

Análisis de Viabilidad de Diodos Orgánicos Emisores de Luz como Recolectores de Energía de Radiofrecuencia: Una Investigación Teórica

Sección 1: Introducción a la Dualidad Funcional de los Dispositivos Optoelectrónicos Orgánicos

1.1 El Paradigma de los Materiales Multifuncionales

El avance de la ciencia de los materiales se caracteriza no solo por el descubrimiento de nuevos compuestos, sino también por la exploración de funcionalidades secundarias en tecnologías existentes. Los dispositivos, diseñados con un propósito primario, a menudo poseen propiedades latentes que pueden ser explotadas en aplicaciones novedosas e imprevistas. Este informe se enmarca en dicha exploración, investigando la viabilidad teórica de reutilizar los Diodos Orgánicos Emisores de Luz (OLED), el pilar de la tecnología de pantallas modernas, para una función radicalmente diferente: la captación y conversión de energía ambiental de radiofrecuencia (RF).

1.2 OLEDs como Emisores y Fotodetectores: Una Dualidad Establecida

La premisa de que un dispositivo OLED pueda absorber energía electromagnética no es del todo especulativa; se fundamenta en una dualidad funcional ya establecida en la literatura científica.

1.2.1 Función Primaria: Electroluminiscencia

La función principal y bien conocida de un OLED es la electroluminiscencia, un proceso mediante el cual la energía eléctrica se convierte directamente en luz visible. En su modo de operación estándar, se aplica una corriente eléctrica a través de una pila de delgadas capas orgánicas semiconductoras intercaladas entre dos electrodos. Esta corriente induce la inyección de portadores de carga (electrones y huecos) que se recombinan en una capa emisiva, liberando energía en forma de fotones.¹ Esta capacidad de generar luz de alta calidad con bajo consumo de energía ha posicionado a los OLED como una tecnología dominante en pantallas para dispositivos electrónicos, desde teléfonos inteligentes hasta televisores de gran formato.

1.2.2 Función Secundaria: Fotodetección

Menos conocida, pero igualmente demostrada, es la capacidad de los OLED para operar en un modo inverso como fotodetectores orgánicos (OPD). En esta configuración, el dispositivo no emite luz, sino que la absorbe. Cuando fotones con energía suficiente inciden sobre las capas orgánicas, pueden generar pares de portadores de carga (excitones), que luego son disociados y recolectados en los electrodos, produciendo una fotocorriente medible.³ Esta funcionalidad de fotodetección establece un precedente crítico: la estructura fundamental de un OLED es intrínsecamente capaz de absorber energía electromagnética del espectro visible y convertirla en energía eléctrica. Esta dualidad inherente sirve como punto de partida lógico para la hipótesis central de este informe.

1.3 La Frontera de la Recolección de Energía de RF Ambiental

Paralelamente a los avances en optoelectrónica, ha surgido un campo de investigación centrado en la recolección de energía de fuentes ambientales, conocido como *energy harvesting*. Una de sus subdisciplinas más activas es la recolección de energía de radiofrecuencia (RF), que busca capturar la energía de las ondas de radio omnipresentes emitidas por fuentes como redes WiFi, estaciones base de telefonía móvil (GSM) y transmisiones de televisión.⁵

El dispositivo central para esta tarea es la **rectena** (del inglés *rectifying antenna*), un sistema que consta de dos componentes fundamentales: una antena, que intercepta las ondas electromagnéticas y las convierte en una corriente alterna (CA) de alta frecuencia, y un circuito rectificador, que convierte esa CA en una corriente continua (CC) utilizable para alimentar circuitos de bajo consumo o cargar dispositivos de almacenamiento de energía.⁷

1.4 Hipótesis Central y Estructura del Informe

La pregunta fundamental que impulsa esta investigación, derivada de la consulta del usuario, es la siguiente: ¿Puede la capacidad demostrada de los OLED para absorber energía electromagnética (fotones de luz visible) extenderse para capturar y convertir eficientemente la energía de fotones de radiofrecuencia de mucha menor energía, como los emitidos por las redes WiFi?

Este informe abordará esta cuestión mediante un análisis riguroso y multifacético. Primero, se establecerán los principios físicos fundamentales que gobiernan la interacción luz-materia en los semiconductores orgánicos y la tecnología de rectenas de RF. A continuación, se evaluará críticamente la viabilidad teórica y práctica de un sistema de rectena basado en OLED, considerando las limitaciones impuestas tanto por la mecánica cuántica como por la física de dispositivos clásica. Finalmente, se presentarán conclusiones sobre la factibilidad del concepto y se propondrán direcciones de investigación alternativas pero relacionadas que surgen de este análisis.

