



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Nanogenerador Triboeléctrico para recolección de energía proveniente del viento

TRABAJO FIN DE MASTER

MASTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Hernán Molina Ruiz
Director: Dr. Salvador Ángel Gómez Lopera



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, 21 de julio de 2021

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, el Dr. Salvador Ángel Gómez Lopera por aportarme la idea que dio luz a este trabajo y a mi interés por la innovación tecnológica como modelo y objetivo en la vida.

En segundo lugar, doy gracias a la Máster en Energías Renovables de la Universidad Politécnica de Cartagena, el cual me ha permitido tener contacto con profesores que me han aportado tanto y han alimentado mi amor por la ingeniería, la ciencia y el conocimiento.

Al Dr. Antonio Urbina Yeregui, por enseñarme a usar la “Web of Science”, lo que me ha permitido ampliar y renovar continuamente mi conocimiento acerca de tecnologías innovadoras.

A la Dra. María Socorro García Cascales, por su confianza en mí, la cual me ha permitido iniciar una carrera profesional dedicada a la innovación y nuevas tecnologías renovables.

También quería dar gracias a mis padres y hermana, sin cuyo apoyo no habría llegado al lugar en el que ahora me encuentro.

Por último, quería dar gracias a Dña. Celia María Alfonso Pérez, por ser un modelo de entereza y referente, un apoyo incondicional y la voz que me ha empujado a llegar hasta el final.

Muchas gracias.



ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. GENERALIDADES	2
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.4. PLANIFICACIÓN.....	4
CAPÍTULO 2 TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES	6
2.1. EFECTO TRIBOELÉCTRICO	7
2.1.1. Generalidades	7
2.1.2. Parámetros dominantes.....	8
2.1.3. Otros factores importantes.....	9
2.1.3.1. Propiedades superficiales	9
2.1.3.2. Influencias externas	9
2.2. SERIES TRIBOELÉCTRICAS	9
2.3. NANOGENERADORES TRIBOELÉCTRICOS (TENG)	12
2.3.1. Definición y características	12
2.3.2. Problemáticas	13
2.3.3. Tipologías de Nanogeneradores Triboeléctricos	13
2.3.4. Nanogenerador triboeléctrico de no contacto con asistencia magnética	14
2.3.4.1. Materiales empleados.....	15
2.3.4.2. Funcionamiento	15
2.3.4.3. Caracterización.....	16
2.3.4.4. Observaciones	18
2.3.5. Nanogenerador triboeléctrico cilíndrico	19
2.3.5.1. Estructura.....	20
2.3.5.2. Funcionamiento	21
2.3.5.3. Caracterización.....	22
2.3.5.4. Observaciones.....	26
2.3.6. Nanogenerador Híbrido	27
2.3.6.1. Estructura.....	27
2.3.6.2. Funcionamiento	28
2.3.6.3. Caracterización.....	29
2.3.6.4. Observaciones.....	32
2.3.7. Modelos matemáticos	33
2.3.7.1. TENG de deslizamiento dieléctrico – dieléctrico	35
2.3.7.2. TENG de deslizamiento conductor – dieléctrico	48
2.3.7.3. TENG de contacto	51
2.3.8. Optimizaciones de funcionamiento.....	56
2.3.8.1. MG - TENG.....	58
2.3.8.2. TENG de disposición radial.....	65
2.4. CONCLUSIONES	69
CAPÍTULO 3 DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS	72
3.1. INTRODUCCIÓN	73
3.2. PARÁMETROS DE DISEÑO	74
3.3. DISPOSITIVO 1 (D.1): VENTILADOR DE CPU	75
3.3.1. Rotor	77
3.3.2. Estator.....	79
3.4. DISPOSITIVO 2 (D.2): MOLINILLO	80
3.4.1. Rotor	80
3.4.2. Estator.....	81



3.5.	DISPOSITIVO 3 (D.3): CILINDRO TRIBO-GENERADOR	81
3.6.	SELECCIÓN DE MATERIALES	81
CAPÍTULO 4 MODELIZACIÓN TEÓRICA		90
4.1.	INTRODUCCIÓN	91
4.2.	MODELO GENERAL	91
4.1.1.	<i>Balance Energético del sistema</i>	92
4.1.1.1.	Energía de entrada y salida del sistema	93
4.1.1.2.	Pérdidas del sistema	100
4.1.1.3.	Generación eléctrica	103
4.1.2.	<i>Modelizado final general</i>	107
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....		112
REFERENCIAS.....		115



ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1.	Diagrama de Gantt del proyecto	5
Figura 2.	Esquema de funcionamiento de un Generador de Van Graaff	8
Figura 3.	Tipologías de funcionamiento de los TENG dependiendo del método de contacto triboeléctrico.	14
Figura 4.	Esquema estructural y de funcionamiento del TENG de no contacto con asistencia magnética ...	16
Figura 5.	Estudio de la dependencia de Voc e Isc de un solo TENG respecto a la frecuencia de rotación del dispositivo.....	17
Figura 6.	Caracterización de un TENG a una frecuencia de rotación de 6 Hz (óptima)	18
Figura 7.	(a) Prototipo, (b) esquema de diseño y funcionamiento, caracterizaciones a (c) velocidades de viento variables y (d) TENGs encapsulados.	19
Figura 8.	Esquema del TENG cilíndrico con 6 contactos triboeléctricos.	21
Figura 9.	Esquema de funcionamiento del TENG cilíndrico.	22
Figura 10.	Caracterización del TENG cilíndrico de 6 contactos triboeléctricos.	23
Figura 11.	Estudio de los TENGs cilíndricos con diferentes cantidades de contactos	24
Figura 12.	Demostración del funcionamiento y de los rangos de degradación del TENG cilíndrico de 8 contactos.....	25
Figura 13.	Esquema de funcionamiento de un Nanogenerador Híbrido TENG-PPENG.....	28
Figura 14.	Caracterización del TENG.....	30
Figura 15.	Caracterización del PPENG.	32
Figura 16.	Modelización de tensiones (V, Voc) del TENG de deslizamiento dieléctrico - dieléctrico. Condiciones de Circuito Abierto (OC)	35
Figura 17.	Relación (V-Q-x) del TENG de deslizamiento dieléctrico - dieléctrico.....	36
Figura 18.	Observación del <i>Efecto borde</i> sobre un TENG de deslizamiento de $l/d = 10$	41
Figura 19.	Modelización de Intensidad y Carga de Cortocircuito (Isc, Qsc) del TENG de deslizamiento dieléctrico - dieléctrico.....	42
Figura 20.	Comparación del Modelo matemático teórico obtenido con datos experimentales para un TENG de deslizamiento dieléctrico - dieléctrico.....	48
Figura 21.	Modelización del TENG de deslizamiento Conductor - Dieléctrico.	49
Figura 22.	Esquemas de funcionamiento para los diferentes Tribo-dispositivos de contacto a modelizar. (a) Dieléctrico – dieléctrico, (b) Conductor – dieléctrico.	51
Figura 23.	Gráficas de funcionamiento de TENGs con diferentes cantidades de contactos emparrillados (N) equivalentes.....	58
Figura 24.	Esquema de un doble contacto del MG-TENG.	59
Figura 25.	Esquemas de funcionamiento de un MG-TENG de doble contacto.	60
Figura 26.	Análisis del comportamiento del MG-TENG a múltiples ciclos de funcionamiento.	60
Figura 27.	Análisis del comportamiento del MG-TENG a múltiples ciclos de funcionamiento.	62
Figura 28.	Figura 28. Progresión de la potencia recolectada por el MG-TENG a 10 m/s y con un espesor de PTFE de 25 μm	64
Figura 29.	Esquema del diseño estructural del TENG de disposición radial.	65



Figura 30.	Esquema de funcionamiento del TENG de disposición radial.....	66
Figura 31.	Análisis de los parámetros de salida del TENG de disposición radial en función de diferentes variables dimensionales o de funcionamiento.	68
Figura 32.	Estructura de partida tipo para nuestro Diseño D.1.....	76
Figura 33.	Alzado y Planta del rotor de partida para D.1.....	76
Figura 34.	Alzado y Planta del rotor de partida para D.2.....	77
Figura 35.	Imagen del núcleo del estator con sus correspondientes solenoides y núcleos metálicos	79
Figura 36.	Ejemplos de partida tipo para nuestro Diseño D.2.....	80
Figura 37.	Esquema molecular de un material dieléctrico despolarizado (sin aplicación de un campo eléctrico externo) y polarizado.....	88
Figura 38.	Esquema de funcionamiento de un sistema eólico con las isolíneas de velocidad del viento. .	93
Figura 39.	Sección transversal del flujo de viento interaccionando con el rotor del aerogenerador	94
Figura 40.	Representación de los Coeficientes de potencia (C_p) y las relaciones de velocidad (λ) de distintos diseños de rotores con diferente número de álabes.	100
Figura 41.	Esquema del mecanismo de funcionamiento del rozamiento de rodadura.	102



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Planificación temporal del TFM.....	5
Tabla 2. Serie Triboeléctrica cualitativa.....	10
Tabla 3. Serie Triboeléctrica de dieléctricos puestos en contacto con mercurio (Hg) como referencia	11
Tabla 4. Coeficientes dinámicos de rozamiento para los diferentes sistemas considerados en el funcionamiento del MG-TENG.....	61
Tabla 5. Análisis de las densidades de carga superficial y máximas inducidas en función de la anchura de los contactos emparrillados para un espesor de dieléctrico de 25 μm	63
Tabla 6. Análisis de las densidades de carga superficial y máximas inducidas en función de la anchura de los contactos emparrillados para un espesor de dieléctrico de 10 μm	64
Tabla 7. Densidades de carga triboeléctrica (TECD = σ) de diferentes Pares Triboeléctricos.	81
Tabla 8. Parámetros de interés de los diferentes materiales valorados.....	82
Tabla 9. Coeficientes de rozamiento dinámicos y estáticos de los diferentes materiales considerados con respecto del Acero	85





CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



1.1. Generalidades

En los últimos años, la conciencia social y política acerca del cambio climático, el efecto invernadero y el medio ambiente, han visto un incremento sin precedentes debido a los problemas que estos están causando sobre la biodiversidad, los ecosistemas y las diferentes formas de vida. Por estos motivos nos encontramos en la actualidad con un auge en las políticas hacia la descarbonización de los diferentes modelos productivos humanos, centrándonos en este caso en el relativo al sistema energético.

Los principales métodos puestos en marcha para el alcance del objetivo de descarbonización del sistema energético global pasan por el uso de las denominadas como energías renovables. Dichas fuentes energéticas se caracterizan por el empleo de los recursos cuya regeneración es apreciable a escala humana, por lo que se les define como *Fuentes de energía inagotables*. Adicionalmente, las Energías Renovables presentan unas escasas o nulas emisiones de gases contaminantes, así como de efecto invernadero. Pese a que su investigación y desarrollo lleva ya años de avances y progresos y en algunos casos son tecnologías maduras, siguen presentando importantes limitaciones que obliga a unas labores de dimensionamiento e ingeniería de importante envergadura para alcanzar que, junto con la descarbonización, también se mantenga o mejore la rentabilidad de los sistemas productores de energía. Entre las limitaciones cabe destacar las referentes a las dimensiones y escala que las centrales para el aprovechamiento de las fuentes de energía renovable tienden a requerir.

Con todas estas premisas establecidas, el desarrollo de no solo investigaciones de mejora en la eficiencia y rentabilidad de las energías renovables ya conocidas tales como la eólica; solar fotovoltaica; entre otras, es de importancia. También lo es el estudio de otras nuevas formas de aprovechamiento de los recursos renovables en aras de aumentar la eficiencia global y el grado de producción de energías renovables, haciéndolas más accesibles a menores escalas de instalación.

Es en este punto donde se establece el objeto de nuestro proyecto. Dispositivos capaces de aprovechar hasta débiles rachas de viento para la obtención de energía eléctrica de alta eficiencia y a un coste reducido. Menores incluso que las relativas a la aplicación de la energía minieólica. Permitiendo así un aprovechamiento del recurso eólico a menor escala para la alimentación de dispositivos eléctricos de baja tensión ampliamente extendidos en el uso doméstico, entre otros. En un enfoque de macroescala se podría suponer en la aplicación de un rotor accionador de una pequeña dinamo para la producción de corriente continua. Uno de los dispositivos planteados aplica esta consideración y la une junto con la aparición y empleo de triboelectricidad.

La triboelectricidad, de forma simplificada, se puede definir como la electrización por frotamiento de dos materiales cuyas características ocasionan la aparición del efecto triboeléctrico. Dicho efecto consiste en la electrización de ambos materiales puestos en contacto en la interfase de los mismos, debido a los diferentes grados de afinidad electrónica

INTRODUCCIÓN

que estos presentan. A ambos materiales se les denomina como “Par triboeléctrico”. Los materiales triboeléctricos se encuentran referenciados en series triboeléctricas las cuales los clasifican atendiendo a la magnitud y signo de la electrización sufrida.

Además del par triboeléctrico seleccionado, otro de los parámetros clave para la obtención de una corriente triboeléctrica es el grado de rugosidad y superficie de contacto de los materiales durante el proceso de activación por frotamiento. Cuanto más íntimamente se pongan en contacto para su posterior separación, mayor será el grado de electrización de los mismos ocasionando una mayor densidad de carga triboeléctrica en cada uno de ellos y posterior corriente, una vez se cierre el circuito. Es en este punto donde se aplican las técnicas correspondientes a la Nanotecnología ya que, en el caso de materiales nanoestructurados (1 – 100 nm de tamaño), se ocasiona un contacto mucho más íntimo entre ellos y un mayor grado de rugosidad, facilitando así la magnitud de la electrización. De hecho, está demostrada la correlación existente entre la nanotecnología y la aplicación de la triboelectricidad y otros efectos de recolección energética en desarrollo, como la piezo- y piroelectricidad. De no existir las técnicas propias de la nanotecnología, la magnitud de la recolección energética de estos sistemas no sería relevante.

A la combinación entre un par triboeléctrico mediante materiales nanoestructurados se les conoce como *Nanogeneradores Triboeléctricos (TENG)*. Estos dispositivos, junto con otros tipos de nanogeneradores existentes, combinan ciertas propiedades de especial interés. Entre ellas destaca su gran modularidad y pequeña escala de aplicación con altas eficiencias. Esto es debido a la tendencia actual hacia el desarrollo de las redes eléctricas distribuidas e inteligentes, las cuales se posicionan como algunas de las principales propuestas para el cumplimiento del objetivo de renovación y descarbonización del sistema energético. La problemática para el desarrollo de dichas redes subyace bajo las limitaciones hacia el autoconsumo en zonas urbanas de alta densidad de población. Por lo tanto, la modelización de los nanogeneradores; especialmente los triboeléctricos; supone una línea de conocimiento de especial interés gracias al gran abanico de posibilidades de conversión energética a pequeña escala que estos podrían suponer. Pero estos no son los únicos que se deberían considerar ya que, teniendo en cuenta los anteriormente mencionados efectos piezo- y piroeléctricos, la combinación de todos podría albergar un aún más amplio espectro. Como el que observa la punta de un iceberg de posibilidades.

1.2. Justificación

El presente TFM consiste en el desarrollo de un proyecto investigador de vanguardia empleando conceptos aún en estudio y desarrollo para el diseño y modelado teórico de diferentes diseños de nanogeneradores triboeléctricos (TENG). Se corresponderá con un primer enfoque de ingeniería conceptual de los posibles dispositivos que podrían construirse, sus fundamentos de funcionamiento, así como potenciales optimizaciones, con el objetivo de sentar unas bases para posibles futuros desarrollos de los mismos.

INTRODUCCIÓN

La consideración de un determinado par triboeléctrico, en forma de materiales nanoestructurados, junto con diferentes especificaciones de diseño según el dispositivo considerado; permitirá el alcance de los objetivos del proyecto con unos valores de: alta eficiencia, bajo coste y amplia versatilidad de aplicación como sistema de apoyo o alimentación de dispositivos de bajo consumo, entre otros.

Los modelos obtenidos podrán suponer un relevante impacto en el mundo de las energías renovables y la eficiencia energética. A escala urbana y doméstica podrán permitir una mayor aproximación hacia los objetivos globales de desarrollo sostenible y descarbonización económica, debido al mayor aprovechamiento de la energía eólica a pequeña escala. Adicionalmente, debido a la potencial modularidad que presentan, la asociación de múltiples dispositivos de esta índole podría presentar un enorme potencial, no solo como generadores de energía eléctrica, sino además como equipo de hibridación con otras tecnologías, tanto de producción como almacenamiento...

1.3. Objetivos

Los principales objetivos de este TFM son los siguientes:

1. Profunda revisión del estado del arte relativa a los conceptos de interés para el presente proyecto.
 - 1.1. Efecto triboeléctrico
 - 1.2. Series triboeléctricas
 - 1.3. Nanogeneradores triboeléctricos, híbridos, diseños, optimizaciones y modelos matemáticos de funcionamiento
2. Diseño de diferentes nanogeneradores triboeléctricos (TENG) para el aprovechamiento de la energía mecánica del viento y su conversión en energía eléctrica.
 - 2.1. Diseño de los Rotores y Estatores
 - 2.2. Selección de los materiales a emplear: Par triboeléctrico y Electrodo
3. Modelizado teórico de los diseños planteados.
 - 3.1. Modelizado teórico general
 - 3.2. Modelizado teórico preciso para cada uno de los dispositivos planteados

A partir de ellos se pretende obtener un modelo y estimación aproximados del funcionamiento de los diferentes dispositivos prediseñados y considerados. De esta manera se podrían comparar resultados con los de un modelo experimental que se ajuste a los parámetros de diseño y, establecer la precisión del modelo en aras de perfeccionarlo con el objetivo final de facilitar los dimensionamientos futuros y optimizaciones de los TENG.

Además, también permitiría obtener el punto de partida a un posible proyecto de desarrollo tecnológico, a partir de un estudio de viabilidad y su correspondiente análisis de sensibilidad, acerca de los TENGs objeto.

1.4. Planificación

INTRODUCCIÓN

Tabla 1.
Planificación temporal del TFM

Tareas	Comienzo	Final
Revisión del estado del arte	Enero 2020	Octubre 2020
Diseño del TENG	Marzo 2020	Diciembre 2020
Modelización Teórica	Noviembre 2020	Mayo 2021
Escritura de la memoria del proyecto	Enero 2020	Julio 2021

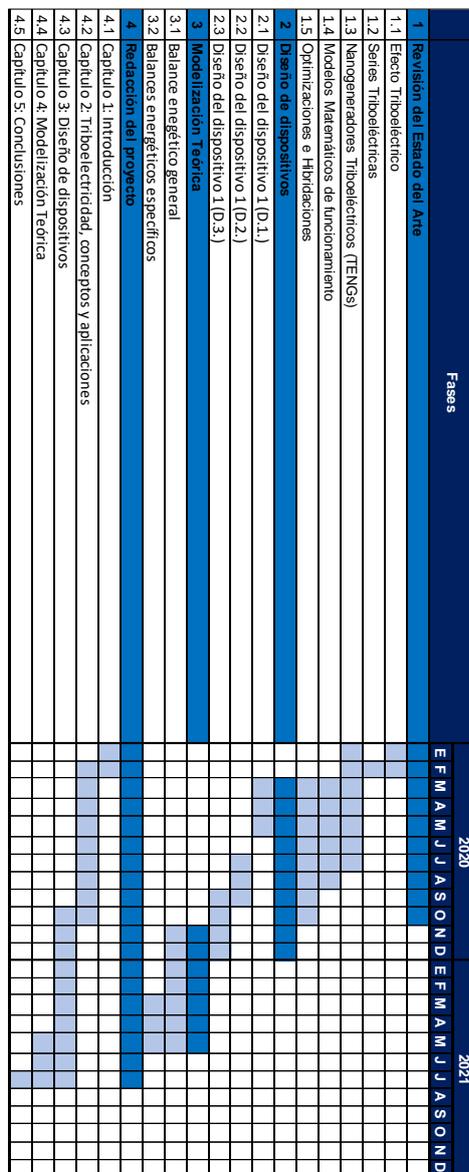


Figura 1. Diagrama de Gantt del proyecto



CAPÍTULO 2

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES



TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

2.1. Efecto triboeléctrico

2.1.1. Generalidades

La *Triboelectricidad* constituyó una de las primeras manifestaciones eléctricas conocidas. Descubierta por Tales de Mileto al frotar Ámbar con Lana, este observó que el Ámbar adquiría una capacidad no presentada hasta el momento; la de atraer o repeler cuerpos de pequeño tamaño; tales como virutas o fibras. Fue este descubrimiento el que estableció los términos generales que hoy se emplean en el campo de la electricidad tales como *Elektron*, el cual le da nombre y proviene del griego cuyo significado es Ámbar. Por su parte, este fenómeno se precisó tiempo después estableciendo que dicha atracción y repulsión de cuerpos era debida a las interacciones electrostáticas ocasionadas por las cargas de signo opuesto. Para que esto tuviera lugar entre dos cuerpos tras el frotamiento mutuo, estos se debían haber electrizado, o lo que es lo mismo, acumulado cargas de distinto signo. A esto se le dio un nombre siguiendo también la terminología griega, el cual era el de *Triboelectricidad*; procedente de *Elektron* y *Tribein* (Frotar en griego). Es por todo esto que a la Triboelectricidad es también conocida como la electrización por frotamiento o contacto entre dos materiales que conforman un *par triboeléctrico*.

Algunas aplicaciones históricas de este efecto han sido las máquinas o generadores electrostáticos de alto voltaje, capaces incluso de alcanzar la tensión de ruptura dieléctrica del aire produciendo chispas al acercar tanto superficies cargadas como eléctricamente neutras. Entre estos instrumentos destacamos:

- **Generador de Van Graaff**: Presentado en 1931 por el Físico norteamericano que le da nombre. Su funcionamiento se basaba en la electrificación por contacto de una cinta de un material aislante (efecto triboeléctrico), la cual rotaba hasta ponerla en contacto con una escobilla superior de un material conductor. Dicha escobilla extraía la carga de la cinta mediante inducción electrostática. La **Figura 2** muestra un esquema de funcionamiento para un generador de Van Graaff. Entre sus aplicaciones destacan las académicas, en aras de visualizar de forma práctica la electrostática, y los aceleradores de partículas electrostáticos.
 - **Máquina de Wimshurst**: Presentada entre 1880 – 1883 por el británico que también le da nombre, se trata de otro generador electrostático de alto voltaje. También emplea el efecto triboeléctrico ocasionado por el contacto entre un aislante y un conductor, pero a diferencia de la de Van Graaff, esta presenta menores aislamientos en sus conexiones, lo que ocasiona el efecto corona y las consecuentes pérdidas de potencia activa.
-

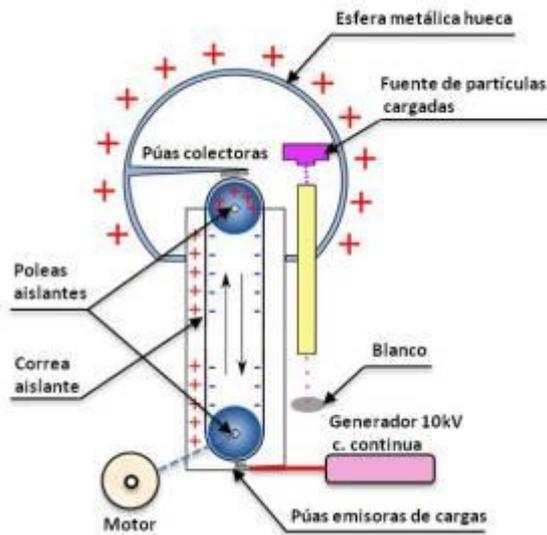


Figura 2. Esquema de funcionamiento de un Generador de Van Graaff

Fuente: <https://losfisicos2.wordpress.com/como-funciona/>

Con el objetivo de precisar en mayor medida acerca de los principios teóricos fundamentales que originan el efecto triboeléctrico, en [1] se realiza una revisión acerca de dicho efecto enfocándola en diferentes aspectos. Esto se debe a que, aún hoy en día, este efecto presenta dificultades para su conocimiento exhaustivo y es por ello por lo que, para su estudio, se desvinculan cada parámetro dominante y se estudia de forma independiente. La gran extensión de los *tribo-dispositivos*, en la época contemporánea, está obligando al desarrollo de estudios y el postulado de teorías acerca de este efecto para su mejor entendimiento y óptima aplicación.

2.1.2. Parámetros dominantes

El efecto triboeléctrico es observable mediante la medición de diferentes tipos de portadores de carga que lo originan. Para ello se emplean modelos tales como el de profundidad de inyección de la carga, así como, la medición de la densidad de carga superficial que dicho efecto produce sobre los materiales. Los portadores de carga implicados en este efecto pueden ser: electrones, iones y nano-materiales.

- **Profundidad de inyección de carga:** Establece que, para que tenga lugar el efecto triboeléctrico, las cargas deben de mantenerse en la interfaz triboeléctrica, por lo que esta ha de tener las características de un condensador, dando lugar a un efecto capacitivo. Es por esto por lo que los materiales dieléctricos son de especial interés para la génesis del efecto triboeléctrico, dada su tendencia a la polarización; bien sea a través de dipolos permanentes o instantáneos.
- **Densidad de carga superficial (σ_s):** Parámetro de medición del grado de electrización de ambas superficies triboeléctricas puestas en contacto. También es empleado para la determinación del grado de eficiencia de los



tribo-dispositivos, así como el análisis de otros parámetros tales como la densidad de carga triboeléctrica, la densidad de potencia y la densidad energética del dispositivo.

2.1.3. Otros factores importantes

Los factores importantes nombrados a continuación hacen referencia a aquellos que son *controlables* para la mejora del proceso de triboelectrificación. Para hablar de ellos nos centraremos en dos grandes grupos acerca de las propiedades superficiales y las influencias externas.

2.1.3.1. Propiedades superficiales

- Microestructura, geometría o patrones de los materiales: Son de especial interés debido a que afectan a la rugosidad del mismo. La cual es un parámetro de mejora del proceso triboeléctrico y está muy influenciada por la composición y estructura superficial de este.
- Tamaño de las partículas o materiales: La magnitud de la electrificación se incrementa progresivamente con la disminución del tamaño. Esto es debido al contacto más íntimo que tiene lugar entre los materiales que conforman el par triboeléctrico.

Las partículas de un tamaño inferior a 40 μm también suelen conllevar una importante mejora de la rugosidad y el contacto superficial. Es por este motivo el especial interés en el empleo de la nanotecnología en los pares triboeléctricos.

2.1.3.2. Influencias externas

- Carga aplicada: Se trata de un factor de especial interés ya que es el activador el efecto triboeléctrico y es importante de conocer para poder precisar el grado de eficiencia del proceso de conversión de la energía mecánica, en modo de fricción o presión superficial, a carga triboeléctrica.
- Humedad y acidez: Pese a que no está consensuado aún el efecto que estos factores pueden tener sobre los pares triboeléctricos, una teoría bastante acertada se basa en la consideración del condensador de doble capa correspondientes a los modelos de Gouy-Chapman y Stern. Esta teoría explicaría las pérdidas de la interfaz triboeléctrica por ocurrir el efecto capacitivo de doble capa electrolítica en el agua depositada.

2.2. Series triboeléctricas



TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

Muchas sustancias pueden ser electrificadas (o electrizadas) por frotamiento y el signo de esta (ya sea positiva o negativa) depende del par de materiales empleados para llevar a cabo dicha electrificación.

Es debido a esto que se establecen las denominadas series triboeléctricas las cuales ordenan las diferentes sustancias por orden de magnitud y signo según el tipo de electrización sufrida. En la actualidad existen muchas series triboeléctricas ya establecidas. Pese al acuerdo parcial entre varias de ellas, la mayoría difieren bastante entre sí, incluso tratándose de los mismos materiales puestos en contacto.

Tabla 2.
Serie triboeléctrica cualitativa.

More positively charged (+)	Δ
Rabbit's Fur, Hair	Brass
Glass	Silver
Mica	Gold
Wool	Polyester (PET)
Nylon	Polystyrene
Lead	Acrylic
Silk	Polyvinyl chloride
Aluminum	Polyvinyl chloride w/plasticizer
Paper	Silicon
Wood	Polyethylene
Amber	Polypropylene
Sealing wax	Polytrifluorochloroethylene
Rubber Balloon	Teflon (PTFE)
Nickel	Silicon Rubber
Copper	Ebonite
∇	More Negatively Charged (-)

* Pure polymers (not mixtures) are marked in red. Pure metals as the segregation points are marked in blue.

Nota Fuente: S. Pan, Z. Zhang. "Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review", (2019), *Friction*, 7

Mientras que en [1] nos encontramos con la serie triboeléctrica de la **Tabla 2**, la serie triboeléctrica propuesta en [2] es la siguiente:

[Pelaje de conejo | Lucita | Baquelita | Acetato | Vidrio | Cuarzo | Mica | Nylon | Lana | Pelaje de gato | Seda | Papel | Algodón | Madera | Ámbar | Resinas | Metales | Poliestireno | Polietileno | Teflón (PTFE)]

Esta serie agrupa a los materiales de mayor grado de cargas positivas a negativas cuando se ponen en contacto los materiales, es decir, los materiales del inicio de la lista se cargan positivamente en contacto con los del final y viceversa. Se considera que una sustancia electrizada con signo negativo por frotamiento ha sufrido una electrificación resinosa y, en el caso de electrizarse con carga positiva sería vítrea, en su lugar.

Por su parte, en [3] se nos propone otra serie triboeléctrica. En este caso se trata de una serie con un mayor grado de detalle que la anterior realizada mediante ensayo con un material de referencia. El ensayo ha consistido en la medición de la densidad de carga triboeléctrica (TECD), la cual es equivalente a la *densidad de carga superficial* (σ_s); mencionada con anterioridad, que tiene lugar cuando se ponen en contacto el material de referencia y el que se desea establecer en la serie triboeléctrica.

Dicho material de referencia es mercurio (Hg), debido a que se trata del único metal líquido en condiciones ambientales. El estado líquido permite un contacto más íntimo entre el par triboeléctrico debido a la mayor difusión en los intersticios del sólido a estudiar, posibilitando así la maximización de la superficie de contacto entre el par triboeléctrico. Debido a que el material de referencia es un metal, esta serie triboeléctrica se centra en la caracterización del efecto triboeléctrico que presentan los materiales dieléctricos frente al mercurio. Es por esto por lo que en esta serie no encontramos valores de referencia del grado de electrización triboeléctrica de otros metales.

La **Tabla 3** muestra los resultados extraídos de [3] sobre la clasificación en serie triboeléctrica de los polímeros ensayados en contacto con el mercurio. En ella nos encontramos con una mayoría de materiales poliméricos que son cargados negativamente, sufriendo una electrización resinosa, con respecto al mercurio. Esto se debe a la mayor tendencia de éste y los demás metales a la cesión de sus electrones externos presentes en su banda de conducción. Los valores más altos de la tabla se corresponden con los que presentan una mayor magnitud de electrización y, además, el valor α se trata de un valor de referencia respecto de la TECD del PTFE (Teflón).

Como principal conclusión hay que destacar que el empleo de las series triboeléctricas se realiza con enfoques principalmente cualitativos, debido a la gran dificultad de establecer una serie triboeléctrica que englobe a todos los pares triboeléctricos disponibles. Este es el principal factor que origina las discrepancias entre las series triboeléctricas existentes actualmente, ya que todas tienden a diferir en los materiales empleados como referencias, así como, sus estructuras o pares empleados. Por todo esto, el empleo de las series triboeléctricas es con afán de seleccionar el par triboeléctrico óptimo para según qué aplicaciones, teniendo en cuenta otros factores de diseño de importancia. Entre estos factores de diseño de importancia destacan: la densidad de carga triboeléctrica generada, los costes, facilidad de utilización y síntesis nanoestructurada, consideraciones de diseño dependiendo de la aplicación, etc.

Tabla 3.

Serie triboeléctrica de dieléctricos puestos en contacto con mercurio (Hg) como referencia

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

Table 1 Triboelectric series of materials and their triboelectric charge density (TECD)

Materials	Abbr.	Average TECD ($\mu\text{C m}^{-2}$)	STDEV	α
Chemical-Resistant Viton® Fluoroelastomer Rubber		-148.20	2.63	-1.31
Acetal		-143.33	2.48	-1.27
Flame-retardant garolite		-142.76	1.49	-1.26
Garolite G-10		-139.89	1.31	-1.24
Clear cellulose		-133.30	2.28	-1.18
Clear polyvinyl chloride	PVC	-117.53	1.31	-1.04
Polytetrafluoroethylene	PTFE	-113.06	1.14	-1.00
Abrasion-resistant polyurethane rubber		-109.22	0.86	-0.97
Acrylonitrile butadiene styrene	ABS	-108.07	0.50	-0.96
Clear polycarbonate (Glossy)	PC	-104.63	1.79	-0.93
Polystyrene	PS	-103.48	2.48	-0.92
Ultem polyetherimide	PEI	-102.91	2.16	-0.91
Polydimethylsiloxane*	PDMS	-102.05	2.16	-0.90
Polyester fabric (Plain)		-101.48	1.49	-0.90
Easy-to-machine electrical-insulating garolite		-100.33	1.79	-0.89
Food-grade high-temperature silicone rubber		-94.03	0.99	-0.83
Polyimide film	Kapton	-92.88	2.58	-0.82
DuraLar polyester film	PET	-89.44	0.86	-0.79
Polyvinylidene fluoride	PVDF	-87.35	2.06	-0.77
Polyetheretherketone	PEEK	-76.25	1.99	-0.67
Polyethylene	PE	-71.20	1.71	-0.63
High-temperature silicone rubber		-69.95	0.50	-0.62
Wear-resistant garolite		-68.51	1.99	-0.61
Low-density polyethylene	LDPE	-67.94	1.49	-0.60
High impact polystyrene		-67.37	1.79	-0.60
High-density polyethylene	HDPE	-59.91	1.79	-0.53
Weather-resistant EPDM rubber		-53.61	0.99	-0.47
Leather strip (Smooth)		-52.75	1.31	-0.47
Oil-filled cast nylon 6		-49.59	0.99	-0.44
Clear cast acrylic	PMMA	-48.73	1.31	-0.43
Silicone		-47.30	1.49	-0.42
Abrasion-resistant SBR rubber		-40.13	1.31	-0.35
Flexible leather strip (Smooth)		-34.40	0.86	-0.30
Noryl polyphenyl ether		-31.82	0.86	-0.28
Poly(phenylene Sulfide)	PPS	-31.82	0.86	-0.28
Pigskin (Smooth)		-30.10	0.86	-0.27
Polypropylene	PP	-27.23	1.31	-0.24
Slippery nylon 66		-26.09	0.50	-0.23
Weather- and chemical-resistant santoprene rubber		-25.23	0.50	-0.22
Chemical- and steam-resistant aflas rubber		-22.65	1.31	-0.20
Polysulfone		-18.92	0.86	-0.17
Cast nylon 6		-18.35	0.99	-0.16
Copy paper		-18.35	0.50	-0.16
Chemical-resistant and low-temperature fluorosilicone rubber		-18.06	0.86	-0.16
Delrin® Acetal Resin		-14.91	0.50	-0.13
Wood (marine-grade plywood)		-14.05	0.99	-0.12
Wear-resistant slippery garolite		-11.47	0.50	-0.10
Super-stretchable and abrasion-resistant natural rubber		-10.61	0.50	-0.09
Oil-resistant buna-N rubber		2.49	0.23	0.02
Food-grade oil-resistant buna-N/vinyl rubber		2.95	0.13	0.03

Note: STDEV refers to the standard deviation. The α refers to the measured triboelectric charge density of tested materials over the absolute value of the measured triboelectric charge density of the reference material. The material marked with an asterisk "*" means it has strong adhesion with mercury, a small drop of mercury is observed when it is separated with mercury. The measured TECD value may be a bit lower than its real value. Source data are provided as a Source Data file.

Nota Fuente: H. Zou, Y. Zhang, L. Guo, P. Wang, X. He, G. Dai, H. Zheng, C. Chen, A.C Wang, C. Xu, Z.L Wang. "Quantifying the triboelectric series", (2019), nature COMMUNICATIONS

2.3. Nanogeneradores triboeléctricos (TENG)

2.3.1. Definición y características

Los Nanogeneradores Triboeléctricos son una tipología de transductores empleados para la generación de energía eléctrica en base a la aparición del efecto triboeléctrico

ocasionado por la activación mecánica entre un par de materiales nanoestructurados. Algunas de sus características generales más relevantes son las siguientes:

- Bajo coste
- Diversidad de modalidades de trabajo dependiendo del diseño, del sistema o mecanismo establecido
- Conversión energética de alta eficiencia
- Simplicidad del proceso de fabricación a gran escala
- Amplia disponibilidad de aplicación en la recolección de la energía mecánica en diversas formas. Destacando en este ámbito la energía eólica a pequeña escala, la energía urbana y la energía azul.
- Multitud de materiales empleables para su construcción

El principal fundamento en el que los Nanogeneradores Triboeléctricos basan su funcionamiento para la recolección energética es la combinación del *Efecto Triboeléctrico* entre los dos materiales puestos en contacto, con la *Inducción Electrostática* entre el material dieléctrico cargado, vía electrización por contacto (triboelectricidad), y su electrodo. Esta combinación de fenómenos ocurre cuando el par triboeléctrico se separa tras su interacción y sendos electrodos se encuentran conectados, a través de un circuito externo, y en contacto con los dos materiales triboeléctricamente cargados. El circular de las cargas inducidas a través de este circuito es lo que posibilita la realización de un trabajo eléctrico útil en el circuito externo.

2.3.2. Problemáticas

Las principales problemáticas de los nanogeneradores triboeléctricos se encuentran muy relacionados con las propias del Efecto Triboeléctrico y son:

- La humedad: Por los consabidos efectos perniciosos que esta ocasiona al efecto triboeléctrico.
- Desgaste de los materiales que originan el par triboeléctrico debido a la fricción del contacto. Para evitar este problema se han empezado a ensayar nanogeneradores triboeléctricos de contacto-separación vertical, no de deslizamiento libre que ocasionaría pérdidas de material por efecto abrasivo. De esta manera, junto con un buen encapsulamiento anti-humedad, se debería incrementar notablemente la vida útil de nanogenerador. A estos TENGs se les ha denominado como TENGs de no contacto.

2.3.3. Tipologías de Nanogeneradores Triboeléctricos

Atendiendo a la diferenciación realizada en [1], los nanogeneradores triboeléctricos se pueden clasificar según las diferentes tipologías de funcionamiento mostradas en la **Figura 3** para el contacto del par triboeléctrico seleccionado.

De todos estos, los más comunes y modelizados matemáticamente son los correspondientes a los *TENGs de contacto vertical* y *TENGs de deslizamiento* con especial interés en los que no emplean un doble dieléctrico, sino que el segundo electrodo también hace las veces de contacto triboeléctrico. Esta condición se da en los TENGs que emplean Aluminio, u otro metal como el Cobre, como material triboeléctrico a la par que electrodo dados sus buenos parámetros conductivos y de conformación de pares triboeléctricos.

