

Recibido: 20.01.2022 • Aceptado: 22.02.2023

Palabras clave: Aleaciones de alta entropía, nuevos materiales, industria aeroespacial.

# Aleaciones de alta entropía: una mirada hacia el futuro

MARCO ANTONIO RUIZ-ESPARZA RODRÍGUEZ

*marco.ruiz@cimav.edu.mx*

CARLOS GAMALIEL GARAY REYES

*carlos.garay@cimav.edu.mx*

ROBERTO MARTÍNEZ SÁNCHEZ

*roberto.martinez@cimav.edu.mx*

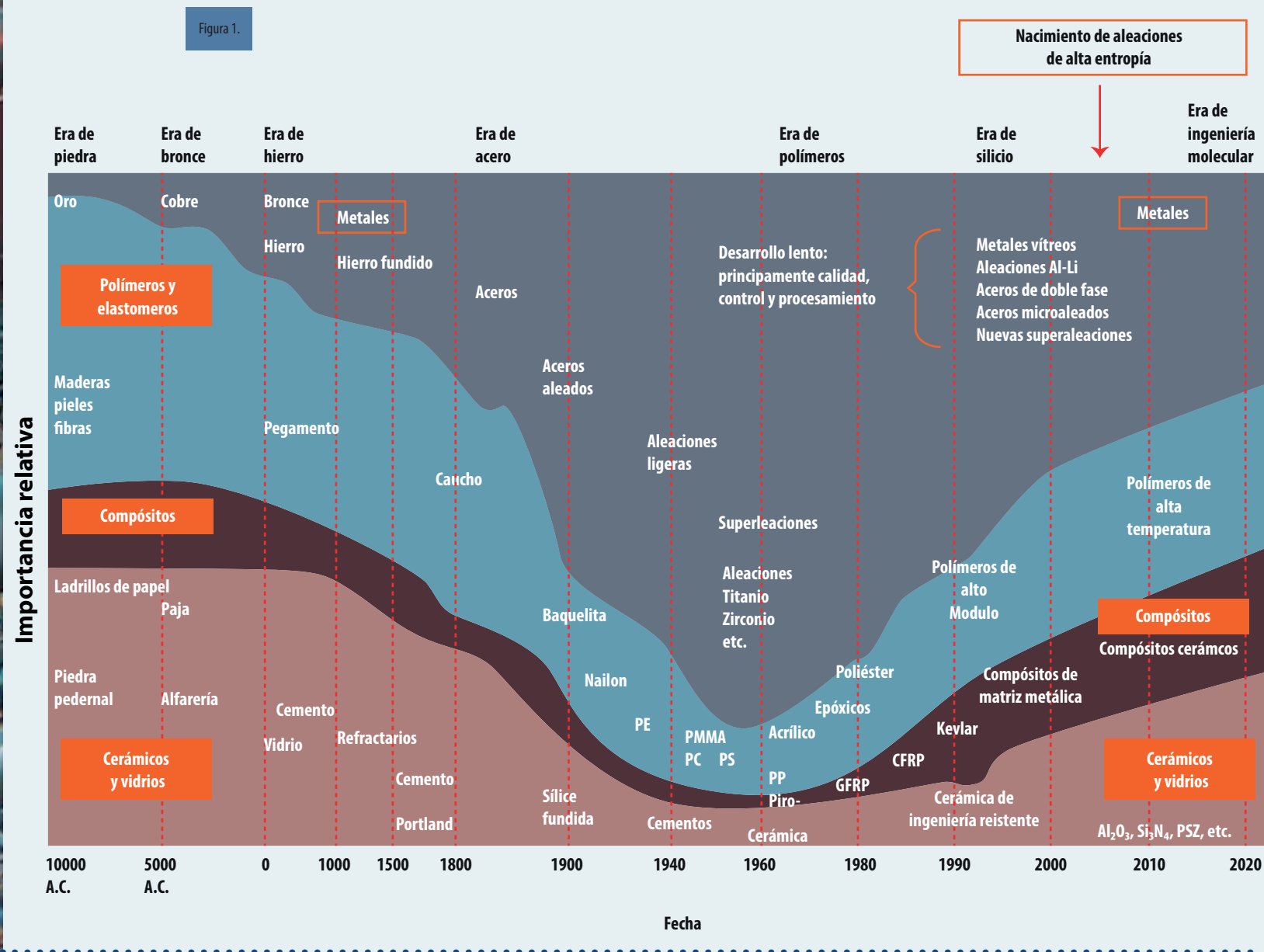
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS

¿Te gustaría conocer los materiales que nos permitirán explorar el espacio? Con el auge de la industria aeroespacial en los últimos años se ha intensificado el desarrollo de nuevos materiales, los cuales deben presentar propiedades que les permitan soportar los fenómenos naturales que se generan en el espacio. Por ejemplo, tener una buena estabilidad estructural y resistencia mecánica para soportar cambios drásticos de temperatura.