Sección 2: Principios Cuánticos de la Interacción Luz-Materia en Semiconductores Orgánicos

Para evaluar la posibilidad de que un OLED absorba energía de RF, es imperativo comprender primero los mecanismos cuánticos que gobiernan tanto la emisión como la absorción de luz en estos materiales. Estos procesos están intrínsecamente ligados a la estructura electrónica de los semiconductores orgánicos y a la energía de los fotones implicados.

2.1 El Proceso Electroluminiscente en OLEDs (Emisión)

La emisión de luz en un OLED es un sofisticado proceso de múltiples etapas que se basa en una arquitectura de capas delgadas.

- **Arquitectura del Dispositivo:** Un OLED típico se construye sobre un sustrato (generalmente vidrio o plástico flexible) y consiste en un ánodo transparente, comúnmente de óxido de indio y estaño (ITO), seguido de una capa de transporte de huecos (HTL), una capa emisiva (EML), una capa de transporte de electrones (ETL) y, finalmente, un cátodo metálico (como aluminio o plata).¹
- **Inyección y Transporte de Portadores:** Al aplicar un voltaje en polarización directa, el ánodo inyecta "huecos" (portadores de carga positiva) en la HTL, mientras que el cátodo inyecta electrones (portadores de carga negativa) en la ETL. Guiados por el campo eléctrico, estos portadores migran a través de sus respectivas capas hacia la EML.¹

- **Formación de Excitones y Recombinación Radiativa:** Dentro de la EML, un electrón y un hueco se encuentran y, debido a su atracción coulombiana, forman un estado ligado llamado **excitón**. Un excitón es una cuasipartícula eléctricamente neutra. El proceso de emisión de luz ocurre cuando este excitón decae de forma radiativa, lo que significa que su energía se libera en forma de un fotón. La energía de este fotón, y por lo tanto el color de la luz emitida, está determinada por la brecha energética (bandgap) del material orgánico en la EML.⁹ Este proceso es fundamentalmente un fenómeno cuántico, donde la energía eléctrica se convierte eficientemente en energía lumínica.

2.2 El Proceso Fotovoltaico en Fotodiodos Orgánicos (Absorción)

El funcionamiento de un OLED como fotodetector es esencialmente el proceso inverso de la electroluminiscencia.

- **Absorción de Fotones y Generación de Excitones:** El proceso comienza cuando un fotón incidente, con una energía igual o superior a la del bandgap del material orgánico, es absorbido. Esta absorción de energía excita un electrón desde el orbital molecular ocupado más alto (HOMO) al orbital molecular desocupado más bajo (LUMO), creando un excitón.¹¹
- **Disociación de Excitones:** A diferencia de los semiconductores inorgánicos, los excitones en los materiales orgánicos están fuertemente ligados (con energías de enlace de ~0.3-0.5 eV) y no se separan espontáneamente en portadores de carga libres.¹² Para que se genere una fotocorriente, el excitón debe difundirse hasta una interfaz entre dos materiales con diferentes afinidades electrónicas (una heterounión donante-aceptor). En esta interfaz, el gradiente de energía es suficiente para disociar el excitón en un electrón y un hueco libres.¹²
- **Recolección de Carga:** Una vez liberados, los electrones y los huecos son transportados hacia los electrodos opuestos por el campo eléctrico interno del dispositivo (o un campo aplicado externamente en polarización inversa), generando así una fotocorriente medible. Este es el principio operativo de las células solares orgánicas y los fotodetectores.⁴

2.3 El Desajuste Energético Fundamental: Una Barrera Crítica

La viabilidad de que un OLED absorba energía de RF depende de una comparación directa entre la energía de un fotón de RF y la energía necesaria para iniciar el proceso fotovoltaico en el material orgánico. Esta comparación se realiza utilizando la relación de Planck-Einstein, $E=hf$, donde E es la energía del fotón, h es la constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$), y f es la frecuencia de la radiación.¹⁴

- **Energía de Fotones de Luz Visible:** Un OLED verde típico emite luz con una longitud de onda (λ) de aproximadamente 550 nm. La frecuencia correspondiente es $f=c/\lambda$, donde c es la velocidad de la luz. La energía de este fotón es de aproximadamente 2.25 eV.
- **Energía de Fotones de RF (WiFi):** Una señal WiFi opera a frecuencias de 2.4 GHz o 5 GHz.
 - Para 2.4 GHz (2.4×10^9 Hz), la energía del fotón es de aproximadamente 9.9×10^{-6} eV, o 9.9 microelectronvoltios (μeV).
 - Para 5 GHz (5×10^9 Hz), la energía del fotón es de aproximadamente 2.07×10^{-5} eV, o 20.7 μeV .