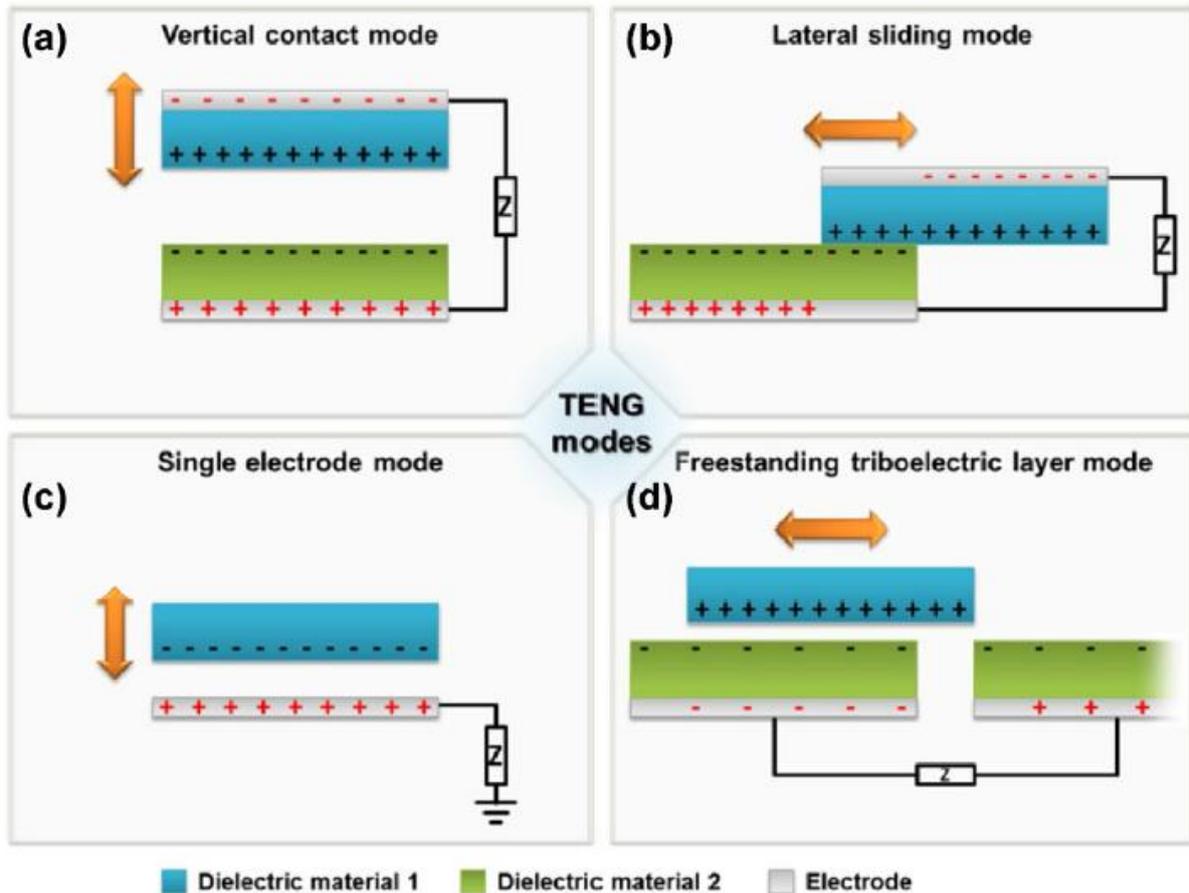


Figura 3. Tipologías de funcionamiento de los TENG dependiendo del método de contacto triboeléctrico.

Fuente: S. Pan, Z. Zhang. "Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review", (2019), *Friction*, 7

2.3.4. Nanogenerador triboeléctrico de no contacto con asistencia magnética

En [4], se nos diseña, analiza y caracteriza un TENG de no contacto mediante asistencia magnética para aplicaciones de recolección de energía eólica a pequeña escala, así como energía azul. La importancia de este estudio recae sobre su proximidad hacia el objetivo de nuestro proyecto.

El Dispositivo propuesto consistía en un TENG de contacto el cual es activado mediante la interacción de dos materiales magnéticos. Uno ubicado en los extremos del Rotor,

accionado a partir de la energía motriz a recolectar. Y el otro establecido en la lámina exterior del TENG.

2.3.4.1. Materiales empleados

El dispositivo diseñado consistía en dos láminas, una de *respuesta magnética* y otra *no magnética*, ambas de $4 \times 4 \text{ cm}^2$ y con las composiciones desarrolladas a continuación.

- **Lámina de respuesta no magnética:** Conformada por una **Tela de Al/Ni + PET arqueado**.
 - **La tela de Al/Ni:** hace las veces de Triboeléctrico y electrodo para la extracción de las cargas. se caracteriza por disponer de unos diámetros de fibra de Ni de $14 \mu\text{m}$ con un tamaño de nanopartícula de Ni de 50 nm.
 - **PET arqueado:** Se trata del soporte cuya resistencia mecánica es la que permite la separación de las láminas y vuelta al estado original.
- **Lámina de respuesta magnética:** Conformada por **Compuesto de PDMS (Polidimetilsiloxano)/ FeCoNi + Al + PET arqueado**
 - **Compuesto de PDMS/FeCoNi:** Elemento conformado por el material triboeléctrico (PDMS) junto con partículas ferromagnéticas (FeCoNi) en su seno.
 - **Al:** Electrodo para extraer la carga.
 - **PET arqueado:** Soporte arqueado con la misma función que en la anterior lámina.

2.3.4.2. Funcionamiento

El funcionamiento del TENG propuesto consta de los siguientes pasos secuenciales:

1º Movimiento del sistema de asistencia magnética impulsado por la fuente de energía a recolectar.

2º El sistema de asistencia magnética interacciona con el Compuesto PDMS/FeCoNi de la *Lámina de respuesta magnética*. Con dicha fuerza de atracción magnética, ambas láminas se aproximan hasta producir el contacto de los materiales triboeléctricos el cual ocasiona la electrización de los materiales debido al efecto triboeléctrico.

3º La asistencia magnética, por efecto del impulso de la energía mecánica a recolectar, se separa y deja de interactuar con la *Lámina de respuesta magnética*. Esto provoca la separación de las láminas del TENG electrizadas con cargas de diferentes signos ocasionando una diferencia de potencial entre los electrodos. En el caso del PDMS, se produce la inducción electrostática a su electrodo en contacto. Los electrodos, conectados con los conductores externos, cierran el circuito por él que circula una

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

corriente ocasionada por esta diferencia de potencial y cargas desplazadas de origen triboeléctrico.

La Recuperación del TENG se lleva a cabo por la fuerza elástica del PET arqueado. Cuanto mayor sea esta, mayor será la potencia eléctrica extraída del dispositivo, debido a que mayores frecuencias de rotación, interacción magnética y consecuente contacto podrá soportar; alcanzando la máxima separación entre láminas. A mayor separación entre láminas (GAP), mayor será la Diferencia de potencial generada.

4º Repetición del proceso en ciclo. Esta repetición cíclica ocasiona la aparición de una corriente alterna (AC) entre los electrodos.

En la **Figura 4** se muestra un esquema de la construcción de las dos láminas triboeléctricas, así como del funcionamiento del dispositivo.

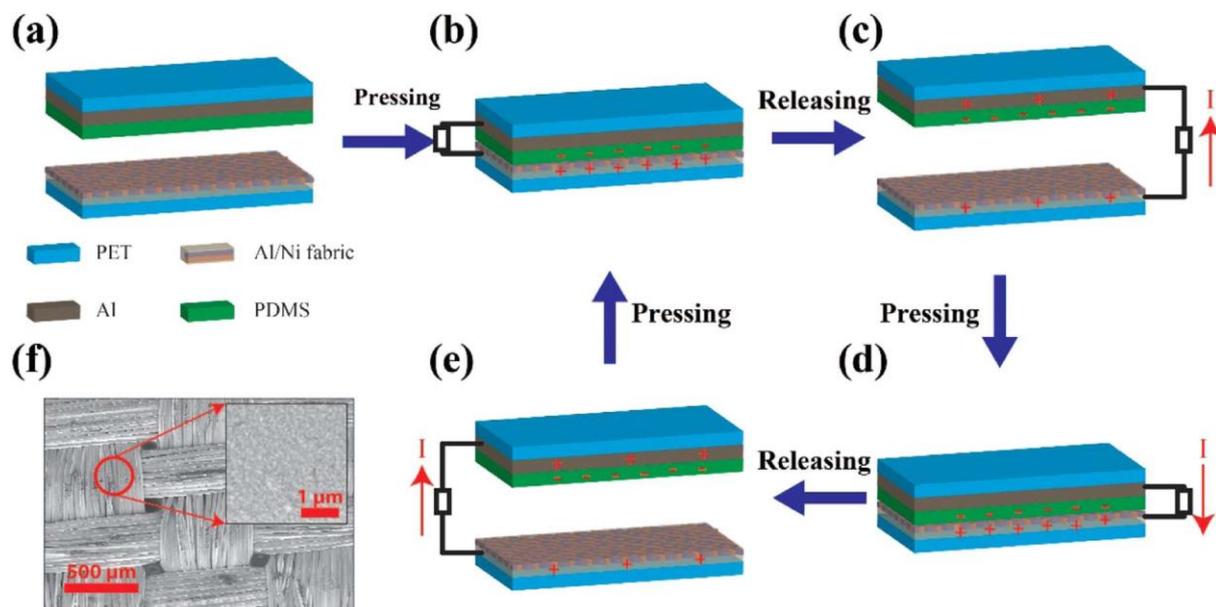


Figura 4. Esquema estructural y de funcionamiento del TENG de no contacto con asistencia magnética
Fuente: L.b. Huang, W. Xu, G. Bai, M.C. Wong, Z. Yang, J. Hao. "Wind energy and blue energy harvesting based on magnetic-assisted noncontact triboelectric nanogenerator" (2016), *Nano Energy*, 30

2.3.4.3. Caracterización

Para la caracterización del dispositivo se midieron los valores de Voltaje de circuito abierto (V_{oc}), así como la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y la potencia máxima que es capaz de generar un solo TENG, de características establecidas en los apartados anteriores, en un circuito externo de resistencia variable.

El voltaje de circuito abierto se mide mediante el empleo de un voltímetro entre los electrodos del TENG sin cerrar el circuito. Por su parte, la corriente de cortocircuito se hará de forma similar, en este caso interconectando los electrodos mediante un conductor y midiendo, mediante un amperímetro, la corriente que fluye a través de ese conductor.

En primer lugar, se empleó un motor lineal acoplado al eje de rotación para realizar ensayos a diferentes velocidades de rotación (frecuencias) del mismo. De esta manera se obtuvieron los resultados mostrados en la **Figura 5**, para las diferentes frecuencias de rotación del dispositivo.

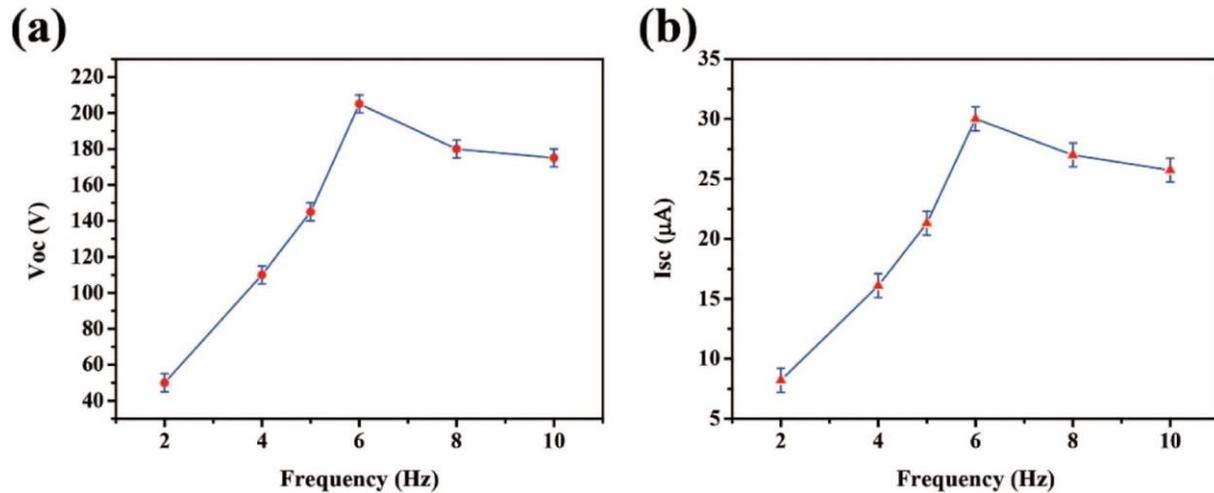


Figura 5. Estudio de la dependencia de Voc e Isc de un solo TENG respecto a la frecuencia de rotación del dispositivo

Fuente: L.b. Huang, W. Xu, G. Bai, M.C. Wong, Z. Yang, J. Hao. "Wind energy and blue energy harvesting based on magnetic-assisted noncontact triboelectric nanogenerator" (2016), *Nano Energy*, 30

Tras este primer estudio se concluye que la frecuencia óptima de rotación del dispositivo para la generación de energía es de 6Hz. A continuación, realizaron el estudio de los parámetros de caracterización a esa frecuencia rotacional en las condiciones de circuito abierto (OC) y cortocircuito (SC), así como a resistencias variables para la obtención del Punto de Máxima Potencia de funcionamiento (mpp). Esto se muestra en la **Figura 6**.

$$\text{Voc (6 Hz)} = 205 - 206 \text{ V}$$

$$\text{Isc (6 Hz)} = 30 \mu\text{A}$$

$$\text{Pmpp (6 Hz, } 10 \text{ M}\Omega) = 3.0 \text{ mW}$$

Como podemos observar, un solo TENG presenta elevados valores de voltaje, pero bajos valores de potencia y corriente.

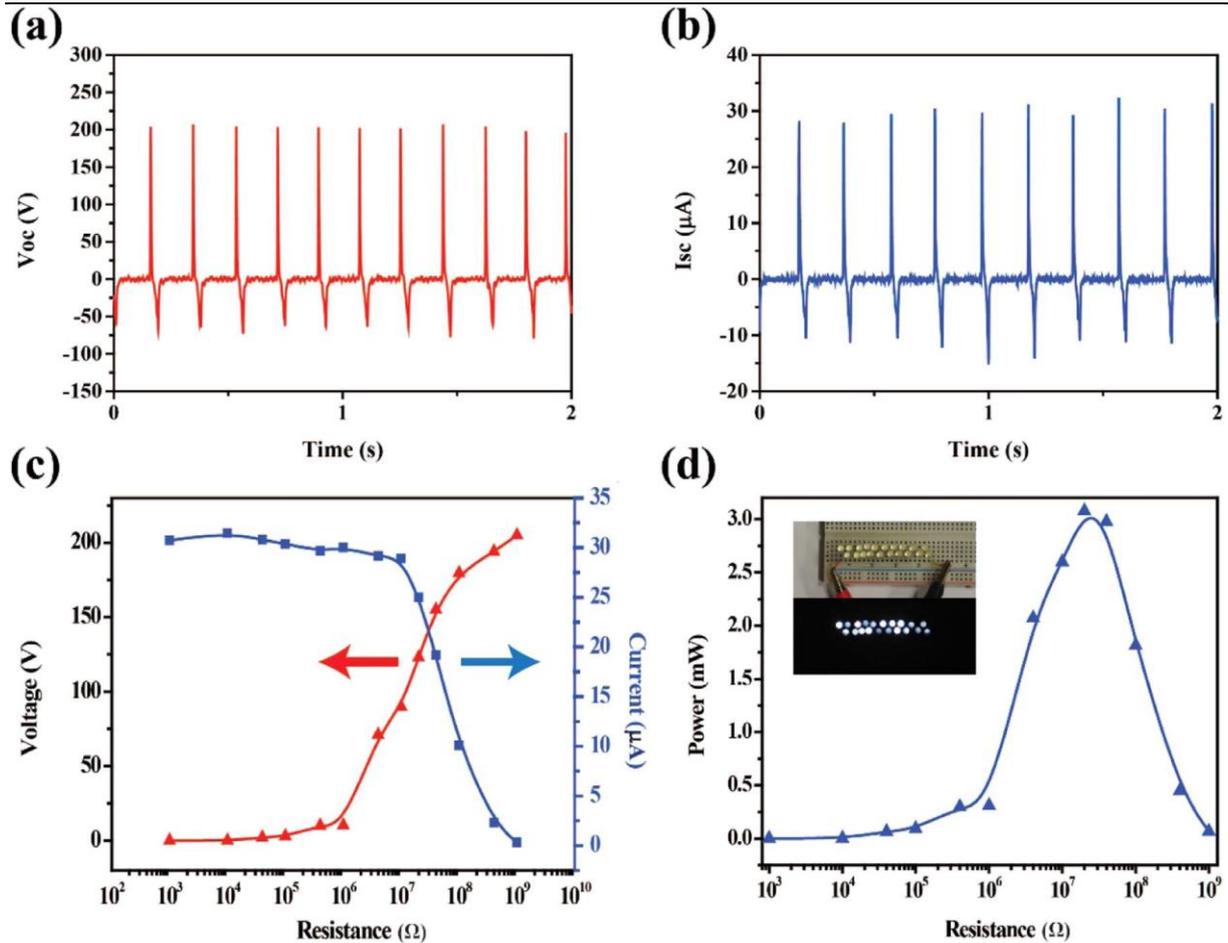


Figura 6. Caracterización de un TENG a una frecuencia de rotación de 6 Hz (óptima)

Fuente: L.b. Huang, W. Xu, G. Bai, M.C. Wong, Z. Yang, J. Hao. "Wind energy and blue energy harvesting based on magnetic-assisted noncontact triboelectric nanogenerator" (2016), *Nano Energy*, **30**

2.3.4.4. Observaciones

El artículo concluye que un solo TENG es capaz de iluminar hasta 20 LEDs blancos mientras el dispositivo completo diseñado, el cual en su caso consta de 4 TENG como se puede observar en la **Figura 7**, es capaz de hacerlo con 50 LEDs blancos. Esto demuestra las capacidades de esta tipología de nanogeneradores triboeléctricos para el abastecimiento de energía eléctrica a sistemas de bajo consumo.

Los principales factores limitantes que nos encontramos en este diseño son:

- Pérdidas por efecto de la humedad y la fricción. El cual se soluciona con un encapsulamiento de los TENGs y la tipología de no contacto, en lugar de la de deslizamiento.
- Limitaciones en la velocidad de rotación del dispositivo. El cual es un factor clave y puede ser ocasionado por la no suficiente de resistencia elástica de las láminas de PET arqueadas las cuales, a elevadas velocidades de rotación, no puedan alcanzar su estado inicial perdiendo el GAP de diseño óptimo de las

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

diferentes láminas del dispositivo. Otro motivo de especial interés sería el efecto que la fuerza magnética puede ocasionar de frenado del dispositivo y dificultad para la generación cíclica del GAP.

- **Extracción de la carga optimizada.** Atendiendo a los resultados extraídos de la caracterización del dispositivo, podemos concluir que: Los valores de tensión extraídos de los nanogeneradores triboeléctricos son elevados y convenientes mientras que, los de intensidad, son reducidos. Es por esto por lo que, para la extracción óptima de la carga, se deberían interconectar entre ellos en paralelo. Incrementando así el valor de corriente extraída.

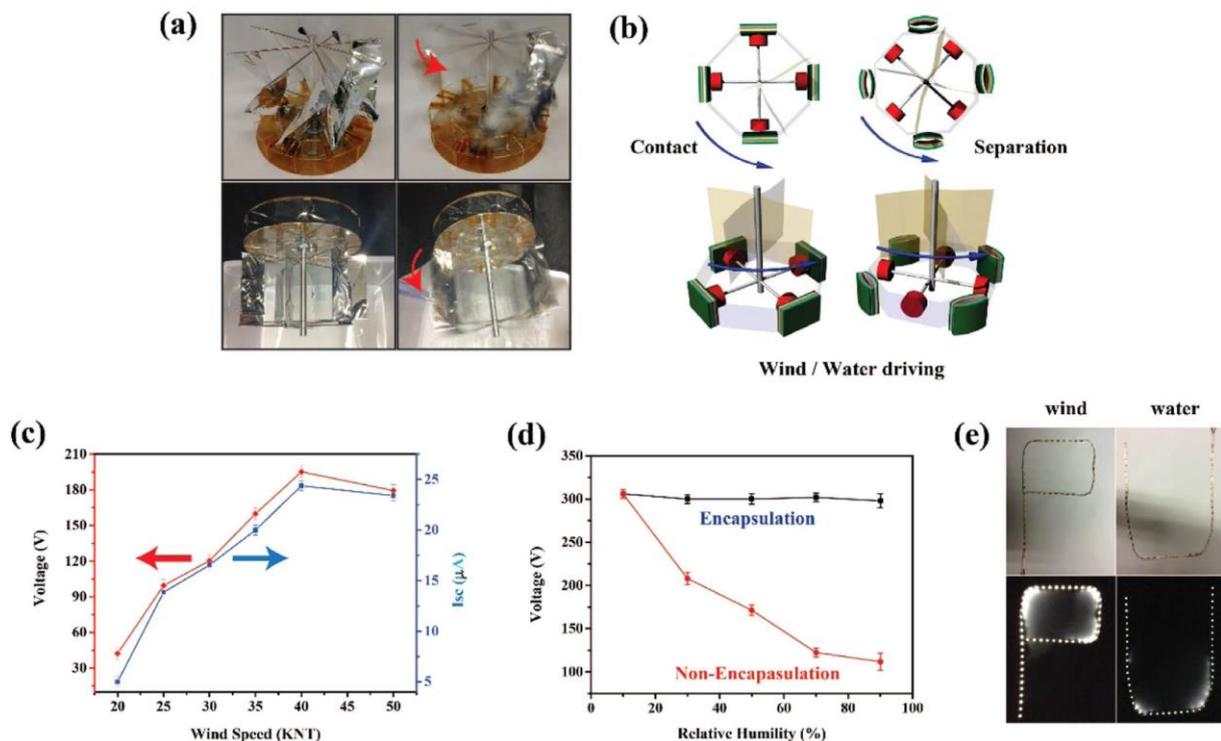


Figura 7. (a) Prototipo, (b) esquema de diseño y funcionamiento, caracterizaciones a (c) velocidades de viento variables y (d) TENGs encapsulados.

Fuente: L.b. Huang, W. Xu, G. Bai, M.C. Wong, Z. Yang, J. Hao. "Wind energy and blue energy harvesting based on magnetic-assisted noncontact triboelectric nanogenerator" (2016), *Nano Energy*, 30

2.3.5. Nanogenerador triboeléctrico cilíndrico

En [5] se propone un tipo diferente de transductor triboeléctrico para la recolección de energía mecánica y su conversión en eléctrica. El dispositivo propuesto consiste en un TENG cilíndrico, de deslizamiento, para la activación de la energía mecánica de forma rotativa. Este diseño se aproxima más al de los Generadores Electromagnéticos (EMG), ampliamente extendidos en la actualidad.

En el artículo se realizaron múltiples ensayos para la caracterización del dispositivo de estudio en diferentes condiciones, tanto estructurales como de funcionamiento. Entre estas condiciones caben destacar las referentes a la **densidad de contactos triboeléctricos**, para la

que se caracterizó la recolección energética a diferente cantidad de estos, así como, la **velocidad lineal de rotación del dispositivo**.

2.3.5.1. Estructura

En la **Figura 8** se puede observar un esquema de la estructura del dispositivo construido. En ella se vislumbra la estructura de rotor-estator en formato núcleo-carcasa. Es importante destacar que en el artículo se abordan experimentos para dispositivos tipo como el mostrado, pero con variedad en el número de contactos triboeléctricos. En aras de estudiar el efecto que la cantidad de estos puede suponer en el funcionamiento. Pese a todo, el dispositivo representado en la **Figura 8** se corresponde con el de **6 contactos triboeléctricos**. En este caso, cada uno de los contactos se corresponderá con un arco circular de 30° de ángulo con respecto al centro de rotación.

Debido a que el funcionamiento del dispositivo no se debe a su interacción axial con respecto a la fuente de energía recolectar, su rotor se encuentra dispuesto para maximizar la superficie de contactos triboeléctricos y minimizar, en la medida de lo posible, las pérdidas mecánicas debidas a la inercia del mismo. Es en este sentido donde recae la importancia de los materiales empleados y su configuración, siendo:

- **Estator**: Conformado por **Carcasa de material acrílico + Contactos de Cobre**
 - **Carcasa de material acrílico**: Empleada como soporte y aislante ambiental longitudinal del dispositivo.
 - **Contactos de Cobre**: Empleados como contacto triboeléctrico del estator a la par que electrodo de este.
 - **Rotor**: Conformado por **Cilindro de material acrílico + Espuma PET + Cu + PTFE**
 - **Cilindro de material acrílico**: Conformado el núcleo del dispositivo. Sus funciones son: 1ª Actuar como sustrato a los contactos triboeléctricos rotativos. 2ª Transmitir la rotación al dispositivo de manera solidaria al elemento mecánico de interacción con la fuente.
 - **Espuma PET**: Empleada para amortiguar los impactos ocasionados por las continuas interacciones mecánicas entre los contactos triboeléctricos y que estos no afecten al eje ni a la eficiencia mecánica del dispositivo.
 - **Cu**: Lámina de 100 nm de Cobre empleada como electrodo de extracción de la carga al circuito externo.
 - **PTFE**: Material triboeléctrico del Rotor, cuya capa superficial y de contacto se encuentra nanoestructurada para una mayor rugosidad y superficie específica para el mismo.
 - **Conductores externos**: Conectados a los electrodos para la extracción de la carga triboeléctrica generada por el dispositivo. Debido a las bajas corrientes generadas por estos dispositivos se **interconectaron en paralelo**.
-

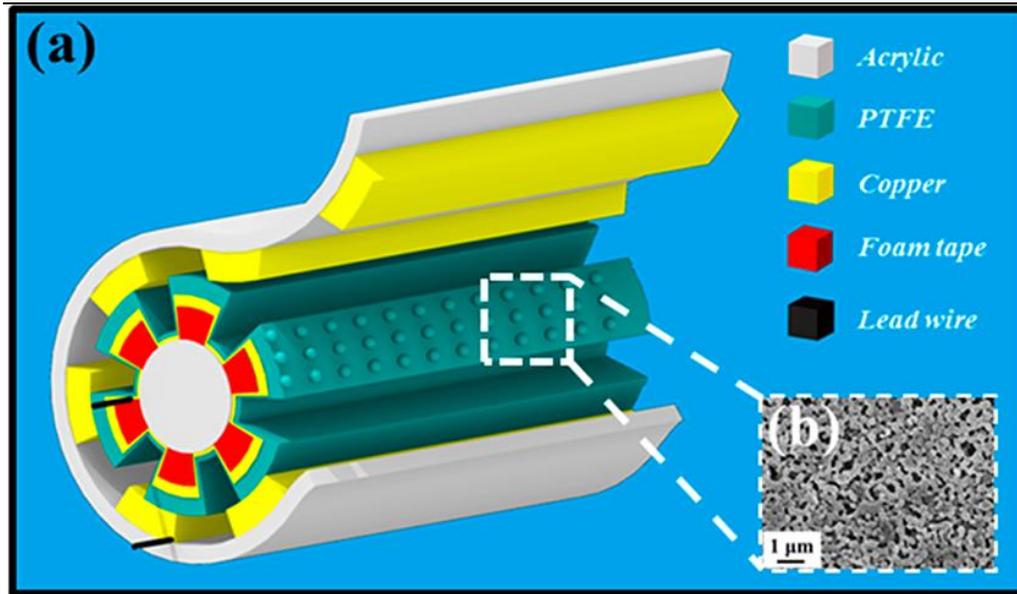


Figura 8. Esquema del TENG cilíndrico con 6 contactos triboeléctricos.

Fuente: P. Bai, G. Zhu, Y. Liu, J. Chen, Q. Jing, W. Yang, J. Ma, G. Zhang, Z. L. Wang. "Cylindrical Rotating Triboelectric Nanogenerator". (2013). *ACS Nano*, 7

Como ya introdujimos anteriormente, en aras de minimizar las pérdidas mecánicas debidas a la fricción, los materiales se han dispuesto de manera que el Rotor acapare a los menos densos y, por tanto, una menor masa inercial total.

Es importante destacar que, para este experimento, todos los dispositivos construidos para su caracterización dispusieron de unos núcleos rotacionales y carcasas del mismo tamaño. Es por esto por lo que, dependiendo del número de contactos de que dispusiera el dispositivo en cuestión, el tamaño y ángulo de estos con respecto al centro de rotación diferiría, no así sus superficies.

2.3.5.2. Funcionamiento

En la **Figura 9** se muestra un esquema por pasos acerca del funcionamiento del TENG cilíndrico de 6 contactos. La explicación acerca del mismo se hará realizando un seguimiento de las etapas en esta mostradas.

- (a) Interacción de los contactos triboeléctricos, se produce la electrización que carga de manera resinosa al Teflón y vítrea al Cobre. La aparición del efecto capacitivo en la interfaz de ambos debido al efecto triboeléctrico ocasiona la electroneutralidad por lo que no circula ningún tipo de carga por el circuito externo.
- (b) Da comienzo la activación mecánica y rotación. Esto ocasiona un desequilibrio de cargas que da lugar a la inducción electrostática del electrodo de Cobre del Rotor debido a las cargas desequilibradas del Rotor. Esto origina un flujo electrónico en

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

forma de una corriente eléctrica externa entre los dos electrodos para la compensación de estas cargas.

- (c) El flujo electrónico cesa cuando las cargas triboeléctricas del Teflón se encuentran compensadas por las inducidas en el electrodo de Cobre.
- (d) Continuando la rotación, el Teflón vuelve a entrar en contacto con otro contacto de cobre y se vuelve a producir la electrización y, por tanto, un flujo electrónico, en este caso en sentido inverso al anterior, pero de módulo equivalente. Es esta duplicidad en el sentido del flujo eléctrico la que ocasiona que la corriente generada sea Alterna (AC).

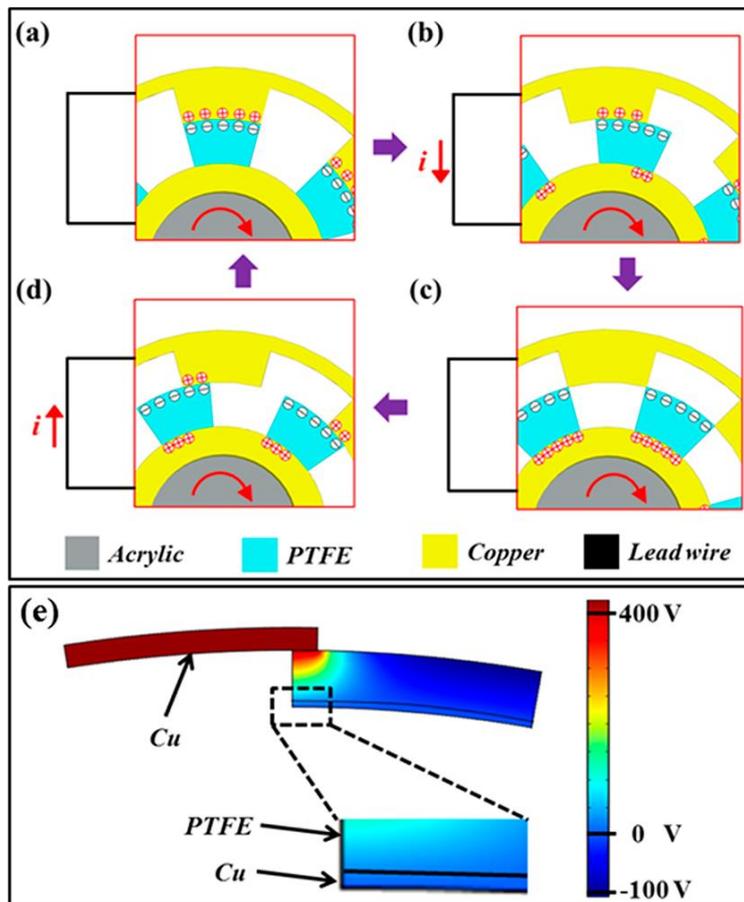


Figura 9. Esquema de funcionamiento del TENG cilíndrico.

Fuente: P. Bai, G. Zhu, Y. Liu, J. Chen, Q. Jing, W. Yang, J. Ma, G. Zhang, Z. L. Wang. "Cylindrical Rotating Triboelectric Nanogenerator". (2013). *ACS Nano*, 7

2.3.5.3. Caracterización

Para la caracterización del dispositivo se midieron tanto V_{oc} como I_{sc} a diferentes valores de velocidades de rotación. En primer lugar, se realizó el ensayo a **1000 rpm**, equivalentes a **16.7 Hz y 1.33 m/s** lineales en el dispositivo ensayado. En la **Figura 10** se muestran los valores obtenidos para los parámetros eléctricos considerados.

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

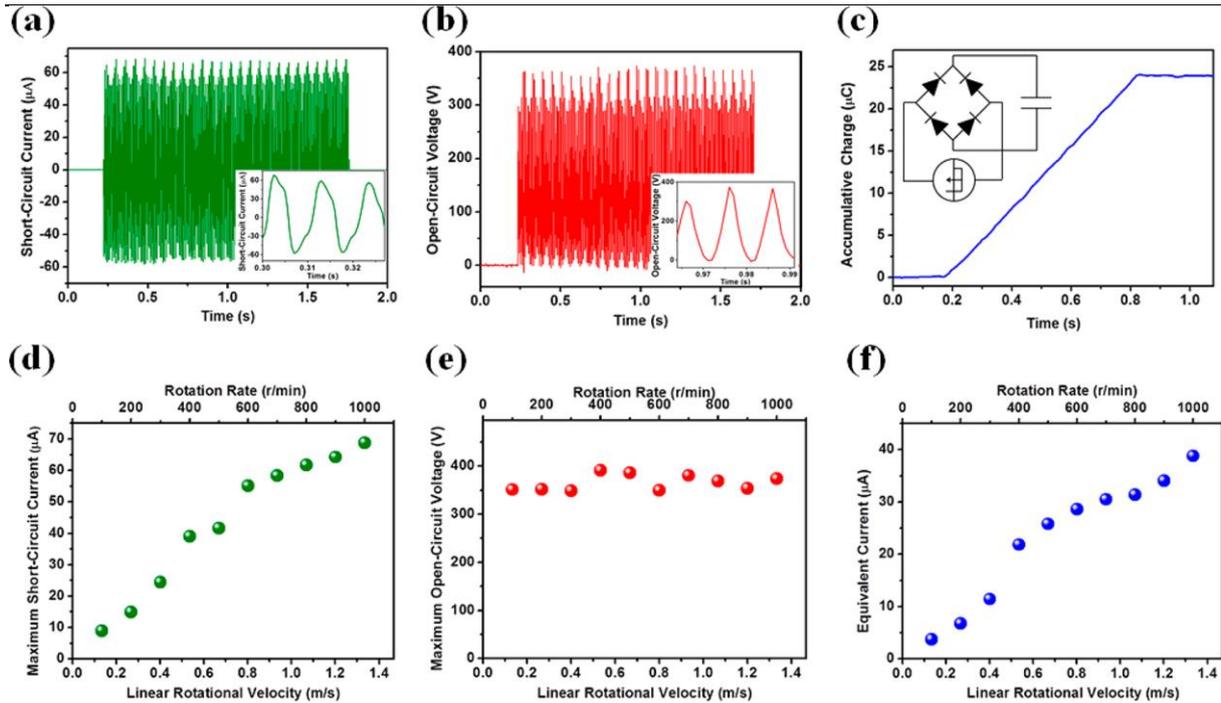


Figura 10. Caracterización del TENG cilíndrico de 6 contactos triboeléctricos.

Fuente: P. Bai, G. Zhu, Y. Liu, J. Chen, Q. Jing, W. Yang, J. Ma, G. Zhang, Z. L. Wang. "Cylindrical Rotating Triboelectric Nanogenerator". (2013). *ACS Nano*, 7

Los valores extraídos para este ensayo fueron:

$$I_{sc} \text{ (6 contactos, 1000 rpm)} = 68.8 \mu\text{A}$$

$$V_{oc} \text{ (6 contactos, 1000 rpm)} = 373 \text{ V}$$

Cabe destacar que la corriente alterna generada será de una frecuencia dependiente de la velocidad de rotación y, por tanto, la frecuencia de la misma junto con el número de contactos empleados. De esta manera, para este primer caso de estudio nos encontramos con que:

$$1000 \text{ rpm} \rightarrow 16.67 \text{ Hz} \cdot 6 \text{ contactos} = 100 \text{ Hz}$$

$$Frecuencia_{AC} = \frac{\text{Velocidad de rotación (rpm)}}{60} \cdot \text{Número de contactos}$$

En la **Figura 10 (c)**, mediante el circuito ahí representado, el cual emplea un Puente de Diodos como rectificador de la corriente alterna generada por el TENG de estudio, se ha medido la carga acumulada en el condensador conectado. El máximo alcanzado de carga acumulada es de **24.5 µC** en **0.63 s**. Esto origina una corriente continua efectiva equivalente de:

$$I_{DC} \text{ (6 contactos, 1000 rpm)} = 38.9 \mu\text{A}$$

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

Por su parte, las gráficas finales de la **Figura 10** establecen unas representaciones de la caracterización del dispositivo a diferentes velocidades de rotación. En ellas se puede apreciar que la velocidad de rotación se relaciona directamente con la intensidad de corriente extraída del mismo (**Figuras 10 (d) y (f)**). Por su parte, la tensión no se ve afectada, ya que sus principales factores son el área de contacto triboeléctrico. Cabe destacar también la interconexión en paralelo que ha tenido lugar entre los diferentes pares de electrodos.

$$V_{OC} = f(\sigma_s) \rightarrow dV_{OC} = \frac{d\sigma_s}{dt} = 0; \quad I = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dl} \cdot v$$

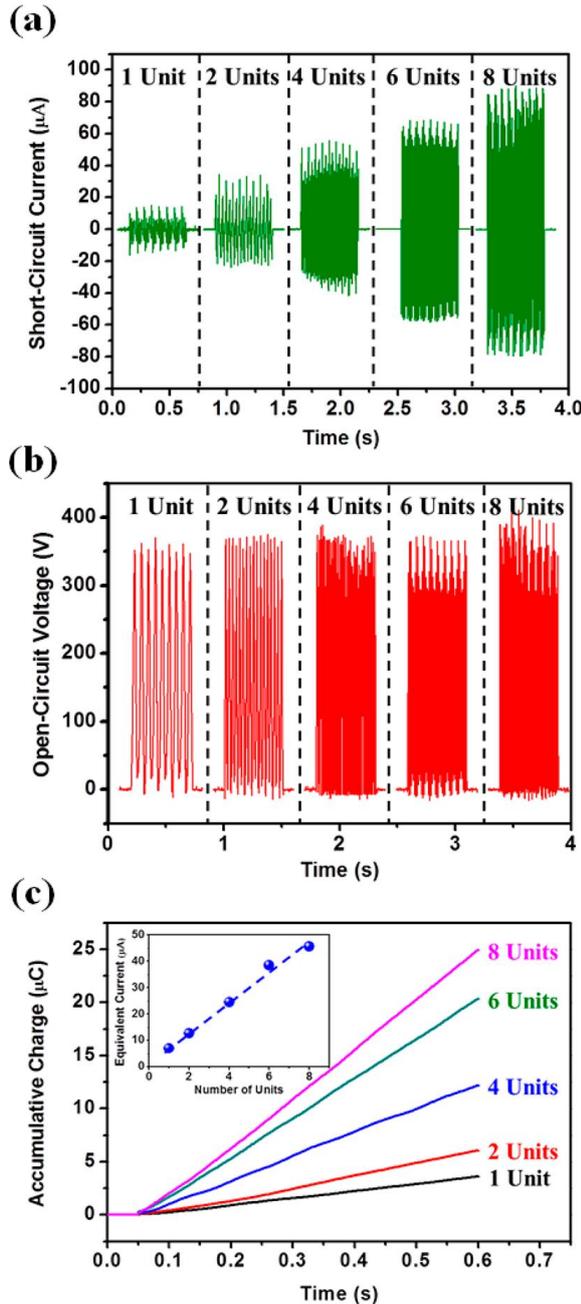


Figura 11. Estudio de los TENGs cilíndricos con diferentes cantidades de contactos

Fuente: P. Bai, G. Zhu, Y. Liu, J. Chen, Q. Jing, W. Yang, J. Ma, G. Zhang, Z. L. Wang. "Cylindrical Rotating Triboelectric Nanogenerator". (2013). *ACS Nano*, 7

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

En la **Figura 11** se muestra la caracterización de los diferentes dispositivos ensayados. Cada uno de ellos con un número diferente de contactos triboeléctricos para estudiar la importancia y efectos que estos pueden suponer sobre su funcionamiento.

Como se puede observar, al igual que la velocidad de rotación, el incremento en el número de contactos triboeléctricos es directamente proporcional a la intensidad de corto circuito (I_{sc}) así como a la Corriente continua equivalente.