En lo que a materiales se refiere, para hablar del futuro hay que entender el pasado; remontándonos a los inicios de la humanidad, el hombre primitivo pudo sobrevivir gracias al empleo de herramientas y armas, las cuales estaban fabricadas principalmente de madera o piedra. Sin embargo, al ser una especie que carecía de las habilidades necesarias para protegerse, fue obligada a buscar nuevos materiales para satisfacer las necesidades más básicas y que, además de favorecer el trabajo diario, les representaran una ventaja sobre otros depre-  
 dadores. Por lo tanto, fue natural que la búsqueda y uso de nuevos materiales avanzara; facilitando así, la vida a la humanidad.

Con el paso del tiempo, las herramientas de madera o piedra se fueron mejorando o sustituyendo por metales o aleaciones; sin embargo, no está definido el comienzo de cada era de los metales, ya que surgieron en distintos lugares del mundo y lentamente se fueron expandiendo (figura 1). Algunos ejemplos de aleaciones utilizadas en esas épocas prehistóricas son el bronce y el latón, que fueron combinaciones de cobre-estaño y cobre-zinc, respectivamente; estas aleaciones tuvieron sus orígenes alrededor de los 5000 a. C. (Laws et al., 2015). Es así que el estudio de materiales inició como un conocimiento empírico (dado por la experiencia), el cual se fue traspasando de generación en generación.

Figura 1.



Una razón por la que es importante entender, estudiar e investigar los materiales ya existentes es para encontrar sustitutos de estos. Es imposible no hablar de aleaciones de alta entropía (AAE) en cuanto al futuro se refiere, ya que estas muestran una gran posibilidad de ser el remplazo de muchas aleaciones convencionales al igualar o hasta mejorar sus propiedades.

### ¿Qué es la entropía y las aleaciones de alta entropía?

Para comprender de una manera sencilla el término de entropía, debemos pensar en un ambiente caótico. Por ejemplo: imaginar cómo es un lugar que ha sufrido un desastre

natural (sismo, huracán, tsunami, erupción volcánica), donde el desorden gobierna sobre el equilibrio y la tranquilidad del ambiente. En este sentido, el concepto de entropía en los materiales está definido como la medida del desorden molecular o atómico de un sistema, y un sistema es el conjunto de elementos ordenados entre sí. Por lo que, al hablar de entropía en aleaciones, nos referimos al desorden que presentan los átomos dentro de la aleación; entre mayor es el número de elementos, mayor será la entropía. Cada elemento presenta diferentes propiedades físicas y químicas que inciden sobre la entropía de la aleación, el tamaño atómico de los elementos es un ejemplo de alguna propiedad que genera desorden en el sistema (figura 2).