Al comparar estas energías, se revela una disparidad abrumadora: la energía de un fotón de luz visible es más de 227,000 veces mayor que la de un fotón WiFi de 2.4 GHz.

Esta diferencia monumental conduce a una conclusión física ineludible. El mecanismo de absorción fundamental en los semiconductores orgánicos es la creación de un excitón, un proceso que requiere una transición electrónica a través del bandgap del material. Este bandgap, para materiales que operan en el espectro visible, es típicamente del orden de 2 a 3 eV. La energía de un fotón de RF, del orden de microelectronvoltios, es cinco a seis órdenes de magnitud insuficiente para inducir esta transición electrónica. Fenómenos como la absorción de dos fotones, aunque teóricamente posibles, requieren densidades de potencia extremadamente altas que no se encuentran en las señales de RF ambientales, haciéndolos irrelevantes para esta aplicación.

Por lo tanto, se puede afirmar con un alto grado de certeza física que **la absorción cuántica directa de fotones de RF individuales por las capas de semiconductores orgánicos en un OLED para generar excitones y, consecuentemente, una corriente eléctrica, es un proceso físicamente imposible**. Este hallazgo refuta de manera concluyente una de las posibles interpretaciones de la consulta del usuario y redirige el análisis hacia un marco clásico.

Tipo de Radiación	Frecuencia / Longitud de Onda	Energía del Fotón (eV)
Luz Ultravioleta (UVC)	254 nm	4.88
Luz Azul	470 nm	2.64
Luz Verde	550 nm	2.25
Luz Roja	650 nm	1.91
WiFi	2.4 GHz	9.9×10^{-6}
WiFi	5.0 GHz	2.07×10^{-5}
Comparación	Bandgap Típico de Semiconductor Orgánico	2.0 - 3.0

Tabla 1: Análisis comparativo de las energías de fotones a través del espectro electromagnético en relación con la brecha energética típica de los materiales semiconductores orgánicos utilizados en los OLED. La tabla ilustra la insuperable brecha energética entre los fotones de RF y la energía de excitación requerida.

Sección 3: El Entorno de Radiofrecuencia y la Tecnología de Rectenas

Habiendo descartado el mecanismo de absorción cuántica directa, la investigación debe reorientarse para evaluar si la estructura física de un OLED puede funcionar como los componentes de una rectena clásica. Este enfoque requiere una comprensión realista de la cantidad de energía de RF disponible en el ambiente y de los principios de funcionamiento de los dispositivos de recolección de energía.

3.1 Caracterización del Paisaje Energético de RF Ambiental

La viabilidad de cualquier sistema de recolección de energía depende fundamentalmente de la densidad de potencia de la fuente. Múltiples estudios han medido las densidades de potencia de RF en entornos urbanos y residenciales, y los resultados son consistentemente bajos.

- **Densidades de Potencia Medidas:** Las mediciones indican que las señales de WiFi (WLAN) presentan niveles de densidad de potencia particularmente bajos, a menudo en el rango de $0.1\mu\text{W}/\text{m}^2$ a $1.0\mu\text{W}/\text{m}^2$.¹⁶ Las bandas de telefonía móvil, como GSM y LTE, suelen ser las fuentes más potentes, pero incluso en áreas urbanas densas, los niveles de potencia promedio capturados rara vez superan los -35 dBm , lo que corresponde a densidades de potencia del orden de cientos de nanowatts a unos pocos microwatts por metro cuadrado (nW/m^2 a $\mu\text{W}/\text{m}^2$).¹⁸
- **Implicaciones para la Recolección:** Estos valores extremadamente bajos significan que cualquier dispositivo de recolección debe ser excepcionalmente eficiente para capturar una cantidad de energía mínimamente útil. La naturaleza difusa y fluctuante de estas señales agrava aún más el desafío.

Fuente de RF	Distancia a la Fuente	Densidad de Potencia Medida ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	Referencia
GSM-900	25 m - 100 m	100 - 1000	¹⁷
GSM-1800	25 m - 100 m	300 - 3000	¹⁷
WiFi (WLAN)	Ambiente interior	< 10	¹⁷
Varias (Urbano)	Ambiente	0.001 - 35.5	¹⁸
Celular (GSM/LTE)	Urbano (Montreal)	~0.3 (promedio)	¹⁹

Tabla 2: Compilación de densidades de potencia de RF ambiental medidas en varios estudios. Estos datos establecen un límite superior realista para la energía de entrada disponible para

un hipotético dispositivo de recolección basado en OLED.

