

ITESO

Universidad Jesuita
de Guadalajara

Dispositivos de Captación y Conversión de energía.

Proyecto Integrador 1 (PI1): Termopar planar

Ingeniería en nanotecnología:

Grupo: P2025_MAF3309J

Equipo 3

Eliud Gamboa Ortiz

Juan Carlos Herrera Novo

Diego Yael Islas Santoyo

Mtro. Sebastián Gascón Pérez

Jalisco, abril de 2025

Resumen

Este proyecto tuvo como objetivo diseñar y fabricar un termopar planar híbrido metálico-semiconductor, integrado sobre un sustrato de silicio tipo p y depositado mediante sputtering con capas delgadas de cobre y plata. La intención fue evaluar su desempeño como generador termoeléctrico aprovechando el efecto Seebeck bajo gradientes térmicos, con la idea de aplicar el dispositivo en recolección de energía (energy harvesting) a microescala. Se caracterizaron sus propiedades eléctricas mediante curvas I–V y se ajustaron modelos teóricos para obtener parámetros como las corrientes de saturación (I_{s1} , I_{s2}), el coeficiente de idealidad (n) y el voltaje Seebeck (V_s). Aunque se logró la fabricación del dispositivo y se obtuvieron resultados coherentes con estructuras Schottky, el voltaje Seebeck ajustado (-0.0234 V) se encuentra por debajo de los valores típicos reportados para termopares comerciales, indicando una eficiencia limitada. Esta baja eficiencia puede deberse a materiales no óptimos, resistencia de contacto, geometría no ideal y pérdidas térmicas durante las mediciones. Se concluye que, si bien el dispositivo demuestra funcionalidad, su rendimiento debe mejorarse mediante una mejor elección de materiales (como Bi_2Te_3 o Sb_2Te_3), optimización del diseño y condiciones de caracterización más controladas. A pesar de sus limitaciones actuales, el termopar planar muestra potencial como base para futuras aplicaciones termoeléctricas compactas y sensores térmicos de alta precisión.

Propósito General:

El objetivo principal de este proyecto es el diseño y la fabricación de un termopar planar con integración de nanoestructuras, enfocado en mejorar la eficiencia termoeléctrica del dispositivo. Para ello, se prestará especial atención a parámetros críticos como la selección de materiales termoeléctricos y la optimización del tipo de contactos eléctricos, factores que influyen directamente en la generación de voltaje por el efecto Seebeck.

Además del proceso de fabricación, se llevará a cabo una caracterización completa de las propiedades eléctricas y térmicas del dispositivo. El análisis de estos datos permitirá evaluar su viabilidad como termogenerador para aplicaciones en recolección de energía (harvesting), sensores integrados, o sistemas de recuperación de calor residual a microescala.

Este enfoque no solo busca demostrar la funcionalidad del termopar planar a nivel experimental, sino también explorar su potencial dentro del campo de los dispositivos termoeléctricos avanzados, abriendo camino para futuras aplicaciones en sistemas autónomos de bajo consumo energético.

Contexto y marco teórico

Actualmente la humanidad atraviesa los mayores problemas ambientales que ha sufrido durante toda la historia, uno de ellos es el efecto invernadero. Este efecto provoca que el calor no pueda salir del planeta, lo que lleva a el aumento en la temperatura global y al cambio climático. Las consecuencias a esto han sido el calentamiento de los océanos, el derretimiento de los polos, así como la renta de la probabilidad de incendios forestales y un aumento en la duración e intensidad de tormentas tropicales. Las actividades humanas han contribuido en el aumento del ya elevado contenido de dióxido de carbono en la atmósfera en un 50 % en menos de 200 años [1].

Las nuevas tecnologías, el transporte, las comunicaciones, así como muchos de los productos en la actualidad son dependientes de la extracción y quema de hidrocarburos. Según datos de la CFE en México una central de combustóleo emite 2.928 toneladas de CO₂ a la atmosfera por m³ de combustible utilizado. Por otro lado, un vehículo promedio emite 122,1 gr de CO₂ por kilómetro recorrido, si se tiene en cuenta la cantidad absurda de vehículos terrestres la contaminación por transporte es bastante alta [2].

