

# Analysis of thermoelectric materials using a virtual instrument in Matlab

Carlos Sánchez Márquez, Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Los Olivos, Perú,  
augusto.sanchez@upn.pe

*Abstract– In this article we analyze different thermoelectric materials, in order to be able to study the voltage generation from the bimetallic junctions between these materials, under the principle of the Seebeck Effect. The analyzes were carried out using a virtual instrument developed on the Matlab platform. This is intended to have a virtual tool that helps research in the field of renewable energy, seeking new solutions to the problem of high costs and the decline in non-renewable energy. A compendium of the work of various researchers has been made, enriching the data and the results of our development.*

*Keywords: Thermoelectricity, Seebeck Coefficient, Matlab Simulation, Bimetallic Union.*

**Digital Object Identifier:** <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.275>  
**ISBN:** 978-958-52071-8-9 **ISSN:** 2414-6390  
**DO NOT REMOVE**

# Análisis de materiales termoeléctricos mediante instrumento virtual en Matlab

Carlos Sánchez Márquez, Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Los Olivos, Perú,  
augusto.sanchez@upn.pe

**Resumen**– En este artículo analizamos diferentes materiales termoeléctricos, con el objetivo de poder estudiar la generación de voltaje a partir de las uniones bimetálicas entre estos materiales, bajo el principio del Efecto Seebeck. Los análisis se han realizado mediante un instrumento virtual desarrollado en la plataforma de Matlab. Con ello se pretende tener una herramienta virtual que ayude a las investigaciones en el campo de las energías renovables, buscando nuevas soluciones al problema de los altos costos y la disminución de las energías no renovables. Se ha hecho un compendio de los trabajos de varios investigadores, enriqueciendo los datos y los resultados de nuestro desarrollo.

**Palabras Clave:** Termoelectricidad, Coeficiente Seebeck, Simulación con Matlab, Unión bimetálica.

## I. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, es un fenómeno que se ha producido en estos últimos tiempos, y que ha traído como consecuencia una serie de problemas, de orden ecológico y de salud en nuestro planeta. El uso desmedido de combustibles como la gasolina, los productos de aerosol, los gases emitidos por las fábricas, entre otros, han contribuido a la degradación del ecosistema. Por otro lado, la generación de energía eléctrica convencional, resulta un proceso muy costoso, ya sea este, de tipo nuclear, químico, hídrico o marítimo. En ese sentido, siendo conscientes de este problema, estamos abocados en la búsqueda de soluciones a la demanda de la generación limpia y menos costosa, de energía eléctrica. Hace ya muchos años atrás, que el investigador Thomas Johann Seebeck, descubrió el fenómeno físico (efecto que toma su nombre), el cual consiste en la generación de energía eléctrica a partir de una fuente de calor aplicada a la unión de dos metales [1]. En nuestros tiempos existen los denominados materiales termoeléctricos, que resultan de combinaciones químicas de varios materiales, cuyo comportamiento de su coeficiente Seebeck, 'S', nos indica, una mayor eficiencia para generar energía eléctrica, a partir del calentamiento de dichas uniones bimetálicas [2].

En ese sentido, surge la pregunta de investigación: ¿Es posible contar con un instrumento virtual desarrollado con el software Matlab, que ayude a las investigaciones en el campo de los materiales termoeléctricos?, y que contribuya en la solución del problema del calentamiento global, y la falta de energías no renovables.

El software de Matlab, es una herramienta muy importante, que en este caso, nos ha servido para desarrollar un instrumento virtual, que efectúa cálculos de voltaje de salida (mV.), en función del calentamiento de las uniones bimetálicas ( $T_1$  y  $T_2$ ), con materiales comunes, además, con el podemos hacer un análisis del comportamiento con materiales termoeléctricos [3]. Por otro lado, podemos observar

la linealización o normalización de valores de temperatura, a partir de mediciones de voltaje en las uniones, así como curvas que relacionan, como por ejemplo, Voltaje vs. Temperatura, o Voltaje vs. Coeficiente Seebeck de los materiales. Así mismo, dentro de Matlab podemos hacer uso de datos en formato Word, de otras tablas de datos y de resúmenes para imprimir.

La aplicación de combinaciones de materiales más eficientes, y la posterior transformación en niveles de energía eléctrica mayores, podrían resolver el problema de falta de energía eléctrica, los materiales termoeléctricos son aquellos capaces de convertir el calor en electricidad [4]. Existen muchas fuentes de calor asociadas a los metales, tales como los motores de los vehículos, los hornos industriales, las termas, entre otros, en los cuales se podría aplicar este principio de generación de energía eléctrica, y con ello se reducirían los costos, utilizando esta energía de generación limpia. Asimismo, podemos decir que nuestra meta es el desarrollo y la aplicación de nuevas tecnologías, en busca de la solución a la demanda de energía eléctrica.

### A. Objetivo general

Desarrollar con el software de Matlab, un programa que permita determinar, analizar y relacionar los parámetros de los materiales termoeléctricos.

### B. Objetivos específicos

Crear un programa en GUIDE de Matlab, a manera de instrumento virtual, en el cual se pueda comprobar los parámetros que intervienen en el análisis de los materiales termoeléctricos.

Verificar en tiempo real el valor de los parámetros del fenómeno a analizar y almacenar un resumen de datos.

## II. MARCO TEORICO

### A. El efecto Seebeck

El físico alemán T. J. Seebeck, observó por el año 1821 que en un circuito formado por dos conductores distintos y cuyas uniones soldadas se encuentran en medios con temperaturas distintas ( $T$  y  $T + \Delta T$ ), aparece entre ambas uniones una fuerza electromotriz (f.t.e.m, llamada en este caso fuerza termo-electromotriz) [5]. Se observa en la Fig. 1.

La fuerza electromotriz origina una corriente que se mantiene constante mientras las temperaturas sigan siendo diferentes. El voltaje generado, es del orden de varios micro voltios por grado kelvin. Para obtener mayor exactitud, se debe trabajar en la no-linealidad de la relación entre fuerza electromotriz y la temperatura [6]. La relación entre la diferencia de la fuerza electromotriz y la temperatura viene

dada por el coeficiente Seebeck  $\alpha$ . Se puede afirmar que el coeficiente Seebeck no es constante.

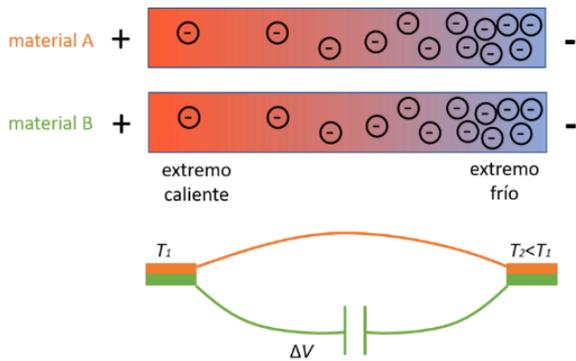


Fig. 1. El efecto Seebeck.

