar cualquier voltaje aplicado o cargarse y descargarse por una corriente cuan grande se desee. En realidad, los condensadores sí disipan energía, poseen voltajes de operación y corrientes máximas de carga y descarga. Todo esto depende de la naturaleza de su construcción y por su puesto, del propósito que fue diseñado.

### 3.2.1. Breakdown voltage

Los condensadores convencionales contruidos con materiales dieléctricos están sujetos a un voltaje máximo de operación determinado por la tensión de ruptura (*Breakdown voltage*), voltaje al cual se pierden las propiedades dieléctricas del material ocasionando cortocircuito al interior del dispositivo, determinado por la fuerza dieléctrica del material y el espesor de este. En los condensadores electrolíticos la tensión de ruptura es determinada por otros mecanismos[8]. En lo que respecta a los supercondensadores, el voltaje máximo de carga depende fundamentalmente de electrolito usado, principalmente por las reacciones que ocurren a ciertos potenciales, este tema será abordado con más detalle en la sección correspondiente.

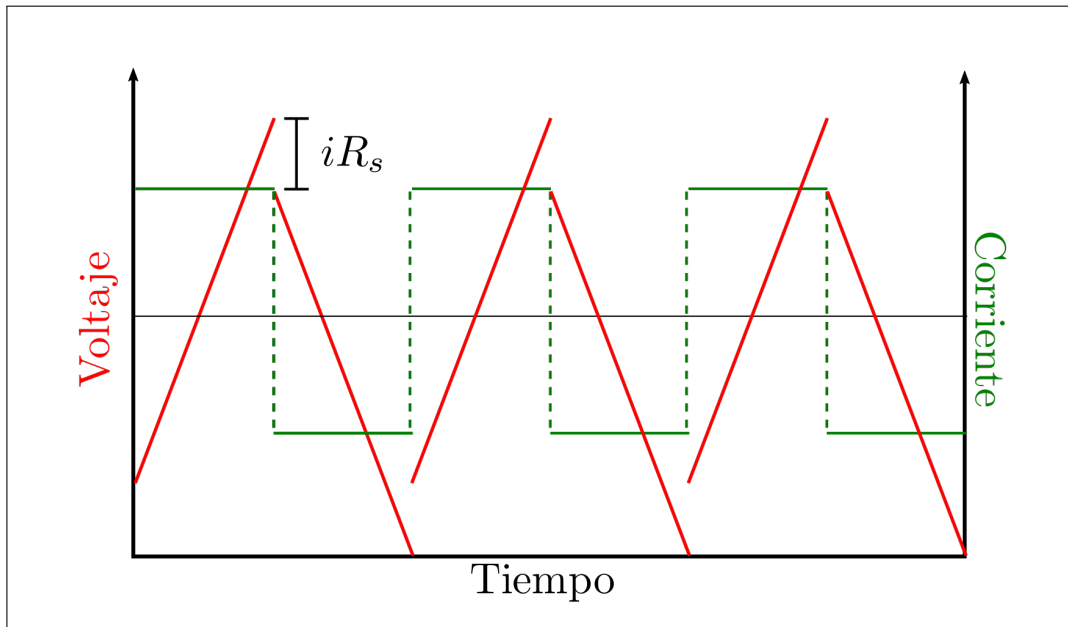
### 3.2.2. Circuito equivalente

El comportamiento de los condensadores reales son modeladas por un circuito equivalente, donde se introducen componentes que representan las imperfecciones del funcionamiento del condensador real.

### 3.2.3. Resistencia en serie equivalente (ESR)

Las imperfecciones en la construcción de los electrodos, y la naturaleza de los materiales utilizados (e.g. resistencia no cero), disipan energía durante la carga y descarga como si se tratase de una resistencia en serie

al condensador, esto se ve reflejado como una caída de voltaje en los terminales del dispositivo (figura 3.2), y disminuye la eficiencia de éste.



**Figura 3.2:** Carga y descarga de un condensador evidenciando el efecto de una ESR.

#### 3.2.4. Corriente de fuga (*leakage current*)

Entre los electrodos del condensador fluye una corriente no deseada cuando existe una diferencia de potencial entre los electrodos, esta corriente

### **3.3. ¿Qué hace a un supercondensador?**

#### **3.3.1. Doble capa electrostática de Helmholtz**

#### **3.3.2. Pseudocapacitancia**

## **Parte II**

### **Cuerpo de la tesis**

## Capítulo 4

# Síntesis de óxido de grafeno

El método de síntesis utilizado está basado en el propuesto por Hummers [9], y es descrito en [10].