Por estas y muchas razones existe una necesidad de extraer energía de distintas fuentes no contaminantes como puede ser el sol, el viento, el calor, las mareas, etc así como aprovechar la energía residual de procesos donde se desprende calor. La relevancia de recolectar energía residual radica en que se trata de una fuente alternativa que depende únicamente de las pérdidas térmicas. Por lo general, dichas pérdidas energéticas se originan en procesos industriales y se liberan al medio ambiente sin ningún tipo de recuperación. Los desechos no dejarán de existir ni de liberarse en el entorno, pero pueden ser parcialmente aprovechados para generar electricidad en el mismo lugar, lo que incrementa el rendimiento general del sistema.

Cuando existe un gradiente de temperatura en ciertos entornos, se presenta un potencial de generación de energía a partir de la energía térmica, donde la diferencia de temperatura representa el potencial para la conversión de energía y el flujo de calor proporciona la potencia. Esto debido al efecto Seebeck que de manera más detallada significa que el gradiente de temperatura en los materiales termoeléctricos provocará que los portadores de carga en el material (conductores y semiconductores) se desplacen, logrando así la conversión de energía térmica en energía eléctrica. Bajo la acción de un gradiente de temperatura, los huecos en el material rico en huecos (tipo p) se difunden hacia el material rico en electrones (tipo n), y los electrones en el material tipo n se difunden hacia el material tipo p, formando así una fuerza electromotriz.

El diseño de un termopar depende de la elección adecuada de los materiales termoeléctricos, cuyas propiedades determinan la eficiencia en la conversión de calor en electricidad. Esta eficiencia se ve reflejada en el factor de mérito ZT, que depende directamente de un alto coeficiente Seebeck (α), una alta conductividad eléctrica (σ) y una baja conductividad térmica (k). En este contexto, los semiconductores son los materiales más adecuados, ya que presentan concentraciones intermedias de portadores de carga, lo cual permite un mejor equilibrio entre estas propiedades.

Por el contrario, los metales, aunque suelen tener buena conductividad eléctrica, presentan una alta conductividad térmica y un bajo coeficiente Seebeck, lo que limita su desempeño como materiales termoeléctricos. Por esta razón, el uso de semiconductores como el telurio de bismuto (Bi_2Te_3), telurio de plomo (PbTe) o aleaciones de silicio-germanio (SiGe) ha sido predominante. Además, el diseño debe considerar otros factores como el gradiente de temperatura disponible, la geometría del dispositivo, la resistencia térmica y eléctrica de contacto, así como la posibilidad de integrar nanoestructuras —como pozos cuánticos o nanohilos— que permiten alcanzar valores de ZT superiores y mejorar significativamente el rendimiento del sistema.

Dado que los dispositivos termoeléctricos tienen eficiencias por debajo del límite de Carnot, las tasas de generación de potencia suelen ser bajas, pero la termoelectricidad puede resultar atractiva para aplicaciones con bajos requerimientos de energía.

Por ejemplo, en el caso de los motores de combustión, por ejemplo, se ha observado que los TEGs pueden convertir hasta un 57% del calor residual en energía eléctrica, lo que se traduce en un aumento del 6% en la potencia disponible del automóvil y un ahorro potencial del 10% en el consumo de combustible.

Además, los avances recientes en el uso de nanoestructuras y la incorporación de tierras raras han permitido mejorar significativamente el rendimiento de los materiales termoeléctricos. Estas innovaciones han elevado el factor de mérito ZT a valores superiores al 20%, abriendo nuevas posibilidades para su aplicación a escala industrial.

Otro de los atributos destacados de los TEGs es su condición de dispositivos de estado sólido sin partes móviles, lo cual les confiere una alta durabilidad, bajo mantenimiento y operación silenciosa. Esto los hace especialmente adecuados para entornos donde se requieren soluciones robustas y confiables, como en dispositivos portátiles o implantables.