Por último, según los datos obtenidos, a mayor **densidad de contactos triboeléctricos** junto con una alta **velocidad lineal de rotación** mayores serían los parámetros eléctricos obtenidos a partir de este TENG cilíndrico. Es por ello por lo que se ensayó en profundidad también el TENG cilíndrico de **8 contactos**, obteniendo los siguientes valores:

$$I_{sc} (8 \text{ contactos, } 1000 \text{ rpm}) = 90 \mu\text{A}$$

$$V_{oc} (8 \text{ contactos, } 1000 \text{ rpm}) = 410 \text{ V}$$

$$\rho_{pp} (8 \text{ contactos, } 1000 \text{ rpm}) = 36.9 \text{ W/m}^2$$

$$Frecuencia_{AC} = 133.33 \text{ Hz}$$

$$v_{lineal} = 1.33 \text{ m/s}$$

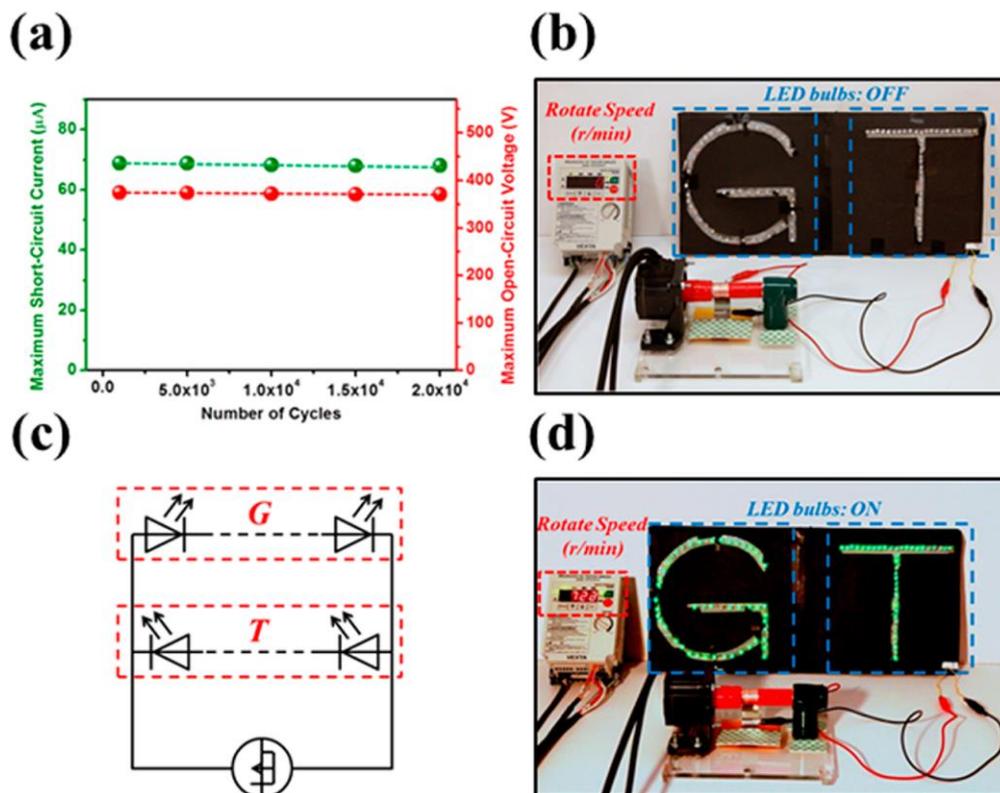


Figura 12. Demostración del funcionamiento y de los rangos de degradación del TENG cilíndrico de 8 contactos.

Fuente: P. Bai, G. Zhu, Y. Liu, J. Chen, Q. Jing, W. Yang, J. Ma, G. Zhang, Z. L. Wang. "Cylindrical Rotating Triboelectric Nanogenerator". (2013). *ACS Nano*, 7

2.3.5.4. Observaciones

En este artículo se desarrollan y estudian en profundidad una modalidad de TENGs cilíndricos de deslizamiento. Entre los parámetros más relevantes a considerar de los mismos destacamos los siguientes:

- Densidades de contactos triboeléctricos: Se trata de un parámetro de gran interés ya que, a mayor cantidad de estos, mayores serán los valores alcanzables de intensidad. Esto se debe a que permitirán una mayor cantidad de ciclos de funcionamiento del TENG por rotación del mismo, entre otros factores, como la interconexión de los mismos en paralelo.
- Velocidades lineales de rotación: Otro de los parámetros dominantes. A mayores velocidades de rotación mayor velocidad en la génesis del ciclo del TENG (electrización, inducción, extracción, equilibrado de cargas) y, por tanto, mayor corriente de salida.
- Conexiones en paralelo: La triboelectricidad, desde su concepción, se ha caracterizado por la génesis de grandes potenciales eléctricos. En términos de corrientes, estas son bastante reducidas, por lo que la multiplicidad de los TENG empleados para sus interconexiones en paralelo se presenta como una de las opciones de obligada aplicación para paliar este problema.
- Recolección energética continua: Debido a todos los parámetros anteriores, los TENG de deslizamiento se presentan como la alternativa más conveniente, respecto del resto, para la recolección energética de baja escala en forma continua ya que incrementan su producción con la velocidad y no presentarían limitaciones ni en la separación de los contactos ni en los posibles frenados magnéticos.
- Necesidad de desaparecer los contactos: Para que los valores de tensión alcancen los máximos esperables los contactos triboeléctricos de ambas partes deben alcanzar el punto de no contacto entre ellos. Es por ello por lo que se establece como una de las premisas del diseño el que los contactos abarquen, únicamente, 180° del perímetro circular total. Permitiendo tanto el apareamiento como el desapareamiento total de los contactos.

En comparación con el diseño visto en [4], los TENGs cilíndricos vistos presentan unos mejores parámetros eléctricos de salida. Esto es debido a las limitaciones en la frecuencia de rotación a alcanzar por el anterior debida a la no suficiente fuerza mecánica de recuperación del contacto. Otro de los motivos puede ser el freno ocasionado a la rotación debido a la interacción magnética.

Una de las limitaciones más importantes al respecto de los TENGs de deslizamiento es aquella relativa al desgaste de las superficies de contacto y el número de ciclos operativos de los mismos. Al respecto de esta cuestión, en la **Figura 12** se muestran los últimos ensayos de funcionamiento, siendo la gráfica (**a**) la que representa el ensayo de un TENG cilíndrico de 6 contactos en hasta 20000 ciclos de funcionamiento. En ella se muestra la prácticamente nula

perturbación de los parámetros eléctricos de salida. Siendo, la mayoría de ellas, ocasionadas por el desgaste de la superficie de Teflón nanoestructurada, entre otros factores.

Por último, entre las aplicaciones consideradas por el artículo destacar las de recolección energética de flujos de fluidos o diferenciales de presión, tales como la energía eólica y la azul. Adicionalmente, la estructura y diseño singular del dispositivo permite su **encapsulación** y accionamiento en base a un eje solidario con su rotor, habilitando la posibilidad de otras aplicaciones tales como hidráulicas o en atmósferas húmedas o agresivas.

2.3.6. Nanogenerador Híbrido

Pese a que el objeto principal de nuestro proyecto se centra en la aplicación de un TENG de deslizamiento rotativo para la recolección de energía eólica a pequeña escala. La consideración de otros posibles diseños o mejoras que optimicen el desarrollo de este sistema son de relevancia. Al tratarse de un proyecto innovador, la gama de posibilidades para su optimización es muy amplia y deben tenerse presentes.

En [6] se establece un diseño base para un Nanogenerador Híbrido, el cual se centra en la aplicación de dos nanogeneradores básicos para un mayor grado de aprovechamiento energético y unas menores pérdidas debidas al funcionamiento de este. El fundamento de este Nanogenerador Híbrido consiste en la aplicación de la tribo-, piezo- y piroelectricidad combinadas. Para ello emplea tanto un TENG de deslizamiento junto con un PPENG (Piezo-Pyroelectric Nanogenerator).

Este dispositivo se caracteriza por aprovechar tanto la energía mecánica traslacional de la parte deslizante del TENG, junto con la fuerza normal ejercida por esta misma parte sobre su correspondiente. Esta fuerza normal es la que ocasiona la fricción, la cual es un factor determinante para la génesis del efecto triboeléctrico, junto con su disipación térmica. Dichas manifestaciones energéticas no son aprovechadas por el TENG para la generación de carga triboeléctrica y posterior extracción de la carga inductiva producto sobre los electrodos. Es por esto por lo que, posterior a la parte triboeléctrica fija, este dispositivo presenta un PPENG, el cual aprovecha esta fuerza normal para la génesis del efecto piroeléctrico y la fluctuación térmica para el piroeléctrico.

2.3.6.1. Estructura

En la **Figura 13 (a)** se muestra el esquema del dispositivo y el funcionamiento del mismo. En términos estructurales cabe destacar el empleo de un **TENG de deslizamiento a base de Aluminio - Teflón** en el cual el Aluminio es el deslizante debido a su menor densidad por no requerir de electrodo añadido, ya que él mismo hace las veces de extractor de carga. Esto es debido a que este se trata de un conductor y no un dieléctrico. De esta manera se disminuyen las pérdidas mecánicas debidas a la inercia del elemento en movimiento. Adicionalmente, se debe resaltar la aplicación del **Fluoruro de Polivinildieno (PVDF)**, el cual se trata de un polímero ferroeléctrico con propiedades tanto piezoeléctricas, debido a su

estructura y polarización permanente, como piroeléctricas. La separación entre nanogeneradores se establece entre electrodos, por lo que se debe establecer un aislante electrónico entre ellos, pero no térmico. Para este fin se emplea **Kapton como separador**.

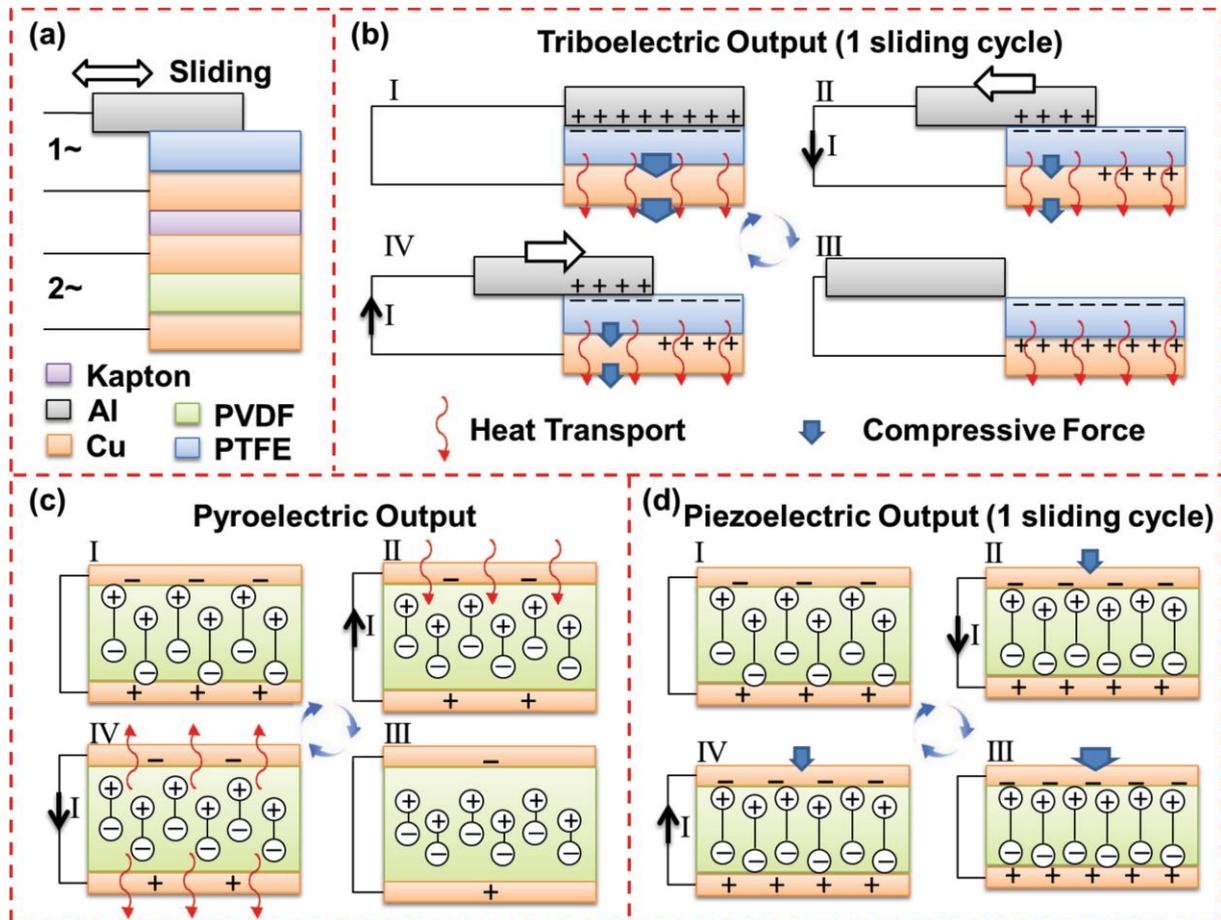


Figura 13. Esquema de funcionamiento de un Nanogenerador Híbrido TENG-PPENG.

Fuente: Y. Zi, L. Lin, J. Wang, S. Wang, J. Chen, X. Fan, P-K. Yang, F. Yi, Z.L. Wang. "Triboelectric-Pyroelectric-Piezoelectric Hybrid Cell for High-Efficiency Energy-Harvesting and Self-Powered Sensing" (2015), *Advanced Materials*.

2.3.6.2. Funcionamiento

Al respecto del funcionamiento de la célula híbrida en estudio, esta se subdivide según los efectos que tienen lugar en la misma. En la **Figura 13 (b)** se nos muestra el funcionamiento del TENG, con sus dos efectos físicos; triboelectricidad e inducción electrostática; el cual ya ha sido explicado en múltiples apartados del presente documento por lo que no se profundizará en el mismo. Sencillamente se destacará la transmisión térmica y mecánica que tiene lugar entre este y el PPENG inferior. Por su parte, las **Figuras 13 (c) y (d)** esquematizan el funcionamiento cíclico del PPENG, el cual supone la gran aportación de este artículo a nuestro estudio.

En el caso de la **Figura 13 (c)** se nos esquematiza el proceso cíclico de funcionamiento de un Nanogenerador Piroeléctrico. En primer lugar, debemos abordar el concepto de la piroelectricidad la cual no es más que la polarización espontánea de un sólido anisótropo

debida a la fluctuación térmica del mismo. El *efecto piroeléctrico* se puede dar en diversos materiales atendiendo a si dicho efecto es primario o secundario.

- *Efecto piroeléctrico primario*: Tiene lugar en los *Materiales Ferroeléctricos* los cuales son aquellos materiales sin simetría de inversión (acentrosimétricos = Quirales o Polares) que retienen la polarización interna incluso después de cesar la activación de esta. Una buena cantidad de estos presentan polarización permanente o “cuasi” permanente (Electretos).
- *Efecto piroeléctrico secundario*: Originado en materiales también acentrosimétricos con *Altos coeficientes de dilatación térmica*.

La principal premisa para la génesis del efecto piroeléctrico es la ausencia de simetría de inversión en los materiales que lo ocasionan. Esta cualidad les permite retener diferentes grados de polarización interna e, incluso, mantener un nivel importante de polarización permanente. Cuando son activados, en este caso mediante fluctuación térmica, sus dipolos sufren modificaciones ya sea por dilatación; por fluctuaciones en los estados vibracionales de los mismos; o ambas. Existen materiales que pueden presentar ambas tipologías de efecto piroeléctrico.

En nuestro caso, el PVDF se trata de un *polímero ferroeléctrico* con polarización permanente. Al recibir el calor generado por la fricción del TENG sufre una fluctuación térmica positiva (calentamiento), la cual origina una leve dilatación e incremento vibracional dipolar, el cual ocasiona la reducción de los momentos dipolares por la no orientación correcta y estable de estos en dirección uniforme a las interfaces con los electrodos. Estos efectos dan lugar a una diferencia de cargas inducidas en los electrodos de cobre de las superficies límite del PVDF con respecto al estado original, lo cual ocasiona una corriente de cargas externa en aras de alcanzar de nuevo la electroneutralidad de las interfaces electrodo – ferroeléctrico. Cuando se produce el enfriamiento (fluctuación térmica negativa), el proceso ocurre de manera inversa, resultando en una corriente alterna.

Por su parte, la **Figura 13 (d)** nos muestra el funcionamiento piezoeléctrico del PPENG. La génesis del *efecto piezoeléctrico* es de similar concepción al *efecto piroeléctrico* con la salvedad del causante del mismo. En el caso de la piezoelectricidad, la fuerza impulsora de este es la activación mecánica, debida a la fuerza normal originadora de la fricción del TENG. Dicha fuerza ocasionará una compresión y reducción volumétrica sobre un material ferroeléctrico (PVDF), la cual originará una variación en las cargas inducidas a los electrodos anexos al mismo e interconectados a través de un circuito externo. Dicha variación de cargas inducidas será compensada mediante el flujo de una corriente externa para alcanzar la nueva electroneutralidad de la interfaz electrodo-ferroeléctrico. Se debe tener en cuenta que, para la génesis del efecto piezoeléctrico, es de relevancia el estudio 3D del mismo, ya que todo tipo de esfuerzos sobre el material ferroeléctrico pueden ocasionar dicha génesis, ya sea de nuestro interés o no.

2.3.6.3. Caracterización

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

Para la caracterización de la célula nanogeneradora híbrida en primer lugar se caracterizaron, por separado, los diferentes nanogeneradores empleados.

El TENG se caracterizó mediante el mismo procedimiento que los caracterizados hasta ahora. Se midieron los parámetros eléctricos de salida característicos de Tensión de circuito abierto (V_{oc}), corriente de corto circuito (I_{sc}) y la densidad de superficial de potencia pico extraíble del mismo (ρ_{pp}). En la **Figura 14** se pueden observar los resultados correspondientes a la caracterización del **TENG de 63.5 cm^2** con una **Frecuencia de oscilación de 4.41 Hz** , los cuales son:

$$V_{oc} (\text{TENG}, 4.41 \text{ Hz}) = 1132.6 \text{ V}$$

$$I_{sc} (\text{TENG}, 4.41 \text{ Hz}) = 9.2 \mu\text{A}$$

$$\rho_{pp} (\text{TENG}, 4.41 \text{ Hz}, 140 \text{ M}\Omega) = 146.2 \text{ mW/m}^2$$

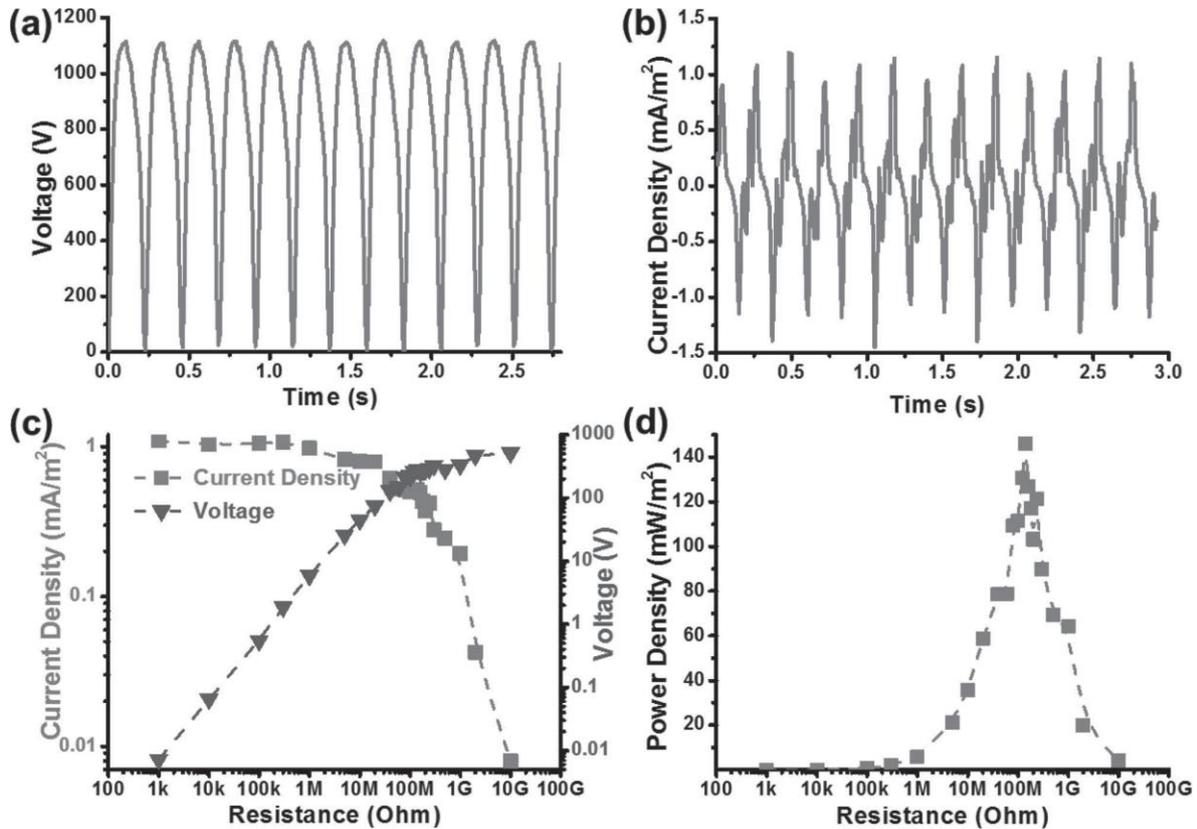


Figura 14. Caracterización del TENG.

Fuente: Y. Zi, L. Lin, J. Wang, S. Wang, J. Chen, X. Fan, P-K. Yang, F. Yi, Z.L. Wang. "Triboelectric-Pyroelectric-Piezoelectric Hybrid Cell for High-Efficiency Energy-Harvesting and Self-Powered Sensing" (2015), *Advanced Materials*.

Por su parte, en la **Figura 15** se muestra las gráficas de caracterización del PPENG en las cuales se recogen los parámetros eléctricos extraídos del mismo. Dicha caracterización se realizó en dos modalidades operativas, relativas al estado del motor lineal de activación. Estas modalidades fueron, motor activado y desactivado, con sus particularidades diferencias.

En primer lugar, en la **Figura 15 (a)** se nos muestra el incremento de la tensión negativa debida al comportamiento piroeléctrico del PPENG durante el periodo de activación del motor. La línea discontinua ejemplifica el punto en el cual el motor se ha detenido y, a partir de ella, se comienza a vislumbrar un decrecimiento de la curva; o lo que es lo mismo; un incremento progresivo de la tensión. Adicionalmente, en ambos casos, tanto la tasa de incremento o disminución de la tensión con respecto a la temperatura es mayor al comienzo del ciclo y progresa, en una tendencia logarítmica, hasta establecer una tasa de 0. Esto es debido a que son los valores de temperaturas del PPENG más distantes de las de equilibrio correspondientes al sistema en ese estado. Ocasionando una mayor velocidad de fluctuación térmica.

Es importante destacar que, en el intervalo de activación (motor activo), si se amplía y estudian en detalle las oscilaciones ocasionadas por las fluctuaciones térmicas, en la **Figura 15 (b)**, se puede denotar un periodo de oscilación de 0.227s, equivalente a la inversa de nuestra frecuencia de deslizamiento del TENG superior. Por otro lado, podemos observar que las tensiones oscilatorias ocasionadas por el funcionamiento del dispositivo son de, aproximadamente, **3V**. Dicha tensión se puede asociar, mayoritariamente, al efecto piezoeléctrico. Debido a esto, se asume la mayor repercusión del efecto piroeléctrico sobre la tensión del PPENG que del piezoeléctrico.

Por su parte, midiendo las corrientes ocasionadas nos encontramos con las **Figuras 15 (c) y (d)** en las cuales se puede observar como la mayor parte de la corriente se ocasiona en el intervalo de activación del PPENG, concluyendo con su mayor contribución piezoeléctrica. Por su parte, este dispositivo presenta la peculiaridad la observada anteriormente por la cual nos proporciona una leve cantidad de carga decreciente una vez detenido. Esta es debida al enfriamiento del dispositivo, el cual también ocasiona una determinada oscilación térmica y la génesis del efecto piroeléctrico.

Con el objetivo de mejorar la corriente de cortocircuito de la “fase de desactivación o enfriamiento”, en la **Figura 15 (e)** se nos muestran los resultados con dos tipologías de enfriamiento del PPENG, mediante aire ambiental o hielo. La presencia del hielo como medio de enfriamiento ocasiona un mayor incremento térmico final y, por tanto, fluctuaciones de mayor envergadura. Es por eso por lo que, en estas condiciones, se alcanzan mayores valores de I_{sc} .

Por último, la **Figura 15 (f)** nos muestra los porcentajes de mejora de la eficiencia de la célula híbrida debidos a la incorporación del PPENG al TENG de Al - PFTE previo. Para resistencias menores de 100 k Ω de carga externa se alcanza una mejoría en la eficiencia de conversión energética del 10%, mientras que el máximo de ganancia se alcanza con resistencias de carga de 1 k Ω o menores: **26.2%**

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

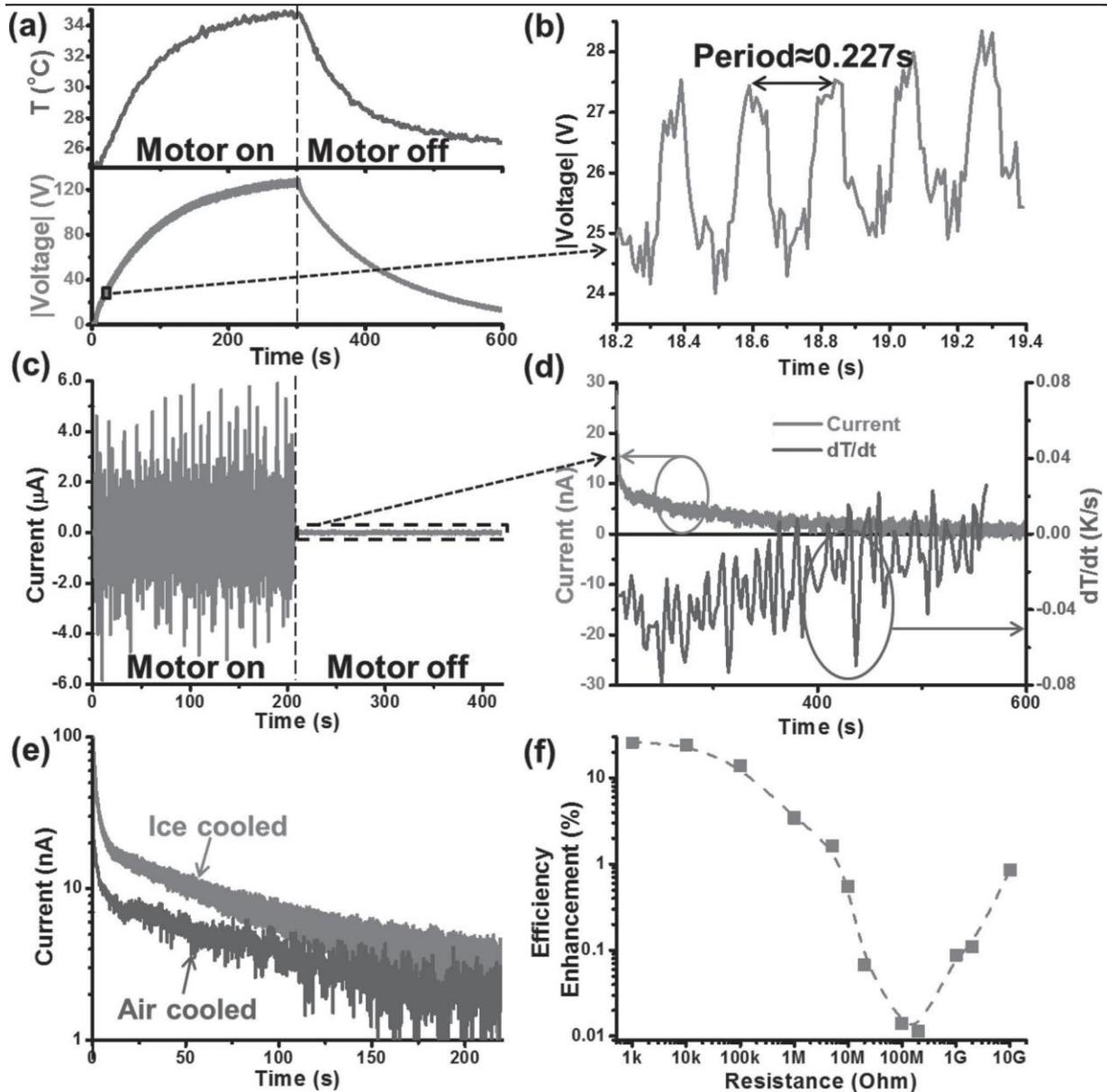


Figura 15. Caracterización del PPENG.

Fuente: Y. Zi, L. Lin, J. Wang, S. Wang, J. Chen, X. Fan, P-K. Yang, F. Yi, Z.L. Wang. "Triboelectric-Pyroelectric-Piezoelectric Hybrid Cell for High-Efficiency Energy-Harvesting and Self-Powered Sensing" (2015), *Advanced Materials*.

2.3.6.4. Observaciones

Según los resultados obtenidos en [6], la inclusión de este sistema supone una mejora del 26% en la eficiencia de conversión energética global del sistema con respecto a un único TENG de deslizamiento mediante el par triboeléctrico Aluminio-Teflón (PTFE). Dicha mejora es solo aplicable para los casos de bajas resistencias de carga.

El interés en el estudio de las células híbridas recae en el aprovechamiento de estas como transductores más optimizados y versátiles. Desde sensores autoalimentados sin

necesidad de fuentes externas tales como baterías, hasta generadores eléctricos de alta eficiencia y bajo coste.

Para nuestro caso de estudio, recogido como objetivo del presente TFM, el interés en el planteamiento de las células o nanogeneradores híbridos recae en la mayor optimización posible y rendimiento de nuestro TENG planteado, así como su durabilidad y número de ciclos disponible. En la actualidad, la mayor parte de las investigaciones para la obtención de nuevos dispositivos recolectores de energía se centran en los Generadores Electromagnéticos (EMG), los Nanogeneradores Triboeléctricos (TENG) y los Nanogeneradores Piezoeléctricos (PENG). Para nuestro proyecto se pretende combinar todos ellos, proponiendo un material ferromagnético como amortiguador de los impactos entre contactos, el cual presente comportamientos tanto piezo- como piroeléctricos y, de esta manera; con el correcto encapsulamiento y nanoestructuración; aprovechar al máximo las fuerzas normales ocasionadas para la génesis de la fricción triboeléctrica, junto con la disipación térmica intrínseca de la misma.

2.3.7. Modelos matemáticos

El comportamiento de la interfaz triboeléctrica es equivalente a un **condensador cargado con una determinada carga eléctrica Q entre los electrodos**. Dicha carga eléctrica es dependiente de los factores ocasionadores del efecto triboeléctrico tales como la rugosidad, superficies de contacto, las propiedades ambientales, el par triboeléctrico empleado entre otras; y la inducción electrostática ocurrida en la interfaz electrodo - dieléctrico. Este parámetro de carga Q está directamente relacionado con la carga triboeléctrica superficial (σ_s), parámetro característico del efecto triboeléctrico.

Los tribo-dispositivos disponen de un ciclo de funcionamiento único el cual se destaca por dos estados diferenciados:

1. Solapamiento de las superficies del par triboeléctrico: Lo que origina la electrización y la carga superficial equivalentes, vítreas y resinosas, en ambas superficies atendiendo a sus características y peculiaridades. Esto originará que el potencial eléctrico en la interfaz del par triboeléctrico sea nulo, ya que se mantiene la electroneutralidad de esta.
 2. Separación progresiva de las superficies del par triboeléctrico: En ambas tipologías de tribo-dispositivos, ya sean de contacto o deslizamiento, conforme se produce la separación de los contactos triboeléctricos la electroneutralidad se rompe. Esto ocasiona la polarización de los dieléctricos cuyos dipolos, instantáneos o permanentes, se reorientan debido al campo eléctrico que las cargas superficiales, producto de la electrización triboeléctrica, originan. Esa reorientación causa la interacción dipolo – conductor en el interfaz dieléctrico – electrodo, lo que da lugar a la inducción electrostática de la carga en este último. El origen de cargas entre los electrodos interconectados mediante un circuito eléctrico externo es lo que ocasiona la génesis de un potencial eléctrico entre ambos y el comienzo del flujo
-

dichas cargas entre uno y otro, dando lugar a la energía eléctrica de origen triboeléctrico.

Por todo esto, para poder dimensionar la magnitud de la energía eléctrica origen de un TENG, es necesario poder calcular, de la manera más precisa posible, la magnitud de la carga; la corriente y el potencial eléctrico; originados entre los electrodos de un TENG de estudio. Las metodologías de cálculo son diferentes dependiendo de la tipología del TENG en consideración, ya sea de deslizamiento o contacto. En este apartado se abordará de manera precisa la modelización matemática del TENG de deslizamiento, ya que se trata de la tipología de funcionamiento de mayor interés para nuestros diseños propuestos más adelante.

En [8], mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos entre otros, se obtuvo un modelo teórico propuesto para el comportamiento de los TENG de deslizamiento. A partir de este modelo, se realizaron determinados experimentos para construir un modelo analítico real acerca del comportamiento de los TENG de deslizamiento. Tras todo esto, se compararon los resultados; entre los del modelo teórico, numérico, semi-analítico y los experimentales; para la validación del mismo, obteniéndose unos valores coherentes. Este artículo constituye un hito en lo referente a la modelización matemática de los TENG de deslizamiento.

Las variables empleadas fueron:

Q = La carga total puesta en circulación por el circuito externo (inducida a los electrodos)

V = Potencial eléctrico ejercido entre los electrodos del TENG

x = Coordenada lineal de deslizamiento relativo de los contactos del TENG

Las cuales estructuran los parámetros básicos para el estudio de funcionamiento de un TENG tipo. Con una relación V-Q similar a la de un condensador, pero de mayor dificultad que este debido al factor deslizante (dx) que debemos considerar para el funcionamiento de un TENG de deslizamiento, ya que dicho factor diferencial del desplazamiento ocasionará una no uniformidad en el comportamiento de las cargas sobre la superficie de los electrodos extractores de carga. Es debido a esto por lo que se empleó el método de cálculo numérico de Elementos Finitos para realizar una primera aproximación a un modelo teórico de comportamiento. Tras esto se empleó el método de la interpolación entre los valores analíticos experimentales obtenidos y los del modelo teórico considerado, obteniendo como resultado el modelo final tras un tratamiento analítico, el cual a continuación abordaremos.

En términos de los materiales empleados como contactos triboeléctricos nos podemos encontrar con **TENGs de deslizamiento dieléctrico – dieléctrico** o **TENGs de deslizamiento conductor – dieléctrico**. A continuación, se establecerán las premisas de funcionamiento y génesis del efecto triboeléctrico por deslizamiento en ambos casos, así como los modelos matemáticos correspondientes a estos. De esta manera se permitirá disponer de un mayor conocimiento acerca del funcionamiento de los tribo-dispositivos de deslizamiento, así como sus formas aplicables para un modelo teórico correspondiente a nuestro dispositivo propuesto.

2.3.7.1. TENG de deslizamiento dieléctrico – dieléctrico

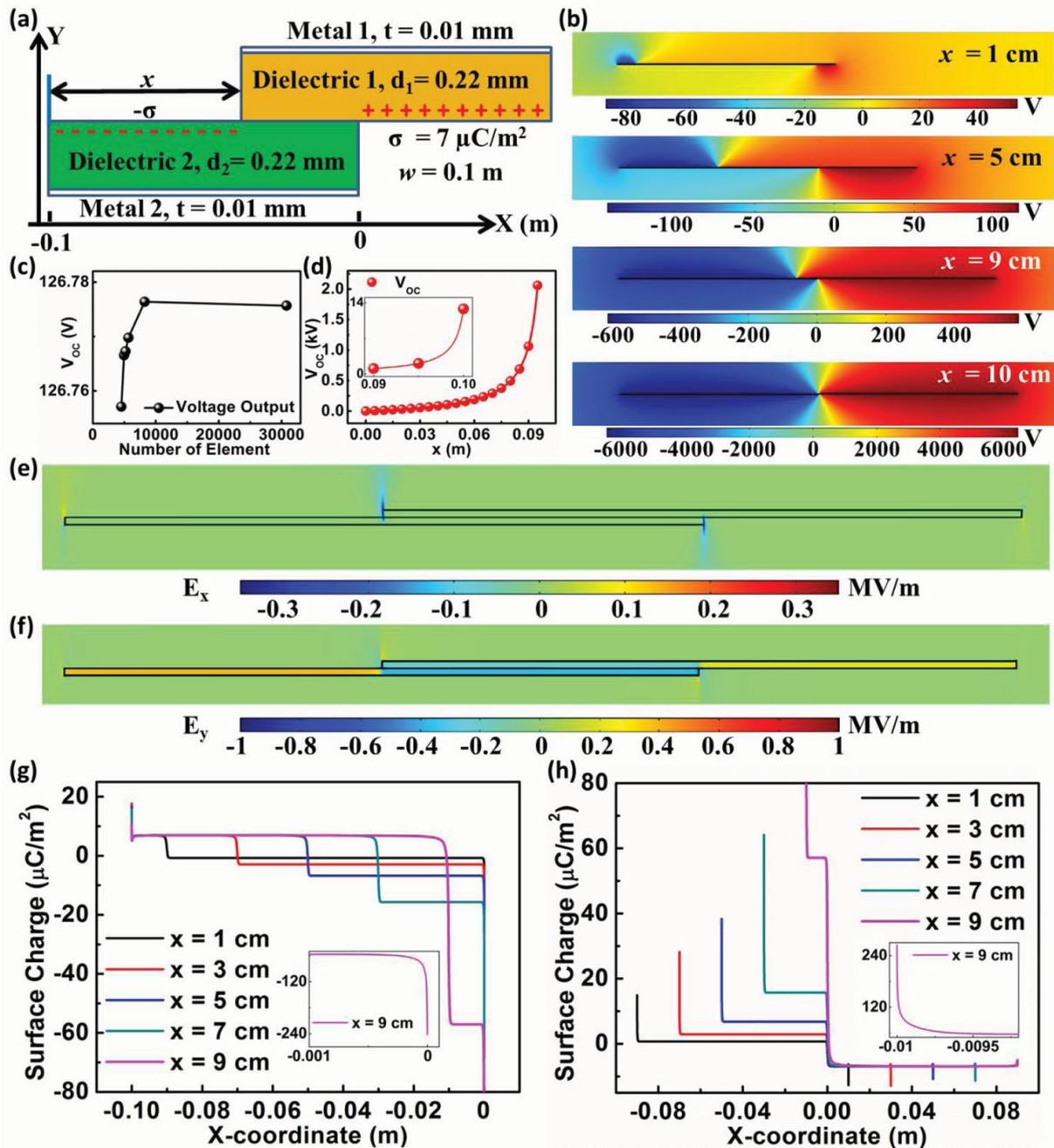


Figura 16. Modelización de tensiones (V, Voc) del TENG de deslizamiento dieléctrico - dieléctrico. Condiciones de Circuito Abierto (OC)

Fuente: S. Niu, Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y. S. Zhou, Y. Hu, Z. L. Wang. "Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators". (2013). *Advanced Materials*. 25.

En la **Figura 16** se nos muestran diferentes representaciones relativas a un TENG determinado y modelado a partir de Método de Elementos Finitos (FEM) en las condiciones de Circuito Abierto. La **Figura 16 (a)** representa un esquema del TENG de deslizamiento considerado con sus parámetros dimensionales (w , x , d y t) y la densidad de carga superficial triboeléctrica ($TECD = \sigma_s$) ocasionada por la puesta en contacto del par triboeléctrico en uso.

Cabe destacar que el tratarse de la condición de Circuito Abierto (OC) se considera que las cargas inducidas en los electrodos son nulas ya que la resistencia externa del circuito tiende a ser infinita.

Por su parte, la **Figura 16 (b)** nos muestra el comportamiento de los potenciales eléctricos en los electrodos debidos a estas condiciones. Estos potenciales son prácticamente nulos en las zonas solapadas en las que se produce la electroneutralidad de la interfaz triboeléctrica. A medida que se va produciendo la separación de las superficies conforme avanza la coordenada del deslizamiento longitudinal x , estas tensiones se incrementan, alcanzando la tendencia de crecimiento exponencial que podemos observar en la **Figura 16 (d)**. Debido a esto podemos concluir que **las mayores tensiones en los TENG de deslizamiento se producen cuando se alcanza la separación total de los contactos**.

A continuación, las **Figuras 16 (e) y (f)** nos muestran la progresión de los campos eléctricos conforme se produce la separación de los contactos por deslizamiento. Se analizan atendiendo a las dos coordenadas espaciales bidimensionales observando un *Efecto borde* en el caso de E_x , y las diferentes polarizaciones sufridas por los dieléctricos correspondientes a cada uno de los contactos tanto en las regiones solapadas como separadas en E_y . En ambas zonas desapareadas podemos observar la génesis de campos eléctricos positivos. Esto es debido a que, teniendo en cuenta la tipología de electrización triboeléctrica superficial sufrida por cada uno de ellos, ambos originan una polarización interna de cargas positivas en dirección superior.

