

A. Anexo.

A.1 Otras alternativas examinadas.

Durante el desarrollo del presente trabajo se intentaron otros enfoques y alternativas para la fabricación de EDLCs. En la tabla 6.1 se describen brevemente y las razones por las que fueron descartadas.

Alternativa	Descartado por...
Electrodos sin colector de corriente metálico. Depositando una película de MWCNT sobre un sustrato aislante transparente de acetato o de polietileno.	Baja conductividad y poca resistencia de los sustratos contra la corrosión.
Electrolito soportado en hidrogel (Copolimero de poliacrilamida).	Baja conductividad y alta viscosidad (poca fluidez que limita la topología con la que se puede fabricar EDLCs).
Electrolito soportado en PVA (alcohol polivinílico).	Baja conductividad y alta viscosidad (aunque sus características son mejores que las de la alternativa que utiliza hidrogel, distan de ser ideales para EDLCs).
Solución de KOH como electrolito	Altamente corrosivo para los colectores de corriente, curvas de descarga con pérdidas excesivas.
Tinta sin aditivos.	Mayor dificultad de aplicar sobre los colectores de corriente, forma un recubrimiento quebradizo no apto para ser enrollado.
Apilar ánodo-separador-cátodo-separador-ánodo....	Mayor dificultad para fabricar EDLCs; requiere cortar muchos segmentos de papel aluminio, y luego conectarlos todos con las terminales del dispositivo, dando lugar a una mayor ESR.
Fabricación de un capacitor electrostático electrodos compuestos por nanotubos de carbono y azufre polimerizado como dieléctrico.	Poca estabilidad del dieléctrico (con el tiempo el azufre polimerizado se convierte en otras formas alotrópicas más estables y quebradizas).
Utilización de nanotubos sintetizados por CVD utilizando $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ como catalizador soportado en Al_2O_3 y CS_2 como precursor.	Dificultad para fabricar cantidades grandes de nanotubos.

Tabla A1. Otras alternativas examinadas para la fabricación de EDLCs con CNTs.

A2. Software utilizado.

Software	Usado para...
Corel DRAW X3	Ilustraciones
Corel PHOTO-PAINT X3	Retoque de imágenes
COMSOL Multiphysics 3.4	Simulación por análisis de elementos finitos
Multisim 10.1	Simulación por SPICE
SciDAVis 0.2.3	Gráficas

Tabla A2. Software utilizado.

A3. Detalles de simulación.