Finalmente, los avances en miniaturización han permitido la creación de microgeneradores termoeléctricos capaces de alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo, como relojes, oxímetros y sensores inalámbricos. Estos dispositivos pueden operar incluso con pequeños gradientes térmicos, como los generados por el cuerpo humano, lo que refuerza el potencial de la termoelectricidad en aplicaciones biomédicas y portátiles.[3]

Propuesta del termopar y justificación del diseño

La conversión directa de calor en electricidad mediante dispositivos termoeléctricos ha cobrado gran relevancia en los últimos años, especialmente en aplicaciones de recuperación de calor residual y generación de energía distribuida. Diversos estudios recientes han mostrado avances significativos tanto en el diseño de materiales como en la miniaturización de dispositivos termoeléctricos. Los termoeléctricos son un tipo de dispositivo que convierte la energía térmica en energía eléctrica utilizando el efecto Seebeck. Estos dispositivos se basan en las propiedades de ciertos materiales que, sometidos a un rango de temperaturas, transforman el calor en un voltaje eléctrico [4].

En este contexto, se propone un diseño de termopar planar con estructura híbrida metálico-semiconductor, como se muestra en la Figura 1, integrado sobre un sustrato de silicio tipo p. Este diseño busca convertir diferencias de temperatura en voltaje mediante el efecto Seebeck, utilizando una configuración plana que facilita su fabricación y potencial integración en sistemas compactos. El termopar combina dos metales: cobre (Cu) para establecer los contactos óhmicos y plata (Ag) como material activo del brazo metálico, conectado a un sustrato de silicio tipo p dopado con boro.

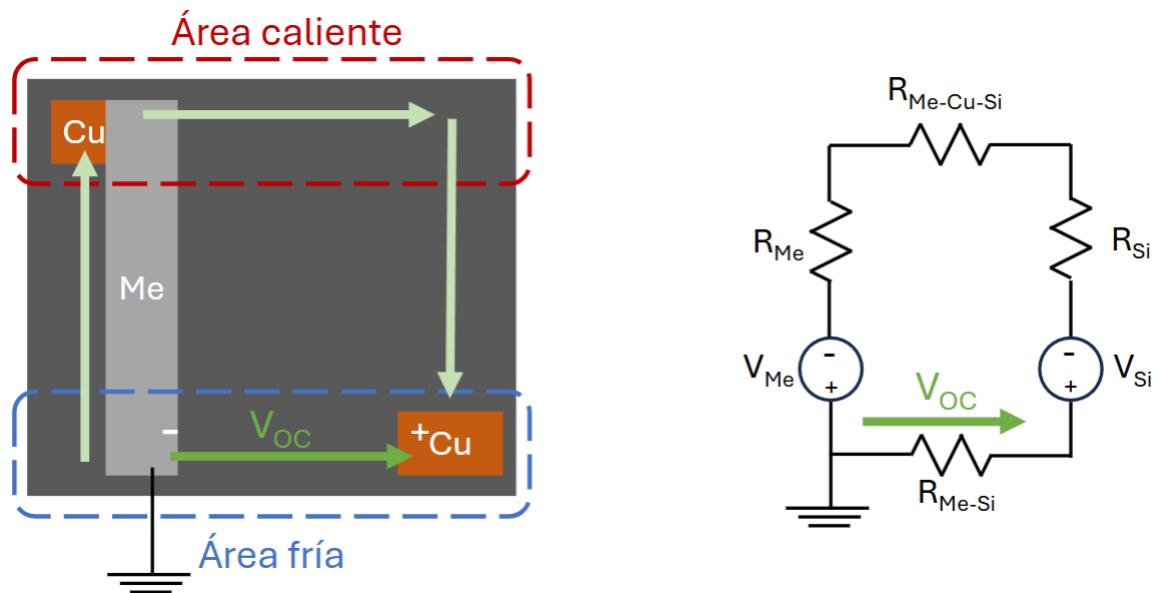


Figura 1. Gráfico del termopar sintetizado y su análogo en circuito eléctrico.