Por último, analizando las **Figuras 16 (g) y (h)** se puede concluir la relación existente entre las cargas inducidas en los electrodos inferior y superior respectivamente con la coordenada x , de una forma similar a la de la tensión con la misma coordenada de deslizamiento. Por ello se procedió a la relación de los tres parámetros característicos (V - Q - x) mostrada en la **Figura 17**.

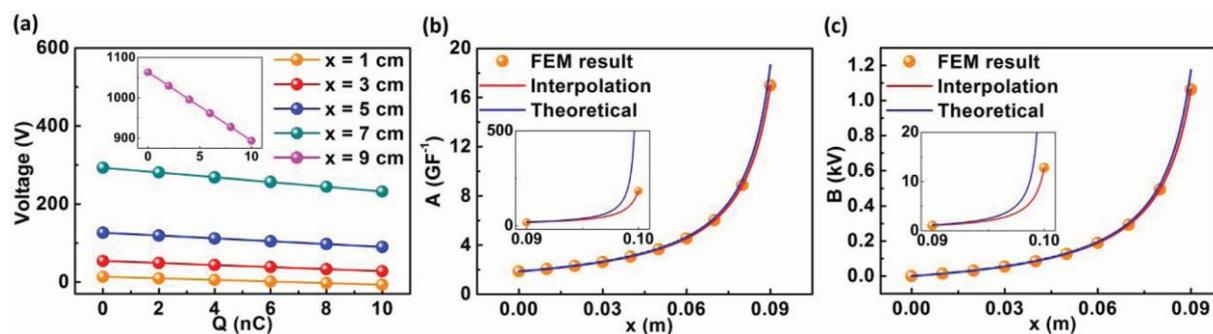


Figura 17. Relación (V - Q - x) del TENG de deslizamiento dieléctrico - dieléctrico.

Fuente: S. Niu, Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y. S. Zhou, Y. Hu, Z. L. Wang. "Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators". (2013). *Advanced Materials*. 25.

En la **Figura 17 (a)** se muestra la relación entre V/Q a diferentes valores de x constantes. En el podemos observar una progresión lineal decreciente, cuya ecuación sería:



$$V = -A(x) \cdot Q + B(x) \quad (1)$$

Para la obtención de A(x) se podría proceder a la obtención de la pendiente de una recta por el método algebraico, obteniendo que:

$$A(x) = \frac{\Delta V (V)}{\Delta Q (C)} = \frac{1}{C(x)} \left(\frac{1}{F} \right) \quad (1.1)$$

De esta manera se obtiene la relación entre los tribo-dispositivos y su comportamiento como condensadores de placas planas entre dieléctricos.

Por otro lado, B(x) es la ordenada en el origen de esta recta y le corresponde el valor de V (Q = 0). Dado que Q es la carga inducida en los electrodos y esta es 0 en la condición de Circuito Abierto, entonces:

$$B(x) = V(Q = 0) = V_{oc} \quad (1.2)$$

Por tanto:

$$V = -\frac{1}{C(x)} \cdot Q + V_{oc}(x) \quad (2)$$

Esta expresión puede ser resuelta de varias maneras, en [8] se plantean dos de ellas, la numérica y la teórica. La resolución numérica consiste en la aplicación del *Método de la Interpolación Fraccional Continua*, la cual alcanza unas mejores aproximaciones de caracterización que la *Interpolación Polinomial Tradicional*. Las expresiones para la aplicación de la *Interpolación Fraccional Continua* son:

$$A(x) = a_1 + \frac{x - x_1}{a_2 + \frac{x - x_2}{a_3 + \dots + \frac{x - x_{10}}{a_{11}}}} \quad (3.1)$$

$$B(x) = b_1 + \frac{x - x_1}{b_2 + \frac{x - x_2}{b_3 + \dots + \frac{x - x_{10}}{b_{11}}}} \quad (3.2)$$

Los datos empleados para la obtención de la tensión mediante el Método de la Interpolación Fraccional Continua se muestran en la Información suplementaria de [8]. Adicionalmente, también en este artículo se referencia a un tercero el cual es [9], para la explicación acerca del procedimiento de aplicación de este método de cálculo numérico.

Pese a la buena relación entre los resultados obtenidos mediante el Método FEM y el Método de la Interpolación Fraccional Continua, como podemos observar en las **Figuras 17 (b) y (c)**. Es importante, en aras de facilitar los posibles diseños y dimensionamiento, el obtener una relación teórica que permita la aplicación de los parámetros dimensionales considerables. Para la obtención de estas expresiones se partió de la **Ecuación 1** y se fueron extrayendo, de forma teórica, los posibles valores de sus parámetros de interés: **C(x)** y **Voc**.

En primer lugar, se estudió el comportamiento capacitivo del sistema. Teniendo en cuenta que el espesor de los dieléctricos era mucho menor que su longitud y que el principal comportamiento capacitivo tiene lugar mientras los contactos se encuentran superpuestos, se consideró un **Modelo de condensador de placas paralelas**. A partir del que se obtuvo la siguiente expresión:

$$C(x) = \frac{\epsilon_0 w (l - x)}{\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}}} \quad (4)$$

Siendo:

ϵ_0 = Constante dieléctrica del aire o el vacío = $8.8542 \cdot 10^{-12}$ ($C^2/(N \cdot m^2)$)

ϵ_{rx} = Constante dieléctrica relativa del material dieléctrico x. $\epsilon_{rx} = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_0}$

d_1 = Espesor del dieléctrico

w = Anchura del electrodo

l = Longitud del electrodo

x = Coordenada de deslizamiento longitudinal respecto del electrodo.

Por su parte, para la obtención de Voc se parte de criterios similares tales como que el espesor de los dieléctricos (d) es mucho menor que las longitudes de estos. Por lo tanto, se puede asumir que los electrodos trabajen como platos infinitos. Debido a esto se puede considerar que el campo eléctrico en la componente y (E_y) es uniforme en el interior de los dieléctricos conforme estos se van separando. De esta manera se obtienen las siguientes expresiones para las densidades superficiales de cargas de las diferentes regiones (solapada o no solapada), en ambos electrodos:

$$\text{Electrodo inferior, Región no solapada: } \rho = \sigma \quad (5.1)$$

$$\text{Electrodo inferior, Región solapada: } \rho = -\frac{\sigma x}{l-x} \quad (5.2)$$

$$\text{Electrodo superior, Región no solapada: } \rho = -\sigma \quad (5.3)$$

$$\text{Electrodo superior, Región solapada: } \rho = \frac{\sigma x}{l-x} \quad (5.4)$$

A partir de las **Expresiones 5** se procede a la obtención de la ecuación para el cálculo de los campos eléctricos internos en sendos materiales dieléctricos considerados. Para ello se empleó el Teorema de Gauss junto con las densidades de carga triboeléctrica superficial en función del deslizamiento ($\rho(x)$), obteniendo las siguientes **Ecuaciones 6**.

$$E_{y1} = \frac{\sigma x}{\epsilon_0 \epsilon_{r1} (l-x)} \quad (6.1)$$

$$E_{y2} = \frac{\sigma x}{\epsilon_0 \epsilon_{r2} (l-x)} \quad (6.2)$$

Ambas expresiones para el cálculo de los campos eléctricos internos de los dieléctricos, debido a la polarización de los mismos, se presentan con el mismo signo. El motivo de esto son las cargas inductoras de cada polarización ya que, en el caso del dieléctrico inferior, su campo eléctrico debería de haber sido negativo dada la dirección de recorrido del espesor del mismo respecto de la interfaz triboeléctrica. Pero, al producirse una electrización resinosa en este electrodo, las cargas negativas de la superficie de contacto originan una reorientación de dipolar positiva en la dirección ascendente. Por esto, **los campos eléctricos ocasionados por la polarización triboeléctrica de dieléctricos son sumativos**, ya que terminan con el mismo signo, y dan lugar a la **Ecuación 7** para la obtención del Potencial de Circuito Abierto:

$$V_{OC}(x) = E_{y1}d_1 + E_{y2}d_2 = \frac{\sigma x}{\epsilon_0(l-x)} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right) \quad (7)$$

Una vez obtenidas las dos expresiones podemos retomar la **Ecuación 2** y sustituir en esta las **Ecuaciones 4 y 7**:

$$V = -A(x) \cdot Q + B(x) = -\frac{1}{\epsilon_0 w(l-x)} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right) Q + \frac{\sigma x}{\epsilon_0(l-x)} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right) \quad (8)$$

En las **Figuras 17 (b) y (c)** se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de la **Ecuación 8** en sus dos modalidades, numérica mediante la Interpolación Fraccional Continua ($A(x)$ y $B(x)$) y la Teórica, junto con los resultados obtenidos del Método de los Elementos Finitos. Ambas modalidades presentan una gran aproximación al comportamiento representado por el Método de los Elementos Finitos pero la problemática se presenta cuando la coordenada de deslizamiento (x) se aproxima a la longitud total del contacto triboeléctrico (l).

$$\lim_{x \rightarrow l} V = \infty$$

Esto ocasiona unas discrepancias importantes en los resultados de la aproximación por aplicación del modelo teórico en coordenadas x superiores al 80% de la longitud total de contacto. Los principales motivos posibles para esta problemática podrían abarcar desde la no correcta consideración de los efectos sobrevenidos debido al *Efecto borde* ya comentado en la génesis de los campos eléctricos de coordenada longitudinal (E_x). En un inicio, el planteamiento aplicado considera este *Efecto borde* como despreciable y, para establecer esta consideración como correcta se deben cumplir ambas de las siguientes condiciones:

- $d \ll l$: De forma que los campos eléctricos longitudinales sean despreciables con respecto a los transversales. Esto podría ocasionar problemáticas relativas a que la magnitud creciente de los campos eléctricos en la coordenada longitudinal conforme la relación d/l aumente. Dichos campos originarían la no uniformidad de los transversales y, por tanto, de la carga inducida en los electrodos. Esto generaría fluctuaciones como las observadas en la **Figura 18**. En la realidad, esta situación es raro que se produzca dado que la longitud de contactos tiende a ser bastante elevada con respecto al espesor de los dieléctricos debido en parte a la aplicación de materiales nanoestructurados.
- La coordenada de deslizamiento (x) no debe aproximarse a la longitud de los *contactos*: Existen tres factores no ideales que podrían aplicarse para este supuesto:
 - Proximidad de las superficies capacitivas, solapadas y no solapadas
 - Cuando $x \rightarrow l$, la consideración de cargas superficiales en los electrodos, $Q = 0$ en los electrodos, para la condición de circuito abierto serían muy elevadas y el *Efecto Borde* no podría ser despreciado.
 - Las superficies exteriores de los electrodos también se encontrarían cargadas, no se acumularían todas en la interfaz.

Pese a todo, las mayores diferencias con respecto el modelo de elementos finitos se produce cuando la coordenada de deslizamiento alcanza el 90% de la longitud, lo cual supone una distancia de contacto restante mínima. Por lo tanto, las cargas restantes a extraer y no consideradas en caso de despreciar esta parte, serían ínfimas. Es por ello por lo que se

considerará la **Ecuación 8** como válida y precisa en la mayor parte de los casos de aplicación, para valores de $x = (0, 0.8l]$.

Por su parte, para el estudio de las condiciones de Cortocircuito (SC) se empleó nuevamente el mismo esquema que para las de Circuito Abierto, aplicando el criterio de mínima resistencia, tendiente a nula, o lo que es lo mismo, mismo potencial eléctrico en ambos electrodos. De esta manera se asume una caída de tensión de 0V en la totalidad del proceso cumpliéndose la hipótesis de cortocircuito. En la **Figura 19** se muestra la modelización del comportamiento en cortocircuito del TENG de deslizamiento dieléctrico – dieléctrico mediante el Método de Elementos Finitos.

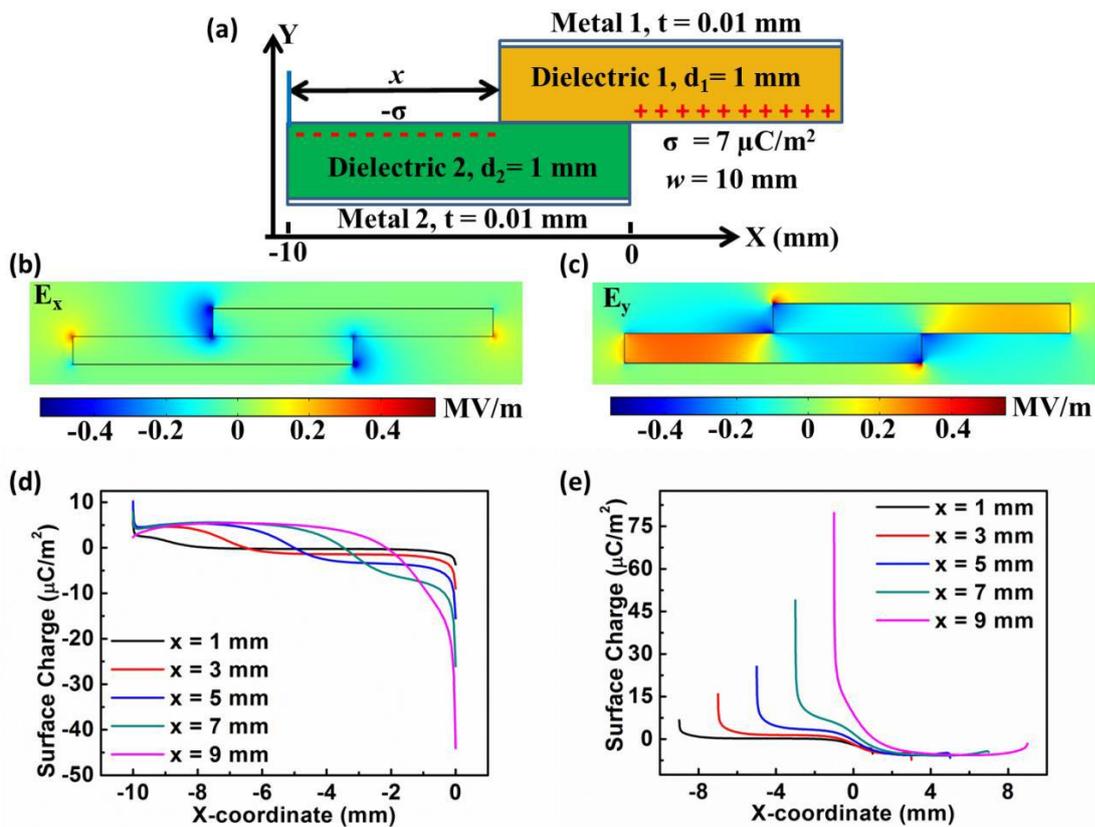


Figura 18. Observación del *Efecto borde* sobre un TENG de deslizamiento de $l/d = 10$.

Fuente: S. Niu, Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y. S. Zhou, Y. Hu, Z. L. Wang. "Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators, Supporting Information". (2013). *Advanced Materials*. 25.

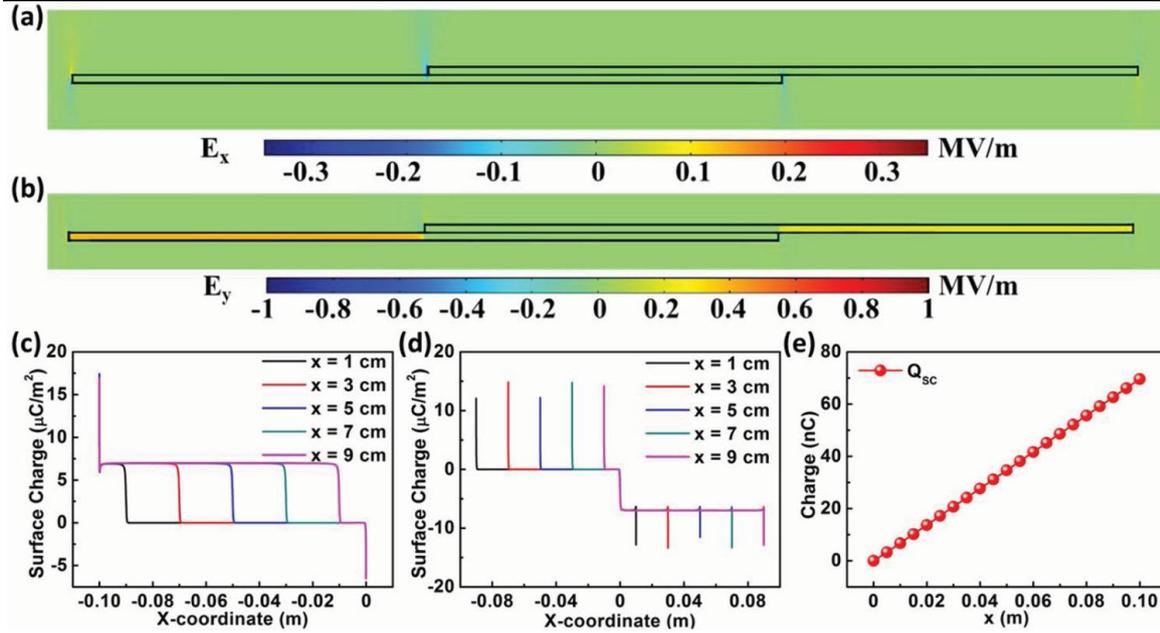


Figura 19. Modelización de Intensidad y Carga de Cortocircuito (I_{sc} , Q_{sc}) del TENG de deslizamiento dieléctrico - dieléctrico.

Fuente: S. Niu, Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y. S. Zhou, Y. Hu, Z. L. Wang. "Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators". (2013). *Advanced Materials*. 25.

Para la obtención de la expresión analítica para I_{sc} debemos desparar, a partir de la **Ecuación 8**, el valor correspondiente a la carga presente en los electrodos en la condición de cortocircuito: $Q(V=0) = Q_{sc}$

$$0 = -\frac{1}{\epsilon_0 w(l-x)} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right) Q_{sc} + \frac{\sigma x}{\epsilon_0(l-x)} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right)$$

$$\frac{1}{\epsilon_0 w(l-x)} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right) Q_{sc} = \frac{\sigma x}{\epsilon_0(l-x)} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right)$$

$$Q_{sc} = \sigma w x \quad (9)$$

La **Ecuación 9** muestra la relación lineal entre la carga de cortocircuito y el deslizamiento con ordenada en el origen cero, mostrada en la **Figura 19 (e)**. Por su parte, para obtener la respectiva corriente de cortocircuito debemos proceder de la siguiente forma:

$$I_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{dt} = \sigma w \frac{dx}{dt} = \sigma w v(t) \quad (10)$$

Pese a todo, en nuestra revisión de [5] también se estableció como principal la relación entre la corriente extraída de un TENG con la frecuencia de interacción y ciclos triboeléctricos ocasionada. Es por ello por lo que, para una mejor representación de este factor, la **Ecuación 10** pasa a ser empleada como la **Ecuación 11**.

$$I_{SC}(f_{CA}) = \sigma w l_{total} f_{CA} \quad (11)$$

Siendo:

$$f_{CA} = f_{contacto\ triboeléctrico} = f_{rotación(Hz)} \cdot N_{CTP}$$

N_{CTP} = Número de Contactos Triboeléctricos interconectados en Paralelo

Por tanto:

$$I_{SC}(f_{rotación}, N_{CTP}) = \sigma w l_{total} f_{rotación} N_{CTP} \quad (12)$$

Para la modelización de los TENG de deslizamiento en condiciones de funcionamiento real se debe asumir la extracción de la corriente a un circuito externo para alimentar a una determinada carga. Para el objetivo de la modelización teórica se asumirá que la conjunción de dicha carga junto con la resistencia de los conductores se englobará en un único término genérico denominado R. Partiendo de la Ley de Ohm:

$$V = I \cdot R = R \frac{dQ}{dt}$$

Sabiendo el valor de V de la **Ecuación 8**, podemos sustituirlo en la superior y obtener una ecuación diferencial para un modelo teórico o semi-analítico, dependiendo de si sustituimos la expresión teórica o numérica para la aplicación del Método de la Interpolación respectivamente. Para el modelo teórico, el cual es el objetivo de nuestra revisión, obtendríamos:

$$R \frac{dQ}{dt} = - \frac{1}{\epsilon_0 w (l-x)} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right) Q + \frac{\sigma x}{\epsilon_0 (l-x)} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right) \quad (13)$$

La **Ecuación 13** se trata de una ecuación diferencial ordinaria de primer orden cuyas **condiciones iniciales son: $x(t=0) = 0$ y $Q(t=0) = 0$** . Adicionalmente, se ha de considerar la siguiente agrupación de constantes dimensionales de interés para facilitar el desarrollo resolutivo de la ecuación. De esta manera definimos la:

$$\text{Constante de espesor } (d_0) = \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right)$$

Por otro lado, debido a la problemática ocasionada por el *Efecto borde* anteriormente comentado, se deben aplicar unas determinadas condiciones frontera para la resolución de los casos límites de la coordenada x con respecto a l . Estas condiciones son:

$$x = vt \left(t < \frac{x_{max}}{v} \right) \quad (14.1)$$

$$x = x_{max} \left(t \geq \frac{x_{max}}{v} \right) \quad (14.2)$$

Siendo:

$$x_{max} = 0.8 \cdot l$$

Por tanto:

$$l - x_{max} = 0.2 \cdot l$$

A partir de la resolución analítica para la **Ecuación 13**, para el caso de velocidad de deslizamiento constante, aplicando las diferentes condiciones frontera establecidas en las **Expresiones 14.1 y 14.2** obtendríamos:

Para la condición de la **Ecuación 14.1** en la que el tiempo de ensayo es inferior que el deslizamiento alcance $x_{max} = 0.8 \cdot l$.

$$Q = \sigma l w \left\{ -\frac{Rw\epsilon_0 v}{Rw\epsilon_0 v - d_0} \exp \left[\frac{d_0}{Rw\epsilon_0 v} \ln \left(\frac{l - vt}{l} \right) \right] + \frac{d_0}{Rw\epsilon_0 v - d_0} \left(\frac{l - vt}{l} \right) + 1 \right\} \quad (15.1)$$

$$I = \sigma w v \frac{d_0}{R w \epsilon_0 v - d_0} \left\{ \frac{l}{l - vt} \exp \left[\frac{d_0}{R w \epsilon_0 v} \ln \left(\frac{l - vt}{l} \right) \right] - 1 \right\} \quad (15.2)$$

$$V = I \cdot R = \sigma w v R \frac{d_0}{R w \epsilon_0 v - d_0} \left\{ \frac{l}{l - vt} \exp \left[\frac{d_0}{R w \epsilon_0 v} \ln \left(\frac{l - vt}{l} \right) \right] - 1 \right\} \quad (15.2)$$

Por otro lado, para la condición de la **Ecuación 14.2** en la que el tiempo de ensayo permite que se alcance y supere x_{max} :

En primer lugar, sustituimos la condición frontera en la **Ecuación 13**.

$$R \frac{dQ}{dt} = - \frac{d_0}{\epsilon_0 w (l - x_{max})} Q + \frac{\sigma x_{max} d_0}{\epsilon_0 (l - x_{max})} \quad (13')$$

Resolviendo obtenemos que:

$$Q = \sigma w x_{max} - (\sigma w x_{max} - Q_0) \exp \left[- \frac{d_0}{R w \epsilon_0 (l - x_{max})} \left(t - \frac{x_{max}}{v} \right) \right] \quad (16.1)$$

$$I = (\sigma w x_{max} - Q_0) \frac{d_0}{R \epsilon_0 w (l - x_{max})} \exp \left[- \frac{d_0}{R w \epsilon_0 (l - x_{max})} \left(t - \frac{x_{max}}{v} \right) \right] \quad (16.2)$$

$$V = I \cdot R = R (\sigma w x_{max} - Q_0) \frac{d_0}{R \epsilon_0 w (l - x_{max})} \exp \left[- \frac{d_0}{R w \epsilon_0 (l - x_{max})} \left(t - \frac{x_{max}}{v} \right) \right] \quad (16.3)$$

Cabe destacar que en las **Expresiones 16** se muestra un parámetro Q_0 , obtenido a partir de la aplicación de la condición frontera relativa a la carga: $Q(t = x_{max}/v) = Q_0$. El valor de Q_0 se obtiene de la sustitución de $t = x_{max}/v$ en la **Ecuación 15.1**.

Por último, debemos también tener presentes la **Expresión 17** la cual nos establece el método de obtención de la *Constante de reducción de la corriente producida* (τ) la cual nos representa el tiempo que tardará en comenzar a decaer la corriente producida entre electrodos una vez se haya superado x_{max}/v , o lo que es lo mismo, los contactos se encuentren desapareados. Su conocimiento es de vital importancia para evitar que este tiempo sea superado en la medida de lo posible durante los ciclos de funcionamiento de TENG de deslizamiento y esto conlleve pérdidas de eficiencia de conversión energética.

$$\tau = \frac{R\epsilon_0 w(l - x_{max})}{d_0} \quad (17)$$

Y se debe cumplir la siguiente condición:

$$\tau > \frac{l_{contacto}}{v_{rotación}}$$

Por lo que, a la hora de los diseños, siempre serán más convenientes los TENG cuyas $l_{contacto}$ sean menores, ya que esto además permitirá un incremento en la densidad de estos y unas mayores intensidades obtenidas debido a la interconexión en paralelo de los contactos. Adicionalmente, sería de interés la reducción de la coordenada longitudinal de los contactos para un dispositivo de aplicación real en condiciones de velocidad de activación variable, en aras de paliar los detrimentos en la recolección energética que esto podría conllevar.

Para la comprobación del modelo propuesto, en [8] relizan un ensayo experimental para comparar. Dicho ensayo consiste en un tribo-dispositivo de deslizamiento dieléctrico - dieléctrico compuesto por un par triboeléctrico de PFTE – Nylon cuyas propiedades y parámetros característicos de funcionamiento se muestran en la **Tabla 4**. Para la activación del funcionamiento se empleó un motor lineal para acelerar y decelerar, con valores constantes de aceleración, el contacto superior del dispositivo.

Tabla 3:

Parámetros para la simulación teórica del ensayo PFTE – Nylon.

Dielectric 1 Nylon	$\epsilon_{r1} = 4, d_1 = 50 \mu\text{m}$
Dielectric 2 PTFE	$\epsilon_{r2} = 2.1, d_2 = 50 \mu\text{m}$
Width of Dielectrics w	0.05 m
Length of Dielectrics l	0.071 m
Tribo-charge surface density σ	$200 \mu\text{C m}^{-2}$
Maximum separation distance x_{max}	0.05 m
Acceleration a	20 m/s^2

Nota Fuente: S. Niu, Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y. S. Zhou, Y. Hu, Z. L. Wang. "Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators". (2013). *Advanced Materials*. **25**.

Se consideraron las siguientes condiciones frontera debidas a la aceleración constante:



$$x = \frac{1}{2}at^2 \left(t < \sqrt{\frac{x_{max}}{a}} \right)$$

$$x = x_{max} - \frac{1}{2}a \left(2\sqrt{\frac{x_{max}}{a}} - t \right)^2 \left(\sqrt{\frac{x_{max}}{a}} \leq t < 2\sqrt{\frac{x_{max}}{a}} \right)$$

$$x = x_{max} \left(t \geq 2\sqrt{\frac{x_{max}}{a}} \right)$$

En la **Figura 20 (a)** se muestra un esquema del dispositivo ensayado y en las **Figuras 20 (a – f)** se representa la comparación en resultados entre el estudio experimental realizado y el modelo teórico propuesto. Como se puede observar, pese a existir ciertas diferencias relativas entre ciertos valores, la proximidad de resultados y picos es notoria. Esto nos permite concluir que el modelo teórico considerado es válido para estimar el funcionamiento de determinados tribo-dispositivos de deslizamiento dieléctrico – dieléctrico.

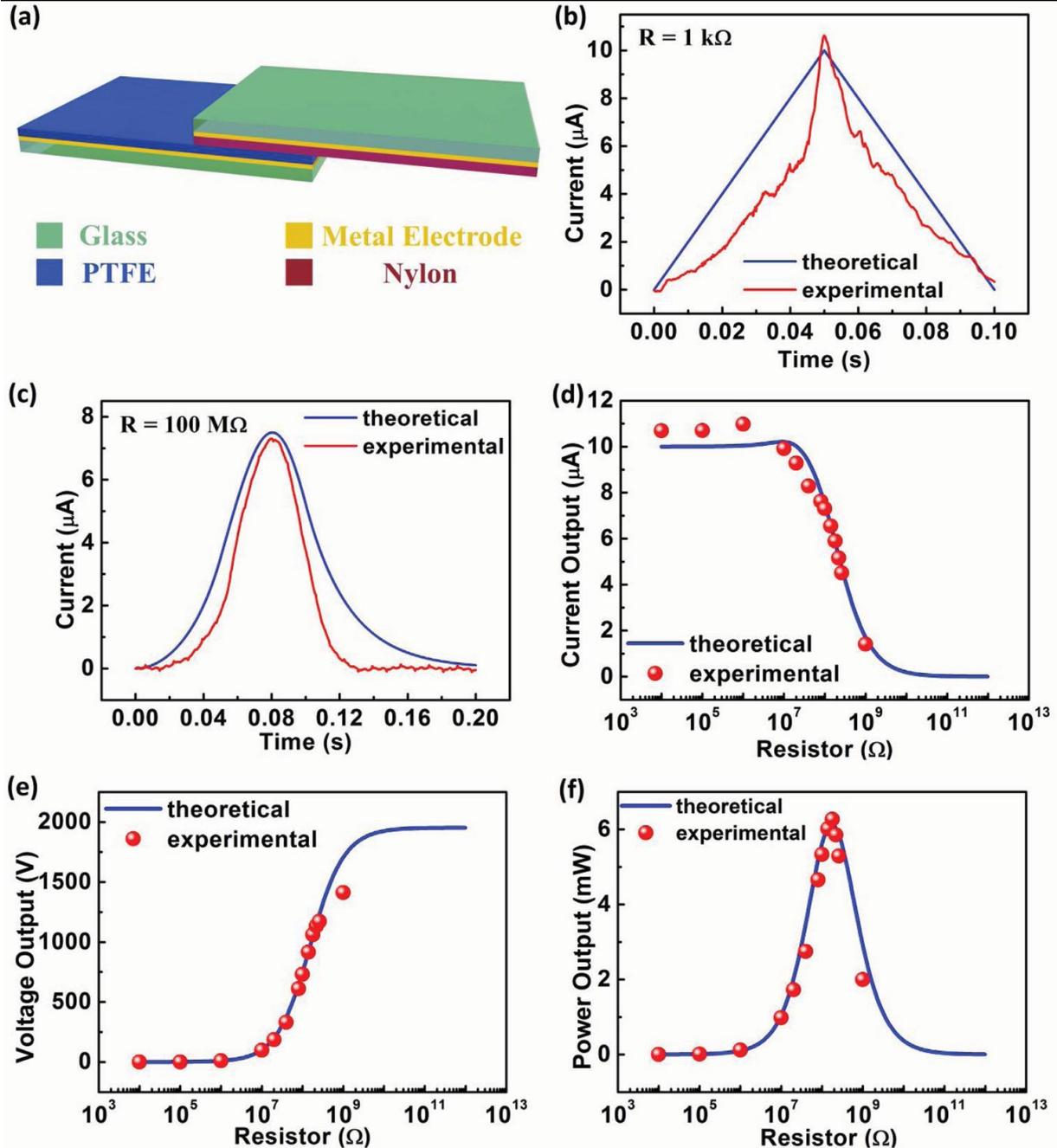


Figura 20. Comparación del Modelo matemático teórico obtenido con datos experimentales para un TENG de deslizamiento dieléctrico - dieléctrico.

Fuente: S. Niu, Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y. S. Zhou, Y. Hu, Z. L. Wang. "Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators". (2013). *Advanced Materials*. 25.

2.3.7.2. TENG de deslizamiento conductor – dieléctrico

Para la modelización de la tipología de TENG de deslizamiento conductor – dieléctrico el procedimiento es equivalente, pero atendiendo a ciertas diferencias a tener en cuenta. En la **Figura 21 (a)** se muestra un esquema del sistema a modelizar. En el resto se establecen las relaciones de cargas con la coordenada de deslizamiento y el electrodo estudiado, así como la

comparación entre la estimación alcanzada a través de la aplicación del Método de Elementos Finitos (FEM) y el modelo teórico final.

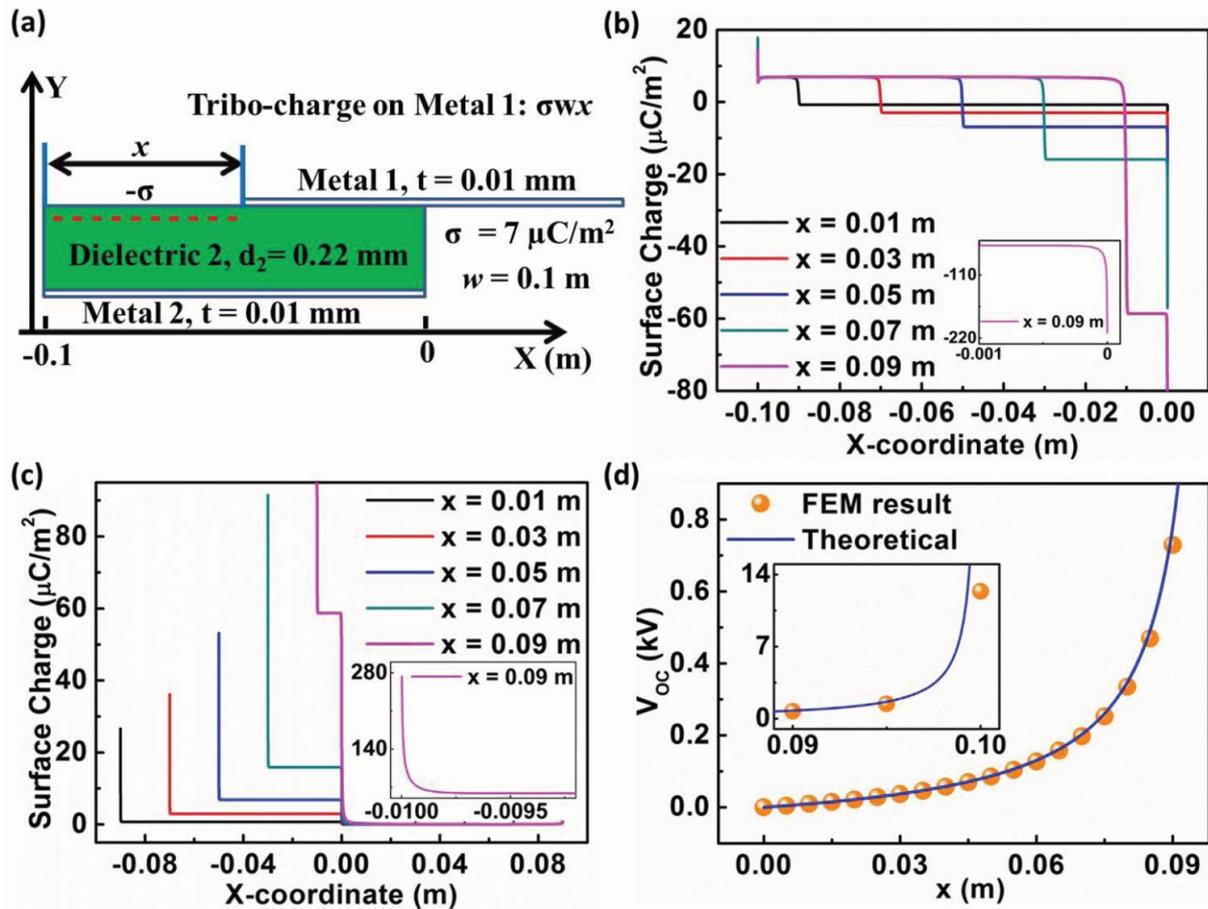


Figura 21. Modelización del TENG de deslizamiento Conductor - Dieléctrico.

Fuente: S. Niu, Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y. S. Zhou, Y. Hu, Z. L. Wang. "Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators". (2013). *Advanced Materials*. 25.

Entre las diferencias de ambas tipologías de funcionamiento destacar las relativas a la ausencia de uno de los dieléctricos, en este caso el superior. Esta ausencia ocasionará discrepancias con respecto al modelo anterior principalmente en lo relativo al espesor de dicho dieléctrico ($d_1 = 0$) así como el empleo de un contacto triboeléctrico que realiza las funciones de electrodo a la par. Estas diferencias tendrán repercusión en los modelos de distribuciones de cargas sobre los electrodos, en las regiones solapadas y no solapadas, presentados para el caso anterior en las **Ecuaciones 5**. El principal motivo se deberá a que un conductor dispone de la capacidad de brindar movilidad a las cargas por definición. Esto origina la imposibilidad de que dichas cargas triboeléctricas se mantengan en la interfaz y den lugar a un campo eléctrico interno, ya que tampoco son capaces de polarizarse como los dieléctricos.

Teniendo en cuenta estas diferencias, en las **Ecuaciones 18** se nos muestran los modelos propuestos de distribución de cargas en los electrodos:

$$\text{Electrodo inferior, Región no solapada: } \rho = \sigma \quad (18.1)$$

$$\text{Electrodo inferior, Región solapada: } \rho = -\frac{\sigma x}{l-x} \quad (18.2)$$

$$\text{Electrodo superior, Región no solapada: } \rho = 0 \quad (18.3)$$

$$\text{Electrodo superior, Región solapada: } \rho = \frac{\sigma x}{l-x} \quad (18.4)$$

Por su parte, el campo eléctrico originado en el único dieléctrico empleado será obtenido a partir de la **Ecuación 19**.

$$E_{y2} = \frac{\sigma x}{\epsilon_0 \epsilon_{r2} (l-x)} \quad (19)$$

Siendo, por tanto, el potencial de circuito abierto (V_{oc}) el mostrado por la **Ecuación 20**:

$$V_{oc}(x) = E_{y2} d_2 = \frac{\sigma x}{\epsilon_0 (l-x)} \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \quad (20)$$

Como en el caso del anterior modelo, este también presenta problemáticas en el ajuste de valores, entre los teóricos y los numéricos, para los casos de x próximos a l . Por su parte, los valores de Capacitancia (C) y de Tensión en condiciones de carga, no circuito abierto, se obtienen mediante las **Ecuaciones 21 y 22** respectivamente.

$$C(x) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2} w (l-x)}{d_2} \quad (21)$$

$$V = -A(x) \cdot Q + B(x) = -\frac{1}{\epsilon_0 w (l-x)} \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} Q + \frac{\sigma x}{\epsilon_0 (l-x)} \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \quad (22)$$

A partir de todas estas expresiones se puede proceder de igual forma que para el caso de los TENG de deslizamiento dieléctrico – dieléctrico en la obtención de la ecuación diferencial ordinaria de primer orden. Esta ecuación será equivalente a las **Ecuaciones 13 y 13'** y, a partir de ella, de podrá obtener las diferentes funciones para la obtención de la carga (Q), Tensión (V) e Intensidad (I) originada por un TENG de deslizamiento conductor –

dieléctrico. La única diferencia entre estas y las de la tipología anterior es que, en el caso actual, el valor de $\mathbf{d}_1 = \mathbf{0}$. Al tratarse de una constante, esta no afectará a los procesos analíticos de resolución de la ecuación diferencial.

2.3.7.3. TENG de contacto

Para la comprensión acerca del mecanismo de funcionamiento de los tribo-dispositivos de contacto se empleó el artículo [10]. En él se realiza una clasificación similar al anterior, para el modelado de este tipo de tribo-dispositivos atendiendo a si estos son de contacto dieléctrico – dieléctrico, o conductor – dieléctrico. En la **Figura 22** se muestran los esquemas de funcionamiento que se tendrán en cuenta para la realización de la modelización teórica de ambas tipologías.