Fuente: Sara Díez García, Universidad Politécnica de Madrid [1]

Una formula aproximada y con validez general es:

$$E_{AB} = C_2 (T_1 - T_2) - C_2 (T_1^2 - T_2^2) \quad (1)$$

Dónde:  $E_{AB}$  es el voltaje de salida;  $T_1$  y  $T_2$  representan las temperaturas absolutas respectivas de cada unión, y  $C_1$  y  $C_2$  son constantes Seebeck que dependen de los materiales A y B [7].

### B. Coeficiente Seebeck ( $\alpha$ )

Este coeficiente, representa el incremento de voltaje dependiendo del incremento de la temperatura [8]. El coeficiente de Seebeck de un material depende de la estructura del cristal, de la temperatura y del material.

Esta relación se expresa mediante  $\alpha$ , y se define como:

$$\alpha = \frac{\delta V}{\delta T} \quad (2)$$

### C. Factor de mérito ZT

En su teoría de la conversión de energía termoeléctrica, Ioffe en 1949, estableció el parámetro ZT (figura de mérito adimensional) que actualmente se emplea como medida de la calidad termoeléctrica de un material. ZT [9]:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} T \quad (3)$$

Dónde:  $\alpha$ : es el coeficiente de Seebeck  
 $\sigma$ : es la conductividad eléctrica  
 $k$ : es la conductividad térmica y  
 $T$ : es la temperatura absoluta.

### D. Materiales termoeléctricos

La termoelectricidad es un fenómeno físico que se produce en algunos materiales, en especial en los semiconductores.

El material termoeléctrico es un dispositivo que crea un potencial eléctrico cuando se le aplica una diferencia de

temperatura entre sus extremos y contrariamente al aplicarle un voltaje, crea una diferencia de temperatura en la salida [10].

Los materiales termoeléctricos son muy buenos transmisores de la electricidad pero no del calor. Buscando una solución al problema, los investigadores, incorporan por ejemplo, nano partículas o nano cables en una matriz de otro material, permitiendo a la electricidad fluir libremente.

Debido a la escasez de Teluro/Germanio en la corteza terrestre, es necesario desarrollar nuevos materiales con mayores rendimientos termoeléctricos y muy eficientes, como el material PbSe (Seleniuro de plomo o seleniuro de plomo (II), es un material semiconductor). Este desarrollo, se ha logrado mediante el dopaje, la nanoestructuración, la ingeniería de la estructura de bandas, los arquitectos microestructural y los arreglos atómicos [11].

El 54% de materiales termoeléctricos utilizados, se basan en telururo de plomo (PbTe), telururo de bismuto (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>) y en germanio y silicio (SiGe). Otros de materiales como escuteruditas, clatratos, aleaciones Half heusler y otros materiales inorgánicos, representan el 42%. Por último sólo un 4% son orgánicos: polímeros conductores y compuestos de grafeno/CNT, [12].

Otro estudio indica que en la generación termoeléctrica se utiliza principalmente Telururo de Bismuto (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>), Telururo de Plomo (PbTe) y Silicio - Germanio (SiGe), debido a que son los materiales que presentan rangos de temperatura de operación baja, media y alta respectivamente [13].

### E. Termocuplas

El efecto Seebeck constituye el principio de funcionamiento de las termocuplas, y estas se construyen con dos conductores de distinto material, unidos en una misma conexión, llamado punto de unión. Cuando se aplica temperatura en la unión de los metales, se genera en la salida, un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los milivolts, el cual aumenta con la temperatura [9].

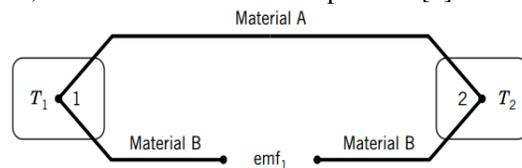


Fig. 2. Circuito de termocupla básica

Fuente: Figliola-Beasley, (Theory and Design for Mechanical Measurements, pg. 331)

### F. Linelización

La relación entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura no es lineal (no es una recta).

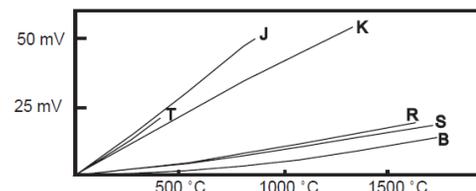


Fig. 3. Curvas de termocuplas: Voltaje vs. Temperatura

Fuente: www.arian.cl

El instrumento electrónico debe tener la capacidad de efectuar la linealización, para mostrar la medida, es decir, tomar el voltaje, y conociendo el tipo de termocupla, hallar en tablas internas la temperatura que corresponde a este voltaje [14].

## II. EL ESTADO DEL ARTE

### A. *Materiales inorgánicos termoeléctricos*

Actualmente se están investigando muchos tipos de materiales inorgánicos, como se explica a continuación.

Durante décadas se han utilizado en refrigeración termoeléctrica los calcogenuros, como son el Teluro de bismuto y sus aleaciones, más notablemente Bi<sub>2</sub>-xSb<sub>x</sub>Te<sub>3</sub> (tipo p) y Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-xSex (tipo n), [15]. Los calcogenuros de plomo (PbTe, PbSe, PbS) son los principales materiales para generación de energía termoeléctrica. En un rango de temperatura de 600 a 800 K, [16].

El material SnSe, recientemente se está aplicando para la generación de energía a temperatura media y es más barata y menos tóxica que las basadas en plomo.

Otros materiales como los siliciuros, en este caso el material Mg<sub>2</sub>Si, atrajeron la atención por su fácil preparación, para aplicaciones termoeléctricas [17] y tienen, una alta posibilidad de adaptar su estructura electrónica debido a su estado sólido.

Otro material utilizado en TG, es la skutterudita, o arseniuro de cobalto (CoAs<sub>3</sub>). Su fórmula general es TPn<sub>3</sub>, donde T es un metal de transición y Pn significa pnictogen (elementos del grupo 15 de la tabla periódica), [18].

Así mismo, los llamados compuestos de Heusler, adoptan la fórmula elemental X<sub>2</sub>YZ.

Las cobaltitas en capas, NaCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> son los compuestos de mejor rendimiento, y marcó el punto de partida de una investigación sistemática en cobaltitas para generadores termoeléctricos, debido a sus estructuras en capas.

Actualmente, las aleaciones de silicio - germanio (SiGe) se utilizan en células fotovoltaicas y termoeléctricas. Con respecto a la termoelectricidad, en las últimas décadas, Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub> atrajo una atención significativa como material de recolección de energía, para impulsar aplicaciones espaciales y otras aplicaciones industriales [19].

Los generadores termoeléctricos de radioisótopos tienen ventajas de confiabilidad y se usan principalmente en sistemas totalmente automatizados que no experimentarán contacto humano durante períodos de tiempo más largos que otras fuentes de energía [20]. La generación de energía con radioisótopos es el proceso de generar energía eléctrica a través de un generador eléctrico que utiliza termopares para convertir el calor de la energía de desintegración de un material radioisotópico por el efecto Seebeck [21].