Se optó por usar cobre para los contactos óhmicos por su alta conductividad eléctrica y su compatibilidad con el silicio, lo que permite una baja resistencia de contacto en el punto de unión. La resistividad del cobre es una medida de su capacidad para resistir el flujo de corriente eléctrica. Es importante porque determina la eficiencia del cobre como conductor en aplicaciones eléctricas y electrónicas. Su baja resistividad lo hace ideal para cables eléctricos y componentes electrónicos que requieren alta conductividad [5]. Con los conductores óhmicos, la resistencia permanece constante, lo que conduce a una corriente predecible para cualquier tensión dada. Por tanto, su uso en diseños de circuitos sencillos garantiza un funcionamiento estable y fiable del circuito [6].

Por otro lado, se optó por utilizar plata para el metal debido a su excelente conductividad térmica. La combinación Ag/Cu sobre silicio tipo p permite establecer una diferencia de potencial que se puede medir cuando se aplica un gradiente térmico.

El comportamiento del dispositivo puede representarse mediante un circuito como el de la Figura 1, que incluye las resistencias internas de los materiales y las fuentes de voltaje asociadas a los coeficientes de Seebeck de cada uno. Esto permite analizar y comparar los valores experimentales con los teóricos.

Plan de trabajo y gestión de recursos

El desarrollo del termopar planar se organizó en varias etapas, desde la fabricación, hasta la caracterización del dispositivo. El proyecto se llevó a cabo principalmente en los laboratorios de películas delgadas, en el que se realizó el depósito de cobre y plata sobre el sustrato de silicio tipo p por medio del sputtering, y el laboratorio de óptica, donde se realizó la caracterización del termopar con ayuda del SMU Keithley 2400 para la generación de curvas V-I en configuración "pseudo cuatro puntas" y se evaluará el voltaje Seebeck de circuito abierto (V_{OC}) en condiciones térmicas variables, tanto a temperatura ambiente como bajo exposición térmica.

Se llevó a cabo el siguiente plan para cada etapa del proyecto, expresado en la Tabla 1.

Fecha	Actividad	Recursos/ Insumos	Lugar/Equipo utilizado
21/02/2025	Fabricación del termopar: Sesión grupal para el depósito de contactos óhmicos con capa de cobre (100 nm).	Cobre	Laboratorio de Películas delgadas, Edificio J, Planta baja. Mediante el sistema de pulverización catódica (sputtering) S16 del laboratorio.
05/03/2025	Fabricación del termopar: Sesión por equipo para el depósito del brazo metálico del termopar (Plata).	Plata	Laboratorio de Películas delgadas, Edificio J, Planta baja. Mediante el sistema de pulverización catódica (sputtering) S16 del laboratorio.
12/03/2025	Caracterización del termopar: medición grupal de curvas I-V para la caracterización del termopar.	Termopar sintetizado	Laboratorio de Óptica, Edificio T, Segundo Piso. Unidad SMU 2400 en una configuración pseudo 4-puntas.

Tabla 1. Cronograma para la realización de las distintas fases del proyecto.

Fabricación y caracterización

Primero se llevó a cabo la etapa de fabricación del termopar, en el que se utilizó el sistema de depósito por pulverización catódica (sputtering), disponible en el Laboratorio de Películas Delgadas (equipo S16) para depositar una película delgada de cobre, con un espesor de 100 nm, sobre un sustrato semiconductor de silicio tipo-p, dopadas con boro y con orientación cristalina (100). Además, posteriormente se deposita una segunda película de plata, con un espesor de 100 nm, empleando el mismo equipo.

Las condiciones de depósito para estos materiales fueron las siguientes:

Condiciones	Cobre (Cu)	Plata (Ag)
P_{RF}	80 W	60 W
R_{ef}	8 W	0 W
P_w	5 mTorr, 4 sccm	20 mTorr, 3.6 sccm

Tune	2%	1.5%
Load	2.9%	5.2%
δ (Espesor nominal)	37 nm	10.7 nm
Espesor Real Depositado	100 nm	100 nm
Tiempo	29 min 45 s	25 min 53 s

Tabla 2. Parámetros de depósito para el cobre y plata por medio del sputtering.