### 4.1. Procedimiento experimental

En una síntesis normal 3g de grafito en polvo (Sigma-Aldrich ¿99 %) o en hojuelas (Superior Graphite ¿80 %),

### 4.2. Resultados

## **Capítulo 5**

# **Reducción del óxido de grafeno**

### **5.1. Materiales**

Como precursor se usa el óxido de grafeno sintetizado con anterioridad,

### **5.2. Procedimiento**

El proceso de reducción se lleva a cabo a diferentes temperaturas

### **5.3. Resultados**

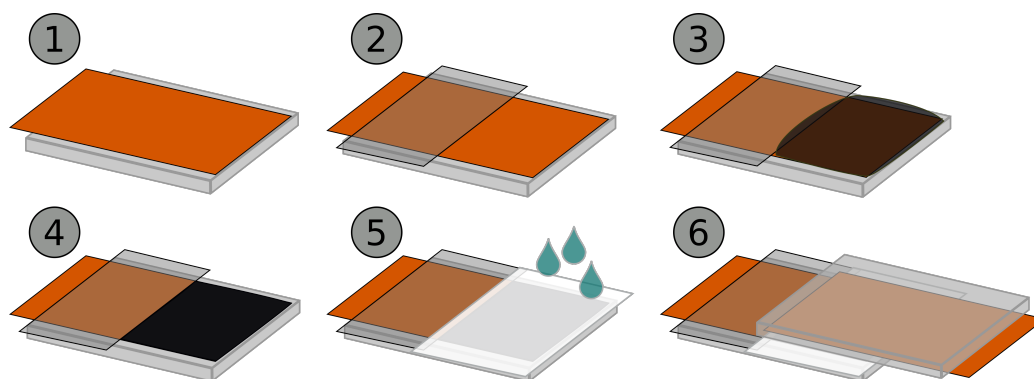


## Capítulo 6

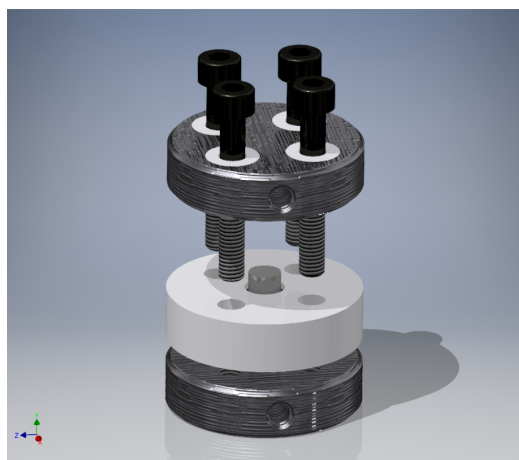
# Construcción de supercondensadores

### 6.1. Armado del dispositivo

Un supercondensadores es armado simplemente haciendo un sandwich electrodo-separador-electrodo, siendo los electrodos con material el componente más crítico. Los electrodos son placas metálicas que cumplen el rol de colectores de corriente, recubiertos con el materiales que se desea utilizar, en este caso, RGO.①



**Figura 6.1:** Armado de un supercondensador para realizar pruebas. ① Lámina metálica de 1 cm de ancho sobre un trozo de vidrio. ② Cinta auto adhesiva para limitar el área a 1 cm<sup>2</sup>.



## **6.2. Celda de prueba de supercondensador**

## **6.3. Resultados**

Los supercondensadores son sometidos a pruebas electroquímicas estudiar su desempeño, éstas pruebas incluyen: voltametría cíclica (CV), ciclos de carga y descarga a corriente constante, espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

## **Parte III**

# **Conclusiones**

# Anexo

# Índice alfabético

condensador ideal, 9

condensador real, 10

longitud característica, 3, 7

nanomaterial, 3, 7

tensión de ruptura, *breakdown voltage*, 10

# Bibliografía

1. Greßler, S. y Gazsó, A. Definition of the term “nanomaterial”. *ITA Nanotrust Dossiers*. doi:[10.1553/ita-nt-039en](https://doi.org/10.1553/ita-nt-039en) (2013).
2. Novoselov, K., Geim, A. y Morozov, S. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science* **306**, 666-9. ISSN: 1095-9203 (2004).
3. Balandin, A. A. y col. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters* **8**, 902-907. ISSN: 15306984 (2008).
4. Bolotin, K. I. y col. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Communications* **146**, 351-355. ISSN: 00381098 (2008).
5. Bonaccorso, F, Sun, Z, Hasan, T y Ferrari, A. C. Graphene Photonics and Optoelectronics. *Nature Photonics* **4**, 611-622. ISSN: 1749-4885 (2010).
6. Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., Hone, J. y =. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science* **321**, 385-388. ISSN: 0036-8075 (2008).
7. Thounthong, P., Ra??l, S. y Davat, B. Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *Journal of Power Sources* **193**, 376-385. ISSN: 03787753 (2009).

8. Yahalom, J. y Zahavi, J. Experimental evaluation of some electrolytic breakdown hypotheses. *Electrochimica Acta* **16**, 603-607. ISSN: 00134686 (1971).
9. Hummers, W. S. y Offeman, R. E. Preparation of Graphitic Oxide. *Journal of the American Chemical Society* **80**, 1339-1339. ISSN: 0002-7863 (1958).
10. Abdolhosseinzadeh, S., Asgharzadeh, H. y Seop Kim, H. Fast and fully-scalable synthesis of reduced graphene oxide. *Scientific Reports* **5**, 10160. ISSN: 2045-2322 (2015).