Asimismo, las nano estructuras prometen mejorar las propiedades termoeléctricas de materiales como el silicio y los compuestos a base de silicio. En investigaciones recientes sobre diferentes nano estructuras han presentado materiales basados en silicio para su implementación en generadores termoeléctricos [22].

Tanto en aplicaciones militares como espaciales, cualquier mejora en la eficiencia de conversión de los generadores

termoeléctricos daría como resultado un ahorro de combustible, una consideración importante.

### B. *Generadores Termoeléctricos aplicados en la industria*

En 1867, M.G. Granjero, realizó el primer intento exitoso en el desarrollo de generadores termoeléctricos, y se basó en un par de materiales termoeléctricos (Cu60%, Ni20% y Zn20% - negativo material) y aleación de antimonio-zinc (material positivo). Asimismo, la segunda versión de la pila de Clamond y Mure se basó sobre la aleación de Marcus (Zn66,6% y Sb33,3% - negativo material) y sobre hierro (material positivo). Pero, Clamond desarrolló nuevas MT como el TEG llamado "Clamond Improved Thermopile" y tubo como base, la aleación de bismuto y antimonio (negativo material) y sobre hierro (material positivo) [23].

Anteriormente Seebeck, en 1821, ya había observado que un circuito cerrado hecho de dos metales diferentes, es decir, un termopar, desviaba una brújula colocada cerca de un circuito con dos uniones metálicas, [24], sentando las bases para el próximo desarrollo de la termoelectricidad y fue el físico británico Rayleigh, quien sugirió en 1885 explotar el efecto Seebeck para generación de energía.

El físico alemán Edmund Altenkirch determinó, en 1909, la máxima eficiencia de un generador termoeléctrico, es decir, la relación entre la potencia eléctrica devuelta por el generador y el calor por unidad de tiempo suministrado en el lado caliente.

Por el año 1947, Maria Telkes del Instituto Tecnológico de Massachusetts, pudo fabricar un generador termoeléctrico, basado en PbS y ZnSb, que mostraba una eficiencia de conversión superior al 5% en funcionamiento, bajo una diferencia de temperatura de 400 K [25].

Los TEG fabricados de termopares de ZnSb/Constantan se introdujeron en la Unión Soviética para alimentar radios mediante la conversión del calor producido por las lámparas de queroseno en zonas rurales.

En 1954, Hiroshi Goldsmid, en los laboratorios de investigación de The General Electric Company en Wembley, demostró enfriamientos a 273 K, utilizando un dispositivo termoeléctrico hecho de termopares Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> [9].

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos, la eficiencia de los dispositivos termoeléctricos aún no era superior al 5%, y al final del año 1960, el progreso favoreció al desarrollo de los motores. En la década de 1990, L. D. Hicks y Mildred Dresselhaus, ambos físicos del MIT, investigaron en nanoestructuración de materiales, afirmando que pueden ofrecer importantes avances en las propiedades termoeléctricas de la materia, dando nuevas esperanzas para materiales con mayor zT y, por lo tanto, dispositivos con mayor eficiencia de conversión de energía [15]. Así mismo, los compuestos nano estructurales exhiben nano estructuras y propiedades prometedoras para aplicaciones termoeléctricas, reuniendo así materiales de baja dimensión y a granel para aplicaciones termoeléctricas [26].

### C. *Softwares de simulación para materiales termoeléctrico*

Para la simulación del comportamiento de materiales termoeléctricos, existen muchas plataformas de software especializado, entre los cuales tenemos al programa Wien2K.

Este se basa en el método de LAPW, que se utiliza en el cálculo de la estructura electrónica en cristales y utiliza la teoría funcional de la densidad (DFT). El método LAPW, tiene la capacidad de resolver la ecuación de Kohn-Sham para la capacidad del estado fundamental, la energía total y los eigen valores de un sistema de muchos electrones [27].

El software de WIEN2k, es una plataforma que está desarrollado en Fortran y puede efectuar cálculos de mecánica cuántica en sólidos periódicos. Además, hace uso del conjunto de bases de onda plana aumentada y orbitales locales [FP- (L) APW + lo] de potencial completo (linealizado) para resolver las ecuaciones de Kohn-Sham de la teoría funcional de densidad [28].

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

En cuanto al procedimiento metodológico, se efectuó una revisión sistemática de la bibliografía existente a nivel mundial en base de datos extraídos de ResearchGate, Scopus, Sciencedirect y Cybertesis de Universidades. De cada revista o tesis se seleccionaron manualmente los trabajos relacionados con materiales termoeléctricos publicados entre 2014 y 2021. Los artículos y tesis seleccionados en parte se estudiaron para el marco teórico y el estado del arte, y en parte para estudiar los materiales termoeléctricos haciendo uso de Matlab, simulink o GUIDE de Matlab. En este caso, los trabajos seleccionados fueron los siguientes: *“Materiales semiconductores utilizando simulación numérica con elementos finitos para la producción termoeléctrica en condiciones de vacío”* [29]. Los autores indican que en este trabajo se presenta los resultados de la evaluación de materiales semiconductores termoeléctricos para su uso en vacío en el espacio, por medio de simulaciones numéricas con método de elementos finitos. La simulación se realizó en Matlab y concluyen que las condiciones más óptimas de potencia generada y tensión las presenta el Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. El material que se escogió para los módulos termoeléctricos son compuestos cuya base es Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. En la simulación, presentan tablas estadísticas y curvas relacionales como por ejemplo Tensión vs. Temperatura, y no hacen un desarrollo de una interfaz gráfica con GUIDE, mientras que nuestro trabajo si se presenta esta estructura a manera de instrumento y podemos analizar materiales termoeléctricos. En el artículo, *“Modelización y Análisis de Generación Termoeléctrica de Materiales que utilizan Matlab /Simulink”* [30]; los autores presentan varios modelos e implementaciones sobre la medición del comportamiento termoeléctrico de un material utilizando Matlab/Simulink, pudiéndose utilizar en la estimación de la conductividad térmica del material desconocido, facilitando su uso en el análisis y optimización de la eficiencia de nuevos materiales termoeléctricos, ideal para la experimentación termoeléctrica en un laboratorio, como interfaz de usuario para estudiantes. La simulación, se efectúa en simulink, haciendo un tanto complicado el ingreso de datos y la ejecución. Presentan curvas relacionales como por ejemplo Tensión vs. Temperatura, no presentan tablas estadísticas y no hacen uso de una interfaz gráfica con GUIDE, mientras que