Para la caracterización, esta se realizó en el Laboratorio de Óptica, utilizando una unidad de medición SMU Keithley 2400, llevando a cabo el procedimiento mostrado en los siguientes puntos:

- Medición de curvas I–V con la unidad SMU 2400 Keithely en configuración pseudo cuatro puntas, para aislar la resistencia del dispositivo y obtener una lectura más precisa del comportamiento eléctrico.
- Aplicación de un gradiente térmico controlado sobre el dispositivo para generar una diferencia de temperatura entre los extremos del termopar.
- Registro del voltaje de circuito abierto (V_{oc}) generado por el efecto Seebeck.

Una vez llevado a cabo el procedimiento de caracterización se obtuvieron los rangos mostrados en la Tabla 3 de la sección de resultados. Además, se realizaron los cálculos necesarios con las siguientes ecuaciones:

$$I(V) = \frac{2I_{s1}I_{s2}\sinh\left(\frac{qV}{2nkT}\right)}{I_{s1}\exp\left(\frac{qV}{2nkT}\right) + I_{s2}\exp\left(-\frac{qV}{2nkT}\right)}$$

$$J_0 = A^{**}T^2\exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right),$$

$$J = \frac{2J_{01}J_{02}\sinh\left(\frac{qV}{2nkT}\right)}{J_{01}\exp\left(-\frac{qV}{2nkT}\right) + J_{02}\exp\left(\frac{qV}{2nkT}\right)}.$$

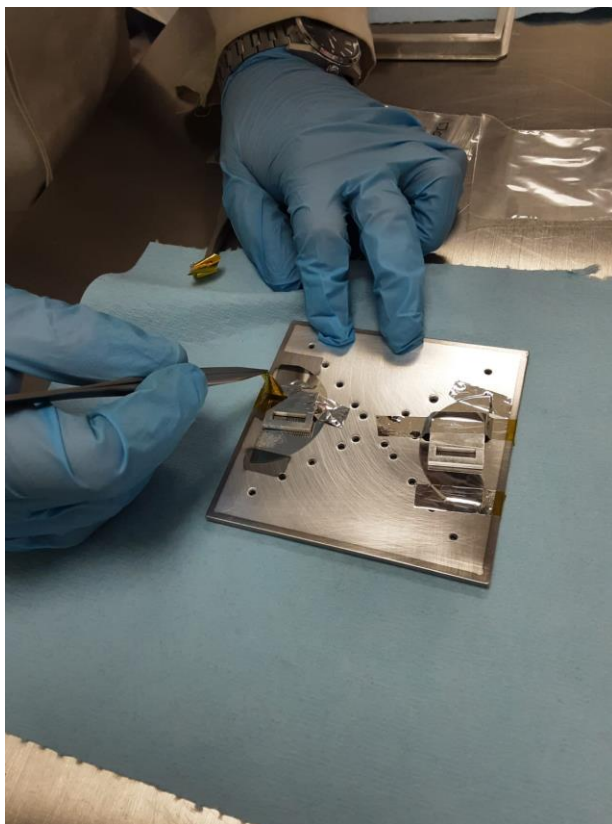
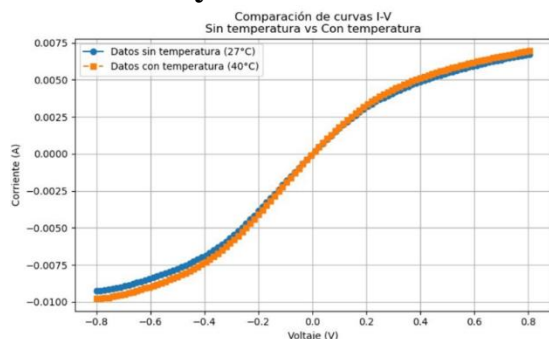
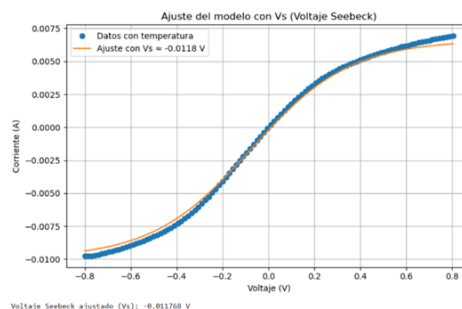


Figura 2. Montaje de muestras para el depósito de las películas delgadas.