3.2 La Rectena: Arquitectura y Principios de Operación

El análisis de la consulta del usuario debe ahora ser reformulado desde una perspectiva de la ingeniería electromagnética clásica. Una rectena no es un dispositivo cuántico; su funcionamiento se basa en la interacción de ondas electromagnéticas con conductores y circuitos no lineales.

- **Componentes del Sistema:**

1. **Antena:** Es un transductor pasivo, típicamente hecho de un material altamente conductor como el cobre. Su geometría está diseñada para resonar a una frecuencia específica (por ejemplo, 2.4 GHz). Su función es interceptar las ondas electromagnéticas que se propagan y convertir su energía en una corriente alterna (CA) oscilante en los terminales de la antena.⁵ La eficiencia de una antena se caracteriza por su ganancia y su adaptación de impedancia.
2. **Rectificador:** Es un componente electrónico no lineal, cuya función es convertir la CA de alta frecuencia capturada por la antena en una corriente continua (CC) utilizable. En aplicaciones de muy baja potencia, el componente de elección es el diodo Schottky, debido a su bajo voltaje de umbral y su rápida velocidad de conmutación.²²

Este cambio de perspectiva es fundamental. La pregunta ya no es si los materiales orgánicos pueden *absorber fotones* de RF, sino si la *estructura física* de un OLED puede ser diseñada para funcionar como una *antena clásica* y un *rectificador clásico*.

3.3 Rendimiento y Limitaciones de la Rectificación de Baja Potencia

La eficiencia de conversión de potencia (PCE, por sus siglas en inglés) de una rectena, definida como la relación entre la potencia de CC de salida y la potencia de RF de entrada, es el parámetro de rendimiento más crítico.

- **El Desafío de la Baja Potencia:** La PCE es fuertemente dependiente de la potencia de entrada. Para rectenas optimizadas que reciben potencias de entrada relativamente altas (superiores a 0 dBm o 1 mW), se han reportado eficiencias superiores al 80%.²⁴ Sin embargo, en el régimen de potencias ambientales (típicamente por debajo de -20 dBm o 10 μ W), la PCE se desploma drásticamente. Las eficiencias en este rango suelen ser inferiores al 20% y pueden caer por debajo del 1% en condiciones de muy baja potencia.²²
- **Limitaciones del Diodo:** El rendimiento a baja potencia está limitado por las características intrínsecas del diodo rectificador. La señal de CA inducida en la antena

por las ondas de RF ambientales puede tener una amplitud de solo unos pocos milivoltios. Si este voltaje es inferior al voltaje de umbral del diodo, no se producirá una rectificación eficiente, y la mayor parte de la energía capturada se disipará.²⁵

Tipo de Rectena	Frecuencia (GHz)	Potencia de Entrada (dBm)	PCE (%)	Voltaje de Salida (V)	Referencia
Diodo Schottky	2.45	0	83	-	²²
Diodo Schottky	2.45	-20	33.3	-	²²
Diodo Schottky	2.4/5.8	3	>60	3.71	²⁶
Diodo Schottky	2.4	-10	>40	-	²⁵
Diodo Schottky	2.4/5.0	-12	>40	1.57 @ 0 dBm	²⁷

Tabla 3: Rendimiento de varios sistemas de rectena de baja potencia reportados en la literatura. Estos valores sirven como un punto de referencia crucial para evaluar la viabilidad de cualquier sistema propuesto basado en OLED.

Sección 4: Modelos Teóricos para un Recolector de Energía de RF Basado en OLED

Con base en los principios físicos establecidos, ahora se pueden proponer y evaluar modelos teóricos para un dispositivo OLED que funcione como recolector de energía de RF.

4.1 Modelo A: El OLED como Transductor Cuántico (Revisado y Descartado)

Este modelo, que postula la absorción directa de fotones de RF para generar excitones, se descarta formalmente. Como se demostró en la Sección 2.3, la energía de un fotón de WiFi es aproximadamente cinco órdenes de magnitud inferior a la energía del bandgap de los semiconductores orgánicos típicos. Por lo tanto, este mecanismo es físicamente inviable y no puede contribuir a la recolección de energía.

4.2 Modelo B: La Estructura OLED como Antena de Resonador Dieléctrico

Este modelo considera la posibilidad de que la estructura física del OLED actúe como una antena. En esta configuración, las capas conductoras (el ánodo de ITO y el cátodo metálico)

funcionarían como los elementos radiantes, mientras que el conjunto de capas orgánicas actuaría como el sustrato dieléctrico sobre el que se construye la antena.