Netlist para el circuito de la simulación:

```

### Multisim Component KV ###
* !!!BEGIN-INTERACT
* : Farads_per_Volt +++++f2 ;
* 0.0 VARIABLE Resistor_Current
* 0.0 VARIABLE Applied_Voltage
* 0.0 VARIABLE Resulting_Capacitance
*:OUT_DATA
* GET_INSTANCE Vsource ::V Vsns i ==> *_Resistor_Current
* *_Resistor_Current 1.0e6 f.* ==> *_Applied_Voltage
* *_Applied_Voltage f.abs ==> *_Applied_Voltage
* Farads_per_Volt *_Applied_Voltage f.*
==> *_Resulting_Capacitance
* *_Resulting_Capacitance VALUE 0
SET_ANIMATION_TEXT_BYID
* *_Resulting_Capacitance.SET_INSTANCE Capacitor ::C C1
capacitance
* ;
*:ON_USER_UPDATE
* 0.0 ==> *_Resistor_Current
* 0.0 ==> *_Applied_Voltage
* 0.0 ==> *_Resulting_Capacitance
* ;
* !!!END-INTERACT
xKV 2 0 2 0 Voltage_Controlled_CapacitorKV
.subckt Voltage_Controlled_CapacitorKV 1 2 3 4
R1 1 1a 1e6
Vsns 1a 2 DC 0
C1 3 4 10e-6
.ends

### Multisim Component C1 ###
cC1 2 0 2.385

### Multisim Component R0 ###
rR0 9 2 4.43 vresR0
.model vresR0 r( )

### Multisim Component V1 ###
vV1 4 0 dc 2.5 ac 0 0
+ distof1 0 0
+ distof2 0 0

### Multisim Component R2 ###
rR2 9 5 5.45 vresR2
.model vresR2 r( )

### Multisim Component C2 ###
cC2 5 0 0.456

### Multisim Component EPR ###
rEPR 9 0 92.94 vresEPR
.model vresEPR r( )

### Multisim Component Rd ###
rRd 0 1 10 vresRd
.model vresRd r( )

### Multisim Component I1 ###
gI1 4 3 7 0 0.1048

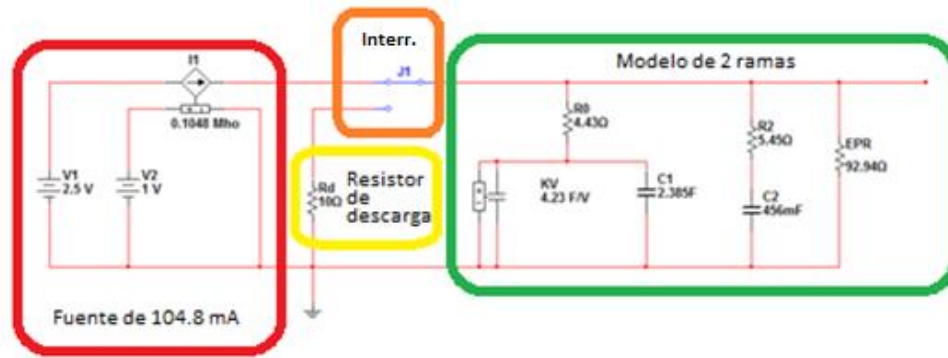
### Multisim Component V2 ###
vV2 7 0 dc 1 ac 0 0
+ distof1 0 0
+ distof2 0 0

### Multisim Component J1 ###
* !!!BEGIN-INTERACT
* : time_on +++++f2 ;
* : time_off +++++f4 ;
* 1e-8 constant low
* 1e30 constant high
* low VARIABLE resistance
* : IS_ON
* time_off time_on f.< if
* TIME time_off f.< if
* true
* else TIME time_on f.< if
* false
* else
* true
* endif endif
* else
* TIME time_on f.< if
* false
* else TIME time_off f.< if
* true
* else
* false
* endif endif
* endif
* ;
*: UPDATE_SWITCH
* IS_ON if
* 1 ==> *_animation_state
* high resistance GRADUAL_CHANGE_AT_RUN
* else
* 0 ==> *_animation_state
* low resistance GRADUAL_CHANGE_AT_RUN
* endif
* ;
*:BEGIN_PLOT
* UPDATE_SWITCH
* ;
*:OUT_DATA
* UPDATE_SWITCH
* ;
*:GRADUAL_CHANGE_AT_RUN locals| ref value |
* value SET_INSTANCE Resistor ::R r1 resistance
* high low f.+ value f.- SET_INSTANCE Resistor ::R r2 resistance
* ;
*:BEGIN_ANALYSIS UPDATE_SWITCH ;
* !!!END-INTERACT

xJ1 1 9 3 TDSwitchJ1

.subckt TDSwitchJ1 1 2 3
R1 2 1 1e30
R2 2 3 1e-8

```



La sección del circuito encerrada en rojo tiene la función de proporcionar 104 mA de corriente hasta llegar a 2.5 V, la sección en amarillo descarga al modelo a través de un resistor de 10 Ω , el interruptor de la sección naranja realiza la conmutación entre el subcircuito de carga y de descarga, inicialmente se encuentra en la posición de descarga y es conmutado al llegar a 0.0001 s, y otra vez al llegar a 100 s. Por último el modelo de 2 ramas se encuentra en la sección en verde.

A4. Lista de figuras.

Identificador	Descripción	Página
2.1	Capacitor de placas paralelas, A es el ánodo, B el dieléctrico, C el cátodo, A el área de las placas y d la distancia entre placas.	4
2.2	Estructura de un EDLC. A es un anión, B es un catión, C es el separador, D el material poroso y E el colector de corriente.	7
2.3	Estructura simplificada de un capacitor electrolítico. A es un ion, B es el papel impregnado o cátodo, C la capa de oxido y D el ánodo, nótese que el electrodo superior e inferior son ánodos.	7
2.4	Simulación por FEA de la densidad de energía en distintas regiones de un capacitor.	11
2.5	Modelo de Gouy-Chapman-Stern para una doble capa. Φ_E es el potencial del electrodo, Φ_1 el del PHI, Φ_2 el del PHE, q^E es la carga en el electrodo, σ^{ci} es la densidad de carga en la capa interna y σ^{cd} la densidad de carga en la capa difusa.	12
2.6	Perfil del potencial a través de una doble capa eléctrica sin involucrar iones absorbidos específicamente. Φ_E es el potencial del electrodo, Φ_2 el del PHE, ambos con respecto al potencial de la solución Φ_s .	13
2.7	Circuito equivalente de un capacitor real para frecuencias bajas.	14
2.8	Circuito equivalente de un EDLC.	15
2.9	Modelo de 2 ramas.	16
2.10	Algunas formas alotrópicas del carbono; a) Diamante, b) Grafito, c) Lonsdaleita, d) C60 (Buckyball), e) C540, f) C70, g) Carbón amorfo, h) nanotubo de carbono de una pared.	18
2.11	Micrografías por TEM de MWCNT de 5, 2 y 7 paredes	20
3.1	Micrografía por SEM de una película de MWCNT – Magnificación 10,000 X @ 20 kV – Detector de electrones secundarios.	26