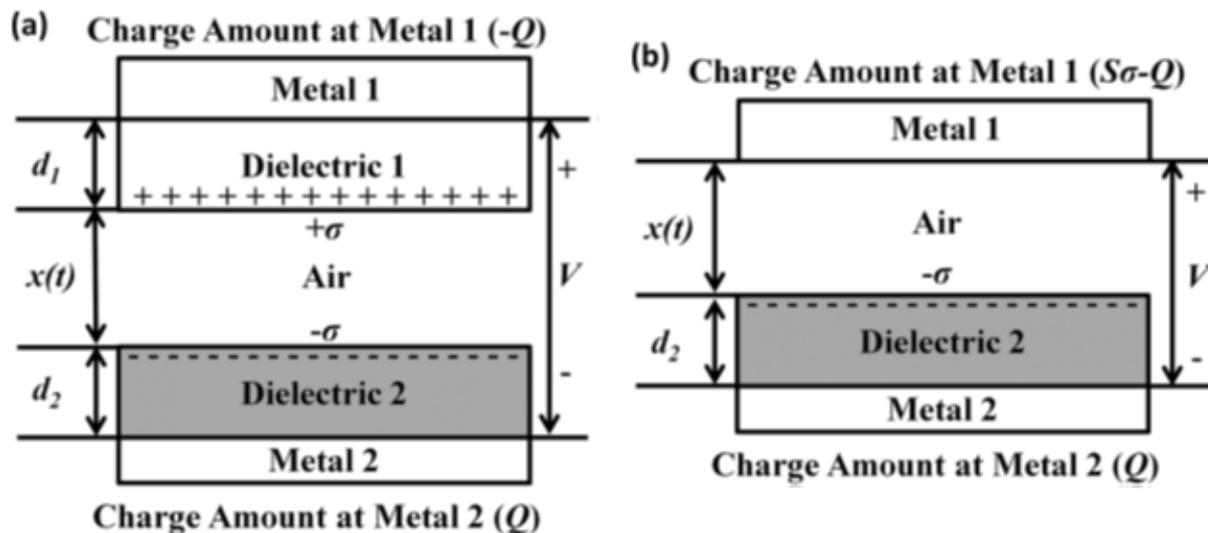


Figura 22. Esquemas de funcionamiento para los diferentes Tribo-dispositivos de contacto a modelizar. (a) Dieléctrico – dieléctrico, (b) Conductor – dieléctrico.

Fuente: S. Niu, S. Wang, L. Lin, Y. Liu, Y. S. Zhou, Y. Hu, Z. L. Wang. "Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source". (2013). *Energy Environ.* 6.

El procedimiento para llevar a cabo la modelización es similar que en el caso de los TENGs de deslizamiento. Se debe tener en cuenta que la principal diferencia entre ambas metodologías de funcionamiento recae sobre la existencia de una coordenada de deslizamiento en uno de los casos y en el otro de separación. Como muestran los esquemas de la **Figura 22**, para el caso de los TENG de contacto, la coordenada de separación seguirá llamándose x , será función del tiempo y su dirección será vertical; alcanzando un punto máximo al que denominaremos el GAP (x_{\max} ó L). Como en el caso del procedimiento anterior, el principal objetivo consistirá en la obtención de un modelo teórico que relacione las variables clave del mismo (V - Q - x) y satisfaga los parámetros eléctricos de salida de un tribo-dispositivo de características determinadas en un correspondiente estado de funcionamiento.

En primer lugar, se procedió a la obtención de los valores de los campos eléctricos que las cargas superficiales triboeléctricas originan una vez se comienza la separación de ambas

superficies. La **Ecuaciones 23 y 24** nos muestran los campos eléctricos internos sobre los correspondientes dieléctricos que dichas cargas originan, dando lugar a la polarización de los mismos. Por su parte, la **Ecuación 25** nos muestra el campo eléctrico al que está sometido el aire interpuesto entre contactos triboeléctricos conforme estos se separan. Dichas expresiones se obtuvieron considerando el **modelo de condensador de placas paralelas** también para este sistema.

$$E_1 = -\frac{Q}{S\epsilon_0\epsilon_{r1}} \quad (23)$$

$$E_2 = -\frac{Q}{S\epsilon_0\epsilon_{r2}} \quad (24)$$

$$E_{aire (GAP)} = \frac{-\frac{Q}{S} + \sigma(t)}{\epsilon_0} \quad (25)$$

Siendo:

S = Superficie de contacto triboeléctrico

$\sigma(t)$ = TECD = Densidad de carga o carga superficial de la interfaz triboeléctrica

Q = Carga inducida a los electrodos y puesta en circulación por el circuito externo.

Q/S = Densidad de carga inducida = σ_1 .

Estos campos presentan un signo negativo debido a que, pese a ser de dirección ascendente, en la **Figura 22** se ha considerado que el potencial eléctrico es en dirección descendente. Esto es así para la correcta aplicación del convenio de signos eléctrico con respecto a la dirección de flujo de los portadores de carga. En la realidad, el electrodo superior es el que tiene una carga inducida negativa y viceversa.

Para la obtención del potencial eléctrico originado se sumaron todos los campos eléctricos considerados, multiplicados por su factor de distancia entre electrodos para cada uno de ellos. La **Ecuación 26** nos muestra el cálculo para dicho potencial en el caso de un TENG de contacto dieléctrico – dieléctrico, y la **Ecuación 27** para uno conductor – dieléctrico.

$$V_{d-d} = E_1d_1 + E_2d_2 + E_{GAP}x(t) \quad (26.1)$$

$$V_{d-d} = -\frac{Q}{S\epsilon_0} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + x(t) \right) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (26.2)$$

Siendo:

$$d_{0,d-d} = \text{constante de espesor} = \frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}}$$

Por lo que, la **Ecuación 26.2** también puede expresarse tal como:

$$V_{d-d} = -\frac{Q}{S\epsilon_0} d_{0,d-d} + \frac{\sigma - \frac{Q}{S}}{\epsilon_0} x(t) \quad (26.3)$$

Para el caso del TENG de contacto conductor – dieléctrico, nos encontramos con la **Ecuación 27**.

$$V_{c-d} = E_2 d_2 + E_{GAP} x(t) \quad (27.1)$$

$$V_{c-d} = -\frac{Q}{S\epsilon_0} \left(\frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + x(t) \right) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (27.2)$$

Aplicando la *constante de espesor* correspondiente:

$$d_{0,c-d} = \text{constante de espesor} = \frac{d_2}{\epsilon_{r2}}$$

$$V_{c-d} = -\frac{Q}{S\epsilon_0} d_{0,c-d} + \frac{\sigma - \frac{Q}{S}}{\epsilon_0} x(t) \quad (27.3)$$



La **Ecuación 27.3** es equivalente a la empleada en otros múltiples estudios y artículos revisados en los cuales se aplican estas tipologías de tribo-dispositivos de contacto conductor – dieléctrico, aunque también podrían ser aplicables a otras muchas. En [3] se nos presenta la **Ecuación 28** como la empleada para la obtención de la *densidad de carga triboeléctrica (TECD)* a partir de los ensayos de Hg – Dieléctrico.

$$V = \frac{\sigma_I(L, t)}{\epsilon_1} d_1 + \frac{\sigma_I(L, t) - \sigma_c}{\epsilon_0} L \quad (28)$$

Siendo:

$\sigma_I(L, t)$ = Densidad de carga inducida en los electrodos = Q/S

ϵ_1 = Constante dieléctrica del material dieléctrico de estudio = $\epsilon_{r1} \cdot \epsilon_0$

σ_c = Densidad de carga triboeléctrica en la interfaz de contacto = TECD

L = Distancia de separación o GAP de los contactos triboeléctricos = $x(t)$

Sustituyendo estos valores por sus equivalentes, obtenemos la **Ecuación 29**; la cual es equivalente a las **Ecuaciones 26.3 y 27.3** pero con el signo cambiado y aplicando las correspondientes *constantes de espesor*.

$$V = \frac{\frac{Q}{S}}{\epsilon_0 \epsilon_{r1}} d_1 + \frac{\frac{Q}{S} - \sigma}{\epsilon_0} x(t) \quad (29.1)$$

$$V = \frac{\frac{Q}{S}}{\epsilon_0} d_0 + \frac{\frac{Q}{S} - \sigma}{\epsilon_0} x(t) \quad (29.2)$$

Por otra parte, en los casos en los que $x(t) \gg d_0$, se podría despreciar esta última, resultando en la **Ecuación 30**.

$$V(d_0 \ll x(t)) = \frac{\sigma - \frac{Q}{S}}{\epsilon_0} x(t) \quad (30.1)$$

$$V(d_0 \ll x(t)) = \frac{\frac{Q}{S} - \sigma}{\epsilon_0} x(t) \quad (30.2)$$

Una vez determinada la tensión eléctrica debida a la combinación del efecto triboeléctrico y la inducción electrostática, se procede a la obtención de los parámetros límite de funcionamiento, así como los de salida en condiciones generales de funcionamiento. En primer lugar, procedemos con la condición límite de **circuito abierto (OC)**. Las premisas principales aplicables a la condición de circuito abierto fueron ya establecidas con anterioridad y son: $Q = 0$, $R \rightarrow \infty$. Esto da lugar a la máxima tensión que el generador puede ofrecer, la cual se calcula según la **Ecuación 31**.

$$V_{oc} = \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (31)$$

Por su parte, en la condición de **cortocircuito (SC)**, $\Delta V = 0$; $R \rightarrow 0$. Aplicando la consideración de la tensión a la expresión general obtenemos la **Ecuación 32**.

$$Q_{sc} = \frac{\sigma x(t) S}{d_0 + x(t)} \quad (32)$$

Siendo:

$$\frac{Q_{sc}}{S} = \sigma_I(L, t)_{sc} = \frac{\sigma x(t)}{d_0 + x(t)}$$

Una expresión también empleada en [3] y [4].

Para la obtención de la **intensidad de cortocircuito (Isc)** debemos conocer a qué velocidad se desplazan las cargas de cortocircuito por el circuito externo, o lo que es lo mismo, la variación de estas con respecto al tiempo. Es por esto por lo que la **Ecuación 33** la obtenemos de la siguiente forma:

$$I_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{dt} = \frac{S\sigma d_0}{(d_0 + x(t))^2} \frac{dx}{dt} = \frac{S\sigma d_0 v(t)}{(d_0 + x(t))^2} \quad (32.1)$$

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{S} = \frac{\sigma d_0 v(t)}{(d_0 + x(t))^2} \quad (32.1)$$

Una vez determinados los valores de I_{sc} y V_{oc} conocemos los parámetros eléctricos de salida de nuestro tirbo-dispositivo para los valores límite de resistencias de carga externas a considerar. Para la determinación de dichos parámetros, así como la misma potencia suministrada al circuito debemos relacionar los parámetros eléctricos con dicha resistencia R . Para ello, como en el caso de la modelización anterior, aplicamos la **Ley de Ohm**, como podemos observar en la **Ecuación 33**.

$$V = I \cdot R = R \cdot \frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{S\epsilon_0} (d_0 + x(t)) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (33)$$

Esta es la ecuación diferencial ordinaria de primer orden a partir de la cual, aplicando las condiciones de inicio y frontera consideradas, podemos calcular los diferentes parámetros eléctricos de salida para determinadas resistencias de carga consideradas. En [10] se nos muestra resuelta para diversas condiciones aplicadas a la misma.

2.3.8. Optimizaciones de funcionamiento

Con los datos que se han mostrado hasta el momento podemos concluir que la tecnología de los TENGs es prometedora, aunque aún no haya alcanzado su máximo potencial de transducción energética mecánico – eléctrica. Con el objetivo de optimizar esta conversión se han revisado otros artículos adicionales, con la finalidad de considerar los parámetros de diseño más convenientes.

En [7] y [11] se nos ejemplifica el beneficioso efecto que supone para los TENGs la aplicación de un contacto en **disposición de rejilla o parrilla**. Dicha disposición consiste en la **reducción de la coordenada longitudinal** empleada durante el apartado anterior de modelización matemática (I). La disminución de esta para una misma superficie total de contacto concluye con un **incremento en el número de contactos y en la frecuencia de extracción de carga**. El aumento de la frecuencia de extracción de carga, aunado con la interconexión en paralelo de los contactos, supone un importante **aumento de la intensidad** y, por tanto, de la potencia eléctrica extraída del dispositivo. Una consideración de diseño importante para estos dispositivos es la correspondencia entre contactos. Esto es debido a

que, para la adición de las corrientes, éstas han de extraerse de forma coetánea y en la misma dirección y sentido.

En la **Figura 23** se nos muestran unas gráficas que demuestran los efectos beneficiosos que esta aplicación puede obtener, de igual manera que lo hacía la **Figura 11** relativa al *TENG Cilíndrico*. En estas figuras se puede observar la progresión de las corrientes de corto circuito (Isc) con respecto al número de contactos emparrillados empleados (**Figuras 23 a – c**) y, por otro lado, como estos afectan a la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto (Voc).

En la **Figura 23 e** se puede observar como el incremento de los contactos va en detrimento del potencial eléctrico entre los electrodos. Esto es debido a que, para una superficie de contacto constante, cuanto menor sea la coordenada longitudinal, menor será la tensión originada. Esto se puede apreciar en la **Ecuación 7** del modelo teórico para la obtención de Voc, en ella se puede comprobar la proporción directa entre dicha tensión y la coordenada longitudinal recorrida. Pese a todo, esta proporción es en realidad fraccional, siendo:

$$V_{OC,max} = \sigma \frac{x_{max}}{l - x_{max}} \cdot \frac{d_0}{\epsilon_0} = \sigma \frac{0.8 \cdot l}{0.2 \cdot l} \cdot \frac{d_0}{\epsilon_0} = 4 \frac{d_0}{\epsilon_0} \sigma$$

En otras palabras, la **Ecuación 7** no explica la reducción de Voc que tiene lugar con el incremento del número de contactos emparrillados, pero sí que está asociada con el aumento del *Efecto borde*. Más adelante ser abordan las consecuencias que este efecto puede ocasionar y cómo podría optimizarse el diseño en base a la relación entre las longitudes de los contactos emparrillados y el espesor de los dieléctricos.

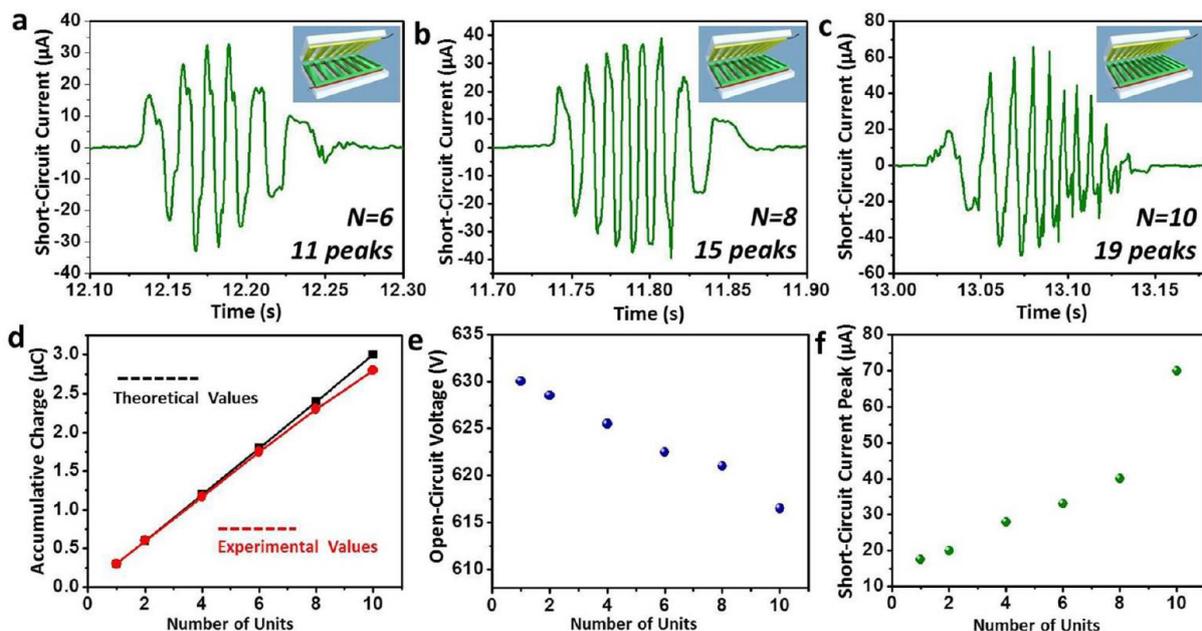


Figura 23. Gráficas de funcionamiento de TENGs con diferentes cantidades de contactos emparrillados (N) equivalentes.

Fuente: G. Zhu, J. Chen, Y. Liu, P. Bai, Y. S. Zhou, Q. Jing, C. Pan, Z. L. Wang. "Linear – Grating triboelectric generator based on sliding electrification". (2013). *Nano Lett.* **13**.

Por su parte, la **Figura 23 d** se nos muestra la comparación entre los valores experimentales de cargas acumuladas para un TENG tipo emparrillado de N contactos la cual se ajusta a la **Ecuación 34** de [11]. Esta ecuación es aplicable principalmente a los casos en los que el deslizamiento ocasiona que ciertos contactos emparrillados no vuelvan a entrar en contacto hasta que se comience en movimiento de retorno.

$$Q = \frac{(2q'N)N}{2} \quad (34)$$

Siendo:

Q = Carga inducida total en las busbar comunes de salida de los contactos

q' = Carga inducida unitaria, por contacto emparrillado

N = Número de contactos emparrillados

Además, en este epígrafe, se analizarán otros posibles diseños a considerar para nuestros TENGs objetivo, de manera que se puedan valorar la mayor variedad de alternativas optimizadoras de los mismos en aras de obtener un modelo aplicable lo más optimizado posible. Entre ellas destacaremos, adicionales al emparrillamiento de contactos, la disposición radial, TENGs de alta eficiencia de conversión energética o hibridación del dispositivo con los transductores energéticos más convencionales, los Electromagnéticos (*Electromagnetic Generator*: EMG).

2.3.8.1. MG - TENG

En [7] se nos presenta un diseño de TENG que emplea micro contactos de tipo emparrillados y alcanza altas eficiencias de conversión energética (MG-TENG). Este diseño, además, se caracteriza por emplear láminas dieléctricas en formato de *Thin Film*, de manera que permite un mejor análisis de las consecuencias que el *Efecto Borde* puede ocasionar en estos dispositivos a diferentes espesores de dieléctrico y anchuras de los electrodos emparrillados (cabe destacar que, a efectos de este artículo, se empleará el término anchura en referencia a la coordenada longitudinal del modelizado).

En la **Figura 24** se muestra un esquema del diseño estructural del dispositivo. Las *Thin Film* azules hacen referencia a las láminas de dieléctrico (PTFE) de 5 cm x 4 cm x 25 μm . Por su parte, las rejillas amarillas se corresponden con los electrodos emparrillados de tamaño unitario 4 cm x 1 mm. El espesor de los electrodos emparrillados se considera despreciable ya

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

que consistirá en 20 nm de Ti, junto con 500 nm de Cu. No es preciso una mayor superficie de electrodos extractores de carga debido a las reducidas corrientes que se producen por contacto. Este proceso se repite también para la cara posterior de la Thin Film de PTFE, de forma complementaria, obteniendo el diseño reflejado en la figura. Finalmente se depositan, de forma equitativa, nanopartículas de PTFE sobre las superficies de dicho material mediante aerosol de estas en suspensión acuosa.

La recolección energética se lleva a cabo a través del deslizamiento relativo de uno de estos contactos con otro equivalente. El funcionamiento de los MG-TENG es diferente a los vistos hasta ahora en los otros dispositivos considerados, de mayor simplicidad. En la **Figura 25** se muestra un esquema de funcionamiento para su mayor comprensión.

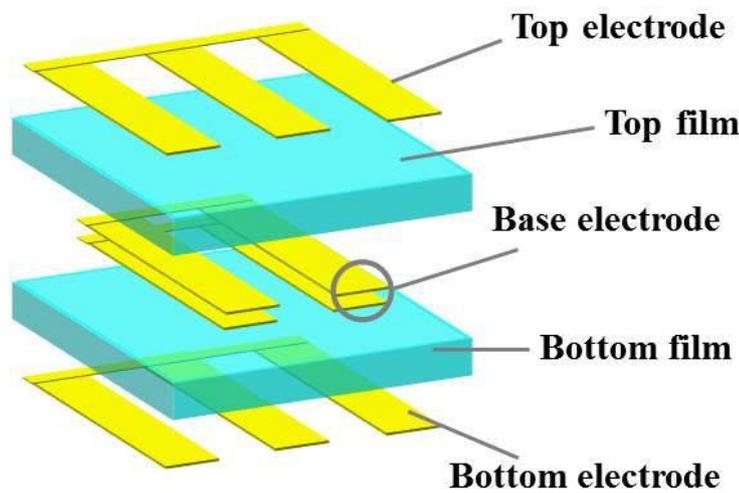


Figura 24. Esquema de un doble contacto del MG-TENG.

Fuente: G. Zhu, Y. S. Zhou, P. Bai, X. S. Meng, Q. Jing, J. Chen, Z.L. Wang. "A Shape-Adaptive Thin-Film-Based Approach for 50% High-Efficiency Energy Generation Through Micro-Grating Sliding Electrification" (2014), *Advanced Materials*, **26**.

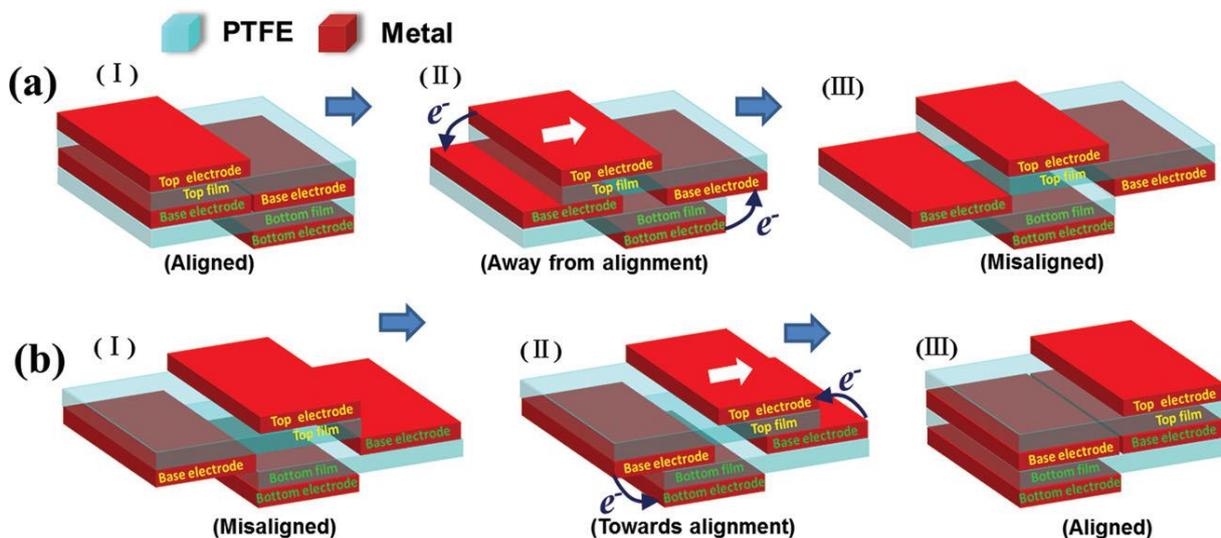


Figura 25. Esquemas de funcionamiento de un MG-TENG de doble contacto.

Fuente: G. Zhu, Y. S. Zhou, P. Bai, X. S. Meng, Q. Jing, J. Chen, Z.L. Wang. "A Shape-Adaptive Thin-Film-Based Approach for 50% High-Efficiency Energy Generation Through Micro-Grating Sliding Electrification" (2014), *Advanced Materials*, **26**.

El funcionamiento de este dispositivo se caracteriza por realizar un doble contacto triboeléctrico, y sus consecuentes triboelectrificaciones superficiales e inducciones electrostáticas, por unidad de desplazamiento.

1º Alineamiento/Apareamiento: Los electrodos base entran en contacto con la superficie dieléctrica contraria sobre la cual tienen movimiento relativo. Esto ocasiona la triboelectrificación superficial y se corresponde con los estados **(a)I** y **(b)III**.

2º Desplazamiento relativo: Se corresponde con los estados **(a)II** y **(b)II**. Se produce el desplazamiento relativo que conlleva la ruptura de la electroneutralidad superficial de la interfaz triboeléctrico electrodo – dieléctrico. Esto origina la polarización del dieléctrico, inducción electrostática a su electrodo y el flujo de cargas inducidas externas. Con este diseño se pueden alcanzar dos extracciones de carga por unidad de desplazamiento, incrementando así notablemente la recolección energética.

3º Desapareamiento: Cuando los electrodos superiores e inferiores coinciden en coordenada x, también lo hacen los de base de cada una de las superficies de contacto. Es justo en este punto cuando se ha producido el desapareamiento total, la tensión alcanza el valor máximo y las cargas ya se han equilibrado a través del circuito externo. Se corresponde con los apartados **(a)III** y **(b)I**. La principal peculiaridad de este estado se debe a coincidencia espacial que ocurre entre los electrodos de base, ocasionando fricción entre ellos. Esto podría suponer pérdidas de electrodo por abrasión, pero en la **Figura 26** se muestra que esto no es especialmente relevante a elevados ciclos de funcionamiento. Además, la mínima capa de Ti interpuesta entre conductores facilita que la extracción de carga se realice de forma uniforme.

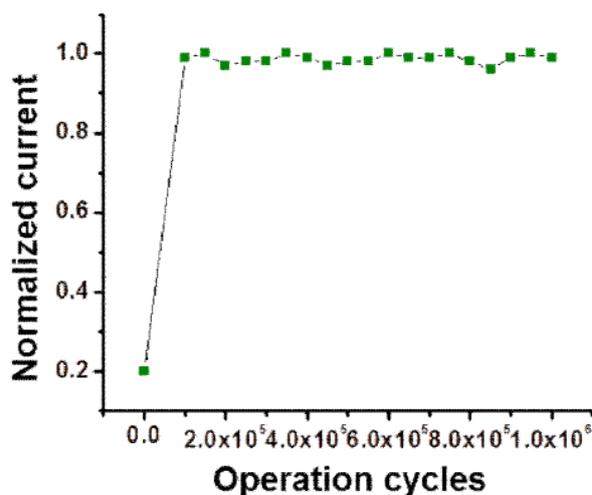


Figura 26. Análisis del comportamiento del MG-TENG a múltiples ciclos de funcionamiento.

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

Fuente: G. Zhu, Y. S. Zhou, P. Bai, X. S. Meng, Q. Jing, J. Chen, Z.L. Wang. "A Shape-Adaptive Thin-Film-Based Approach for 50% High-Efficiency Energy Generation Through Micro-Grating Sliding Electrification (SI)" (2014), *Advanced Materials*, **26**.

Adicionalmente, la **Figura 26** nos muestra una necesidad inicial, por parte el MG-TENG, de alcanzar un cierto número de ciclos de funcionamiento para alcanzar un valor estable de corriente de salida. Esto es debido a que la triboelectrificación inicial no alcanza un grado suficientemente alto y precisa de mayores contactos para que se alcance el valor óptimo de densidad de carga superficial para el par puesto en contacto. Por otro lado, la tendencia constante de la corriente generada con el número de ciclos puede también ser debida al contacto entre nanopartículas de PTFE y los electrodos. Esto se debe a que, al tratarse de partículas esféricas se aplicó más un caso de *Ficción rodante* que *Fricción deslizante*. En la **Tabla 4** se recogen los valores de los coeficientes de rozamiento para las diferentes interacciones supuestas en [7].

Tabla 4.

Coefficientes dinámicos de rozamiento para los diferentes sistemas considerados en el funcionamiento del MG-TENG.

	With PTFE nanoparticles	Without PTFE nanoparticles
$\mu_{m-m}^a)$	0.25	0.38
$\mu_{p-p}^b)$	0.21	0.32
$\mu_{p-m} = \mu_{m-p}^c)$	1.37	3.87

^{a)} μ_{m-m} is the dynamic frictional coefficient between metals; ^{b)} μ_{p-p} is the dynamic frictional coefficient between PTFEs; ^{c)} μ_{p-m} and μ_{m-p} are the dynamic frictional coefficients between PTFE and metal.

Nota Fuente: G. Zhu, Y. S. Zhou, P. Bai, X. S. Meng, Q. Jing, J. Chen, Z.L. Wang. "A Shape-Adaptive Thin-Film-Based Approach for 50% High-Efficiency Energy Generation Through Micro-Grating Sliding Electrification" (2014), *Advanced Materials*, **26**.

Los parámetros eléctricos de salida obtenidos mediante el MG-TENG de diseño y composición establecidas anteriormente, con 20 cm² de superficie de contacto y 60 cm² de superficie total; 0.2 cm³ de volumen ocupado por el dispositivo y 0.6g de masa, son:

$$V_{oc} = 500 \text{ V}$$

$$I_{sc} (10 \text{ m/s} \rightarrow f_{AC} = 5 \text{ kHz}) = 9.8 \text{ mA}$$

$$P_{mpp} (10 \text{ m/s}; R_{LOAD, op} = 0.2 \text{ M}\Omega) = 3 \text{ W}$$

$$\rho_{pp} = 50 \text{ mW/cm}^2 \rightarrow 500 \text{ W/m}^2$$

$$\eta \approx 50\%$$

En la **Figura 27** se muestra la progresión de estos parámetros con respecto a la velocidad linear de deslizamiento del dispositivo.

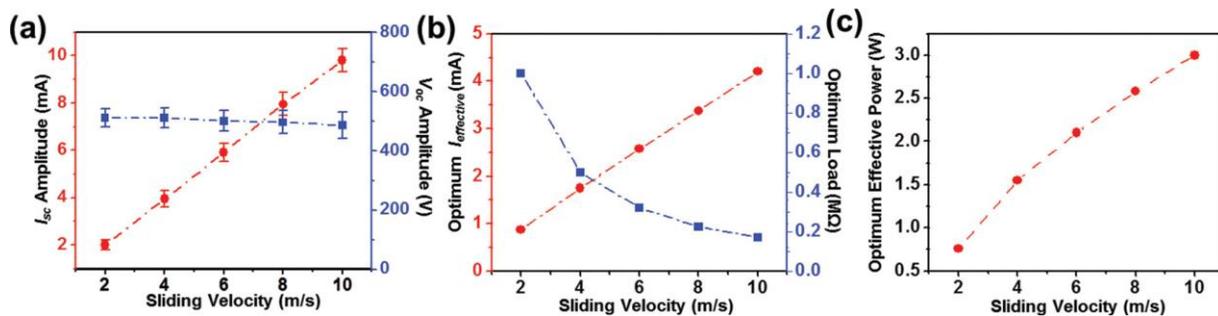


Figura 27. Análisis del comportamiento del MG-TENG a múltiples ciclos de funcionamiento.

Fuente: G. Zhu, Y. S. Zhou, P. Bai, X. S. Meng, Q. Jing, J. Chen, Z.L. Wang. "A Shape-Adaptive Thin-Film-Based Approach for 50% High-Efficiency Energy Generation Through Micro-Grating Sliding Electrification" (2014), *Advanced Materials*, **26**.

En la **Figura 27 (a)** se puede observar la ya estudiada progresión entre la velocidad y los parámetros V_{oc} e I_{sc} del dispositivo. En primer lugar, se atisba una leve reducción en la V_{oc} conforme se incrementa la velocidad de deslizamiento, pese a todo, esta reducción es prácticamente despreciable y es debida al *Efecto borde* ocurrido con mayor frecuencia a altas velocidades. Por su parte, I_{sc} se ajusta al comportamiento de la **Ecuación 12**, incrementando de manera lineal con la frecuencia de rotación del dispositivo, la cual crece con la velocidad de deslizamiento del MG-TENG.

La **Figura 27 (b)** ejemplifica el comportamiento de los generadores eléctricos convencionales y su ajuste con respecto a la demanda. Para un rotor de masa conocida, una mayor velocidad de giro incurrirá en un incremento de su energía cinética rotacional. Esto ocasionará una progresión, generalmente curva, en el rendimiento de la transducción que tiene lugar en el dispositivo. El aumento de la velocidad, para una tensión de salida constante, originará un incremento en la corriente de salida, lo que se traduce en una disminución de la R_{LOAD} externa conectada. De esta manera se equilibra el rendimiento. Este es el comportamiento similar al que supone un incremento de la demanda en la red sobre los generadores síncronos de esta, los cuales se deceleran debido a las altas corrientes que deben suministrar; oponiendo una mayor resistencia mecánica; demandando así más aporte energético para suplir esa demanda.

Adicionalmente, en la **Figura 27 (c)** se nos muestra la progresión de incremento que tiene la potencia óptima o máxima generada por nuestro dispositivo con respecto a la velocidad de deslizamiento del mismo. En el conjunto de datos mostrados se muestra una progresión creciente pero no del todo lineal. La pendiente de la misma va disminuyendo progresivamente. Esta representación, pese a no ser tan abrupta, está relacionada con la tendencia asintótica que presentaba la R_{LOAD} en la **Figura 27 (b)**.

Otro de los factores de gran interés que se puede extraer de [7] es el estudio acerca del *Efecto Borde*, en lo relativo a la relación entre la anchura de los contactos emparrillados (l) y el espesor del material dieléctrico (d). Como ya se observó con anterioridad, este efecto puede llegar a originar importantes discrepancias entre las cargas inducidas sobre los

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

electrodos ($\sigma_l = Q/S$) y las cargas superficiales originadas debido al efecto triboeléctrico y el deslizamiento relativo ($\sigma_c = \sigma$). Debido a esto se cumple que:

$$d \ll l \rightarrow \frac{\sigma_l}{\sigma_c} \rightarrow 1$$

$$l \rightarrow d = \sigma_l < \sigma_c$$

Es por esto por lo que, para optimizar el diseño de los contactos emparrillados, se debe tener en cuenta esta relación ya que una reducción muy elevada de su anchura puede originar que, pese a que se empleen dieléctricos *Thin Film*, esta se acabe aproximando a su espesor originando un *Efecto borde* importante. En las **Tablas 5** y **6** se muestran dos ensayos diferentes realizados para demostrar esta progresión a diferentes proporciones de anchuras de parrilla y espesor de dieléctrico. Por su parte, en la **Figura 28**, se nos muestra como progresa la potencia eléctrica extraída del MG-TENG a una determinada velocidad lineal de deslizamiento de 10 m/s. Esta progresión se analizó para diferentes anchuras de contactos emparrillados con una Thin Film de PTFE de 25 μ m, la cual se corresponde con el espesor mínimo comercial para este material, lo que permitiría abaratar costes al ahorrarnos otro proceso de fabricación.

Tabla 5.

Análisis de las densidades de carga superficial y máximas inducidas en función de la anchura de los contactos emparrillados para un espesor de dieléctrico de 25 μ m.

Grating width (μ m)	Triboelectric charge density ($\sigma_{\text{triboelectric}}$: $\mu\text{C m}^{-2}$)	Maximum induced charge density (σ_{induced} : $\mu\text{C m}^{-2}$)	$\sigma_{\text{induced}}/\sigma_{\text{triboelectric}}$ (%)
1000	330	317.526	96.22
750	330	314.028	95.16
500	330	307.296	93.12
250	330	289.938	87.86
100	330	247.929	75.13
75	330	226.611	68.67
50	330	194.535	58.95
25	330	135.102	40.94
10	330	73.788	22.36
7.5	330	61.545	18.65
5	330	41.745	12.65
1	330	17.523	5.31

Nota Fuente: G. Zhu, Y. S. Zhou, P. Bai, X. S. Meng, Q. Jing, J. Chen, Z.L. Wang. "A Shape-Adaptive Thin-Film-Based Approach for 50% High-Efficiency Energy Generation Through Micro-Grating Sliding Electrification" (2014), *Advanced Materials*, **26**.

Tabla 6.

Análisis de las densidades de carga superficial y máximas inducidas en función de la anchura de los contactos emparrillados para un espesor de dieléctrico de 10 μm .

PTFE thickness (μm)	Width-to-thickness ratio ^{a)}	Triboelectric charge density ($\sigma_{\text{triboelectric}}$: $\mu\text{C m}^{-2}$)	Maximum induced charge density (σ_{inducad} : $\mu\text{C m}^{-2}$)	$\sigma_{\text{inducad}}/\sigma_{\text{triboelectric}}$ (%)
100	0.1	330	34.617	10.49
50	0.2	330	49.269	14.93
10	1	330	132.264	40.08
5	2	330	189.288	57.36
1	10	330	284.163	86.11
0.5	20	330	303.402	91.94
0.1	100	330	323.037	97.89

^{a)}The grating width is fixed at 10 μm .

Nota Fuente: G. Zhu, Y. S. Zhou, P. Bai, X. S. Meng, Q. Jing, J. Chen, Z.L. Wang. "A Shape-Adaptive Thin-Film-Based Approach for 50% High-Efficiency Energy Generation Through Micro-Grating Sliding Electrification" (2014), *Advanced Materials*, **26**.

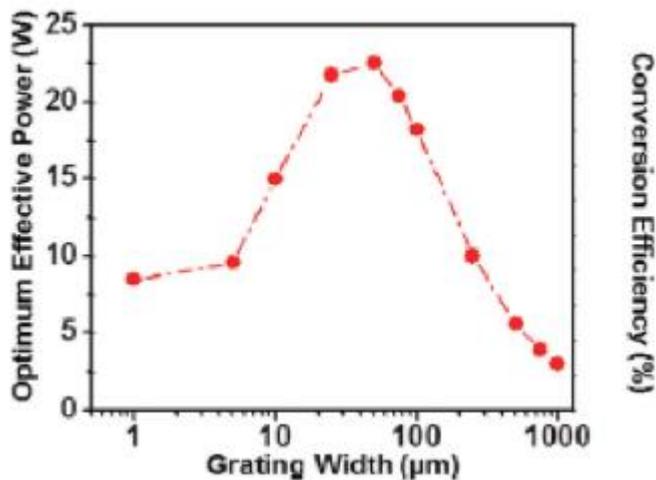


Figura 28. Progresión de la potencia recolectada por el MG-TENG a 10 m/s y con un espesor de PTFE de 25 μm .

Fuente: G. Zhu, Y. S. Zhou, P. Bai, X. S. Meng, Q. Jing, J. Chen, Z.L. Wang. "A Shape-Adaptive Thin-Film-Based Approach for 50% High-Efficiency Energy Generation Through Micro-Grating Sliding Electrification" (2014), *Advanced Materials*, **26**.

En las **Tablas 5 y 6** se nos muestra que el **intervalo óptimo para la proporción l/d sería de unos 20 – 100, o mayor que este último**. De esta manera se obtendrían porcentajes de densidades de carga inducida superiores al 90% de la densidad de carga superficial originada por la electrización triboeléctrica. Por su parte, el factor de mayor interés nos lo muestra la **Figura 28**, en la cual podemos vislumbrar que, para unas condiciones de operación dadas, nuestro dispositivo presentará una **potencia eléctrica de salida óptima en un intervalo de l/d = (1 - 2)**, encontrándose el máximo; prácticamente; en el valor de anchura del doble del espesor. Por otro lado, si comprobamos los valores de potencia que nos aportarían las proporciones del intervalo de inducción óptima de cargas obtendríamos que estas se encuentran entre las menores. Por todo esto, a efectos de los modelos matemáticos

anteriormente analizados, la consideración de una proporción que optimice la potencia conllevará la aparición de un *Efecto borde* importante, lo que ocasionará que dichos modelos no se cumplan con total exactitud.

En definitiva, la escalabilidad y modularidad que los contactos emparrillados posibilitan a los TENG su posible aplicación a múltiples superficies diferentes. Esto a su vez no incrementa el nivel de dificultad que pudiera conllevar la modelización matemática, ya que, al tratarse de contactos tan pequeños, cuasi infinitesimales, se puede considerar que se trata de un TENG lineal y emplear los modelos ya conocidos. Pese a todo, es importante tener en cuenta la necesidad de optimizar las proporciones estructurales de los contactos establecidos, principalmente con relación a la anchura del emparrillado y el espesor del dieléctrico. Es en este punto donde la aplicación de las Thin Film para el contacto no emparrillado destacan, ya que las proporciones más adecuadas siempre conllevan que el espesor de este sea, proporcionalmente, menor a la anchura del contacto emparrillado. Objetivo solo alcanzable mediante la aplicación de esta tecnología si se pretende reducir, de forma relevante, la anchura de este último.

2.3.8.2. TENG de disposición radial

En [12] se nos presenta un diseño de interés para la aplicación a la que pensamos orientar a nuestro transductor objetivo. Este dispositivo tiene una composición y disposición estructural mostrada en la **Figura 29**.