- **Análisis de Propiedades de Materiales:**
 - **Conductividad de los Electrodo:** Las antenas de RF convencionales utilizan cobre, un material con una resistividad extremadamente baja (aproximadamente $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$). En cambio, el ITO, el material estándar para el ánodo transparente de los OLED, tiene una resistividad mucho mayor, típicamente del orden de 10^{-6} a $10^{-5} \Omega \cdot m$. El cátodo metálico (p. ej., aluminio o plata) tiene una conductividad mejor, pero la resistencia total de la estructura de la antena estaría dominada por el ITO. Esta alta resistencia intrínseca resultaría en pérdidas óhmicas significativas, disipando una gran parte de la energía de RF capturada en forma de calor antes de que pueda ser transferida al circuito rectificador.
 - **Pérdidas Dieléctricas:** Los materiales orgánicos que componen las capas activas del OLED, aunque funcionan como dieléctricos, no son perfectos. A frecuencias de gigahercios (GHz), estos materiales exhiben una tangente de pérdidas no nula, lo que significa que también disiparán una fracción de la energía del campo electromagnético en forma de calor.
- **Conclusión del Modelo B:** Aunque es teóricamente posible diseñar las dimensiones de los electrodos de un OLED para que resuenen en las bandas de 2.4 GHz o 5 GHz, las propiedades inherentes de los materiales utilizados (alta resistividad del ITO y pérdidas dieléctricas en las capas orgánicas) la convertirían en una antena extremadamente ineficiente en comparación con una simple antena de dipolo de cobre.

4.3 Modelo C: El OLED como Rectificador

Este es el modelo más plausible desde el punto de vista físico, aunque también presenta desafíos significativos. Este enfoque investiga si la unión p-n del semiconductor orgánico dentro del OLED puede realizar la función de rectificación, reemplazando al diodo Schottky de un sistema de rectena convencional. La rectificación se basa en la característica de corriente-voltaje (I-V) no lineal de un diodo.

- **Análisis de las Características I-V del OLED:**
 - Los OLED son, por su naturaleza, diodos y, por lo tanto, exhiben una curva I-V no lineal, lo cual es un requisito previo para la rectificación.¹
 - Sin embargo, estos dispositivos están optimizados para operar con una alta polarización directa (típicamente >2 V) para permitir una inyección de portadores eficiente y la consiguiente emisión de luz.²⁹ En la recolección de energía de RF, el dispositivo opera cerca de una polarización cero, con voltajes de CA inducidos por la antena que son extremadamente pequeños, a menudo en el rango de milivoltios (mV) o incluso microvoltios (μV). A estos niveles de voltaje tan bajos, la

unión del OLED permanecería en su estado de alta resistencia ("apagado"), impidiendo un flujo de corriente significativo y, por lo tanto, una rectificación eficiente.

- **Movilidad de Portadores de Carga:** Una limitación fundamental de los semiconductores orgánicos es su baja movilidad de portadores de carga en comparación con los semiconductores inorgánicos como el silicio o el arseniuro de galio. A las altas frecuencias de las señales WiFi (GHz), los electrones y huecos en las capas orgánicas no podrían responder con la suficiente rapidez a las oscilaciones del campo eléctrico. Esto daría como resultado una eficiencia de rectificación extremadamente pobre, ya que el dispositivo no podría "seguir" el ciclo de la onda de CA.

La combinación de estos factores conduce a una conclusión crítica. El modelo más viable requiere que el OLED funcione simultáneamente como antena y rectificador. Sin embargo, como antena, sus materiales son intrínsecamente resistivos y con pérdidas. Como rectificador, su física de dispositivo está fundamentalmente desajustada para las condiciones de operación de la recolección de energía ambiental (alto voltaje de encendido frente a una señal de RF diminuta; baja movilidad de portadores frente a alta frecuencia). Esta combinación de una antena de baja eficiencia con un rectificador de muy baja eficiencia, alimentada por una densidad de potencia de entrada extremadamente baja, crea una **cascada de ineficiencias**. El resultado inevitable es que la eficiencia de conversión de potencia (PCE) de extremo a extremo de una hipotética rectena OLED sería infinitesimal, probablemente varios órdenes de magnitud inferior a las ya bajas eficiencias de las rectenas dedicadas de baja potencia.

Sección 5: Desafíos de Implementación y Evaluación de la Viabilidad Práctica

La evaluación final de la propuesta debe sintetizar las barreras teóricas y de ingeniería identificadas, culminando en una proyección cuantitativa de la potencia de salida esperada.

5.1 La Barrera del Desajuste Energético

Se reitera la conclusión fundamental de la Sección 2: la absorción directa de fotones de RF para la generación de excitones está prohibida por las leyes de la mecánica cuántica. La energía de un fotón de WiFi es insuficiente por un factor de más de 100,000 para superar la brecha energética electrónica de los materiales orgánicos utilizados en los OLED. Esta es una limitación insuperable de naturaleza cuántica.