nuestro trabajo si se presenta esta estructura a manera de instrumento, en donde además se trabajan varios parámetros. En el artículo, *“Modelado y simulación del análisis de rendimiento para el módulo Peltier y el módulo Seebeck utilizando MATLAB/Simulink”* [31]; los autores, aplican MATLAB/Simulink para la simulación y demuestran que el modelado analítico presenta un error porcentual entre los experimentos reales de simulación de 0.45% donde la simulación analítica estima que la salida de voltaje es 1.6340 V mientras que la salida de voltaje experimental del experimento en el laboratorio es de 1.6266 V a una temperatura caliente de 61 ° C y una temperatura fría de 27.5 ° C. La simulación, efectuada en simulink, representa más opciones para el proceso de ejecución y obtención de resultados. Presentan curvas relacionales como por ejemplo Tensión vs. Temperatura, mas no tablas estadísticas y no hacen uso de una interfaz gráfica con GUIDE, mientras que nuestro trabajo si se presenta esta estructura incluso tiene la opción de almacenamiento e impresión en formato Word. En el artículo, *“Análisis de rendimiento del generador termoeléctrico con MATLAB”* [32]; los autores hacen un trabajo de simulación en simulink, del modelo matemático de un generador termoeléctrico (convierte calor en electricidad). En donde la energía pico se logra cuando la resistencia interna del Generador Termoeléctrico es igual a la resistencia de la carga. Los valores de los parámetros de la superficie caliente del módulo son 230°C (450°F) de la curva corriente-voltaje y la superficie fría del módulo es 30°C (90°F). Como se observa, la simulación del modelamiento se efectúa en simulink de Matlab, sería más dinámico y amigable para el usuario si se hubiese desarrollado un instrumento en GUIDE de Matlab, en donde se puedan no solo simular un modelo determinado sino también analizar muchas variables, como temperatura, voltaje, linealizar termocuplas, crear tablas a partir de los datos extraídos, como se da en nuestro trabajo. En el siguiente artículo, *“Medición de temperatura: sensores termoeléctricos”* [33]; los autores describen las formas de medición de temperatura de los sensores de temperatura, como las termocuplas, el circuito integrado LM35 y los termistores NTC y PTC. Las señales se acondicionaron con el circuito integrado AD595, y se usa una tarjeta de adquisición de datos. Se advierte de un desarrollo en GUIDE, de una sola opción para mostrar las variaciones de temperatura de los sensores y relacionarlos entre sí, además presenta un sistema de liberalización de datos de los sensores, y tablas y gráficos relacionales, similar al nuestro. En el artículo, *“Control clásico y moderno sobre células Peltier en un entorno didáctico”* [34], los autores efectúan un análisis exhaustivo del fenómeno termoeléctrico en las células Peltier que resulta bastante difícil de conseguir. Se desarrollan plantillas en GUIDE como el cuadro de diálogos para el control discreto sobre la célula Peltier. Se presenta un novedoso modelo de variable de estado del comportamiento de temperatura de la cara fría de la célula Peltier. Presenta opciones para el cálculo de parámetros, y a diferencia de nuestro trabajo, no presenta tablas de datos, ni una base de datos para analizar el proceso o la simulación. En la

tesis, “Desarrollo de una interfaz gráfica de usuario para el cálculo de parámetros micro mecánicos en materiales compuestos reforzados con fibra óptica” [35]; se observa un buen desarrollo de la interfaz GUIDE de Matlab, incluso se pueden cargar imágenes y se pueden hacer reportes para imprimir, aunque no está directamente relacionado con el tema de investigación pero lo hemos seleccionado, precisamente por el desarrollo de la interfaz gráfica, como instrumento virtual, y podemos concluir diciendo que existen muy pocos desarrollos de instrumentos virtuales para el análisis no solo de materiales termoeléctricos, como hemos visto en los trabajos anteriores. En cuanto a los datos se procesaron en una computadora Core i3, con Windows 8.2 y office 2013, utilizando el software de Matlab versión 2013b [36].

Como se ha indicado y observa, en nuestro trabajo se utilizan las interfaces gráficas de usuario GUIDE de Matlab, en cuyas plantillas se desarrollaron los programas en lenguaje C, para el funcionamiento de la estructura del instrumento virtual.

El desarrollo del programa en Matlab basado en estructuras GUIDE, presenta el siguiente diagrama de bloques:

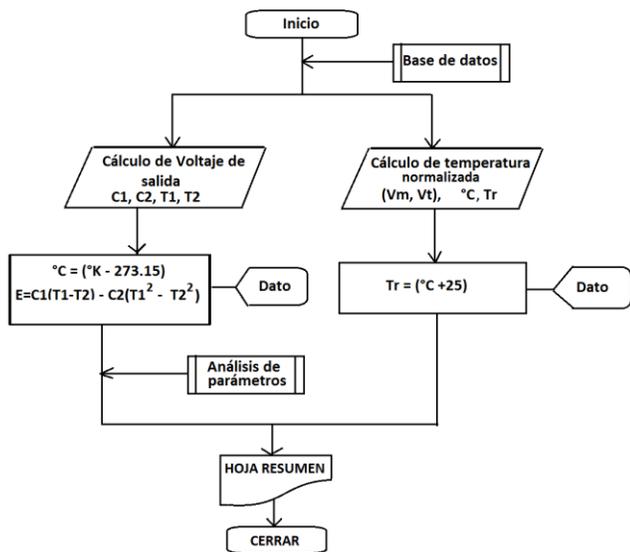


Fig. 4. Diagrama de flujo del sistema del instrumento virtual Fuente: Elaboración propia

Como se observa, en el existe la opción de selección de la Base de datos, donde podemos encontrar tablas y curvas de diferentes parámetros de materiales termoeléctricos. Podemos calcular el voltaje de salida al relacionar dos de los materiales. También se puede calcular la temperatura linealizada de las termocuplas, en base a tablas de linealización. Se puede visualizar la curva Materiales vs. Coeficiente de Seebeck, así mismo podemos elaborar nuestras propias tablas de datos obtenidos y una hoja de datos para almacenar.

De manera general, se presentan en parte los programas de las etapas:

```
%Cálculo del voltaje de salida:
>>c1=handles.edit1
```

```
>>c2=handles.edit2
>>t1=handles.edit3
>>t2=handles.edit4
>>Eab=(c1*(t1-t2)+c2*(t1.^2-t2.^2))/1000
>>set(handles.salida,'String',Eab)
```

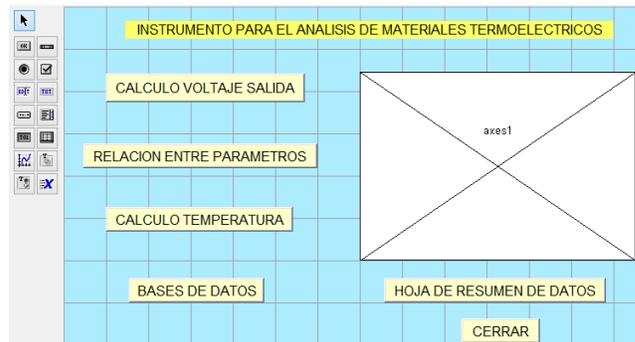


Fig.5. Desarrollo de la estructura en GUIDE:

```
%Cálculo de la temperatura normalizada:
>>c1=handles.temperatura
>>Tr = (c1+25)
>>set(handles.real,'String',Tr)
%función mostrar valor de la temperatura
>>val=get(hObject, 'String')
>>NewVal = str2double (val)
>>handles.temperatura=NewVal
>>guidata(hObject,handles)
```

#### IV. RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados de las simulaciones conducidas para ilustrar el rendimiento del algoritmo propuesto utilizando la herramienta de GUIDE basada en MATLAB para el análisis de los materiales termoeléctricos, tablas de datos, curvas de relaciones, linealización y ensayos respectivos. Podemos decir, que todo lo anterior se estructura en base a los objetivos específicos planteados.