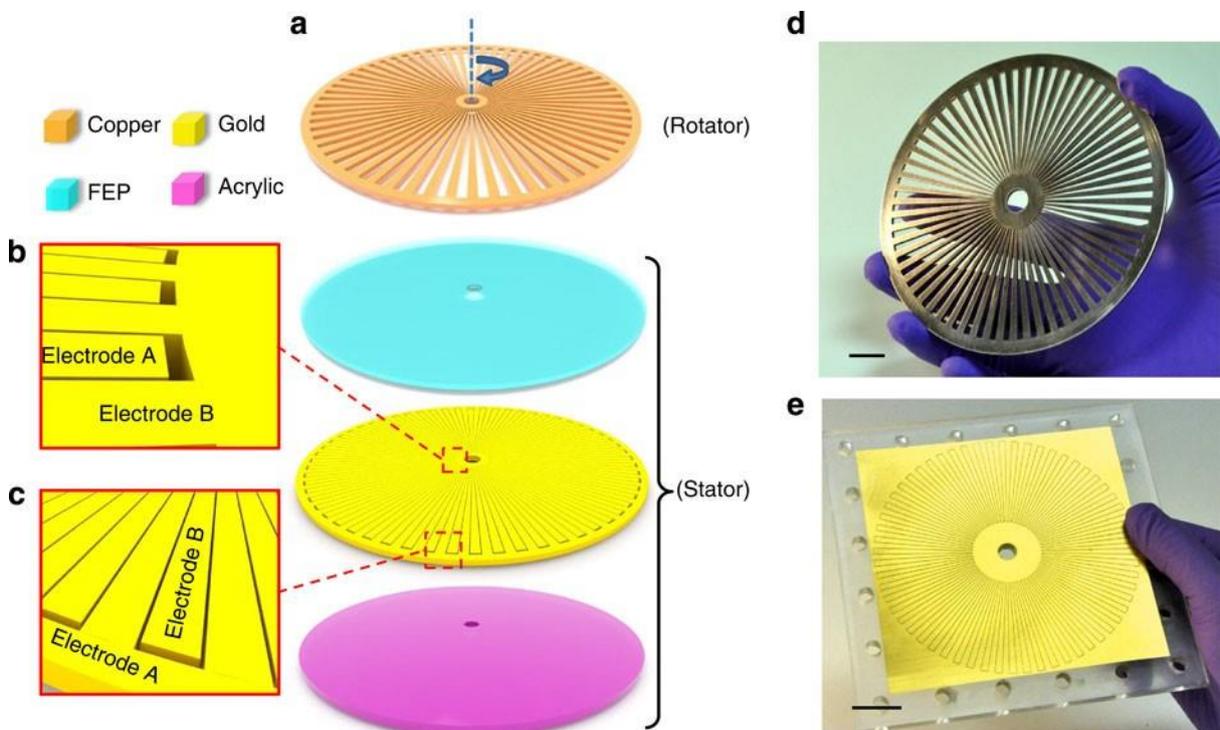


Figura 29. Esquema del diseño estructural del TENG de disposición radial.

Fuente: G. Zhu, J. Chen, T. Zhang, Q. Jing, Z. L. Wang. "Radial-arrayed rotary electrification for high performance triboelectric generator". (2014). *Nature COMMUNICATIONS*.

En la **Figura 29 a** se nos muestra la disposición estructural del dispositivo, el cual está conformado por rotor y un estator. El Estator lo componen: 1. Lámina de acrílico como sustrato, 2. Lámina de electrodos radiales de oro, 3. Lámina de material dieléctrico FEP (Fluoroetileno Propileno). Por su parte, el Rotor es una Lámina de contactos metálicos de cobre en disposición radial. La principal peculiaridad de este diseño reside en la lámina de electrodos radiales, los cuales son equivalentes y dispuestos de la forma que se puede ver en las **Figuras 29 b y c**. La dimensión de los electrodos es equivalente en todos ellos, de unos 3° con respecto al eje central del dispositivo. Esto establece que sus anchuras vayan variando con el radio. Adicionalmente, esta lámina dispone de dos tipologías de electrodos, diferenciadas por A y B en las figuras, dependiendo de la interconexión que tengan. Los electrodos A se interconectan de forma paralela entre si mediante una busbar exterior de la lámina electródica y, por su parte, los B se interconectan en paralelo a través de la busbar interior. Estas agrupaciones electródicas se interconectan entre si a través de un circuito externo mediante el cual se alimenta a la R_{LOAD} .

El funcionamiento de diseño se muestra en la **Figura 30**. Se trata de un funcionamiento equivalente a todos los vistos hasta el momento, con la combinación del Efecto triboeléctrico con la Inducción Electroestática. La principal diferencia reside en la extracción de carga a través de electrodos estáticos y un contacto deslizante libre, lo que no nos obliga a emplear sistemas de extracción de carga rotativa tales como escobillas, etc.

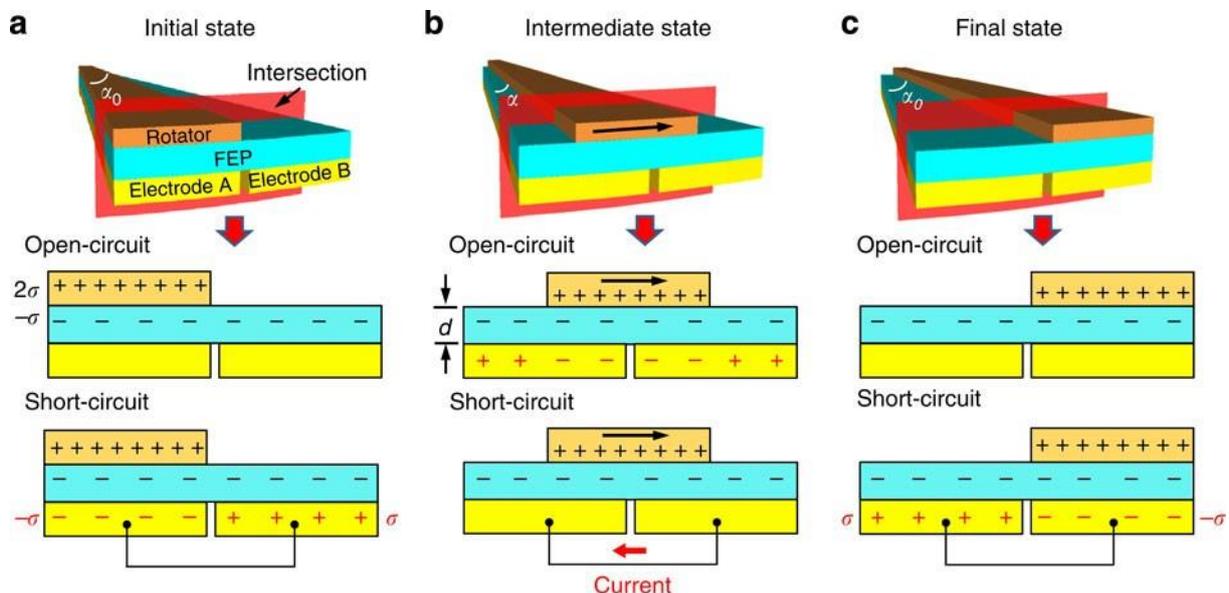


Figura 30. Esquema de funcionamiento del TENG de disposición radial.

Fuente: G. Zhu, J. Chen, T. Zhang, Q. Jing, Z. L. Wang. "Radial-arrayed rotary electrification for high performance triboelectric generator". (2014). *Nature COMMUNICATIONS*.

Un factor de importancia para este dispositivo planteado es el del efecto radial que tiene lugar debido a su disposición. Dado que los electrodos de extracción presentan una disposición radial de ángulo constante con respecto al eje central del dispositivo ($\alpha = 3^\circ$), esto



ocasionará que sus anchuras (l) vayan variando con respecto al incremento de la coordenada radial. Esto es:

$$l = f(r) \rightarrow l(r) = \frac{\alpha\pi}{180} \cdot r$$

Siendo:

r = Radio del dispositivo desde el eje central hasta el extremo exterior.

Se deben considerar los radios equivalentes a las busbar interior y exterior ya que estos no formarán parte de los electrodos. Por esto, para la mayor precisión de la expresión anterior se considerará que: $r = [r_1 - r_2]$, siendo r_1 y r_2 los radios de las coronas circulares establecidas por las respectivas busbar de extracción de carga.

Esta consideración del efecto radial respecto de los parámetros de funcionamiento es también aplicable las cargas inducidas tal como muestra la **Ecuación 35**.

$$Q_{SC} = \frac{\alpha\pi}{180} \sigma \cdot (r_2^2 - r_1^2) \quad (35)$$

Por tanto:

$$I_{SC} = \frac{dQ_{SC}(r)}{dt} \rightarrow I_{SC}(r) = Q_{SC}(r) \cdot f_{CA}$$

Los parámetros eléctricos de salida ofrecidos por el dispositivo diseñado en [12], con un diámetro de la superficie circular de 10 cm y una velocidad de rotación de 3000 rpm \rightarrow 3 kHz de salida de corriente alterna debido a los 60 contactos, son:

$$\mathbf{Voc = 850 V}$$

$$\mathbf{Isc (R_{LOAD,op} = 0.8 M\Omega) = 3 mA}$$

$$\mathbf{Pm_{pp} (R_{LOAD,op} = 0.8 M\Omega) = 1.5 W}$$

$$\mathbf{\rho_{pp} = 19 mW/cm^2 \rightarrow 190 W/m^2}$$

$$\mathbf{\eta \approx 24\%}$$

En la **Figura 31** se muestran los diferentes factores que afectan a la funcionalidad el TENG de disposición radial. En su mayoría son factores anteriormente visualizados tales como

TRIBOELECTRICIDAD, CONCEPTOS Y APLICACIONES

el efecto de la R_{LOAD} sobre la velocidad de rotación del dispositivo y viceversa. Por su parte, en las **Figuras 31 c y d** se muestra la progresión que tiene lugar entre los diferentes parámetros y el **radio exterior (máximo) del dispositivo**. Esta relación se presenta de forma cuadrática para la I_{sc} y, por tanto, para la potencia eléctrica de salida dado que: **Pelétrica = I·V**. Las **Figuras 31 e y f** nos presentan la relación de dichos parámetros con respecto al **ángulo unitario con respecto al eje central (α)** de cada contacto. Esta sería la equivalencia con el grado de empujamiento o anchura de los contactos empujados vista para el MG-TENG.

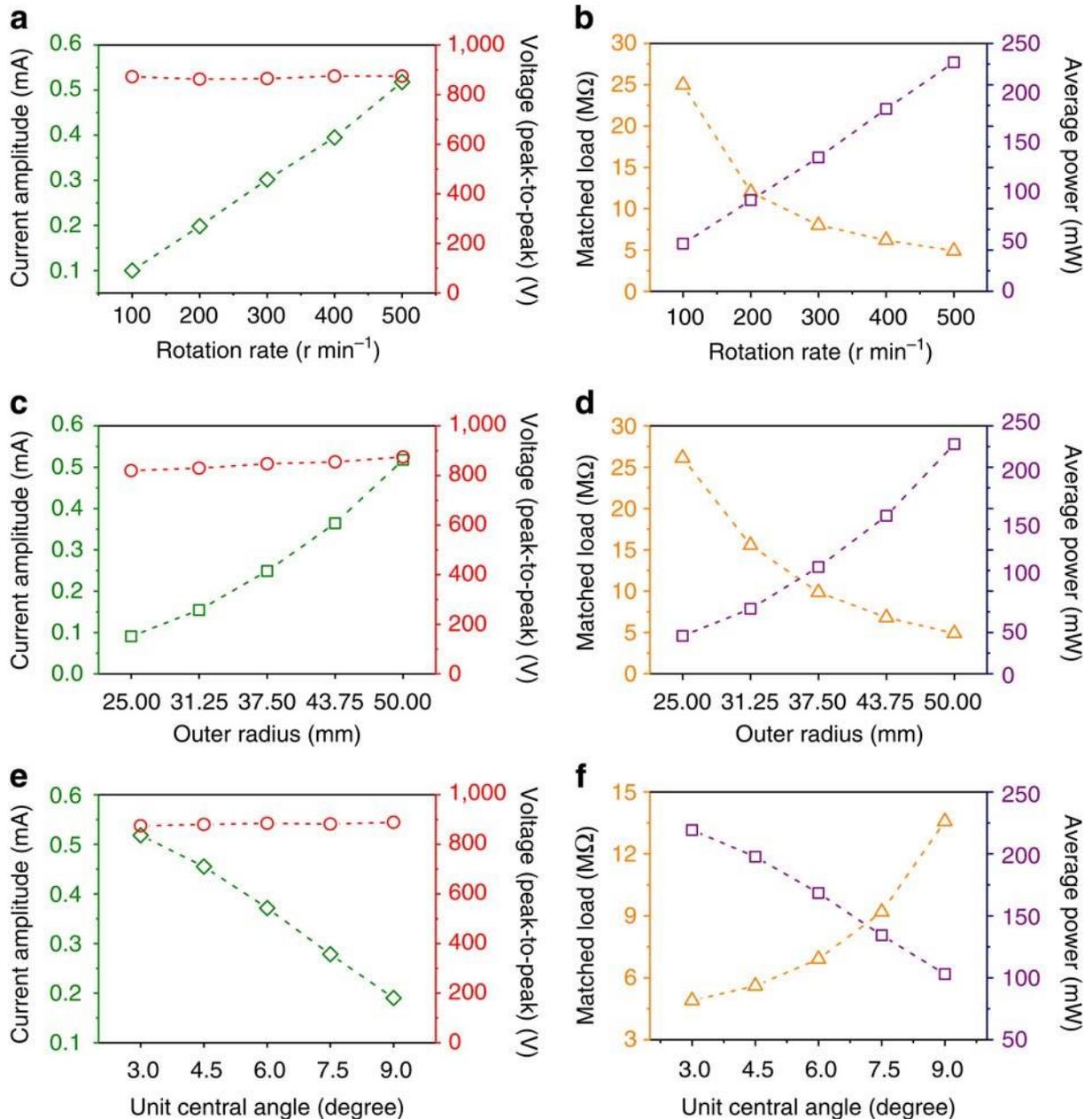


Figura 31. Análisis de los parámetros de salida del TENG de disposición radial en función de diferentes variables dimensionales o de funcionamiento.

Fuente: G. Zhu, J. Chen, T. Zhang, Q. Jing, Z. L. Wang. "Radial-arrayed rotary electrification for high performance triboelectric generator". (2014). *Nature COMMUNICATIONS*.

Como hemos podido observar en los parámetros característicos del TENG de distribución radial, estos son menores que los del MG-TENG. Esto es debido, principalmente, a la no optimización de los mismos a tan alto grado. Por un lado, los MG-TENG analizados presentaban un par triboeléctrico de mayor densidad de carga triboeléctrica debido a que el Aluminio presenta un mayor grado de triboelectrificación vítrea. Adicionalmente, el TENG de disposición radial no presenta un nivel de optimización estructural tan alto, con dieléctricos *Thin Film* de menor espesor o con nanopartículas depositadas en su superficie de contacto para incrementar su eficiencia.

Pese a todo, la disposición radial es conveniente para dispositivos en los que se quiera aprovechar mayoritariamente la superficie del plano axial de los mismos. Por otro lado, la disposición longitudinal planteada con anterioridad en la mayor parte de los casos es de mayor interés para dispositivos con un mayor grado de esta superficie.

2.4. Conclusiones

El **Efecto triboeléctrico** constituyó uno de los primeros hitos en la historia de la física debido a tratarse de una de las primeras manifestaciones de la electrostática conocidas y causa del nombramiento de la electricidad y su principal portador de carga, el electrón (proveniente del griego *Elektron* equivalente a Ámbar), tales y como los conocemos hoy y día. Pese a todo, a lo largo de la historia, las aplicaciones prácticas de este fenómeno han brillado por su ausencia. Tratándose, principalmente, de un efecto adverso en el almacenamiento de sustancias peligrosas o atmósferas explosivas por la posibilidad de originar problemas de seguridad. No fue hasta la aparición de la Nanotecnología donde empezaron a concebirse aplicaciones de utilidad para este efecto.

El principal efecto que la nanotecnología supuso sobre este efecto fue en términos de mejora del mismo. El incremento de la superficie específica de los materiales puestos en contacto contribuyó a favor de la cesión de portadores entre estos. Pese a todo, en la actualidad el efecto triboeléctrico presenta parámetros aún no definidos los cuales se siguen encontrando en fase de estudio. Su génesis y funcionamiento no terminan de estar del todo claras y precisan, en su mayor parte, de la combinación de métodos de cálculo numérico con modelos teóricos para su entendimiento. Es por esto por lo que la nanotecnología, además de ser un medio para su aplicación, también lo está siendo para su estudio y comprensión.

La génesis del efecto triboeléctrico tiene lugar cuando se ponen en contacto una superficie con respecto de otra. Esto origina, debido a las diferencias estructurales, de polarización o afinidad electrónica, la cesión de portadores de carga desde una de las superficies a la otra. A dicha cesión es a la que conocemos como efecto triboeléctrico, electrificación por contacto o frotamiento o triboelectrificación. El grado de triboelectrificación que presentarán dos materiales puestos en contacto dependerá, principalmente, de la composición y estructura de los mismos. Así como el grado de rugosidad superficial que presenten. Este grado de electrificación se mide en base a la densidad de carga superficial que ambos materiales presentarán, cada uno de ellos diferentes en signo atendiendo a la afinidad



que cada uno de ellos presente por los portadores, y equivalentes en número, ya que si se ponen en contacto durante el suficiente tiempo alcanzarán la electroneutralidad de la interfaz triboeléctrica, por lo que las densidades de carga superficial serían equivalentes en módulo y de signo contrario. Esta densidad de carga triboeléctrica superficial ($TECD = \sigma$) será dependiente de los materiales puestos en contacto, también conocido como **Par triboeléctrico**, y su disposición superficial. La nanoestructuración de esta superficie incrementaría el orden de la triboelectrización. Cabe destacar que un material puede presentar triboelectrización respecto de sí mismo debido a las posibles diferencias estructurales superficiales que sendas superficies del mismo puestas en contacto pudieran presentar.

Para conocer el grado de triboelectrización de los diferentes pares triboeléctricos se han establecido agrupaciones de diferentes materiales ordenados por magnitud de las densidades de cargas originadas en cada uno de ellos. A estas agrupaciones se las conoce como series triboeléctricas y, pese a que presentan coincidencias notables, es raro que coincidan al 100% en la ordenación de sus materiales. Además, la mayor parte de ellas son cualitativas, ya que para la ordenación cuantitativa se deben realizar ensayos en base a un material de referencia. Habitualmente, los polímeros fluorados dieléctricos tales como el PFTE (Teflón) se ubican en la zona más negativa de las series y los metales en la positiva.

Entre las aplicaciones del Efecto triboeléctrico debemos destacar la conversión de energía mecánica a pequeña escala en energía eléctrica mediante transductores triboeléctricos nanoestructurados o TENGs. Las ventajas ofrecidas por esta tipología de dispositivos respecto de los generadores eléctricos convencionales son notables. La principal de ellas recae sobre los costes, volúmenes y cantidades requeridas para cada uno de ellos, siendo siempre menores las necesidades para la aplicación triboeléctrica. Por otro lado, ambos pueden activarse de maneras similares, pero, el TENG presenta mayores posibilidades debido a la gran cantidad de aplicaciones respecto del movimiento relativo entre dos superficies. Por su parte, los Generadores Electromagnéticos convencionales (EMG) precisan de movimientos rotativos para su óptimo funcionamiento. Adicionalmente, cada una de las tipologías mencionadas tiene su propio intervalo de aplicación y peculiaridades, siendo los EMG más útiles para aplicaciones a gran escala y de gran tamaño, mientras que los TENG a la inversa. Además, los TENGs son; al uso; generadores principalmente electrostáticos, los cuales originan altos potenciales eléctricos y bajas corrientes alternas, originando una gran impedancia en el sistema. Justo a la inversa que con los EMG. Adicionalmente, existen otras muchas aplicaciones de interés para los TENGs en el campo de los sensores autoalimentados dentro de las áreas de la medicina y la salud entre otras.

Acerca del funcionamiento de estos dispositivos, este se debe a la conjunción de dos efectos tales como son el ya mencionado efecto triboeléctrico y la inducción electrostática. Ambos tienen lugar cuando se ponen en contacto los dos materiales que conforman el par triboeléctrico y sufren un desplazamiento relativo, ya sea vertical o deslizante, mientras se encuentran interconectados por un circuito externo a través de unos electrodos. La tensión se origina debido a las cargas inducidas en los dos electrodos mientras que la corriente es



alterna y dependiente de la frecuencia de contacto - separación entre los materiales. Por su parte, las cargas inducidas dependerán de la superficie de contacto. Para el correcto funcionamiento de un tribo-dispositivo deben de producirse dos estados espacio – temporales muy diferenciados. Estos deben ser el estado de solapamiento/apareamiento total del par triboeléctrico, denominado también como *Contacto*, y, por otro lado, el desolapamiento/desapareamiento total. Esto se debe a que es en estos estados donde se alcanzan los picos de intensidad y tensión que es capaz de ofrecer el contacto en los dos sentidos de la corriente alterna respectivamente.

Entre las consideraciones a tener en cuenta para el diseño de un determinado TENG se encuentra la necesidad, anteriormente mencionada, de aparear y desaparear completamente los contactos. Dicha consideración nos limita la superficie a establecer como contacto triboeléctrico en un dispositivo a, como máximo, la mitad de la disponible. Por otro lado, también se debe tener presente la alta impedancia de estos dispositivos, por la cual se deberán considerar la interconexión en paralelo de todos los contactos considerados. Adicionalmente, un incremento de contactos con extracción coetánea mediante la reducción de la longitud de los mismos también conllevaría un aumento de la frecuencia con una superficie de contacto constante. Esto ocasionaría un importante incremento de la corriente extraída y la eficiencia del dispositivo.

También, la hibridación de los TENG con otros sistemas de recolección energética puede ser de gran interés debido a la gran variedad de aplicaciones de que disponen. Para aplicaciones de recolección de energía mecánica rotacional se puede considerar la hibridación con EMGs o Nanogeneradores Piezoeléctricos (PENG). Incluso, se podría barajar la opción de incluir Nanogeneradores Piroeléctricos para la recolección de parte de las pérdidas energéticas en forma de calor debidas a la fricción. Todo esto obligaría a un diseño electrónico más preciso acerca de los circuitos de gestión energética de salida para controlar y poder aunar todas ellas generaciones con diferentes niveles de impedancia.

Por último, el correcto dimensionamiento estructural será una variable clave en aras de optimizar el funcionamiento del dispositivo. Existen múltiples opciones de disposición para los contactos triboeléctricos dependiente de las coordenadas más favorables del dispositivo que queramos aplicar u otros criterios propios. Además, es importante conocer la relación óptima existente entre la anchura/longitud de los contactos y el espesor del material dieléctrico empleado. Con el objetivo de incrementar la eficiencia y potencia extraída del dispositivo es conveniente emplear láminas dieléctricas *Thin Film* y contactos emparrillados, o lo que es lo mismo, de muy baja anchura.



CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS



3.1. Introducción

En este capítulo se establecen las características estructurales y funcionales de los dispositivos a modelar. Tal y como se remarca en el objetivo 2 del presente proyecto, se diseñan tanto el rotor como el estator, así como el resto de los sistemas requeridos para el funcionamiento deseado en nuestros dispositivos.

El capítulo anterior nos ha permitido conocer la génesis relativa al efecto triboeléctrico junto con su aplicación a la recolección de energía mecánica en base a los Nanogeneradores Triboeléctricos (TENGs), sus modelos matemáticos, parámetros dominantes y otros factores de interés. Gracias a este conocimiento preciso en este capítulo se realiza una lista de parámetros de diseño claves para la optimización de estos junto con el diseño de diversos tribo-dispositivos nanotecnológicos para la recolección energética.

La totalidad de los dispositivos diseñados se basan en la tipología de un TENG de deslizamiento. El primero de ellos, para el diseño del rotor y el estator, emplea un modelo previo comercial establecido. De esta manera nos aseguraremos de emplear un diseño optimizado para la rotación, con escasas o nulas pérdidas debidas a su estructura durante su funcionamiento. Este modelo es el de los ventiladores de refrigeración de las CPU. A este diseño previo se le añaden, de la manera óptima posible, el par triboeléctrico nanoestructurado junto con sus correspondientes electrodos para la extracción de la corriente triboeléctrica. Se han considerado dos disposiciones de los contactos triboeléctricos, una deslizante simple y otra deslizante libre. Para el caso de la deslizante siempre se precisa también del diseño de un sistema de extracción de carga propio para lo que se debe considerar el estado rotacional de uno de los electrodos en uno de los casos. Para el contacto deslizante libre esto no es preciso, por encontrarse ambos electrodos en el Estator. Además, se invierte el modo de funcionamiento de dicho modelo base empleado para la obtención de potencia eléctrica pasando su motor de rotación a dinamo generadora, mediante la hibridación EMG – TENG.

El segundo diseño planteado consistirá en un TENG de disposición radial en el plano axial posterior de un molinillo. Se tratará de un TENG de contacto deslizante libre, el cual será el dispuesto de forma radial en la cara posterior del molinillo, que hará las veces de Rotor. Por su parte, el Estator estará conformado por la lámina de dieléctrico y sus electrodos de extracción de carga.

Por último, el tercer dispositivo consistirá en una hibridación del TENG de disposición longitudinal y el TENG radial. Este diseño empleará como Rotor un molinillo u otra turbina/rotor eólico óptimo para pequeñas escalas, cuyo eje estará acoplado solidariamente a otros 3 rotores diferentes, correspondientes a dos TENGs de disposición radial y otro de disposición longitudinal. Todos estos TENGs conformarán un *Cilindro Tribo-generador* cuyas bases circulares serán los TENGs radiales y su superficie longitudinal interna el TENG

longitudinal. Además, esta disposición permitirá una mayor optimización dimensional, así como selección de materiales para la encapsulación de la totalidad del dispositivo.

Adicionalmente, en esta fase se seleccionan los materiales empleados para el par triboeléctrico de los dispositivos. Desde sus factores más relevantes desde el punto de vista del efecto triboeléctrico tales como la densidad de carga superficial (TECD), hasta otros de índole más mecánica. Una vez determinadas las características dimensionales y estructurales de los dispositivos a simular se podrán proceder con el modelizado energético de los mismos.

3.2. Parámetros de Diseño

Los parámetros de diseño considerados para nuestros dispositivos se ajustarán a las valoraciones y optimizaciones aplicables a los TENGs tipo considerados durante la revisión realizada en el *CAPÍTULO 2: Triboelectricidad, conceptos y aplicaciones*. Son:

- Maximización de la velocidad lineal de deslizamiento del dispositivo: Esto se alcanzará mediante la conveniente selección de materiales para el Rotor de los mismos, de manera que estos sean de **baja densidad**. La finalidad de este parámetro de diseño es:
 - Incrementar la frecuencia de los contactos y, por tanto, de la corriente alterna ocasionada (f_{CA})
 - Disminución de la masa inercial del Rotor, incrementando la eficiencia de conversión energética
 - Optimización del Par triboeléctrico seleccionado: En aras de maximizar la eficiencia del dispositivo mediante la conveniente selección de los materiales más convenientes con los objetivos de:
 - Maximizar la TECD (σ) del dispositivo
 - Minimizar los coeficientes dinámicos de rozamiento (μ) del par triboeléctrico mediante la selección de materiales y nanoestructuración conveniente (*Fricción rodante*).
 - Minimizar costes globales del dispositivo, desde las materias primas al tratamiento de las mismas y ensamblamiento del mismo. Materiales de bajo coste y fácil manipulación.
 - Superficies de contacto: La superficie de contacto del dispositivo debe ser, como máximo, de **la mitad de la superficie total disponible** para el mismo, en aras de facilitar los ciclos de corriente alterna debidos al solapamiento – separación, así como maximizar las propiedades eléctricas de salida del tribo-dispositivo.
 - Optimización de la densidad de contactos triboeléctricos: Se emplearán **contactos emparrillados del estilo del MG-TENG junto con láminas de dieléctrico Thin Film en la proporción dimensional óptima próxima a la relación $l/d \geq 2$** . Pese a las no correspondencias con el modelo que puedan acontecer debidas al *Efecto borde*. El objetivo de este parámetro será:
-

DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS

- Maximización de la corriente de salida del dispositivo por el alto incremento en la frecuencia debido la **interconexión en paralelo** de todos sus contactos
- Minimización de la posibilidad de problemas debidos a que se alcance el tiempo de la *Constante temporal de reducción de la corriente producida* (τ) (**Ecuación 17**)
- Sistemas de extracción de cargas adecuados al dispositivo: Para la correcta, y con mínimas pérdidas, extracción de la corriente generada. Sobre todo, de los Rotores. Ej: Busbar, Escobillas...
 - **Las extracciones de carga deberán ser coetáneas en todos los contactos** por lo que todos ellos deberán ser equidistantes. De esta manera se evitará la recirculación de cargas y pérdidas de eficiencias que pudieran acontecer.
- Empleo de un amortiguador mecánico: Entre el sustrato y el contacto del Rotor o Estator, para paliar los efectos y desgastes mecánicos debidos a posibles impactos que estos pudieran sufrir. Dicho amortiguador podría ser un PPENG (TENG híbrido), para la recolección de las energías residuales ocasionadas por el desplazamiento relativo entre los contactos, o cualquier lámina polimérica amortiguadora. Un efecto que se debería estudiar serían las potenciales pérdidas debidas a un contacto menos rugoso por disminuir la componente normal, equivalente a la fuerza centrífuga, debida a este aportiguamiento.
- Selección adecuada de la disposición de los contactos: Dependiendo de las diferentes superficies disponibles para el dispositivo, dado que el objetivo es **maximizar la superficie de contacto**.
 - $S_{axial} \gg S_{longitudinal} \rightarrow$ Disposición radial
 - $S_{axial} < S_{longitudinal} \rightarrow$ Disposición longitudinal
 - $S_{axial} \approx S_{longitudinal} \rightarrow$ Generalmente será más conveniente la longitudinal en los puntos extremos de la trayectoria por siempre emplear la velocidad lineal máxima de rotación y que esta no dependa del radio.
- Encapsulamiento: Debido a las problemáticas que los efectos ambientales tales como la humedad pueden causar a la génesis del efecto triboeléctrico. Se plantearán posibles soluciones y diseños adecuados en aras de obtener un grado de encapsulación y aislamiento ambiental conveniente.

3.3. Dispositivo 1 (D.1): Ventilador de CPU

El **Dispositivo 1 (D.1)** planteado consiste en la modificación de un Ventilador de CPU para su configuración adaptada a la generación eléctrica por acción del viento. Dicha producción energética se debe a la inversión en el funcionamiento de su motor eléctrico accionador para que este pase a comportarse como un dinamo (EMG), así como a la inclusión de un TENG de deslizamiento en la superficie entre sus álabes y su Estator. La **Figura 32** nos muestra un ejemplo de la estructura base empleada para nuestro diseño.



Figura 32. Estructura de partida tipo para nuestro Diseño D.1

Fuente: <https://www.amazon.es/Digiflex-Ventilador-interno-ordenador-sobremesa/dp/B0047OPHQW>

El principal motivo para la propuesta de este dispositivo como base para el diseño se debe a que estos se encuentran altamente optimizados para su funcionamiento como impulsor de aire, por tanto, también lo estarán para el proceso inverso, aunque para ello se le deban realizar ciertas modificaciones internas. Se trata de un ventilador axial, a través del cual el flujo de aire fluye en la dirección paralela a su eje, ocasionando la correspondiente presión estática. Son capaces de mover grandes volúmenes de aire a escasas presiones aplicadas. En nuestro caso, se trata de uno de pocos álabes, más concretamente, 7. En la **Figura 33** y **34** se muestran los alzados y plantas/perfiles del rotor y el estator de partida de nuestro dispositivo.

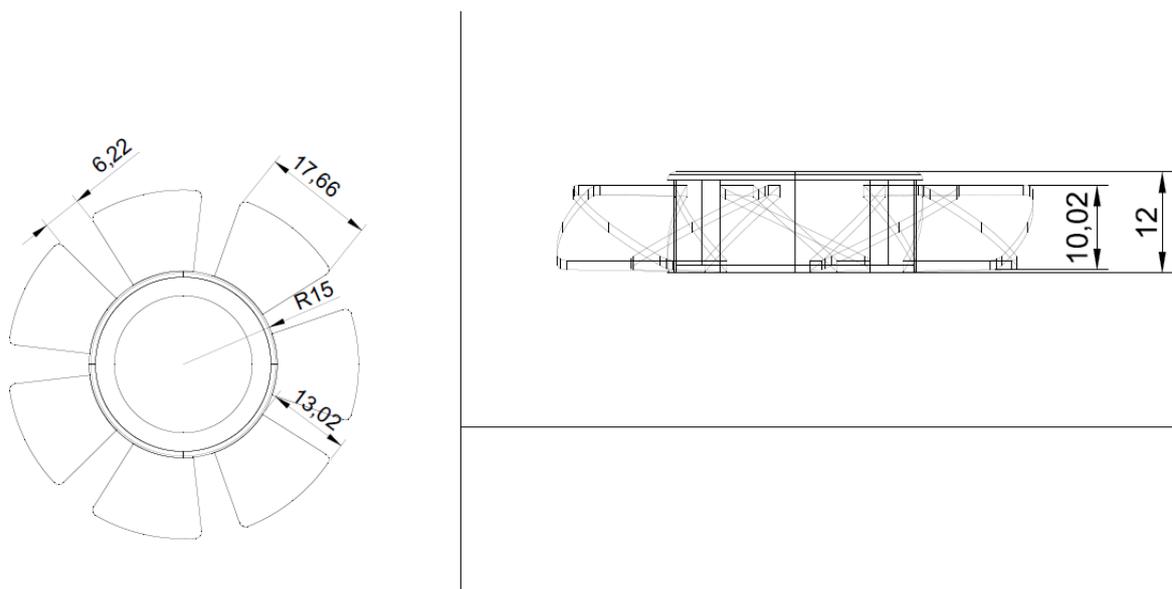


Figura 33. Alzado y Planta del rotor de partida para D.1

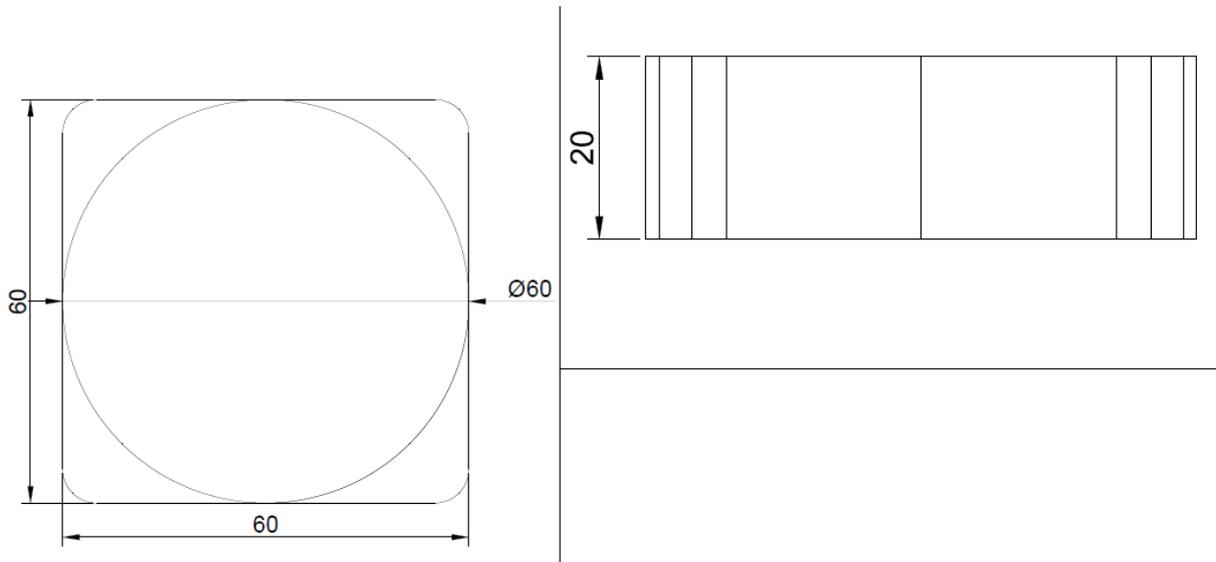


Figura 34. Alzado y Planta del rotor de partida para D.2

3.3.1. Rotor

Como se puede apreciar en la **Figura 32** y la **Figura 33**, en el **D.1** el rotor será el mismo del ventilador de CPU empleado como ejemplo, cuyas dimensiones se pueden apreciar en sus respectivas figuras. A este se le añadirá el correspondiente material nanoestructurado conformador del par triboeléctrico emplazado en el rotor. Este se corresponderá con el de menor densidad para disminuir las pérdidas mecánicas en el aprovechamiento de la corriente de viento debida a la inercia rotacional.

Para conseguir una optimización estructural del desempeño del TENG, el contacto en la parte del rotor tenderá a alcanzar el máximo radio posible ($R_{rotor,max}$), en aras de incrementar la superficie de contacto. Atendiendo a la siguiente expresión:

$$S_{contacto} = 2R_{rotor}\pi w$$

Siendo:

R_{rotor} = Radio del rotor desde el eje de rotación hasta la interfaz de contactos triboeléctricos

w = Anchura del estator, en la que se distribuirán los contactos emparrillados longitudinalmente

DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS

Con la maximización del radio del rotor hasta el contacto triboeléctrico también se favorece la velocidad lineal y, por tanto, la frecuencia con la que estos ocurren. Teniendo en cuenta que:

$$v \text{ (m/s)} = \omega R_{\text{rotor}}$$

Para una misma velocidad angular de rotación de este (ω), la maximización de la velocidad lineal se alcanzará con $R_{\text{rotor,máxima}}$. De esta manera podemos cumplir uno de los parámetros de diseño establecidos de mayor importancia.

Cabe destacar que, pese a este incremento del R_{rotor} , esto no conllevará un gran aumento de la superficie del plano axial que atraviesa el flujo de viento ya que se perderá parte de esta ganancia radial debido al encapsulamiento de la interfaz triboeléctrica. Este encapsulamiento se realizará entre las superficies de contacto, comunes a rotor y estator, mediante su cerramiento y aislamiento ambiental. Pero sin limitar su capacidad de movimiento relativo.

En función de la tipología de contacto triboeléctrico que se desee establecer, se deberán tener en cuenta otras consideraciones. En nuestro caso aplicaremos dos tipologías optimizadas, tanto el MG-TENG de dos contactos como el TENG deslizante de contacto libre (GF-TENG). El primero nos presentará unas mejores capacidades de recolección energética debido a su duplicidad de contactos los cuales abarcarán la práctica totalidad de la superficie disponible, mientras el segundo nos facilitará la extracción de carga, por encontrarse la totalidad de los electrodos en el rotor y no tener que considerar el estado rotacional de los mismos. La disposición de los contactos no será muy diferente en ambas tipologías y se ajustarán a las mostradas en las **Figuras 9 ó 24,25**, con el objetivo de maximizar la cantidad de estos interconectadas en paralelo para incrementar así el comportamiento del sistema en su objetivo de conversión energética.

Adicionalmente, el rotor presentará, próximo a su centro, el imán permanente empleado para la inducción electromagnética en los solenoides del estator. Estos solenoides funcionaban anteriormente mediante la generación de un electroimán debido a su núcleo de hierro, Este núcleo se eliminará para evitar interacciones magnéticas que puedan ocasionarnos un nivel de fuerza magnética en contra de la rotación, lo que podría reducir la eficiencia del dispositivo. De esta manera se obtendrá la hibridación EMG – TENG, para un mayor grado de recolección energética. La **Figura 35** nos muestra la configuración que tenían los solenoides del ventilador de CPU empleado como base del diseño, aún con sus correspondientes núcleos metálicos. Existen ciertas optimizaciones posibles que emplean modelos de reluctancia magnética entre otros, pero que no se han considerado debido a que el alcance de este trabajo es el de dar un primer enfoque acerca de la triboelectricidad, así como posibles diseños dentro del campo de estudio.

3.3.2. Estator

El estator del **D.1** será equivalente al mostrado en las **Figuras 32 y 34**, al cual se le incorporarán la parte de los contactos triboeléctricos correspondiente. Dicha correspondencia dependerá de la tipología empleada, ya sea de deslizamiento libre o de contacto doble. Estas diferencias solo afectarán a la distribución de los pares dieléctrico – Electrodo, pero no al resto, el cual se corresponderá con el amortiguamiento mecánico.