5.2 La Barrera de la Cascada de Ineficiencias

Se resume la conclusión de la Sección 4: el uso de la estructura OLED como una rectena clásica se enfrenta a limitaciones de ingeniería insuperables. La combinación de una antena de alta pérdida (debido a la resistividad del ITO y las pérdidas dieléctricas) y un rectificador de muy baja eficiencia (debido al alto voltaje de encendido y la baja movilidad de portadores) da como resultado un sistema con una eficiencia de conversión de potencia global prácticamente nula.

5.3 Proyecciones de Potencia de Salida

Para cuantificar la inviabilidad práctica, se puede realizar un cálculo de orden de magnitud:

1. **Potencia de RF de Entrada:** Se asume una densidad de potencia de RF ambiental optimista, basada en los datos de la Tabla 2, de $1\mu\text{W}/\text{m}^2$.
 2. **Área de Captura:** Se considera un dispositivo del tamaño de una pantalla de teléfono inteligente, con un área de aproximadamente 100cm^2 (0.01m^2). La potencia de RF total interceptada por esta área sería de $1\mu\text{W}/\text{m}^2 \times 0.01\text{m}^2 = 10\text{nW}$ (nanowatts).
 3. **Eficiencia de la Antena:** Se asume una eficiencia muy generosa del 1% para la antena basada en OLED, considerando las pérdidas óhmicas y dieléctricas. La potencia de CA entregada al rectificador sería de $10\text{nW} \times 0.01 = 100\text{pW}$ (picowatts).
 4. **Eficiencia del Rectificador (PCE):** A un nivel de potencia de entrada de 100pW (o -70dBm), la PCE de cualquier rectificador, y especialmente uno basado en una unión orgánica lenta, sería extremadamente baja. Asumiendo un valor muy optimista de 0.1%, la potencia de CC de salida sería de $100\text{pW} \times 0.001 = 0.1\text{pW}$.
- **Conclusión del Cálculo:** La potencia de salida proyectada para una rectena basada en OLED del tamaño de un teléfono inteligente sería del orden de **0.1 picowatts**. Esta cantidad de energía es varios órdenes de magnitud demasiado pequeña para alimentar incluso el componente electrónico de más bajo consumo, como un solo transistor en un circuito integrado moderno.

5.4 Integración con Almacenamiento de Energía

La etapa final en un sistema de recolección de energía es el almacenamiento de la energía capturada para su uso posterior. Los dispositivos de almacenamiento para aplicaciones de muy baja potencia suelen ser supercondensadores de película delgada.³⁰ Sin embargo, la viabilidad de esta integración se ve socavada por dos factores:

- **Tiempo de Carga:** Cargar un pequeño supercondensador (por ejemplo, de 1mF a 1V , que almacena 0.5mJ de energía) con una potencia de 0.1pW requeriría un tiempo de

carga del orden de 5×10^{15} segundos, lo que equivale a más de 150 millones de años.

- **Corriente de Fuga:** Todo dispositivo de almacenamiento de energía real tiene una corriente de fuga, a través de la cual la carga almacenada se disipa lentamente. Para los supercondensadores de película delgada, esta corriente de fuga, aunque pequeña, suele ser del orden de nanoamperios o, en el mejor de los casos, picoamperios.³² La corriente de carga generada por los 0.1 pW de potencia sería varios órdenes de magnitud inferior a la corriente de fuga del propio dispositivo de almacenamiento. En consecuencia, el supercondensador se descargaría más rápido de lo que podría cargarse, lo que significa que nunca acumularía una carga neta.

Este análisis final demuestra la imposibilidad práctica de la propuesta. La energía recolectada no solo es insuficiente para realizar un trabajo útil, sino que es incluso insuficiente para superar las pérdidas inherentes de los componentes de almacenamiento necesarios.

Sección 6: Conclusiones y Direcciones de Investigación Futuras

6.1 Síntesis de los Hallazgos

Este informe ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de la viabilidad de utilizar paneles OLED como recolectores de energía de radiofrecuencia. La investigación concluye que el concepto, aunque conceptualmente interesante, es inviable debido a barreras fundamentales tanto en el ámbito de la física cuántica como en el de la ingeniería de dispositivos.