Resultados y discusión



Gráfica 1. Comparación de curvas



Gráfica 2. Ajuste de modelo con Vs

Se analizaron las curvas corrientes–voltaje (I–V, de la gráfica 1) obtenidas bajo diferentes condiciones térmicas. El estudio se fundamenta en el efecto Seebeck, que describe la generación de un voltaje debido a la diferencia de temperatura entre dos metales distintos, como se muestra en la gráfica 2 [7][8]. A partir de los datos experimentales, se ajustaron modelos teóricos para determinar parámetros clave como las corrientes de saturación y el

coeficiente de idealidad, mostrados en la tabla 3, lo cual permitió calcular el voltaje Seebeck y evaluar la eficiencia del generador termoelectrico.

Notebook	I_{s1} (A)	I_{s2} (A)	n (adimensional)
Código-sinT-2	9.8587e-03	6.6177e-03	8.2689
Código-sinT-3	1.0012e-02	6.5871e-03	8.4054
Promedio	9.9353e-03	6.6024e-03	8.3372

Tabla 3. Corrientes de saturación e idealidad

El voltaje Seebeck ajustado fue de -0.0234 V, como se indica en la gráfica 2, donde se observa que el modelo reproduce adecuadamente el comportamiento experimental, particularmente en la región central de voltaje. Las ligeras desviaciones en los extremos podrían deberse a no idealidades en los contactos o a efectos resistivos adicionales. Los parámetros promedio obtenidos a partir de las mediciones sin temperatura (27°C) fueron: $I_{s1} = 9.9353 \times 10^{-3}$ A, $I_{s2} = 6.6024 \times 10^{-3}$ A y $n = 8.3372$, y sirvieron como base para el ajuste térmico posterior.

Posteriormente, se estimaron las barreras de Schottky asociadas a cada corriente de saturación, utilizando el modelo de emisión termioónica y los parámetros mostrados en la tabla 4. Los valores obtenidos fueron $\phi b_1 = 0.5039$ V y $\phi b_2 = 0.5145$ V, los cuales son coherentes con dispositivos de contacto metal-semiconductor con condiciones de fabricación no ideales. Estas barreras indican una adecuada alineación energética y son comparables con los reportados en literatura para este tipo de estructuras [9].

<input type="checkbox"/>	Parámetro	Valor	Unidad
1	J_1	0.0099353	A
2	J_2	0.0066024	A
3	ϕB_1	0.5039	V
4	ϕB_2	0.5145	V
5	Temperatura (T)	300.0	K
6	Constante de Richardson (A)	32.0	$\text{A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$

Tabla 4. Barreras de Schottky

Los valores de barrera obtenidos se encuentran dentro del rango que se reporta en la literatura para uniones metal-semiconductor que no son completamente ideales, lo cual indica que hay una buena alineación energética entre las capas de Ag/Cu y el silicio tipo-p [9]. Sin embargo, cuando se analiza el rendimiento del termopar, se nota que el voltaje Seebeck que obtuvimos (-0.0234 V) está muy por debajo de lo esperado si se compara con termopares comerciales. Por ejemplo, un tipo K tiene un coeficiente cercano a $41 \mu\text{V/K}$ y uno tipo E hasta $68 \mu\text{V/K}$, lo que deja en claro que nuestro dispositivo tiene una eficiencia mucho más baja [8]. Esto

puede deberse a varios factores como que los materiales usados no tienen propiedades termoeléctricas ideales, que las uniones entre metales y el semiconductor no fueron perfectas (lo que genera resistencias de contacto), que la geometría no estuvo bien optimizada, o incluso que durante las mediciones hubo pérdidas térmicas por falta de buen aislamiento. Para mejorar esto, sería recomendable usar materiales con mayor figura de mérito como Bi_2Te_3 o Sb_2Te_3 , que ya han mostrado buen desempeño en configuraciones tipo planar [10], además de trabajar en el diseño para aprovechar mejor el gradiente térmico y asegurar una buena calidad en las uniones. También es importante mejorar el control durante las mediciones, para tener condiciones térmicas más estables. Todo esto podría ayudar a acercar el desempeño del dispositivo al de los termopares comerciales.