3.2	Micrografía por SEM de una película de MWCNT – Magnificación 25,000 X @ 20 kV – Detector de electrones secundarios.	26
3.3	Micrografía por SEM de una película de MWCNT – Magnificación 50,000 X @ 20 kV – Detector de electrones secundarios.	27
3.4	Micrografía por SEM de una película de MWCNT – Magnificación 100,000 X @ 20 kV – Detector de electrones secundarios.	27
3.5	Micrografía por TEM de una película de MWCNT – Magnificación 30,000 X @ 120 kV.	28
3.6	Micrografía por TEM de una película de MWCNT – Magnificación 60,000 X @ 120 kV.	28
3.7	Micrografía por TEM de una película de MWCNT – Magnificación 100,000 X @ 120 kV.	29
3.8	EDS del material.	29
3.9	Diagrama del circuito para carga y descarga.	31
3.10	Diagrama de la celda de prueba.	32
3.11	Diagrama del EDLC con electrodos enrollados.	32
3.12	Diagrama de fases para el etanol.	33
4.1	Micrografía por SEM de un electrodo – Magnificación 2,000 X @ 20 kV – Detector de electrones dispersados de fondo.	35
4.2	Micrografía por SEM de un electrodo – Magnificación 5,000 X @ 20 kV – Detector de electrones dispersados de fondo.	35
4.3	Micrografía por SEM de un electrodo – Magnificación 10,000 X @ 20 kV – Detector de electrones dispersados de fondo.	36
4.4	Micrografía por SEM de una película de MWCNT – Magnificación 10,000 X @ 20 kV – Detector de electrones secundarios.	36
4.5	Micrografía por SEM de un corte vertical de un electrodo – Magnificación 1,000 X @ 20 kV – Detector de electrones dispersados de fondo.	37
4.6	Micrografía por SEM de un corte vertical de un electrodo – Magnificación 2,000 X @ 20 kV – Detector de electrones dispersados de fondo.	37
4.7	Micrografía por SEM de un corte vertical de un electrodo – Magnificación 5,000 X @ 20 kV – Detector de electrones dispersados de fondo.	38
4.8	Micrografía por SEM de un corte vertical de un electrodo – Magnificación 1,000 X @ 20 kV – Detector de electrones dispersados de fondo.	38
4.9	Dispositivo y circuito para medir la resistencia de hoja de los electrodos, la distancia entre cada punta es de 1 mm.	39
4.10	Curva de carga – descarga para el EDLC A.	40
4.11	Capacitancia instantánea.	40
4.12	Comparación entre el modelo de 2 ramas y el comportamiento de EDLC B, sin resistor de descarga.	41
4.13	Comparación entre el modelo de 2 ramas y el comportamiento de EDLC B, con resistor de descarga.	42
4.14	Modelo utilizado para la simulación.	42

A5. Lista de tablas

Identificador	Descripción	Página
2.1	Capacidad de almacenamiento de energía de capacitores de alto voltaje.	5
2.2	Comparación de figuras de merito entre baterías recargables, EDLCs y capacitores electrolíticos.	6
2.3	Comparación de capacidad de almacenamiento de carga.	9
2.4	Formas alotrópicas del carbono de acuerdo a la hibridación de sus orbitales.	17
2.5	Modificación de materiales de carbono para EDLCs.	19
4.1	Resistencia de hoja de los electrodos.	38
4.2	Parámetros eléctricos para el modelo de 2 ramas.	41
4.3	Costo de la tinta utilizada para el EDLC B.	43
4.4	Costo del EDLC B.	43
A1.	Otras alternativas examinadas para la fabricación de EDLCs con CNTs.	46