- **Conclusión Cuántica:** El mecanismo de absorción de energía en los semiconductores orgánicos se basa en la generación de excitones, lo que requiere una energía que coincida con la brecha energética del material (típicamente >2 eV). La energía de los fotones de RF de las señales WiFi es más de cinco órdenes de magnitud inferior a este umbral. Por lo tanto, la absorción directa de fotones de RF para la conversión de energía está **físicamente prohibida**.
- **Conclusión de Ingeniería:** La reinterpretación del problema desde una perspectiva clásica, evaluando la estructura del OLED como una rectena, revela una **cascada de ineficiencias**. Los materiales constitutivos (ITO, semiconductores orgánicos) son inadecuados para funcionar como antenas de alta frecuencia y rectificadores de bajo voltaje. La combinación de una baja eficiencia de la antena, una eficiencia de rectificación casi nula a niveles de potencia ambiental y una densidad de potencia de entrada extremadamente baja da como resultado una potencia de salida proyectada en el rango de los picowatts, una cantidad insuficiente para cualquier aplicación práctica, incluido el almacenamiento de energía.

6.2 Recomendaciones para la Investigación Futura

Aunque la propuesta original no es factible, el análisis inspira varias direcciones de investigación alternativas y más prometedoras que se encuentran en la intersección de la electrónica orgánica y la recolección de energía:

1. **Desarrollo de Rectificadores Orgánicos Dedicados:** En lugar de intentar adaptar un dispositivo optimizado para la emisión de luz, la investigación debería centrarse en el diseño de nuevos materiales y arquitecturas de dispositivos semiconductores orgánicos específicamente para la rectificación de alta frecuencia y bajo voltaje. Superar los desafíos de la baja movilidad de portadores y los altos voltajes de umbral en materiales orgánicos podría abrir la puerta a rectenas verdaderamente flexibles y de bajo costo, aunque su aplicación probablemente se limitaría a escenarios de transferencia de energía inalámbrica de campo cercano y mayor potencia, en lugar de la recolección de energía ambiental.
2. **OLEDs como Indicadores Visuales de Campos de RF:** Una aplicación mucho más realista sería combinar una rectena de silicio altamente eficiente y optimizada con un micro-OLED de alta eficiencia. En este sistema híbrido, la rectena de silicio recolectaría la energía de RF (de fuentes más potentes que las ambientales, como un transmisor dedicado) y utilizaría la potencia de CC resultante para alimentar el micro-OLED. Esto crearía un indicador visual pasivo y sin batería que se ilumina en presencia de un campo de RF intenso. Este enfoque aprovecha cada tecnología para su función óptima: el silicio para la recolección de energía de RF de alta eficiencia y el OLED para la emisión de luz de bajo consumo.
3. **Sistemas Híbridos Óptico-RF:** La investigación podría explorar si los campos de RF intensos pueden modular las propiedades ópticas de una película delgada orgánica. Por ejemplo, se podría investigar el fenómeno de la electroabsorción, donde un campo eléctrico altera el coeficiente de absorción de un material.²⁸ Un sistema podría ser diseñado donde un OLED es excitado ópticamente y, simultáneamente, un fuerte campo de RF modula su absorción o emisión, creando un novedoso tipo de sensor o modulador. Sin embargo, es probable que este efecto requiera densidades de potencia de RF mucho mayores que las disponibles en el ambiente.

Fuentes citadas

1. Organic Light-Emitting Diode (OLED) Technology and Applications - International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.ijarcce.com/upload/2016/november-16/IJARCCE%2032.pdf>
2. IEEE Paper | PDF | Oled | Liquid Crystal Display - Scribd, acceso: agosto 16, 2025,

- <https://www.scribd.com/doc/53260914/IEEE-Paper>
3. A Magnetic field sensor based on OLED / organic photodetector ..., acceso: agosto 16, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10644294/>
 4. Review of photodetectors characterization methods - Biblioteka Nauki, acceso: agosto 16, 2025, <https://bibliotekanauki.pl/articles/2173660.pdf>
 5. A Survey on Conceptualization of RF Energy Harvesting - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/publication/331975718_A_Survey_on_Conceptualization_of_RF_Energy_Harvesting
 6. A Comprehensive Survey on RF Energy Harvesting: Applications and Performance Determinants - MDPI, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/8/2990>
 7. Electromagnetic Energy Harvesting Using a Glass Window - SciELO, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.scielo.br/j/jmoea/a/D5kBZRRhkspgqVBBSYjvD5v/?lang=en>
 8. (PDF) Energy Harvesting Using a Low-Cost Rectenna for Internet of Things (IoT) Applications - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/publication/325028854_Energy_Harvesting_Using_a_Low-Cost_Rectenna_for_Internet_of_Things_IoT_Applications
 9. Dualidad onda corpúsculo - Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso: agosto 5, 2025, https://es.wikipedia.org/wiki/Dualidad_onda_corp%C3%BAsculo
 10. Orbital atómico - química.es, acceso: agosto 5, 2025, https://www.quimica.es/enciclopedia/Orbital_at%C3%B3mico.html
 11. Photodiode Sensor Physics - Newport, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.newport.com/n/photodiode-physics>
 12. Device physics and applications of organic photodiodes - TUE Research portal - Eindhoven University of Technology, acceso: agosto 16, 2025, https://research.tue.nl/files/144338409/20200115_Simone.pdf
 13. Organic photodiodes: device engineering and applications - PMC - PubMed Central, acceso: agosto 16, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9763529/>
 14. Radiación de cuerpo negro y catástrofe ultravioleta | Los Mundos de ..., acceso: agosto 5, 2025, <https://losmundosdebrana.com/2014/03/10/radiacion-de-cuerpo-negro-y-catastrofe-ultravioleta/>
 15. Unaintroducción a la Mecánica Cuántica Prof.Dr.Renato ..., acceso: julio 18, 2025, <https://renato.ryn-fismat.es/papers/cuantica.pdf>
 16. Ambient RF energy scavenging: GSM and WLAN power density measurements, acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/publication/224371517_Ambient_RF_energy_scavenging_GSM_and_WLAN_power_density_measurements
 17. Ambient RF energy scavenging: GSM and WLAN power density measurements - TUE Research portal - Eindhoven University of Technology, acceso: agosto 16, 2025, <https://research.tue.nl/files/2827940/Metis229881.pdf>