Como ya se comentó anteriormente, este amortiguamiento puede emplearse para recolectar las energías residuales en base a un polímero ferroeléctrico tal como el PVDF, el cual presenta tanto propiedades piezoeléctricas como piroeléctricas. Esta opción se dejará para una posible ampliación futura de los diseños y a modo de curiosidad, dado que el principal objetivo del presente documento es la aplicación del Efecto triboeléctrico y su caracterización.

La extracción de dicha carga se llevará a cabo en paralelo, para así incrementar la corriente triboeléctrica de salida, mediante busbar de interconexión a los electrodos. De esta manera se maximizarán las corrientes de salida.

Además, el estator presenta los solenoides accionadores del ventilador mediante la generación de un electroimán al paso de una corriente eléctrica. Estos serán reconvertidos a dinamos extractores de carga, eliminando el núcleo de los mismos para evitar la interacción magnética que podría suponer el freno en la rotación del dispositivo como ya se comentó anteriormente. De esta manera, cuando el dispositivo sea activado, el imán permanente ubicado en el rotor ocasionará la génesis de una corriente en los diferentes solenoides.



Figura 35. Imagen del núcleo del estator con sus correspondientes solenoides y núcleos metálicos

3.4. Dispositivo 2 (D.2): Molinillo

El **Dispositivo 2 (D2)** planteado consiste en la construcción de un molinillo de viento, de baja masa inercial y alta eficiencia de recolección de la energía de flujo del viento. Al que le incorporaremos los contactos conformadores de un TENG de disposición radial en su cara axial posterior. En la **Figura 33** podemos observar la tipología básica de diseño relativa a un molinillo de viento.

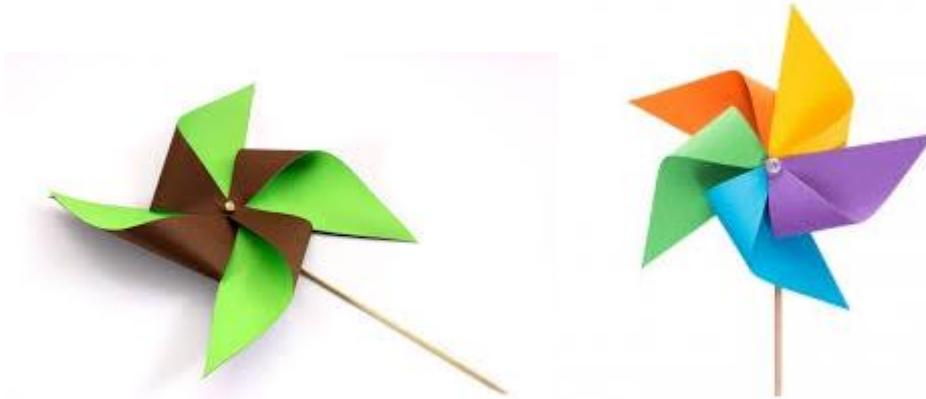


Figura 36. Ejemplos de partida tipo para nuestro Diseño D.2

Fuente: http://es.hellokids.com/c_29481/actividades-manuales/fabricar-objetos-para-decorar/molinillo-de-papel-bicolor;
<https://www.soyvisual.org/fotos/molinillo-de-viento>

La selección de este determinado diseño para el dispositivo se deberá a la forma alveolada de sus álabes junto con su escasa inercia rotacional debida al reducido peso de su rotor. Además, frente al anterior dispositivo planteado, presenta la posibilidad de añadir mayor cantidad de álabes y unas mayores superficies de contacto triboeléctrico deslizante.

3.4.1. Rotor

El rotor de este dispositivo consistirá el contacto triboeléctrico deslizante libre, emplazado en la superficie posterior del molinillo en distribución radial. Tal y como se puede apreciar en la **Figura 23**. Con el objetivo de maximizar la superficie radial uniforme se deben optimizar el número de álabes, en función de su diseño mecánico y densidad, junto con la superficie circular uniforme de la cara posterior del mismo. Otra forma de aplicar este concepto y facilitar el encapsulado sería mediante la aplicación de un eje solidario entre el rotor y el TENG.

El TENG consistirá en una *Thin Film* de escasa masa o una serie de contactos micrométricos, en disposición radial con angularidad respecto del eje de rotación constante. Como ya se comentó en anteriores ocasiones, el material empleado se tratará de un metal que conforme un contacto triboeléctrico de alta densidad de carga superficial con el dieléctrico seleccionado.

3.4.2. Estator

El Estator, por su parte, será equivalente al de TENG de disposición radial. Compuesto por láminas estratificadas de dieléctrico Thin Film, Electrodo de extracción de carga, soporte. Como ya se comentó con anterioridad, la ventaja que presentará esta tipología será el no requerimiento de sistema de extracción de carga en rotación.

3.5. Dispositivo 3 (D.3): Cilindro Tribo-Generador

Este último dispositivo consiste en la unificación y optimización de todas las consideraciones anteriormente establecidas. En él se aúnan los funcionamientos de ambas tipologías construyendo un *Cilindro Tribo-generador* en el que se emplearán sus bases a modo de TENGs de disposición radial y su longitud en forma de uno o múltiples TENGs longitudinales. De esta manera se aprovecha la práctica totalidad de la superficie interna de dicho cilindro, la cual se puede encapsular de múltiples formas e incrementar así las posibilidades de aplicación.

Además de un modelizado y dimensionamiento preciso de la generación triboeléctrica de este dispositivo, también se deberán considerar la estabilización de los parámetros eléctricos de salida de los múltiples TENGs involucrados en el funcionamiento de este *Cilindro Tribo-generador*. Esto se deberá a la interconexión en paralelo planteada para la multiplicidad de tipologías de TENGs consideradas. Para esto un buen diseño mecánico, dimensional y eléctrico son requeridos.

El diseño base para este dispositivo el cual contará con un Rotor optimizado según la aplicación deseada, con un eje solidario. Dicho eje solidario interconectará el rotor con el interior del cilindro y, por ende, con sus múltiples rotores accionadores de los TENGs del mismo. Dichos rotores serán mínimo tres, dos radiales relativos a las bases y uno longitudinal, y establecerán un deslizamiento relativo respecto de los estatores emplazados en la carcasa del cilindro.

3.6. Selección de materiales

Según [1], los materiales nanoestructurados más extendidos para su uso en TENGs son el PTFE y el Aluminio. El primero presenta una alta electrización resinosa al contacto con los metales, lo que origina unas densidades de carga triboeléctricas del par Metal-PTFE como las recogidas en la **Tabla 7**. Por su parte, el Aluminio presenta ventajas en cuanto a su electrización vítrea, manejabilidad y reciclado, lo que puede suponer importantes puntos a favor en cuanto a coste y al ciclo de vida de los materiales del dispositivo.

Tabla 7.

Densidades de carga triboeléctrica (TECD = σ) de diferentes Pares Triboeléctricos.

Material pair	Charge density (C/m ²)
Chromium-Chromium	2.02×10^{-8}
Chromium-Steel	3.37×10^{-8}
Chromium-Gold	6.73×10^{-8}
Metal-SiO ₂ (quartz)	$\sim 10^{-5}$
Metal-NaCl	5.0×10^{-4}
Metal-Nylon	$\sim 10^{-3}$
Metal-PTFE	$\sim 10^{-4} - 10^{-3}$
Metal-Polyimide	3.0×10^{-3}

Nota Fuente: S. Pan, Z. Zhang. "Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review", (2019), *Friction*, 7

Otras de las alternativas son el Cobre (Cu), empleado en algunos de los artículos revisados como contacto triboeléctrico (conductor – dieléctrico) y electrodo, así como combinaciones nanoestructuradas de Al/Ni.

Por su parte, a efectos de los dieléctricos empleados, los de mayor interés son los fluorados debido a sus mayores afinidades por los electrones, dadas las altas electronegatividades de los átomos de Flúor, como el PTFE (Teflón) o el FEP (Fluoro Etileno-Propileno). Ambos disponen de unas propiedades muy similares con la diferencia de que el FEP es más costoso, pero más fácil de manipular por poder emplearse en estado fundido. Por último, otro de los polímeros a valorar es el PDMS (Polidimetil Siloxano) el cual presenta ventajas importantes en cuanto a la densidad, manejo y coste, en detrimento de una menor densidad de carga triboeléctrica con respecto a los metales como se pudo apreciar en [3] (Tabla 3).

En la **Tabla 8** se recogen los principales parámetros de interés investigados para cada uno de los materiales valorados.

Tabla 8.

Parámetros de interés de los diferentes materiales valorados.

Metales	ρ (g/cm ³)	σ ($\times 10^6$) (S/m)	Coste (€/kg)
Al	2,7	37,8	3,67 €
Cu	8,96	59,6	14,66 €
Ni	8,9	14,6	14,97 €
Dieléctricos	ρ (g/cm ³)	ϵ_r (C ² /N·m ²)	Coste (€/kg)
PTFE	2,2	2,1	6,70 €

DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS

PDMS	0,965	2,35	3,50 €
FEP	2,15	2,1	8,00 €
PVDF	1,78	8,4	7,50 €

3.6.1. Criterios de selección

3.6.1.1. Generales

La **densidad de carga triboeléctrica del par (TECD = σ_s)** será el principal de los criterios de selección que se deben tener en cuenta para llevar a cabo esta selección y obtener un dispositivo óptimo. Esta se realizará en base a los datos referenciados en el capítulo anterior, en el epígrafe **2.2. Series triboeléctricas** en el que se recoge la **Tabla 3**, referencia a [3], en la que se establece una clasificación cuantitativa detallada de los valores de TECD de los diferentes dieléctricos con respecto al Mercurio como metal de referencia. La problemática reside en que no es el Mercurio el metal que estamos planteando para nuestros dispositivos por lo que no podemos conocer con exactitud la magnitud que tendrá la TECD de nuestros pares planteados. Solo suponer que esta será equivalente para el PTFE y el FEP por tratarse de materiales de propiedades casi idénticas y un poco inferior para el caso del PDMS, tal y como recoge la **Tabla 3**. Además, se deberá tener en cuenta que, para un correcto conocimiento de la TECD, se deberán acometer ensayos entre los pares deseados a analizar con diferentes tipos de nanoestructuración, para evaluar cuál de ellas sería óptima.

De acuerdo con los **Parámetros de diseño** de los dispositivos establecidos en el epígrafe **3.2. Parámetros de diseño** del presente Capítulo, los dispositivos deben cumplir unas determinadas funciones estructurales que permitan el funcionamiento óptimo para la recolección de energía mecánica y su conversión en energía eléctrica. Con esta finalidad, el parámetro funcional principal para ambos sistemas de transducción, electromagnético o triboeléctrico, se corresponde con la **frecuencia de conversión**, o lo que es lo mismo, la **velocidad de rotación del dispositivo ($v_{rotación} = \omega_{rotación} \cdot R_{rotor}$)**. Esta variable se encuentra limitada por diversos factores siendo uno de los de mayor implicación la **masa inercial** del rotor del dispositivo.

La relación entre los dos parámetros: Velocidad de rotación – Masa Inercial, es inversamente proporcional, tal y como se puede apreciar en la siguiente expresión:

$$E_{c,rotación} = \frac{1}{2} I \cdot \omega_{rotor}^2 \rightarrow \omega_{rotor} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{c,rotación}}{I}}$$

Siendo:

DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS

$E_{c,rotación}$ = Energía cinética de rotación del rotor recolectada de la corriente de fluido

I = Momento de inercia del rotor

ω_{rotor} = Velocidad angular de rotación del rotor

$$\omega_{rotor} = 2\pi f_{rotación}$$

$$I = \sum_{i=0}^n m_i r_i^2$$

A una $E_{c,rotación}$ constante, ω_{rotor} será mayor cuanto más pequeña sea la masa inercial del rotor. En otras palabras, *si nuestro rotor debido a su estructura y disposición dentro de una determinada corriente de fluido es capaz de recolectar, por su geometría; sección y coeficiente de potencia, una determinada cantidad de energía mecánica, dependiendo de su momento de inercia (I), el cual es una función directa de la masa inercial (m), la velocidad de rotación será mayor o menor en una proporción indirecta.*

Matemáticamente:

$$\omega_{rotor} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{c,rotación}}{\sum_{i=0}^n m_i r_i^2}}$$

Para un determinado volumen de material su masa inercial vendrá definida por la densidad (ρ) del mismo. Este será el primer criterio de selección para los materiales a valorar que deberemos tener en cuenta. Siempre buscando que los de menor densidad se apliquen al Rotor y los de mayor al Estator. Cabe destacar que en la mayor parte de los casos estamos valorando volúmenes ínfimos de materiales, *Thin Films* con escasos micrómetros de espesor y la mitad del arco del rotor de longitud (πr), por lo que para este parámetro debería valorarse de forma más precisa cuál es el efecto que supondría sobre los distintos dispositivos dependiendo de su densidad y el radio (r) con respecto del eje de rotación atendiendo a la expresión del Momento de Inercia.

Otro de los criterios generales de selección que afecta a la velocidad de rotación son los **Coefficientes de rozamiento (μ)** de los pares triboeléctricos y las superficies puestas en contacto. Dependiendo del diseño estructural del dispositivo, la magnitud del efecto que el rozamiento supone en su funcionamiento diferirá bastante conforme se produzca la rotación. Para el caso del D.1, o cualquier TENG de disposición longitudinal, el efecto de la disipación por rozamiento será más notable por depender de la fuerza centrífuga del sistema en el R_{max} .

DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS

Por su parte, para los de disposición radial será dependiente de la fuerza con la que se hayan puesto y mantenido en contacto tanto el rotor como el estator a través del eje de rotación.

En la **Tabla 9** se recogen ejemplos de los coeficientes de rozamiento dinámicos para los diferentes pares y dependiendo de los tamaños de nanopartículas puestas en contacto, siendo este muy favorecido por la nanoestructuración.

El coeficiente de rozamiento conllevará unas determinadas pérdidas de velocidad de rotación y energía mecánica transferida entre el fluido y el rotor debido a la fricción, las cuales originarán una disipación térmica de esta energía y el progresivo desgaste del material junto con una disminución de la velocidad de rotación del rotor que supone el efecto más pernicioso. Su minimización es un factor de gran interés a la hora de evaluar los potenciales ciclos de vida que estos dispositivos presentaran los cuales, atendiendo a la **Figura 26**, referente a [7], parecen ser capaces de alcanzar los 10^6 ciclos sin degradación notable gracias al efecto de *Fricción rodante* que ocasionan los nanomateriales esféricos que conforman el par.

La posibilidad de alcanzar datos precisos acerca de los valores de estos coeficientes para unos pares de materiales como los nuestros, los cuales podrían suponen multitud de combinaciones entre unos y otros, no es del todo posible debido a las limitaciones de la bibliografía analizada. En la **Tabla 9** se recogen algunos de los valores para los coeficientes de rozamiento, tanto dinámicos como estáticos, de los diferentes materiales estudiados con respecto al acero a modo de poder emplearlos como método para poder comparar su rozamiento junto con un material de referencia.

Tabla 9.

Coefficientes de rozamiento dinámicos y estáticos de los diferentes materiales considerados con respecto del Acero.

Material	$\mu_{estático}$	$\mu_{dinámico}$
Al	0,61	0,47
Cu	0,53	0,36
Ni	-	0,64
PTFE	0,04	-
FEP	0,04	-
PDMS	-	-
PVDF	-	-

Nota Fuente: https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html y <https://www.tribonet.org/wiki/friction-coefficients-in-atmosphere-and-vacuum/>

Por último, el último criterio general a tener en cuenta para la selección de los materiales empleados es el **coste**. Pese a no emplearse grandes materiales de ellos, el coste debe valorarse en múltiples vías. No únicamente desde el punto de vista del CAPEX del mismo, el cual es un factor bastante importante dado que este no solo incluye el coste de adquisición del mismo sino también debe valorar el de su nanoestructuración deseada dependiendo de la **manipulabilidad del material**.

DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS

Por otro lado, también estará el OPEX del mismo, el cual se cubrirá con los costes en los que se puede llegar a incurrir por su ciclo de vida no del todo sostenible o debido a sus bajos ciclos de vida posibles.

Debido a que muchos de estos valores requieren del trabajo real con los materiales, trabajo que no se ha realizado, se dejarán enunciados a modo de introducción de los mismos en los párrafos anteriores. El que si se ha podido reflejar es el coste de adquisición del material, el cual se muestra en la **Tabla 8**.

3.6.1.2. Metales

Con respecto a los metales empleados, el criterio de selección de estos dependerá de la aplicación de los mismos y su emplazamiento. La propiedad principal que deberán cumplir será la de una alta conductividad en la medida de lo posible, así como una elevada densidad de carga triboeléctrica (TECD) para el par dieléctrico – metal conformado. Existe la posibilidad teórica de emplear dos metales diferentes, uno que actúe como contacto triboeléctrico y otro que haga las veces de electrodo, pero en la práctica se deberían de valorar las *funciones trabajo* (ϕ) y los *Niveles de Fermi* de sendos metales ya que, a la puesta en contacto, se pueden originar problemas de corrosión galvánica por las diferencias de potenciales estándar (E^0), entre otros.

De entre los criterios seleccionados, el de mayor peso será el de la densidad de carga triboeléctrica (TECD) debido a que, atendiendo a la siguiente expresión para el cálculo de la caída de tensión en un electrodo/busbar tipo, pese a que nos encontremos con el caso de que la longitud de estos electrodos sea muy grande, la intensidad que circula por ellos es bastante baja ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$ de contacto triboeléctrico), por lo que; pese a que la sección transversal también sea bastante reducida, la caída de tensión podría no ser significativa. Es cierto que se debería valorar la realización una optimización estimada entre las longitudes y secciones de los electrodos extractores empleados para una determinada intensidad de salida, la cual también dependería de una de las componentes de la sección, la anchura del electrodo la cual es equivalente a la anchura del contacto triboeléctrico. En la **Figura 24** se puede apreciar un ejemplo.

$$\Delta V = \frac{2 \cdot L_e \cdot I}{\sigma \cdot S} (V)$$

Siendo:

ΔV = Caída de tensión que tiene lugar en el conductor

L_e = Longitud del electrodo/busbar

I = Intensidad que circula por el electrodo/busbar

DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS

σ = Conductividad del material empleado para el electrodo/busbar

S = Sección transversal del electrodo/busbar

En definitiva, estos criterios no tendrán tanto, pero a la hora de seleccionar los metales empleados como los generales.

3.6.1.3. Dieléctricos

Los materiales dieléctricos son los principales causantes del efecto triboeléctrico debido a su afinidad y tendencia a ser electrizados resinosamente (cargas negativas), sobre todo cuando son puestos en contacto con metales. Son aislantes eléctricos los cuales, cuando son sometidos a un potencial eléctrico, se polarizan, reorientando sus cargas por inducción electrostática y almacenando en su seno un campo eléctrico, a modo de polarización, de magnitud equivalente y sentido contrario al campo causante. Este es el proceso que tiene lugar en los condensadores, los cuales emplean un material dieléctrico interpuesto entre dos placas paralelas conductoras entre las cuales se aplica una diferencia de potencial eléctrico. Cuando el potencial deja de aplicarse, de forma inversa a la génesis de la polarización, el campo eléctrico “almacenado” en el dieléctrico se relaja, induciendo una diferencia de potencial electrostática de sentido contrario a la causante de la polarización inicial. Esta es la génesis de los **efectos capacitivos** que tienen lugar en los circuitos eléctricos.

Cuando un material dieléctrico se electriza resinosamente, debido a su carácter aislante, las cargas negativas se retienen sobre su superficie de contacto con el otro material, y estas inducen un campo eléctrico polarizante en el seno del material. Si este está en contacto con un material conductor (electrodo) al otro lado, este será sometido a otro proceso de inducción electrostática en esta interfaz para equilibrar el potencial negativo, causado por la polarización del dieléctrico, en esta interfaz dieléctrico - electrodo. En la **Figura 37** se muestra un ejemplo de todos estos procesos.

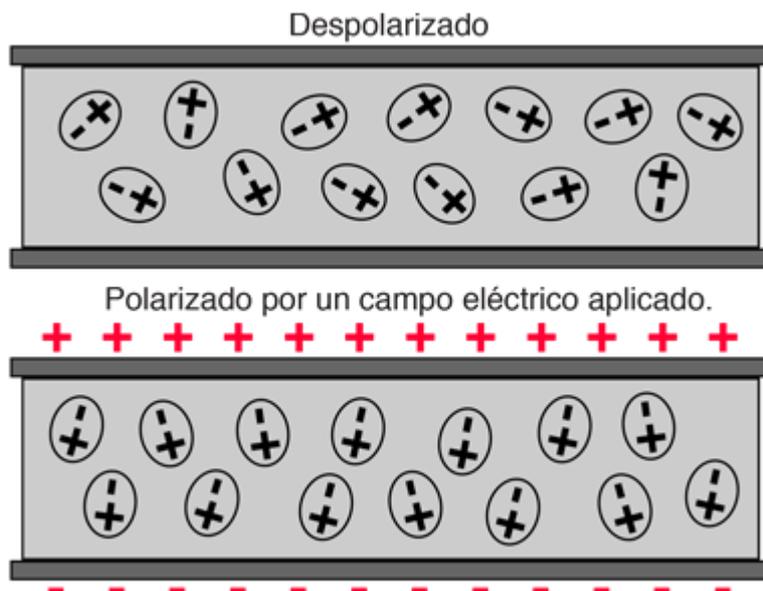


Figura 37. Esquema molecular de un material dieléctrico despolarizado (sin aplicación de un campo eléctrico externo) y polarizado.

Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electric/dielec.html>

El principal criterio específico para la selección de los materiales dieléctricos es su misma **constante dieléctrica o susceptibilidad eléctrica**. Ambos parámetros se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0(1 + \chi_{e,x}) \rightarrow \varepsilon_x = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r,x}$$

$$\varepsilon_{r,x} = 1 + \chi_{e,x} = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$$

Siendo:

ε_x = Constante dieléctrica del material x

ε_0 = Constante dieléctrica del vacío ($8,8542 \cdot 10^{-12}$ (F/m = C²/(N·m²))

$\chi_{e,x}$ = Susceptibilidad eléctrica del material x

Atendiendo a las demostraciones realizadas durante los epígrafes de modelado matemático del funcionamiento de los TENGs de diferentes modalidades en el Capítulo anterior, podemos concluir que la tendencia de este parámetro debe ser a minimizar, de manera que se incremente la constante de espesor del sistema.

$$\text{Constante de espesor} = \sum \frac{d_i}{\varepsilon_{r,i}} = \sum \frac{d_i \cdot \varepsilon_0}{\varepsilon_i}$$

3.6.1.4. Materiales Seleccionados

En definitiva, a la vista de todos los criterios mencionados, los materiales seleccionados serán el par de **Aluminio con PTFE**. Pese a ser el más extendido es el que presenta unas mejores propiedades en cuanto al coste, la constante dieléctrica y la densidad de carga triboeléctrica según las referencias consultadas. **Una alternativa pasa por la sustitución del PTFE por FEP**, otro tipo de Teflón pero en este caso **más manejable que el anterior por poder ser manipulado en estado fundido**. Con propiedades similares.

El Aluminio presenta la ventaja de su relativo bajo coste en comparación al Cobre o el Oro, los cuales son metales también muy considerados en la bibliografía en los TENGs. Por



DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS

otro lado, también es un material con un índice de reciclabilidad de prácticamente el 100%, lo que lo hace un material sostenible, así como dúctil y manejable. Por su parte, el Teflón presenta las mejores propiedades de cara la génesis del efecto triboeléctrico dada su alta electrización resinosa respecto de los metales y una coherente constante dieléctrica.

Esta toma de decisión se realizó de acuerdo a los criterios mostrados en la **Tabla 8**, entre otros, **priorizando entre ellos el coste, la facilidad de manipulación de dichos materiales y, sobre todo, el comportamiento de los pares conformados de cara a la TECD (σ_s) que generan**. El resto de los criterios también se valoraron, pero con pesos muy inferiores en este primer análisis, dado que no se consideró que fuesen a ser un factor determinante a la hora de tratar de escalar e industrializar los dispositivos en un futuro.

Pese a todo, la mejor manera de valorar el comportamiento de todas las alternativas sería ensayarlas una a una de manera que se puedan extraer datos empíricos y más precisos acerca de todos los criterios planteados de cara a poder seleccionar el par óptimo de todos los propuestos.

Como aislantes ambientales y sustratos se proponen materiales acrílicos de bajo coste y densidad y altas propiedades hidrofóbicas, debido a los problemas que la humedad puede conllevar para la génesis del efecto triboeléctrico. Así mismo, se proponen espumas, como las de tereftalato de polietileno (PET), o algún material ferroeléctrico (Ej: PVDF) que permita la hibridación TENG-PPENG por ser capaz de originar dar lugar a los efectos piro y piezoeléctrico.



CAPÍTULO 4

MODELIZACIÓN TEÓRICA



4.1. Introducción

El objetivo de la realización de un modelado teórico para nuestro sistema se corresponde con el de disponer de una relación matemática-analítica inicial que nos permita analizar, validar y optimizar el comportamiento de transducción energética del mismo, junto con la posibilidad de extraer otros parámetros característicos no considerados hasta el momento y de realizar un estudio pormenorizado preciso de su funcionamiento. Adicionalmente, este modelo permitirá conocer los parámetros óptimos de entrada y salida de nuestro sistema, los cuales posibilitarían a posteriori el dimensionar el Sistema de Control electrónico óptimo para su funcionamiento, obteniendo las máximas prestaciones energéticas a su salida y la máxima eficiencia de funcionamiento. A este sistema también se le conoce como *Energy Management System (EMS)* y no es parte del alcance de este trabajo inicial.

A la hora de comenzar el modelado matemático teórico se deben tener en cuenta múltiples características de nuestro sistema y su modelo funcional, las cuales se englobarán en un **Balance de Energía**. Este balance se puede enfocar de forma genérica, para flujos de múltiples fluidos, o de forma específica como será nuestro caso; considerado que la energía de flujo del fluido a recolectar es la del aire circulante a pequeña escala y velocidad.

El principal motivo para considerar el aire como el medio tractor del sistema es por ser considerado como una de las principales fuentes de energía renovables, además de haber sido ampliamente estudiado a lo largo de los años, permitiéndonos el obtener expresiones y asumir consideraciones de diseño y funcionamiento, más precisas que en otros medios fluidos. Además, existen multitud de posibles aplicaciones en las que el aire como medio tractor es aplicable a pequeña escala, desde los túneles de viento que se generan en ciertas calles de determinadas ciudades con bastante frecuencia debido a las condiciones orográficas y meteorológicas, así como el de posibilitar la generación de energía para cargar y alimentar pequeños dispositivos electrónicos en zonas boscosas o montañosas, sin acceso a la red eléctrica. En el Capítulo final de presente trabajo se abordarán otras muchas aplicaciones de estos dispositivos en múltiples fluidos, de forma que se pueda enmarcar el potencial de los mismos y suscitar así el interés en su desarrollo y aplicación.

El modelado matemático que vamos a llevar a cabo se realizará desde dos enfoques: uno general, en el que nos centraremos en postular las ecuaciones generales del balance aplicables a todo tipo de TENGs de funcionamiento similar a los estudiados, mediante el flujo de aire como medio tractor, y unos específicos en el que se apliquen las consideraciones específicas para cada uno de los dispositivos.

4.2. Modelo general

Para la obtención del modelo general se partirá de un balance de energía a partir de la energía de flujo del viento. El planteamiento será el de que nuestro dispositivo se comporte

como un aerogenerador eólico de pequeña escala, aplicando la triboelectricidad en lugar de la inducción electromagnética (o combinándola con esta) para la transformación de la energía mecánica recolectada en energía de eléctrica aprovechable en múltiples aplicaciones.

4.1.1. Balance Energético del sistema

Partiendo de la expresión general del balance energético para un sistema definido por un volumen de control, la cual se muestra en la **Ecuación 34**:

$$E_e - E_s = E_a + E_g \quad (34)$$

Siendo:

E_e = Energía de entrada al sistema

E_s = Energía de salida del sistema

E_a = Energía acumulada en el sistema

E_g = Energía generada en el sistema

Partiendo de esta expresión y términos generales para el planteamiento del balance energético de un determinado sistema podemos aplicar las siguientes consideraciones.

- La **Energía de entrada (E_e)** es la propia energía de flujo del viento que recibe nuestro sistema.
 - La **Energía de Salida (E_s)** es la energía de flujo del viento no aprovechable que sale del sistema. Esta dependerá del diseño y masa inercial del rotor, así como la solidez del mismo, junto con el Coeficiente de potencia y el Límite de Betz; debido a nuestro caso de consideración del viento como flujo tractor del sistema.
 - La **Energía generada (E_g)** equivaldría a la generación de energía por cualquier fuente en el mismo sistema. Cabe destacar que, atendiendo al Primer Principio de la Termodinámica, en un sistema cerrado la energía mecánica se conserva. En nuestro caso se trata de un sistema abierto en el que no se producen generaciones, pero si pérdidas mecánicas debidas a la fricción de los materiales las cuales originarán disipaciones térmicas, de ahí que se haya expresado restando.
 - La **Energía Acumulada (E_a)**, se trata de aquella que presenta una manifestación temporal e incluso sigue posibilitando el funcionamiento del mismo durante un periodo de tiempo después de haber finalizado su activación. En nuestro caso consideraremos que se trata del momento de inercia del sistema y su energía mecánica asociada. Generalmente en sistemas que funcionen de forma
-

MODELIZACIÓN TEÓRICA

estacionaria se la considerará despreciable dado que solo es considerable a la hora de arrancarlo y no a la hora de mantenerlo en funcionamiento.

En adelante se acometerán expresiones precisas acerca de los diferentes efectos que estos términos, y las consideraciones generales sobre el funcionamiento de nuestros dispositivos, tienen sobre la **Expresión 34**. De esta manera se irán sustituyendo los términos y comprendiendo, en término general, el funcionamiento de los diferentes TENGs planteados para, posteriormente, proceder con un modelado preciso de cada dispositivo tipo.

4.1.1.1. Energía de entrada y salida del sistema

Para nuestro caso, de la resta entre la energía de entrada y la de salida obtenríamos el término de la energía mecánica del rotor, de la primera transformación en energía mecánica de flujo a energía mecánica de rotación, tal y como podemos ver en la **Ecuación 35**.

$$E_e - E_s = E_{rotor} \quad (35)$$

Esta primera transformación conlleva uno de los principales enfoques a la hora de afrontar una potencial optimización del sistema debido a que, un correcto diseño del rotor y del sistema, podría ocasionar un coeficiente de potencia lo más elevado posible para la aplicación objeto y la maximización en la velocidad de rotación del sistema; la cual es el parámetro principal para obtener el máximo grado de transducción energética mecánico – eléctrica.

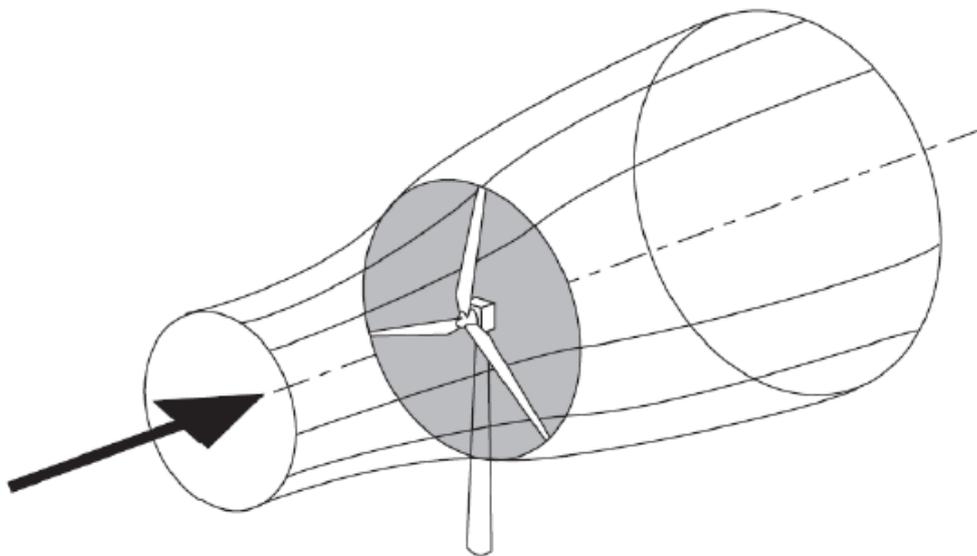


Figura 38. Esquema de funcionamiento de un sistema eólico con las isólinas de velocidad del viento.

Fuente: T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi. (1981). "Wind Energy Handbook". Wiley

Al tratarse de un sistema que emplea la energía del viento como fuente energética renovable a recolectar, nos centramos en realizar un enfoque de los parámetros de entrada y salida de acuerdo con las metodologías de dimensionado propias de la energía eólica.

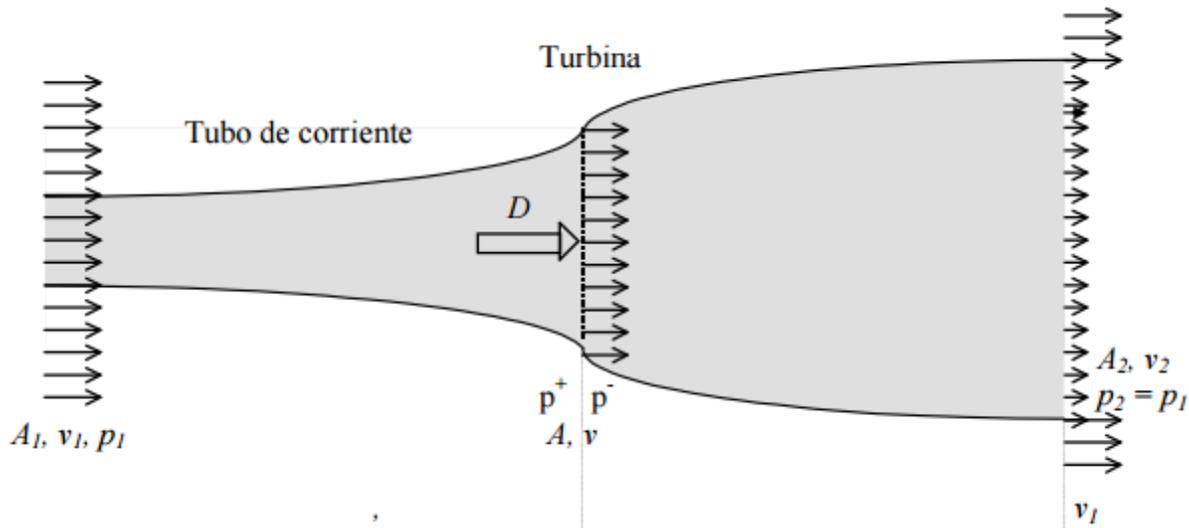


Figura 39. Sección transversal del flujo de viento interactuando con el rotor del aerogenerador

Fuente: D. Martínez Navarro, R. Herrero Martín, J. Pérez García. (2016). "Diseño de un sistema de generación eléctrica basado en la utilización de energía solar y eólica, e integrado en el medio natural". TFG UPCT.

A la hora de obtener las expresiones que rigen el balance energético y dimensionan la energía recolectada en un aerogenerador nos basaremos en las **Figuras 38 y 39**. En esta se muestra esquemáticamente un sistema eólico para la generación de electricidad en el cual se asumen las hipótesis de:

- Flujo de viento unidireccional y en dirección axial al rotor y su superficie de captación.
- Fluido no viscoso
- Fluido incompresible
- Flujo estacionario

Atendiendo a la **Figura 39**, los parámetros A_1 , v_1 y P_1 se corresponderán con los del flujo de viento a la entrada del sistema mientras que los A_2 , v_2 y P_2 con los de salida. La diferencia entre ambos se corresponde con el término del balance que hace referencia a la Energía mecánica útil de la **Ecuación 35**, aprovechable en el rotor en forma de velocidad de rotación y frecuencia entre los contactos triboeléctricos y la inducción electromagnética, lo que origina la transducción mecánico-eléctrica.

El motivo por el cual la sección a la salida se incrementa se debe principalmente a la Ley de conservación de la masa y el comportamiento estacionario del flujo, en el cual no se producen acumulaciones de aire en los álabes del rotor. Cumpliéndose esta hipótesis:

$$Q_1(m^3/s) = Q_2(m^3/s) \rightarrow S_1(m^2) \cdot v_1(m/s) = S_2(m^2) \cdot v_2(m/s)$$

MODELIZACIÓN TEÓRICA

Para que el caudal sea constante, en caso de que se produzca una reducción en la velocidad del flujo de aire debido a un elemento interpuesto en su trayectoria, la sección a atravesar por este aire tendrá que ser mayor ($S_2 > S_1$).

Con esto claro, aplicando el **Principio de Bernoulli** relativo a la mecánica de fluidos:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + P_1 + \rho g z_1 = cte \text{ (Pa)}$$

Sabiendo que:

- El flujo se realiza en una misma cota ($z_1 = z_2$)
- La temperatura es constante a lo largo del proceso y se aplica a hipótesis de incompresibilidad, la densidad también será constante.
- Solo se producen variaciones en la velocidad del fluido.

Pese a que estas consideraciones sean muy reduccionistas del problema, a efectos del diseño son bastante acercadas, dado que los posibles cambios de cota que una partícula de aire determinada pueda sufrir, son despreciables.

Por todo esto, y añadiendo al caudal (m^3/s) en cuestión, el cual nos permitirá cambiar el principio de Bernoulli, de estar expresando en términos de la presión (Pa) a términos de potencia (W) y aplicándola a los flujos de entrada; desde el seno del fluido hasta que alcanza el rotor, y salida; desde la salida del rotor hasta el seno del fluido nuevamente, obtenemos que:

$$\frac{1}{2}Q\rho v_1^2 + P_{atm}Q = \frac{1}{2}Q\rho v_{rotor}^2 + P_1Q \text{ (W)} \quad (36.1)$$

$$\frac{1}{2}Q\rho v_2^2 + P_{atm}Q = \frac{1}{2}Q\rho v_{rotor}^2 + P_2Q \text{ (W)} \quad (36.2)$$

La **Ecuación 36.1** hace referencia a la Potencia de entrada a nuestro sistema y que alcanza nuestro dispositivo mientras que la **36.2** a la de salida. Restando ambas, tal cual se hace en la **Ecuación 35** obtendríamos la **Potencia Útil (P_{útil})** de nuestro sistema.

$$Q(P_1 - P_2) = \frac{1}{2}Q\rho(v_1^2 - v_2^2) = P_{\text{útil}} \quad (37)$$

Siendo:

$$Q = cte = S_{rotor} \cdot v_{rotor}$$

Y aplicando el principio de conservación de fuerzas:

$$\rho S_1 v_1^2 - \rho S_2 v_2^2 = F_{\text{útil}}$$

Siendo **F_{útil}** la fuerza que el flujo de viento aplica al rotor y lo pone en movimiento. Si aplicamos el criterio de conservación de materia ($Q = cte$) a esta conservación de fuerzas obtenemos que:

$$F_{\text{útil}} = \rho S_{rotor} v_{rotor} (v_1 - v_2) \quad (38)$$

Pasando la **Ecuación 38** a términos de la potencia multiplicándola por la v_{rotor} (**P = F·v**) obtenemos:

$$P_{\text{útil}} = F_{\text{útil}} \cdot v_{rotor} = \rho S_{rotor} v_{rotor}^2 (v_1 - v_2) \quad (39)$$

Igualando las **Ecuaciones 37** y **39** obtenemos que:

$$\rho S_{rotor} v_{rotor}^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} Q \rho (v_1^2 - v_2^2)$$

Sustituyendo el caudal del flujo por su expresión equivalente y despejando:

$$v_{rotor} (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} (v_1^2 - v_2^2) \quad (40)$$

Con el objetivo de poder valorar realmente la velocidad que obtendríamos en el rotor a la hora de conocer la frecuencia con la que se producirían los contactos y separaciones triboeléctricas, así como las inducciones electromagnéticas en los casos que proceda, deberíamos ser capaces de simplificar las expresiones anteriores a términos fácilmente medibles y obtenibles de diversas fuentes. Existen diversas metodologías, tales como la **Escala de Beaufort** o la **Distribución de Weibull** que nos permitirían estimar con relativa precisión las velocidades del viento que se podrían tener en una ubicación determinado en un momento preciso, o a lo largo de un periodo de tiempo en el caso de la segunda. De esta manera se podrían obtener los datos para las velocidades de entrada del viento al sistema (v_1), con la misma facilidad se podrían obtener los valores para la densidad el viento (ρ), y la superficie de interacción del rotor (S_{rotor}), la cual dependerá de la tipología del dispositivo y del diseño del mismo.