##### A. Calculo del voltaje de salida en función de las temperaturas de unión y el coeficiente Seebeck.

Hemos desarrollado la interfaz de usuario, denominada CALOR, en la cual se puede obtener el voltaje de salida, en función de las temperaturas de unión de los materiales.

Tomando como ejemplo, utilizamos los materiales: Aluminio, con coeficiente Seebeck de 3.5 (según tabla) y el material Oro, con coeficiente Seebeck de 6.5, a temperaturas de unión correspondientes a  $T_1$  y  $T_2$ , (tomando  $T_2$  como la de referencia, es decir, fija), según la teoría descrita en líneas anteriores: 100 °C (373.15°K) y 80°C (353.15°K), respectivamente. Ejecutando el botón de “Voltaje de salida”, podemos observar el resultado de 23.47 mV.

Como sabemos, el coeficiente Seebeck, es un valor relativo (uV/°C- incremento de voltaje por incremento de grado de temperatura). Por ello, las medidas de las termocuplas no son lineales, deben de linealizarse.



Fig. 6. Voltaje de salida para Aluminio-Oro  
Fuente: Elaboración propia

Asimismo, en la Fig. 7, utilizando los materiales: Constantan, con coeficiente Seebeck de -35 (según tabla) y el material Nicron, con coeficiente Seebeck de 25, a temperaturas de unión correspondientes, según la teoría descrita en líneas anteriores: 100 °C (373.15°K) y 80°C (353.15°K), respectivamente. Ejecutando el botón de "Voltaje de salida", podemos observar el resultado de 89.3mV.

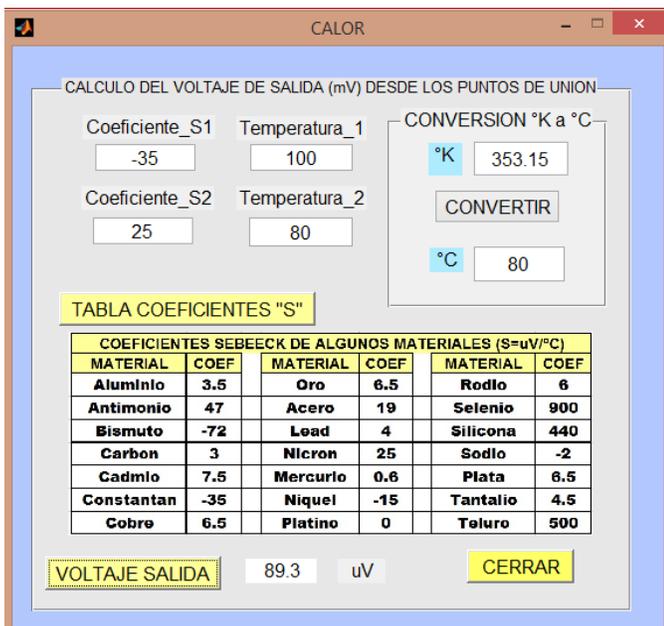


Fig. 7. Voltaje de salida para Constantan-Nicron  
Fuente: Elaboración propia

### B. Relaciones entre parámetros

Presentamos a continuación las relaciones entre parámetros, mediante tablas y gráficos. En una primera presentación, para la tabla mostrada, observamos la curva para

un coeficiente Seebeck mayor a 3.0 y menor de 1000 (Relación: Coeficiente Seebeck (uV/°C vs. Tipo de materiales).

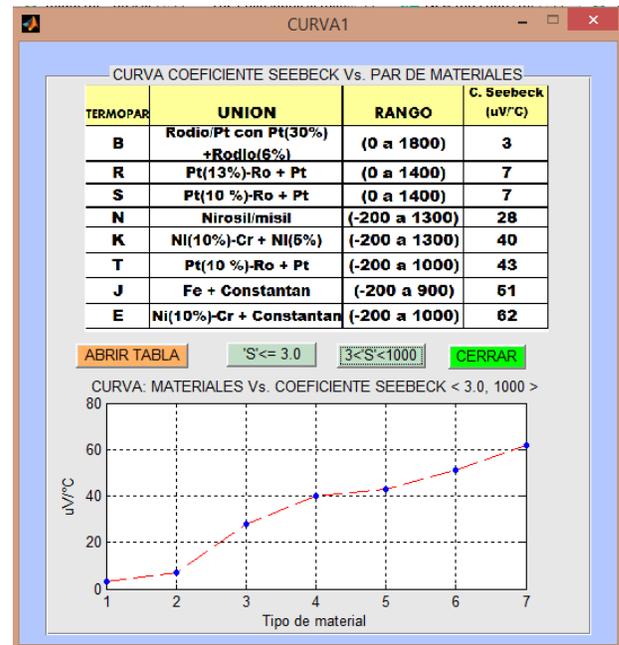


Fig. 8. Coeficiente Seebeck (3,100) vs. Tipo material  
Fuente: Elaboración propia

TABLA I. VOLTAJE DE SALIDA DE UNION DE MATERIALES  
Fuente: Elaboración propia

MAT. A	C1	T1 (°C)	MAT. B	C2	T2 (°C)	V SALIDA
Aluminio	3.5	80	Oro	6.5	60	18.27
Antimonio	47	80	Acero	19	60	54.14
Bismuto	-72	80	Lead	4	60	9.76
Carbon	3	80	Nicron	25	60	70.06
Cadmio	7.5	80	Mercurio	0.6	60	1.83
Constantan	-35	80	Niquel	-15	60	-42.72
Cobre	6.5	80	Platino	0	60	0.13
Rodio	6	80	Selenio	900	60	2520.12
Silicona	440	80	Sodio	-2	60	3.2
Plata	6.5	80	Tantalio	4.5	60	12.73
Teluro	500	80	Rodio	6	60	26.8
Cadmio	7.5	80	Nicron	25	60	70.15
Aluminio	3.5	80	Cobre	6.5	60	18.27
Selenio	800	80	Teluro	500	60	1416
Sodio	-2	80	Nicron	25	60	69.96

### C. Para el caso de termocuplas industriales

Observando el comportamiento del coeficiente Seebeck de los materiales, dependiendo de la variación del calor, nos conduce a comprender que el comportamiento en la adquisición de datos de una determinada termocupla, es de carácter no-lineal, por esa misma razón, se hace necesaria la linealización (línea recta), y ello se logra con la observación y búsqueda de valores aproximados en las tablas de linealización (tomamos como ejemplo a la termocupla J). Es importante indicar, que nosotros para leer los datos de dichas tablas, hacemos que Matlab, interactúe con Word.