18. Ambient RF Energy Harvesting, acceso: agosto 16, 2025, <https://icrepq.com/icrepq'10/652-Bouchouicha.pdf>
19. (PDF) Dynamic Ambient RF Energy Density Measurements of Montreal for Battery-Free IoT Sensor Network Planning - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/publication/350031127_Dynamic_Ambient_RF_Energy_Density_Measurements_of_Montreal_for_Battery-Free_IoT_Sensor_Network_Planning
20. Ambient RF energy scavenging: GSM and WLAN power density measurements - Research portal Eindhoven University of Technology, acceso: agosto 16, 2025, <https://research.tue.nl/en/publications/ambient-rf-energy-scavenging-gsm-and-wlan-power-density-measureme>
21. Radio Frequency Energy Harvesting Technologies: A Comprehensive Review on Designing, Methodologies, and Potential Applications - MDPI, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/11/4144>
22. Design of a High-Efficiency 2.45-GHz Rectenna for Low-Input-Power Energy Harvesting, acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/publication/258649127_Design_of_a_High-Efficiency_245-GHz_Rectenna_for_Low-Input-Power_Energy_Harvesting
23. Design of a Rectenna in 2.45 GHz Band Frequency for Energy Harvesting, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=112173>
24. Broadband RF Energy-Harvesting Arrays - University of Colorado Boulder, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.colorado.edu/faculty/popovic-zoya/sites/default/files/attached-files/Kwiatkowski2022.pdf>
25. A Flexible Compact Rectenna for 2.4GHz ISM Energy Harvesting Applications, acceso: agosto 16, 2025, https://tentzeris.ece.gatech.edu/aps18_eid.pdf
26. Design of a 2.4 & 5.8 GHz Efficient Circularly Polarized Rectenna for Wireless Power Transfer Applications - MDPI, acceso: agosto 16, 2025, <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/12/2645>
27. (PDF) Dual Band Rectenna for Electromagnetic Energy Harvesting ..., acceso: agosto 16, 2025, https://www.researchgate.net/publication/384294726_Dual_Band_Rectenna_for_Electromagnetic_Energy_Harvesting_at_24_GHz_and_5_GHz_Frequencies
28. Relation between the built-in voltage in organic light-emitting diodes and the zero-field voltage as measured by electroabsorption | Phys. Rev. B, acceso: agosto 16, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.81.125203>
29. Cytocompatible, disintegrable, low-voltage operation n-type organic thin film transistors, acceso: agosto 16, 2025, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/ma/d4ma01148a>
30. A printable supercapacitor as a storage unit in an RF energy harvester, acceso: agosto 16, 2025, https://researchportal.tuni.fi/files/4822236/Lehtim_ki_EPES_2014_RF_harvester_pre_print.pdf

31. Synergistic integration of energy harvesters and supercapacitors for enhanced performance, acceso: agosto 16, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11904531/>
32. (PDF) Super-capacitor and Thin Film Battery Hybrid Energy Storage for Energy Harvesting Applications - ResearchGate, acceso: agosto 16, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/260967402_Super-capacitor_and_Thin_Film_Battery_Hybrid_Energy_Storage_for_Energy_Harvesting_Applications
33. Subgap Absorption in Organic Semiconductors | The Journal of Physical Chemistry Letters, acceso: agosto 16, 2025,
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpclett.3c00021>