En definitiva, lo que necesitamos definir es un factor de rendimiento que establezca la relación entre la Potencia de entrada al sistema, dependiente de la velocidad del viento que, si pudiéramos conocer a partir de las metodologías mencionadas anteriormente, y la potencia útil del mismo, la cual es la transmitida al rotor y origina la velocidad de rotación del mismo. Es en este punto en el que tenemos que definir el **Coefficiente de potencia (Cp)**, ampliamente extendido en las bibliografías relativas a la energía eólica y los aerogeneradores como en [15], [16], [17] y [20].

El **Coefficiente de potencia (Cp)** se define tal cual se expresa en la **Ecuación 41** que se muestra a continuación:

$$Cp = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{entrada}}} = \frac{P_{\text{útil}}}{\frac{1}{2} \rho S v_1^3} \quad (41)$$

Por tanto:

$$P_{\text{útil}} = Cp \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad (42)$$

El valor de este **Coefficiente de potencia (Cp)** correspondiente a la interacción mecánica entre un flujo de aire a una determinada velocidad (v_1) y una superficie rotórica interpuesta presentará un valor máximo de acuerdo con el **Límite de Betz**, el cual es del **59,3%** atendiendo a las referencias consultadas [15], [16], [17] y [20] y dependerá de determinados valores dependientes del diseño y parámetros de funcionamiento del rotor en cuestión. Estos valores serían:

MODELIZACIÓN TEÓRICA

- **Relación de velocidad punta ó “Tip Speed Ratio (TSR)” (λ):** Establece la relación entre la velocidad máxima que puede alcanzar el rotor (en su Radio máximo), con respecto a la velocidad del viento que la induce.

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v_1}$$

- **Paso de Pala del álabe (β):** Ángulo existente entre la cuerda de los álabes del rotor y el vector velocidad de rotación de los mismos.
- **Solidez ó “Solidity ratio” (σ):** Equivale a la relación entre la superficie proyectada por los álabes del rotor y la superficie del mismo (S_{rotor}).

$$\sigma = \frac{S_{t, \text{álaves}}}{S_{rotor}} = \frac{2 \cdot N \cdot c}{\pi \cdot D}$$

Siendo:

N = Número de Álabes

c = Cuerda aerodinámica de los álabes

D = diámetro del rotor

- **Número de Álabes (N):** Este valor va íntimamente ligado con los anteriores. A mayor número de álabes mayor será el grado de Solidez del rotor.
 - **Los rotores de elevada Solidez tienen un fuerte momento de arranque, pero bajas velocidades de rotación;** principalmente porque a una masa de álabe determinada, la mayor cantidad de estos implica una mayor masa inercial total del rotor (I) y, por tanto, una menor velocidad de rotación para una determinada Energía Cinética.

$$E_{c, \text{rotación}} = \frac{1}{2} I \cdot \omega_{rotor}^2$$

- De forma inversa, **los rotores de baja solidez rotan a mayores velocidades y tienen menores momentos de arranque.** En otras palabras, presentan mayores dificultades para ser puestos en movimiento dado que el Par de arranque del rotor será dependiente del número de álabes del mismo según la siguiente expresión:

$$T (N \cdot m) = N \cdot F_{\text{álabe}} \cdot R_{rotor}$$

Siendo:

$$F = \rho S_{\text{álabe}} v_1^2$$

$$S_{\text{álabe}} = R_{\text{rotor}} \cdot c$$

Por tanto:

$$T = N \rho c v_1^2 \cdot R_{\text{rotor}}^2$$

Este Par de arranque/momento de fuerzas, debe ser capaz de vencer el momento de inercia del rotor (I):

$$I_{\text{rotor}} = \sum_{i=0}^n m_i r_i^2$$

$$E_{c,\text{rotación}} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n m_i r_i^2 \cdot \omega_{\text{rotor}}^2 = N \rho c v_1^2 \cdot R_{\text{rotor}}^2 \quad (43)$$

En la **Ecuación 43**, cuando el valor de la velocidad angular del rotor (ω_{rotor}) es próximo a 0 y va incrementando, los valores de la velocidad el viento que alcanza al rotor (v_1) que se obtienen de la ecuación son los que marcarán las velocidades de viento que arrancarán la rotación del sistema.

En definitiva, con el objetivo de optimizar nuestros dispositivos debemos de procurar reducir al máximo posible el momento de inercia del rotor mediante la tendencia a la minimización en la masa de los álabes a la par que procuramos maximizar el Coeficiente de potencia de recolección de la energía de flujo del mismo. Siempre con la perspectiva puesta en maximizar todo lo posible la velocidad de rotación (ω ó $v_{\text{rotor}} \rightarrow \text{max}$).

En la **Figura 40** se muestra una representación de los parámetros principales que se deberían tener en cuenta para el dimensionado y consideración del rotor de cara a obtener las mayores eficiencias de cara a la recolección energética, a la vez que obtenemos la mayor

MODELIZACIÓN TEÓRICA

capacidad de transducción electro-mecánica. Atendiendo a esta gráfica, para poder obtener las mayores velocidades (eje de abscisas) los rotores deben minimizar el número de sus álabes.

De esta representación además se pueden concluir que el **Coefficiente de potencia habitual**, para los rotores de 3 álabes en su punto de máxima potencia útil, **suele ser del 40%**. Para los de nuestros casos carecemos de datos acerca de cuáles serán sus coeficientes de potencia aplicados dependiendo de su momento de inercia y número de álabes. Se debería proceder en primer lugar a extraer cual es la Relación de velocidades de los mismos de forma empírica analizando su velocidad de rotación frente a un flujo de viento de velocidad controlada. De esta manera se podría dar uno de la siguiente **Ecuación 44** para datos empíricos propuesta en [21]:

$$C_{p,max} = 0,593 \left[\frac{\lambda \cdot N^{0,67}}{1,48 + (N^{0,67} - 0,04)\lambda + 0,0025\lambda^2} - \frac{1,92\lambda^2 \cdot N}{1 + 2\lambda N} \cdot \frac{C_D}{C_L} \right] \quad (44)$$

Siendo:

C_L = Coeficiente de sustentación de los álabes

C_D = Coeficiente de resistencia de los álabes

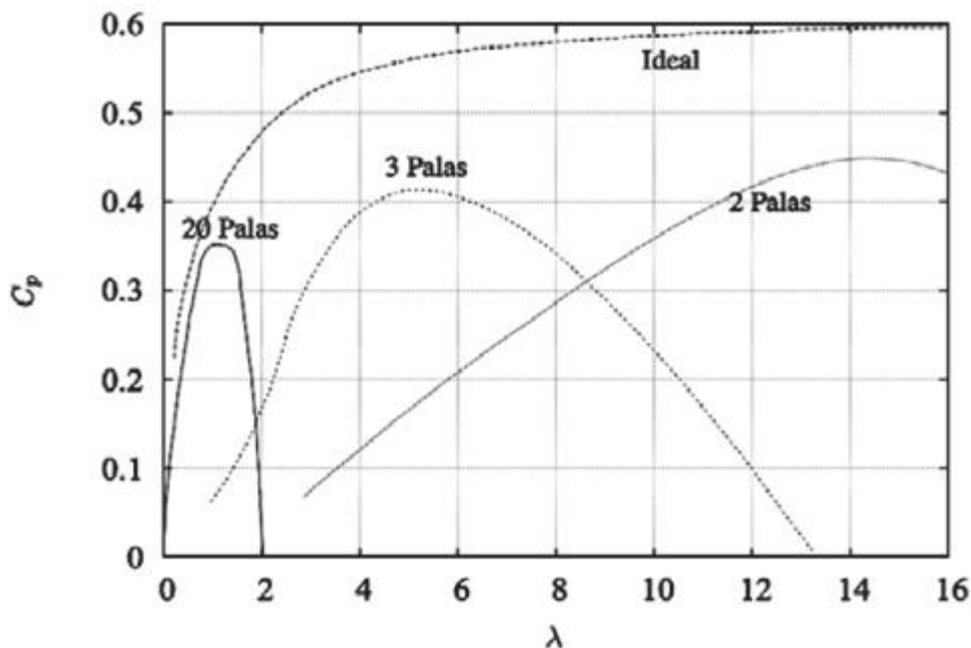


Figura 40. Representación de los Coeficientes de potencia (C_p) y las relaciones de velocidad (λ) de distintos diseños de rotores con diferente número de álabes.

Fuente: C. A. Ramirez, A. J. Saavedra-Montes. "Parameter Calculation of a Small Wind Turbine Model". (2012). IEEE.

4.1.1.2. Pérdidas del sistema

Tal y como se estableció en el epígrafe **4.1.1. Balance Energético del sistema**, las pérdidas que tienen lugar en el mismo son debidas a la fricción necesaria para que tenga lugar el efecto triboeléctrico. Tal y como se estableció en el **Capítulo 3: Diseño de los dispositivos**, las principales pérdidas que se van a considerar para estos dispositivos son aquellas que conlleven una transformación de la energía mecánica activadora del sistema en otras manifestaciones energéticas no eléctricas. Esto pasará principalmente en el caso de la fricción de los contactos triboeléctricos y otras superficies del sistema, las cuales originarán una fuerza de rozamiento resultante y su correspondiente pérdida de energía cinética rotacional y consecuente velocidad de rotación.

En el **Epígrafe 2.3.6.** se establecen determinadas alternativas que podrían permitir el aprovechamiento de estas pérdidas de origen mecánico debidas a la fricción. Dichas alternativas eran el empleo de un material Piezo – Piroeléctrico como el PVDF (Fluoruro de Polivinilideno) con el objetivo de ser capaz de recolectar la energía disipada en sus dos manifestaciones, tanto la mecánica la cual activaría el efecto piezoeléctrico, como la térmica que activaría el piroeléctrico. Dado que estos efectos se maximizan con los gradientes, el grado de elasticidad del material, así como el planteamiento de un sistema de disipación térmica que permitiera que el gradiente de esta fuera máximo en cada ciclo, serían de gran interés. Pese a todo, dado que el planteamiento y modelado de la transducción mecánico – eléctrica de estos sistemas sería también de elevada complejidad, esta se queda fuera del alcance de este primer trabajo, de forma que se puedan plantear estudios futuros para diferentes optimizaciones de, únicamente, el efecto triboeléctrico aplicado a los dispositivos planteados. Por todo esto, las pérdidas se verán limitadas a un estudio acerca de las disipaciones energéticas originadas por la fricción entre los contactos únicamente.

Tal y como se enunció en el **Epígrafe 4.1.1.**, el término del balance que hará referencia a las pérdidas del mismo será el de **Eg**, y sus expresiones analíticas dependerán de la tipología de funcionamiento y contacto que tenga lugar y serán las de las correspondientes **fuerzas de rozamiento (Fr)** para cada uno de los contactos:

- **TENGs de disposición longitudinal:** La fricción y su consecuente Fuerza de Rozamiento será obtenida a partir de la **Fuerza centrífuga** que tendrá lugar en los contactos del rotor sobre los del estator. Esta será respondida, en magnitud equivalente y sentido contrario, por la fuerza normal del contacto y la centrípeta del rotor. Esta fuerza será de magnitud prácticamente despreciable debido a que cada contacto es de espesor micrométrico. No así respecto de la totalidad de los contactos los cuales abarcarán la mitad del perímetro de rotación del sistema, pero al tratarse de un rozamiento de rodadura con hundimiento de la rotación (z) dependiente del amortiguamiento que se haya decidido emplear, podríamos considerarlo despreciable. En la **Figura xx** se muestra un esquema acerca del funcionamiento del rozamiento de rodadura.
-

$$\mu_{rr}(\text{rozamiento de rodadura}) \approx \sqrt{\frac{\text{hundimiento } (z)}{\text{diámetro } (d)}}$$

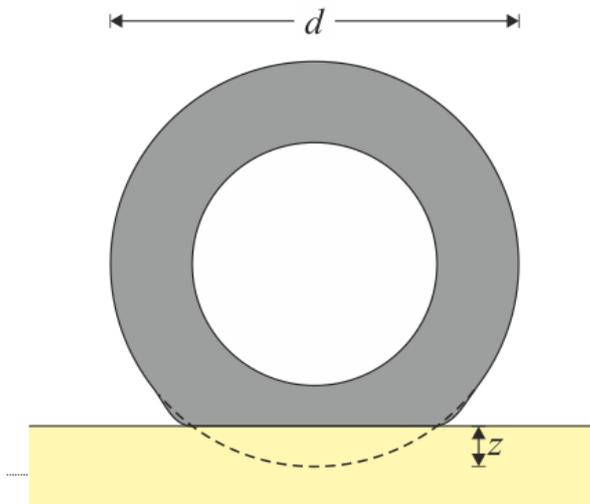


Figura 41. Esquema del mecanismo de funcionamiento del rozamiento de rodadura.

Fuente: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Fuerzas_de_rozamiento_\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Fuerzas_de_rozamiento_(GIE))

- TENGs de disposición radial: Para el caso de la disposición radial, el rozamiento dependerá de la fuerza con la cual se hayan puesto en contacto tanto el rotor como el estator, o lo que es lo mismo, la fuerza de unión de las piezas a través del eje. Además, a efectos disipativos de la potencia mecánica por fricción, esta es proporcional a la velocidad del punto en cuestión, la cual en un contacto radial será variable con el radio, en la misma magnitud que la velocidad del punto.

$$P_{roz}(r) = F_r \cdot v_{rotor}(r)$$

Otro tipo de pérdidas que nos podemos encontrar serán aquellas relativas al caso de que empleemos la **hibridación TENG – EMG**. Tal y como su propio nombre indica, los generadores eléctricos fundamentados en la inducción electromagnética emplean campos magnéticos, habitualmente originados a partir de materiales magnéticos permanentes de alto grado de Histéresis magnética. Esta histéresis no presenta un problema de pérdidas en el entrehierro que si origina para el caso de los transformadores debido a la inercia en la excitación magnética (H) que presentan, que puede suponer una limitación y pérdidas con respecto a la corriente alterna aplicada. Además, los bobinados empleados para la inducción electromagnética son de cobre con el objetivo de reducir al mínimo las pérdidas resistivas, el cual es un material diamagnético sin práctica interacción con los campos magnéticos (más allá

de la potencial inducción electromagnética), por lo que tampoco se considerará la génesis de una fuerza magnética atractiva entre imán permanente y los bobinados que pudieran suponer fuerzas contrarias a la rotación del dispositivo.

Por último, la parte de extracción de la corriente eléctrica también originará pérdidas en el sistema debidas a las resistencias internas, tanto de los conductores como de cualquier efecto parásito que tenga lugar en el mismo. Con los parámetros dimensionales de los conductores y electrodos extractores bien definidos se podría realizar una estimación, la cual sería conveniente dado que, pese a que las corrientes producidas por Busbar/electrodos extractor son muy bajas, también lo son las secciones de transferencia. Pese a todo, para nuestro caso de estudio.

4.1.1.3. Generación eléctrica

Al respecto del proceso de transducción mecánico-eléctrica de origen triboeléctrico, esta se ajusta a las expresiones que se analizaron en los **Epígrafe 2.3.8.** del anterior capítulo. Dependiendo de la tipología de TENG que estemos estudiando las expresiones se modificarán de una u otra manera.

Para nuestros dispositivos se han empleado **TENGs de deslizamiento con contacto Dieléctrico – Conductor (Metal)**, el cual también hará las veces de electrodo extractor de la corriente. El motivo de su selección se debe a que es el más extendido en la bibliografía para aplicaciones de conversión energética, por encima del de contacto Dieléctrico-Dieléctrico, el cual presenta mejores valores de tensión, pero inferiores de corriente dada la mayor resistencia interna que dos dieléctricos suponen.

Debido a las dificultades existentes para llevar a cabo la extracción de carga en el rotor se ha planteado la alternativa de que en este solo se encontrase el metal de contacto conformador del par triboeléctrico y los electrodos extractores se ubicasen en la parte posterior del dieléctrico en el estator, tal y como se aprecia en la **Figura 30.** Esto imposibilitaría la aplicación de la optimización vista en el **Epígrafe 2.3.8.1. relativo al TENG de microemparrillado (MG – TENG)**, el cual disponía del doble de contactos, a pesar de todo, ambas consideraciones se aplicarán a nuestros diseños, siempre considerando la potencial incertidumbre y dificultad de poder llevar a cabo la extracción de carga en rotación a base de escobillas u otras técnicas a valorar.

Las principales expresiones que necesitaremos tener en cuenta serán las **Ecuaciones 16,** del **Epígrafe 2.3.7.1,** las cuales están obtenidas para el caso de un TENG de deslizamiento con contacto Dieléctrico – Dieléctrico, pero tal y como se concluyó en el **Epígrafe 2.3.7.2,** para pasarlas a un TENG de deslizamiento con contacto Dieléctrico – Metal debemos actualizar su constante de espesor (d_0) a la correcta del sistema:

$$d_{0,d-d} = \left(\frac{d_1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\varepsilon_{r2}} \right) \rightarrow d_{0,d-c} = \frac{d_d}{\varepsilon_{rd}} = \frac{d_d \cdot \varepsilon_0}{\varepsilon_d}$$

Con esto claro, las **Ecuaciones 16** pasan a ser las **Ecuaciones 45**:

$$Q = \sigma w x_{max} - (\sigma w x_{max} - Q_0) \exp \left[-\frac{d_d}{R w \epsilon_d (l - x_{max})} \left(t - \frac{x_{max}}{v} \right) \right] \quad (45.1)$$

$$I = (\sigma w x_{max} - Q_0) \frac{d_d}{R \epsilon_d w (l - x_{max})} \exp \left[-\frac{d_d}{R w \epsilon_d (l - x_{max})} \left(t - \frac{x_{max}}{v} \right) \right] \quad (45.2)$$

$$V = I \cdot R = R (\sigma w x_{max} - Q_0) \frac{d_d}{R \epsilon_d w (l - x_{max})} \exp \left[-\frac{d_d}{R w \epsilon_d (l - x_{max})} \left(t - \frac{x_{max}}{v} \right) \right] \quad (45.3)$$

También requeriremos de las expresiones para el cálculo de los parámetros de funcionamiento, tanto en **condiciones de circuito abierto (OC) como cortocircuito (SC)**. Dichas expresiones son tanto la **Ecuación 46**, obtenida a partir de la **Ecuación 7** para nuestro caso de estudio, y las **Ecuaciones 10, 11 y 12**:

$$V_{OC}(x) = E_{y1} d_1 = \frac{\sigma x d_d}{\epsilon_d (l - x)} \quad (46)$$

$$I_{SC} = \frac{dQ_{SC}}{dt} = \sigma w \frac{dx}{dt} = \sigma w v(t) \quad (10)$$

$$I_{SC}(f_{CA}) = \sigma w l_{total} f_{CA} \quad (11)$$

Siendo:

$$f_{CA} = f_{contacto\ triboeléctrico} = f_{rotación(Hz)} \cdot N_{CTP}$$

Por tanto:

$$I_{SC}(f_{rotación}, N_{CTP}) = \sigma w l_{total} f_{rotación} N_{CTP} \quad (12)$$

MODELIZACIÓN TEÓRICA

Por último, otra de las expresiones que debemos tener en cuenta es la referente a la *constante de reducción de la corriente producida*, de gran interés para poder valorar si los parámetros dimensionales establecidos en el diseño son coherentes para mantener un funcionamiento óptimo de la transducción triboeléctrica. Este parámetro será definido por la **Ecuación 47**, proveniente de la adaptación de la **Ecuación 17** a nuestro caso de estudio también:

$$\tau = \frac{R\varepsilon_d w(l - x_{max})}{d_d} \quad (47)$$

Esta expresión debe cumplir el siguiente criterio:

$$\tau > \frac{l_{contacto}}{v_{rotación}}$$

Con el objetivo de precisar en mayor medida el proceso de generación eléctrica de origen triboeléctrico se deben definir algunos de los términos de las expresiones anteriormente establecidas. Estos términos se ajustan a los que se muestran en la **Figura 21 (a)**.

- l = Longitud del contacto triboeléctrico
- x = Coordenada de avance longitudinal del deslizamiento
- l_{total} = Perímetro total de los contactos triboeléctricos. Normalmente será **la mitad el perímetro de contacto** para posibilitar el apareamiento y desapareamiento total de los mismos.
- w = Profundidad del contacto triboeléctrico
- d = Espesor del dieléctrico
- ε_d = Constante dieléctrica del material dieléctrico empleado ($\varepsilon_{FEP} = 2,1 \cdot \varepsilon_0$)
- R = Resistencia de carga del circuito externo
- Q_0 = Carga transferida cuando $t = x_{max}/v$
- $f_{rotación}$ = Frecuencia de rotación del rotor debida a la interacción con el viento

$$f_{rotación} = \frac{\omega_{rotación}}{2\pi} = \frac{v_{rotación}}{2\pi R}$$

- f_{CA} = Frecuencia de Corriente Alterna en el circuito externo

$$f_{CA} = f_{rotación} N_{CTP} = \frac{\omega_{rotación}}{2\pi} \cdot N_{CTP} = \frac{v_{rotación}}{2\pi R} \cdot N_{CTP}$$

- N_{CTP} = Número de Contactos Triboeléctricos en Paralelo

Para modelizar el funcionamiento lo ajustaremos a las variables de ω_{rotor} ó v_{rotor} para definir las variables temporales y, en términos de desplazamiento, se deben aplicar unas determinadas condiciones frontera tal y como se definieron en el epígrafe al cual estamos haciendo referencia **(2.3.7.1)**, con las cuales se pueda obtener un resultado próximo al real evitando las indeterminaciones matemáticas y el efecto borde. Estas condiciones es la siguiente:

$$x_{max} = 0.8 \cdot l$$

Por tanto:

$$l - x_{max} = 0.2 \cdot l$$

Con todas estas aclaraciones ya podemos combinar y despejar las ecuaciones del balance, pudiendo determinar también el efecto de los diferentes parámetros dimensionales, tanto geométricos como operacionales, originan sobre el funcionamiento del dispositivo.

Por último, para modelizar el comportamiento de un *TENG de disposición radial* este dependerá de los parámetros de diseño correspondientes a:

- l (longitud de contacto triboeléctrico): determinada por el ángulo del sector circular, correspondiente a cada uno de los contactos (α) y al radio (r).

$$l = f(r) \rightarrow l(r) = \frac{\alpha\pi}{180} \cdot r$$

- w (Profundidad del contacto): En este caso equivaldrá a su coordenada radial (r), la cual dará lugar a $l \cdot w = S_{contacto}$. Igual que con la $v_{rotación}$, esta será dependiente de la **corona circular** ($r_2 - r_1$).
 - $v_{rotación}$: será progresiva y dependiente del radio según la expresión $v(r) = \omega \cdot r$ entre los valores de r_1 (min) y r_2 (max). Adicionalmente, la superficie de contacto y extracción de carga en el TENG de disposición radial será equivalente a la mostrada en la **Figura 29 (b) y (c)**, por lo que se corresponderá con una corona circular ($r_2 - r_1$) y $r_2(\max) \neq R$ (radio total del rotor).
-

4.1.2. Modelizado final general

El correcto modelizado y simulación de estos dos diseños serán realmente complejos de precisar debidos a la gran cantidad de efectos secundarios que puedan acontecer. Se modelizará un caso general de forma precisa y se considerarán las posibles modificaciones que afecten a estos.

En primer lugar, como ya se definió en el **Epígrafe 4.1.1.1.** la expresión para el primer término de la **Ecuación 34** es la siguiente:

$$P_{\text{útil}} = Cp \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad (42)$$

Tal y como se ha visto, considerando que las pérdidas mecánicas en el sistema son despreciables, así como la acumulación de energía en el mismo (la disipación en forma térmica podrís considerarse, pero esta sería debida a la fricción la cual hemos despreciado). Esta expresión debe igualarse a las de comportamiento del rotor a partir de las cuales se podrá definir la velocidad del mismo. Partiendo de la siguiente expresión:

$$T (N \cdot m) = N \rho c v_1^2 \cdot R_{\text{rotor}}^2$$

Y expresándola en términos de potencia obtenemos la **Ecuación 48**:

$$P_{\text{rotor}} = P_{\text{útil}} = Cp \frac{1}{2} \rho S v_1^3 = N \rho c v_1^2 \cdot R_{\text{rotor}}^2 \cdot \omega_{\text{rotor}} \quad (48)$$

Despejando la velocidad angular y lineal en el rotor (ω_{rotor} y v_{rotor}) obtenemos las **Ecuaciones 49**:

$$\omega_{\text{rotor}} = \frac{CpS}{2NcR_{\text{rotor}}^2} v_1 \quad (49.1)$$

$$v_{\text{rotor}} = \frac{CpS}{2NcR_{\text{rotor}}} v_1 \quad (49.2)$$

A partir de estas expresiones podemos obtener la velocidad de rotación que presentará nuestro rotor a una determinada velocidad de viento recibida. Dicha velocidad de rotación, como ya se comentó y se puede observar es inversamente proporcional con la Solidez de la superficie del rotor interpuesta, y directamente con el coeficiente de potencia del mismo. Este análisis será relevante para posteriores optimizaciones del funcionamiento.

Adicionalmente, el efecto del momento de inercia del rotor (I) viene representado en la **Ecuación 43** a partir de la cual se puede evaluar la velocidad de viento necesaria para el arranque del sistema en función de su momento de inercia:

$$E_{c,rotación} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n m_i r_i^2 \cdot \omega_{rotor}^2 = N \rho c v_1^2 \cdot R_{rotor}^2 \quad (43)$$

Una vez conocida la velocidad de rotación que presentará nuestro rotor en función de sus parámetros de diseño (N , C_p , c , R_{rotor} , I) y de funcionamiento ($\rho(T)$, v_1), podemos aplicar la velocidad de rotación obtenida a las expresiones para el cálculo de los parámetros eléctricos vía tibolectricidad que se obtendrían.

Partiendo de las expresiones del epígrafe anterior para el funcionamiento de un *TENG de disposición longitudinal* y aplicándoles las consideraciones pertinentes, podemos obtener que:

$$V_{oc}(x) = \frac{\sigma x d_d}{\epsilon_d (l - x)} \quad (46)$$

Para la obtención de **Voc,max = Voc(l)**, pero para evitar el efecto borde y la tendencia asintótica de la **Ecuación 46** aplicamos la consideración de x_{max} y obtenemos la **Expresión 46'**:

$$V_{oc,max} = \frac{\sigma x_{max} d_d}{\epsilon_d (l - x_{max})} = \frac{\sigma d_d}{\epsilon_d} \cdot \frac{0,8l}{0,2l} = 4 \frac{\sigma d_d}{\epsilon_d} \quad (46')$$

Por otro lado, hablando de la *Corriente de cortocircuito (Isc)*:

$$I_{SC}(f_{CA}) = \sigma \omega l_{total} f_{CA} \quad (11)$$

Siendo:

$$f_{CA} = f_{rotación} N_{CTP} = \frac{\omega_{rotación}}{2\pi} \cdot N_{CTP} = \frac{v_{rotación}}{2\pi R} \cdot N_{CTP}$$

Por tanto, obtenemos la **Expresión 50** para definir la *frecuencia de extracción de corriente alterna por el dispositivo* (f_{CA}) y la **Expresión 51** para definir la *frecuencia de rotación del rotor* (f_{rotor}):

$$f_{CA} = \frac{Cp \cdot S \cdot N_{CTP}}{4\pi NcR_{rotor}^2} v_1 \quad (50)$$

$$f_{rotación} = \frac{Cp \cdot S}{4\pi NcR_{rotor}^2} v_1 \quad (51)$$

Sustituyendo en la **Ecuación 11**:

$$I_{SC} = \sigma \omega l_{total,contacto} \cdot \frac{Cp \cdot S \cdot N_{CTP}}{4\pi NcR_{rotor}^2} v_1 \quad (52)$$

Siendo:

$l_{total,contacto} \cdot N_{CTP}$ = Perímetro total de contacto triboeléctrico. Habitualmente la mitad del perímetro de contacto rotor-estator para permitir el desapareamiento total en los casos de *TENGs de disposición longitudinal*.

Las **Expresiones 50** y **51** serán de gran importancia para definir el resto de los parámetros de transducción mecánico-eléctrica de nuestro sistema, la cual realizaremos en función de las frecuencias rotacionales, dependientes a su vez de la velocidad el viento ($f = f(v_1)$).

Para determinar los parámetros operacionales de transducción de un sistema en funcionamiento y no en condiciones límite de Cortocircuito o Circuito abierto debemos partir de las **Expresiones 45.1, 45.2** y **45.3**:

MODELIZACIÓN TEÓRICA

$$Q = \sigma w x_{max} - (\sigma w x_{max} - Q_0) \exp \left[-\frac{d_d}{R w \varepsilon_d (l - x_{max})} \left(t - \frac{x_{max}}{v} \right) \right] \quad (45.1)$$

$$I = (\sigma w x_{max} - Q_0) \frac{d_d}{R \varepsilon_d w (l - x_{max})} \exp \left[-\frac{d_d}{R w \varepsilon_d (l - x_{max})} \left(t - \frac{x_{max}}{v} \right) \right] \quad (45.2)$$

$$V = I \cdot R = R (\sigma w x_{max} - Q_0) \frac{d_d}{R \varepsilon_d w (l - x_{max})} \exp \left[-\frac{d_d}{R w \varepsilon_d (l - x_{max})} \left(t - \frac{x_{max}}{v} \right) \right] \quad (45.3)$$

En estas expresiones, sustituyendo las consideraciones para x_{max} junto con el valor de la velocidad de rotación (v) atendiendo a la siguiente expresión:

$$v = v_{rotación} = 2\pi R_{rotor} \cdot f_{rotación} = \frac{Cp \cdot S}{2NcR_{rotor}} v_1$$

Obtendremos las **Expresiones 53.1, 53.2 y 53.3** que se muestran a continuación:

$$Q = \sigma w 0,8l - (\sigma w 0,8l - Q_0) \exp \left[-\frac{d_d}{R w \varepsilon_d 0,2l} \left(t - \frac{2NcR_{rotor} 0,8l}{Cp \cdot S \cdot v_1} \right) \right] \quad (53.1)$$

$$I = (\sigma w 0,8l - Q_0) \frac{d_d}{R \varepsilon_d w 0,2l} \exp \left[-\frac{d_d}{R w \varepsilon_d 0,2l} \left(t - \frac{2NcR_{rotor} 0,8l}{Cp \cdot S \cdot v_1} \right) \right] \quad (53.2)$$

$$V = I \cdot R = R (\sigma w 0,8l - Q_0) \frac{d_d}{R \varepsilon_d w 0,2l} \exp \left[-\frac{d_d}{R w \varepsilon_d 0,2l} \left(t - \frac{2NcR_{rotor} 0,8l}{Cp \cdot S \cdot v_1} \right) \right] \quad (53.3)$$

Adicionalmente se considerará que la variable del tiempo para los casos de operación es el suficiente como para permitir el contacto y deslizamiento completo de los contactos triboeléctricos, o lo que es lo mismo:

$$t = \frac{l}{v_{rotor}}$$

Por tanto:



MODELIZACIÓN TEÓRICA

$$t - \frac{x_{max}}{v_{rotor}} = \frac{l}{v_{rotor}} - \frac{x_{max}}{v_{rotor}} = \frac{l - x_{max}}{v_{rotor}} = \frac{0,2l}{v_{rotor}}$$

Sustituyendo:

$$Q = \sigma w 0,8l - (\sigma w 0,8l - Q_0) \exp \left[-\frac{d_d}{Rw\epsilon_d} \left(\frac{2NcR_{rotor}}{Cp \cdot S \cdot v_1} \right) \right]$$

$$I = (\sigma w 0,8l - Q_0) \frac{d_d}{R\epsilon_d w 0,2l} \exp \left[-\frac{d_d}{Rw\epsilon_d} \left(\frac{2NcR_{rotor}}{Cp \cdot S \cdot v_1} \right) \right]$$

$$V = I \cdot R = R(\sigma w 0,8l - Q_0) \frac{d_d}{R\epsilon_d w 0,2l} \exp \left[-\frac{d_d}{Rw\epsilon_d} \left(\frac{2NcR_{rotor}}{Cp \cdot S \cdot v_1} \right) \right]$$

Todas estas expresiones permitirán definir, de forma aproximada, el comportamiento de nuestro sistema atendiendo a sus parámetros operacionales y de diseño considerados. Como ya se mencionó con anterioridad, para el caso de los *TENGs de disposición radial* se deben modificar ciertas variables por su expresión en función radial y otras serán completamente diferentes atendiendo a su planteamiento y resolución de ecuación diferencial.



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Tal y como se introdujo con anterioridad en el primer capítulo del presente trabajo, la triboelectricidad combinada con la nanotecnología dispone de las características para representar un hito en el campo de las Energías Renovables y los sistemas de transducción energética mecánico-eléctrica. En la actualidad, multitud de artículos acerca de novedosos desarrollos tecnológicos posibles se basan en esta y otras propiedades de diferentes materiales y pares de estos, tales como la piezo- y piroelectricidad. Algunos de estos aprovechan el movimiento de las personas aplicados a un pavimento triboeléctrico o en fibras triboeléctricas aplicadas a la ropa, las cuales generan la transducción con el contacto o interacción con el viento.

Las posibilidades que estas tecnologías presentan son bastante elevadas en un mundo con una clara tendencia a la descarbonización vía electrificación o mediante la aplicación del vector hidrógeno, de origen renovable, especialmente por vía electrolítica, en los campos no electrificables tales como la industria o el transporte pesado. La hibridación de sistemas que aprovechen e incrementen el nivel de eficiencia energética y reducir el *Coste Nivelado de la Energía* (*Levelized Cost Of Energy = LCOE*) o del hidrógeno, en sistemas aplicados al mismo (*Levelized Cost Of Hydrogen = LCOH*), la valoración de costes por potencia y energías producto de nuestros sistemas corresponderían uno de los principales intereses acerca de los mismos.

Al respecto de los diseños, se han planteado 3 posibles alternativas: *TENG de disposición longitudinal*, *TENG de disposición radial* y una combinación de ambos en un *cilindro tribo-generador* la cual incluye de base el sistema de encapsulamiento ante las inclemencias ambientales y un elevado potencial. Todos estos dispositivos están pensados para ser aplicados para la recolección energética en flujos de fluidos. En un inicio se ha modelado de acuerdo a un sistema de aprovechamiento de energía eólica de pequeña escala, pero esto no tendría por qué ser excluyente, y existen multitud de alternativas de flujos de fluidos en los que se pueda considerar la reducción de velocidad y depresión consecuente para la transducción energética. Algunas alternativas podrían ser las de la aplicación a sistema de energía azul, carga de EV en movimiento a costa de una menor aerodinámica de los mismos por mantenimiento de la calandra de los de Motor térmico, entre otras.

Existen multitud de posibles optimizaciones aplicables para el sistema, algunas de ellas son, por ejemplo:

- **Aplicación del un Multiplicador de Velocidades/Variador de Frecuencia:** Con el objetivo de maximizar la velocidad de rotación al máximo admisibles por el mismo, incrementando así notablemente la transducción energética.
 - Superficies contra viento/flujo en los planos no axiales de rotación, originando un **efecto veleta** que nos permita la interacción perpendicular entre el flujo y la superficie del rotor.
 - Empleo de sistemas de transducción electromagnética más eficientes tales como los sistemas de reluctancia, entre otros...
-



CONCLUSIONES

Dada la limitación en el alcance que este TFM ha tenido en consideración a la gran cantidad de alternativas y posibilidad que estos sistemas ofrecen se puede enmarcar que su finalidad ha sido la de establecer un Anteproyecto con su consecuente Ingeniería Conceptual. Se han abordado con bastante detalle aspectos como el modelado teórico y la revisión del estado del arte. Los siguientes pasos lógicos deberían ser los de llevar a cabo una simulación, a partir del ensayo empírico de los pares triboeléctricos considerados y sus correspondientes estudios de viabilidad. De esta manera se podría valorar si dicho desarrollo tecnológico presenta el interés para abordar las fases de Ingeniería Básica, con valoración de alternativas de aplicación e hibridación y de detalle. En estas últimas fases se abordarían las optimizaciones necesarias en términos de diseño mecánico del rotor y sus parámetros de funcionamiento, contactos, materiales, sistema de regulación y control.



REFERENCIAS

- [1] S. Pan, Z. Zhang. "Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review", (2019), *Friction*, **7**
 - [2] Harvard University. "Triboelectric Effects", (2019), *Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations*
 - [3] H. Zou, Y. Zhang, L. Guo, P. Wang, X. He, G. Dai, H. Zheng, C. Chen, A.C Wang, C. Xu, Z.L Wang. "Quantifying the triboelectric series", (2019), *nature COMMUNICATIONS*
 - [4] L. b. Huang, W. Xu, G. Bai, M.C. Wong, Z. Yang, J. Hao. "Wind energy and blue energy harvesting based on magnetic-assisted noncontact triboelectric nanogenerator" (2016), *Nano Energy*, **30**
 - [5] P. Bai, G. Zhu, Y. Liu, J. Chen, Q. Jing, W. Yang, J. Ma, G. Zhang, Z. L. Wang. "Cylindrical Rotating Triboelectric Nanogenerator". (2013). *ACSNano*, **7**.
 - [6] Y. Zi, L. Lin, J. Wang, S. Wang, J. Chen, X. Fan, P-K. Yang, F. Yi, Z.L. Wang. "Triboelectric-Pyroelectric-Piezoelectric Hybrid Cell for High-Efficiency Energy-Harvesting and Self-Powered Sensing" (2015), *Advanced Materials*.
 - [7] G. Zhu, Y. S. Zhou, P. Bai, X. S. Meng, Q. Jing, J. Chen, Z.L. Wang. "A Shape-Adaptive Thin-Film-Based Approach for 50% High-Efficiency Energy Generation Through Micro-Grating Sliding Electrification" (2014), *Advanced Materials*, **26**.
 - [8] S. Niu, Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y. S. Zhou, Y. Hu, Z. L. Wang. "Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators". (2013). *Advanced Materials*. **25**.
 - [9] J. Stoer, R. Bulirsch. (2002). *Introduction to numerical analysis*. Springer, New York.
 - [10] S. Niu, S. Wang, L. Lin, Y. Liu, Y. S. Zhou, Y. Hu, Z. L. Wang. "Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source". (2013). *Energy Environ*. **6**.
 - [11] G. Zhu, J. Chen, Y. Liu, P. Bai, Y. S. Zhou, Q. Jing, C. Pan, Z. L. Wang. "Linear – Grating triboelectric generator based on sliding electrification". (2013). *Nano Lett*. **13**.
 - [12] G. Zhu, J. Chen, T. Zhang, Q. Jing, Z. L. Wang. "Radial-arrayed rotary electrification for high performance triboelectric generator". (2014). *Nature COMMUNICATIONS*.
 - [13] R. Cao, T. Zhou, B. Wang, Y. Yin, Z. Yuan, C. Li, Z. L. Wang. "Rotating – Sleeve Triboelectric – Electromagnetic hybrid Nanogenerator for high efficiency of harvesting mechanical energy". (2017). *ACSNano*. **11**.
 - [14] C. Zhang, W. Tang, C. Han, F. Fan, Z. L. Wang. "Theoretical Comparison, Equivalent Transformation, and Conjunction Operations of Electromagnetic Induction Generator and Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Mechanical Energy". (2014). *Advanced Materials*. **26**.
 - [15] C. A. Ramirez, A. J. Saavedra-Montes. "Parameter Calculation of a Small Wind Turbine Model". (2012). *IEEE*.
-



REFERENCIAS

- [16] R. A. Bastianon. (2008). *Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas*.
 - [17] M. Suau de Castro. (2014). *Diseño y construcción de una mini-turbina eólica*. Universidad Politécnica de Madrid.
 - [18] P. Hammond. (1997). *Electromagnetism for Engineers. An Introductory Course*. Oxford University Press.
 - [19] M. Ohoring. (1995). *Engineering Materials Science*. Academic Press.
 - [20] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi. (1981). *Wind Energy Handbook*. Wiley.
 - [21] R.E. Wilson, P.B.S. Lissaman, S.N. Walker. (1979). "Aerodynamic Performance of Wind Turbines". Oregon State University.
-