Tomando como ejemplo, los valores de las mediciones: voltaje medido en las uniones = 10.84 mV. En la tabla de la termocupla J se encuentra que para 10.84 mV, el valor más

aproximado es 10.832 mV, y corresponde a 200 °C. Si la temperatura de ambiente en los contactos es 25 °C aprox., entonces la temperatura medida es 225°C (25°C + 200°C).

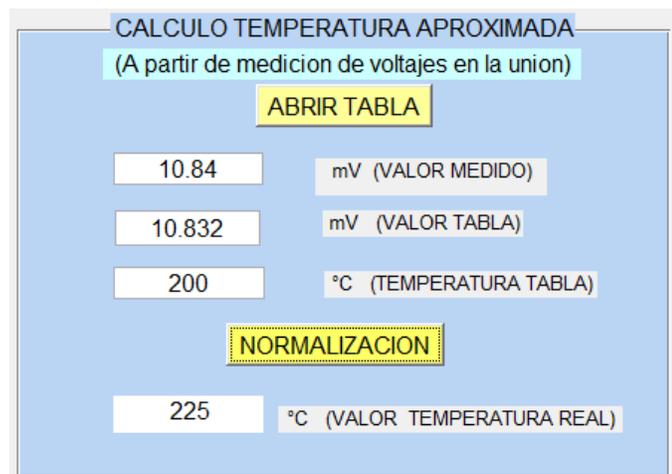


Fig. 9. Calculo de temperatura normalizada  
Fuente: Elaboración propia

Haciendo uso de la interacción entre Matlab y Word, a continuación, presentamos la tabla de la termocupla J. Esta contiene los valores de normalización, para la obtención de las temperaturas reales, en función del voltaje medido entre ambas uniones. Se remarca el voltaje aproximado de 10.832 mV., correspondiente al voltaje medido de 10.84 mV.

TABLA II. LINEALIZACIÓN TERMOCUPLA J  
Fuente: <https://ceiv.com.mx>

TERMOCUPLA	J				milivolts
°C	0	1	2	3	
-210	-8.096				
-200	-7.890	-7.912	-7.934	-7.955	
-190	-7.659	-7.683	-7.707	-7.731	
-180	-7.402	-7.429	-7.455	-7.482	
190	10.222	10.277	10.333	10.388	
200	10.777	10.832	10.888	10.943	
210	11.332	11.387	11.443	11.498	

TABLA III. TEMPERATURA NORMALIZADA  
Fuente: Elaboración propia

V - medido	V- Tabla	TEMP. Tabla	TEMP. Real
10.84	10.832	200	225
11.39	11.387	210	235
11.98	11.943	220	245
12.51	12.498	230	255
13.1	13.109	240	265
13.62	13.608	250	275
14.17	14.163	260	285
14.73	14.718	270	295
15.281	15.273	280	305
15.832	15.827	290	315

#### D. Bases de datos de materiales termoeléctricos

Según los estudios, se han de utilizar materiales que posean un elevado coeficiente Seebeck, una alta conductividad eléctrica, y por último, una baja conductividad térmica. Pensando en un material idóneo, si se analiza en base a la conductividad eléctrica, es obvio que los metales son una opción interesante, mientras que los aislantes quedan descartados por la alta resistencia que oponen a la conductividad eléctrica.

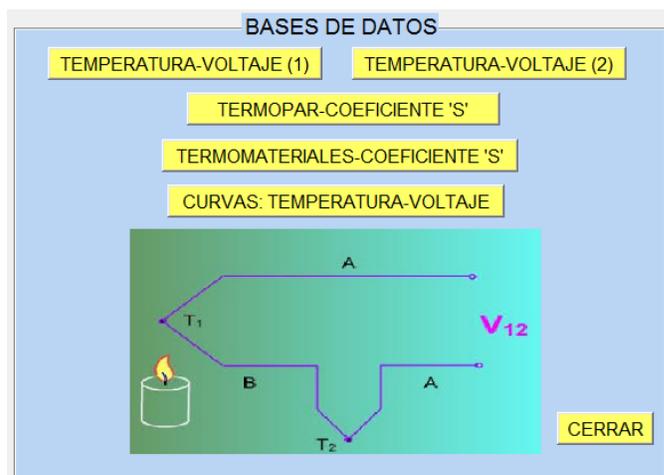


Fig. 10. Panel de la Base de datos  
Fuente: Elaboración propia

Pero al mismo tiempo, como es mayor la movilidad de los portadores, resulta más difícil establecer una diferencia de potencial en el material; o lo que es lo mismo, resulta más complicado obtener un alto coeficiente Seebeck. Cuanto mayor sea el coeficiente Seebeck, menor será la conductividad que ese material muestre [37].

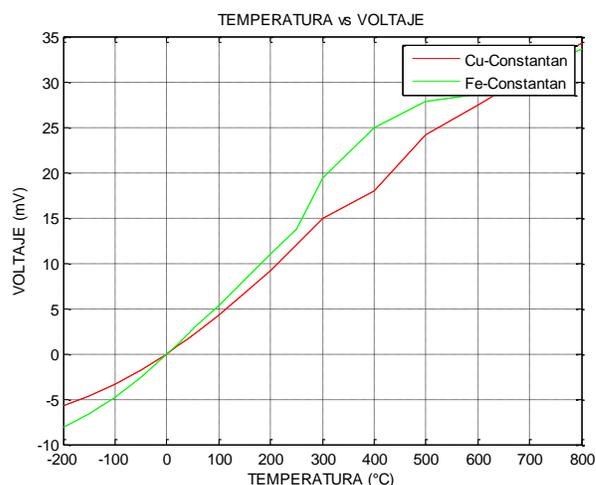


Fig. 11. Curvas Temperatura-Voltaje de uniones Cu y Fe -Constantan  
Fuente: Elaboración propia

En estas curvas se pueden observar la relación Voltaje-Temperatura en las uniones bimetalicas como el Cobre-Constantan y el Hierro-Constantan, dentro de un rango de temperatura que va desde los -200 °C hasta los 800 °C, y voltajes en el rango de -10 Voltios a los 35 voltios.

## V. DISCUSIÓN

A continuación se presentan, las tablas que figuran dentro de la Base de datos, indispensable para las consultas y ensayos. Se pueden incrementar más tablas, curvas, figuras y datos, con el fin de robustecer la información que ayudaran en las investigaciones, en este fascinante campo de los materiales termoeléctricos.