Conclusiones

Después de analizar los datos obtenidos de la de la caracterización del termopar se puede afirmar que se cumplió con el objetivo de fabricar un termopar planar, mediante la implementación de nanoestructuras como lo son películas delgadas, sin embargo no se logró que mejorara su eficiencia ni el aumento en el voltaje de Seebeck para su aplicación en “energy harvesting”, ya que la elección de contactos sustitutos de cobre introdujeron un efecto en el termopar de dos diodos Schottky espalda a espalda, lo que dificulta el paso de corriente, y disminuyendo el impacto del voltaje Seebeck.

Sin duda existe un potencial evidente en el uso de nanoestructuras en la mejora de las características críticas de los termopares para su uso no solo para su uso como termogenerador sino como sensores ultra precisos que tendrán potenciales aplicaciones en el desarrollo científico como mapear diferencias sutiles de temperatura en muestras biológicas para revelar detalles funcionales de la biología celular o, simplemente, el estado de salud de las células.[11]

Se recomienda el uso de cromo para los contactos ya que estos actúan como contactos óhmicos y mejoran la funcionalidad del dispositivo; de igual forma se recomienda estudiar el efecto del grosor en la funcionalidad del termopar.

Referencias

1. Dióxido de carbono | Signos vitales, Climate Change: Vital Signs of the Planet. [En línea]. Disponible: <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/>. [Accedido: 12-mar-2025].
2. Los efectos del cambio climático, NASA Ciencia. [En línea]. Disponible: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/los-efectos-del-cambio-climatico/>. [Accedido: 12-mar-2025].
3. Ando Junior, O.H.; Maran, A.L.O.; Henao, N.C. . (2018). A review of the development and applications of thermoelectric microgenerators for energy harvesting. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91(), 376–393. doi:10.1016/j.rser.2018.03.052

4. Publicaciones Tecnicas Gm2 Electronica Convertronic. (2023, June 23). *Dispositivos termoeléctricos: Nuevos desarrollos para la recuperación de las perdidas térmicas*. Revista Electrónica Convertronic - Noticias Y Actualidad Electrónica. <https://convertronic.net/potencia/control-termico/11484-dispositivos-termoelectricos-nuevos-desarrollos-para-la-recuperacion-de-las-perdidas-termicas.html>
5. M, A. (2024, May 23). *Resistividad del cobre: guía completa* - Bericht. Bericht Fabricación De Piezas Metálicas ➤ Industria Metalúrgica. <https://www.bericht.es/resistividad-del-cobre-guia-completa/>
6. *Conductor óhmico: ejemplos, propiedades* / StudySmarter. (n.d.). StudySmarter ES. <https://www.studysmarter.es/resumenes/fisica/electricidad/conductor-ohmico/>
7. Dewesoft. (2023). *Medición de temperatura con sensores de termopar*. <https://dewesoft.com/es/blog/temperatura-medicion-termopar-sensores>
8. Fluke Process Instruments. (2023). *Teoría de termopares*. <https://www.flukeprocessinstruments.com/es/servicio-y-soporte/centro-de-conocimiento/tecnologia-de-perfilado-termico/teoria-termopares>
9. Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (3rd ed.). Wiley.
10. Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*, 7(2), 105–114. <https://doi.org/10.1038/nmat2090>
11. *High-performance flexible metal-on-silicon thermocouple.pdf: DISPOSITIVOS DE CAPTACION Y CONVERSION DE ENERGIA (P2025_MAF3309J)*. (n.d.). <https://canvas.iteso.mx/courses/47595/files/9383438?wrap=1>
12. Vazquez, A. (2024). *Desarrollo de Transistores Avanzados de Barrera Schottky de Efecto de Campo con Bajo Gasto Térmico* [MA thesis, Insituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica]. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/2446>
13. Carbó Feliu, M. (2020). *Evaluación de generadores termoeléctricos mediante espectroscopía de impedancia*. Universitat Jaume I. <https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/196681>
14. Llorente Monfort, D. (2015). *Estudio y caracterización de elementos termoeléctricos como generadores de energía eléctrica*. Universitat Politècnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/79156>