TABLA IV. MATERIAL Vs. COEFICIENTE SEEBECK  
FUENTE: Rof, Albert. Universidad Politècnica de Catalunya

TERMOPAR	UNION	RANGO	Coefficiente Seebeck ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )
B	Rodio/Pt con Pt(30%) + Rodio(6%)	(0 a 1800)	3
E	Ni(10%)-Cr + Constantan	(-200 a 1000)	62
J	Fe + Constantan	(-200 a 900)	51
K	Ni(10%)-Cr + Ni(5%)	(-200 a 1300)	40
N	Nirosil/misil	(-200 a 1300)	28
R	Pt(13%)-Ro + Pt	(0 a 1400)	7
S	Pt(10%)-Ro + Pt	(0 a 1400)	7
T	Pt(10%)-Ro + Pt	(-200 a 1000)	43

TABLA V. TIPO TERMOCUPLA, TEMPERATURA Y VOLTAJE  
Fuente: <http://docentes.uto.edu.bo>

TIPO DE TERMOCUPLA, TEMPERATURA Y VOLTAJE				
TIPO	MATERIALES		RANGOS	
	CONDUCTOR +	CONDUCTOR -	TEMP( $^\circ\text{C}$ )	V(mV)
B	Platino + 30% Rodio	Platino + 6% Rodio	600 a 1820	1.79 a 13.82
C	Tungsteno + 5% Rhenio	Tungsteno + 5% Rhenio	0 a 2316	0 a 37.07
E	Chromel	Constantan	(-250,1000)	(-9.71,76.37)
J	Hierro	Constantan	(-250,1200)	(-8.09,69.55)
K	Chromel	Niquel-Al	(-200,1370)	(-5.89,54.88)
L	Hierro	Constantan	(-200,900)	(-5.16,53.14)
N	Nirosil	Nisil	(-200,1300)	(-3.99, 47.51)
R	Pt + 13% Rodio	Platino	(-20,1767)	(-0.101,210.8)
S	Pt + 10% Rodio	Platino	(-20,1767)	(-0.103,18.68)
T	Cobre	Constantan	(-250,400)	(-6.18,20.87)
U	Cobre	Constantan	(-200,600)	(-5.69,34.32)

TABLA VI. TEMPERATURA Y VOLTAJE UNION BIMETALICA  
Fuente: <https://mx.omega.com/prodinfo/termopar.html>

TEMPERATURA ( $^\circ\text{C}$ ) vs VOLTAJE(mV)		
TEMPERATURA ( $^\circ\text{C}$ )	Cu - Constantan (mV)	Fe - Constantan (mV)
-200	-5.7	-8.15
-150	-4.69	-6.6
-100	-3.4	-4.75
-50	-1.81	-2.51
0	0	0
20	0.8	1.05
40	1.63	2.11
60	2.48	3.19
80	3.35	4.27
100	4.25	5.37
150	6.62	8.15
200	9.2	10.95
250	11.98	13.75
300	14.9	19.36
400	17.92	25
500	24.15	27.85
600	27.41	28.56
800	34.31	33.67

Tomando como ejemplo la "Tabla II. Linealización termocupla J", expuesto en la sección *Resultados*, en este trabajo, observamos el proceso de linealización que se hace necesaria, al conocer que el coeficiente Seebeck de los materiales ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ), es un valor que representa el valor del incremento de voltaje en función del incremento de la temperatura, y por tal motivo, es necesario normalizar los valores de voltaje en la salida, para poder obtener el valor real de la medición. Cada una de las termocuplas tienen sus propias tablas de normalización, y ellas se utilizan generalmente en procesos industriales, en donde básicamente se controla la temperatura, sin dejar de manejar variables de entrada y de salida. Así mismo, es necesario, explorar y ensayar con otros materiales termoeléctricos, con el objetivo de obtener una mayor eficiencia en cuanto a obtener mayores niveles de voltaje en la salida.

Por otro lado, podemos agregar, que una vez obtenido el voltaje en la salida (del orden de los mV.), podemos intentar acoplarlo a un circuito de acondicionamiento de la señal, y a etapas de amplificación conectados a circuitos de potencia, con los cuales, podríamos alcanzar mayores niveles de energía, que podrían ser muy útiles para energizar algunas etapas, dentro de los procesos industriales. Este tema de investigación, es un campo ilimitado de estudio y de aplicaciones.

### A. Recomendaciones

- Estudiar y ensayar con otros materiales termoeléctricos, y procurando obtener una mayor eficiencia y mayores niveles, en la salida de energía eléctrica.
- Interactuar ensayos que involucren el efecto Seebeck y el efecto Thomson.
- Estudiar la obtención de energía eléctrica, a partir de la generación de calor de todo tipo de fuentes de calor.
- Procurar mejorar la interfaz de Matlab, para el estudio y análisis de los materiales termoeléctricos.

### B. Conclusiones

- Es posible estudiar y analizar el comportamiento de los materiales termoeléctricos, mediante el empleo de plantillas GUIDE, desarrolladas en Matlab.
- El calentamiento de las uniones bimetalicas de metales y de materiales termoeléctricos, nos permite obtener energía eléctrica en forma de voltaje, en la salida, dependiendo del coeficiente Seebeck.
- Es posible, obtener mayores niveles de energía eléctrica en forma de voltaje, agregando etapas de circuitos eléctricos, tales como las de acondicionamiento, de amplificación, de potencia, entre otros.
- Con el software de Matlab, podemos graficar curvas, elaborar tablas, y funciones matemáticas.
- Con software de Matlab, podemos hacer muchas más plantillas GUIDE relacionadas con el tema tratado, ello depende de los conocimientos y punto de vista del programador, así mismo podemos complementar las simulaciones con programas en simulink.

## REFERENCIAS

- [1] Guarneros, A., López, H., Caballero, B., (2018). Dispositivos termoelectricos: Generando electricidad usando el calor residual. CONACYT-Instituto Politécnico Nacional, Materiales para Energía, Salud y Medioambiente (GESMAT), México. Revista Materia, Ciencia y Nanociencia. <https://www.uv.mx/veracruz/microna/files/2019/06/A4.-Dispositivos-Termoelectricos-Generando-Electricidad-Usando-el-Calor-Residual.pdf>
- [2] Wang, L., Liu, Y., Zhang, Z., Wang, B., Qiu, J., Hui, D., Wang, S. (2017). Polymer composites-based thermoelectric materials and devices. Department of Industrial and Systems Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843, United States. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836817306819>
- [3] Uranga, Daniel (2015). Materiales Termoelectricos. Generando energía eléctrica a partir del calor. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/274075613\\_Materiales\\_Termo-electricos\\_Generando\\_energia\\_electrica\\_a\\_partir\\_de\\_calor/link/5514ee600cf260a7cb2df5e6/download](https://www.researchgate.net/publication/274075613_Materiales_Termo-electricos_Generando_energia_electrica_a_partir_de_calor/link/5514ee600cf260a7cb2df5e6/download)
- [4] Peña G., Nuria (2020). Síntesis y caracterización termoelectrica de películas delgadas de pirita. Universidad Autónoma de Madrid (UAM) / Instituto de Micro y Nanotecnología (IMN). [https://digital.csic.es/bitstream/10261/230633/1/DIRECCION\\_DE\\_TR\\_ABAJOS823249.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/230633/1/DIRECCION_DE_TR_ABAJOS823249.pdf)
- [5] Díez G., Sara (2017). Análisis de viabilidad de aplicaciones para recuperación de energía mediante efectos termoelectricos. Universidad Politécnica de Madrid. [http://oa.upm.es/48875/1/TFG\\_SARA\\_DIEZ\\_GARCIA.pdf](http://oa.upm.es/48875/1/TFG_SARA_DIEZ_GARCIA.pdf)
- [6] Azorín, P. (2018). Efecto Peltier y desarrollo de posibles aplicaciones, Universidad Politécnica de Valencia.
- [7] Castillo F. Jorge (2017). Generadores termoelectricos accionados por el calor humano para dispositivos portátiles. Estado del arte y modelado térmico sencillo. Universidad de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/64157/files/TAZ-TFG-2017-2944.pdf>
- [8] Figliola, Richard S., Beasley, Donald E., (2011). Theory and Design for Mechanical Measurements, Fifth Edition, Clemson University, John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Zapata, D. Israel. (2016). Materiales termoelectricos de alto ZT en base de Si y sus aleaciones con Ge. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Puebla, México. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/838/1/ZapataDIE.pdf>
- [10] González de la Vara, A. (2017), Análisis por elementos finitos de los generadores termoelectricos y sus aplicaciones aeroespaciales. Universidad Politécnica de Valencia Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño.
- [11] Gayner, C., Kar, K., Kim, W., (2018). Recent progress and futuristic development of PbSe thermoelectric materials and devices(Review), Advanced Nanoengineering Materials Laboratory, Department of Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, South Korea.
- [12] Olaya, D. (2017). Termoelectricidad en dispositivos heteroestructurados a base de grafeno y nanotubos de carbono. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias. Bogotá, D.C. – Colombia
- [13] Quesada-Martínez, A, Meza-Benavides, C. (2019). Evaluación de materiales semiconductores utilizando simulación numérica con elementos finitos para la producción termoelectrica en condiciones de vacío. ResearchGate. Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [14] Arian, Control e Instrumentación, Santiago de Chile. (2021) <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>
- [15] Beretta, B., Neophytou, N., Hodges, J., Kanatzidis, M., (2019). Thermoelectrics: From history, a window to the future. Center for Nano Science and Technology, Istituto Italiano di Tecnologia. Elsevier. Materials Science & Engineering R.
- [16] García D. G, González, O. D, Hernández C, L, Fungo, C. D, García G. I, (2014), Efecto del cambio de agente protector en las propiedades ópticas y eléctricas de sulfuro de plomo (PbS), ResearchGate.
- [17] Vasilevsqiya D. Keshavarza, M.K. Dufourcq, J. Ihou-Mouk, H. Navonnc, C. Masuta R.A. Turennea, S. (2015), Material termoelectrico tipo n a granel basado en Mg2Si producido por atomización de gas y extrusión en caliente, ScienceDirect.
- [18] Choudhury, I.A, Hashmi, S. (2020), Encyclopedia of renewable and sustainable materials, Elsevier.
- [19] Pérez-Taborda, J., Caballero-Calero, O., Martín-González, M., (2017), Silicon-Germanium (SiGe) Nanostructures for Thermoelectric Devices: Recent Advances and New Approaches to High Thermoelectric Efficiency. ResearchGate.
- [20] Garkida, A. I. (2019), Radioisotope thermoelectric power generation, University of Glasgow. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/330872086\\_RADIOISOTOP\\_E\\_THERMOELECTRIC\\_POWER\\_GENERATION\\_1\\_Theory/link/5c5a50a045851582c3d17f0e/download](https://www.researchgate.net/publication/330872086_RADIOISOTOP_E_THERMOELECTRIC_POWER_GENERATION_1_Theory/link/5c5a50a045851582c3d17f0e/download)
- [21] García D. G, González, O. D, Hernández C, L, Fungo, C. D, García G. I, (2014), Efecto del cambio de agente protector en las propiedades ópticas y eléctricas de sulfuro de plomo (PbS), ResearchGate.
- [22] Gadea, G., Pacios, M., Morata, A., Tarancón, A. (2018), Nanoestructuras de silicio para generadores termoelectricos integrados, IOPscience. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/aad683/meta>
- [23] Polozine, A, Sirotinskaya, S, Schaeffer, L. (2014), History of Development of Thermoelectric Materials for Electric Power Generation and Criteria of their Quality. aLaboratório de Transformação Mecânica – LdTM, Centro de Tecnologia – CT.
- [24] Li, N., Ma, L., Xu, X., Luo, J., (2021), Influence of Seebeck effect on charge transfer between two friction surfaces. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X21002085>
- [25] Torres E., (2016), Obtención y caracterización eléctrica del material Cu2SNo2 y como material termoelectrico, Instituto Tecnológico Detuxtla Gutiérrez.
- [26] Chen, G., Tang, M., Yang, R., (2021), New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials, Guangdong Ocean University.
- [27] Solorio H., (2018). Propiedades termoelectricas del carbonitruro de renio (ReCN), Maestría en Ciencias en Nanociencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- [28] Schwarz, K.; Blaha, P. (2003). "Solid state calculations using WIEN2k". Computational Materials Science.
- [29] Quesada-Martínez, A., Meza-Benavides, C. (2018). Evaluación de materiales semiconductores utilizando simulación numérica con elementos finitos para la producción termoelectrica en condiciones de vacío. DOI, ResearchGate.
- [30] Kobbekaduwa, K. P. V. B., Subasinghe, N. D., (2016). Modelling and Analysis of Thermoelectric Generation of Materials Using Matlab/Simulink. National Institute of Fundamental Studies, Hanthana Road, Kandy, Sri Lanka. International Journal of Energy and Power Engineering.
- [31] Khamil, K.N., Sabri, M.F.M., Yusop, A.M., Mohamed, R., Sharuddin, M. S., (2020). Modelling and Simulation of the Performance Analysis for Peltier Module and Seebeck Module using MATLAB/Simulink. Department of Mechanical Engineering, University of Malaya, Malaysia. ResearchGate.
- [32] Sreekala P, A Ramkumar, K.Rajesh, (2019). Performance Analysis of Thermo Electric Generator using MATLAB, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE).
- [33] Alzate, R. E., Montes, J., Ocampo, C., Silva, O., A. (2007). Medición de temperatura: sensores termoelectricos. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [34] Platero, C. Control clásico y moderno sobre células Peltier en un entorno didáctico. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial (UPM).
- [35] Benavides P., L. (2019). Desarrollo de una interfaz gráfica de usuario para el cálculo de parámetros micro-mecánicos en materiales compuestos reforzados con fibra corta. Universidad Politécnica Salesiana.
- [36] The Mathworks (2021). <https://es.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>
- [37] Undurraga A., (2014). Viabilidad de los materiales termoelectricos, Universidad de Barcelona, Màster en Energies Renovables i Sostenibilitat Energético.