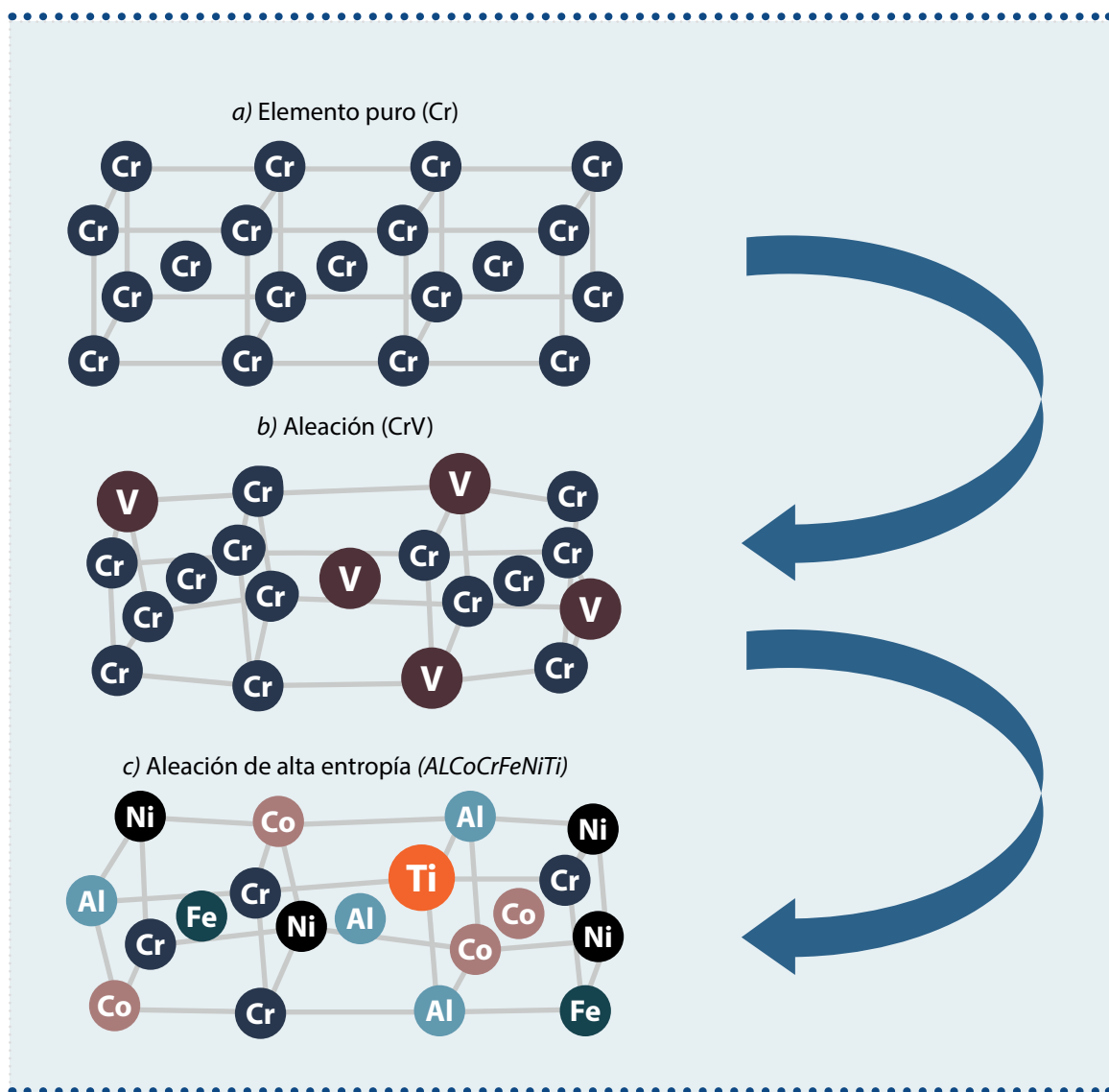


Figura 2. Acomodo de los átomos de a) un elemento puro, b) una aleación de dos elementos y c) una aleación de alta entropía con seis elementos (adaptado de Eißmann *et al.*, 2017).

# Aleaciones de alta entropía: un camino para el espacio

En los últimos años, el desarrollo de nuevos materiales se ha intensificado, buscando propiedades que permitan soportar los fenómenos naturales que ocurren en el espacio. Por ejemplo, que los materiales tengan una buena estabilidad estructural y resistencia mecánica para los cambios drásticos de temperatura.



Aquí cabe mencionar a la entropía, la cual se define como la medida del desorden molecular o atómico de un sistema. En lo que la entropía en aleaciones respecta, nos referimos al desorden que presentan los átomos dentro de la aleación.



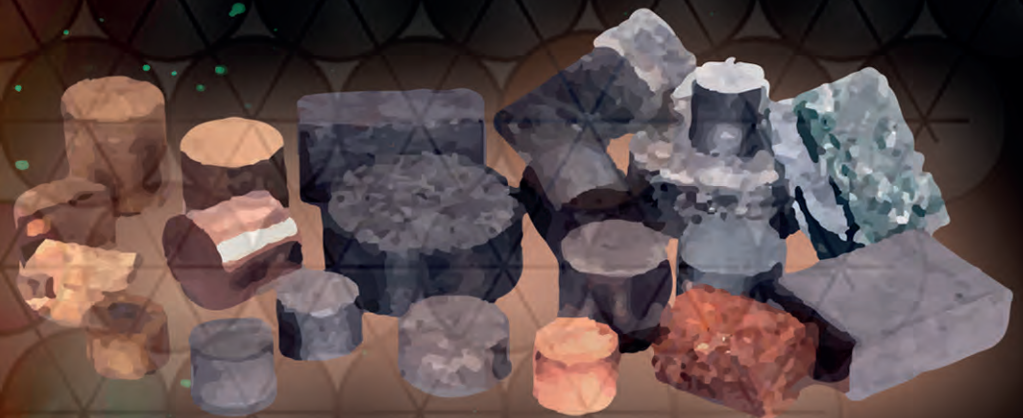
Las aleaciones de alta entropía surgieron en el año 2004 con dos nombres distintos: multicomponentes y de alta entropía. El primero, nombrado así por Brian Cantor, estaba conformada de por lo menos cinco elementos. Mientras que Michael C. Gao dio pie al segundo nombre por el gran desorden en su estructura cristalina.

**MULTICOMPONENTES  
Y ALTA ENTROPÍA**

Tanto la industria aeroespacial, la automotriz, de energías limpias como la de transporte, exigen un incremento en la demanda de nuevos materiales proporcional al crecimiento de la población. Principalmente que dichos materiales se caractericen por su alta resistencia y además sean ligeros para así reducir el impacto ambiental.



- Las aleaciones de alta entropía tendrán participación en la industria aeroespacial, con las características mencionadas se podrá seguir explorando la inmensidad del universo.



Por su lado, las aleaciones de alta entropía surgieron en el año 2004 con dos diferentes nombres: multicomponentes y de alta entropía. El primer nombre fue dado por Brian Cantor a una cierta aleación conformada de por lo menos cinco elementos (Changning *et al.*, 2015), los cuales tienen una concentración equiatómica o aproximadamente equiatómica, es decir, que se encuentran entre los límites de 5 y 35 por ciento atómico. Mientras que Gao *et al.* (2016), dieron pie al segundo nombre por el gran desorden que éstas presentan en su estructura cristalina (ordenamiento atómico).

### Tipos de aleaciones de alta entropía

Es importante mencionar que el campo de estudio que abrieron las aleaciones de alta entropía es muy grande, esto debido a que existe una cantidad considerable de nuevas aleaciones que pueden investigarse. En la figura 3, se muestran los tres tipos de elementos de aleación que pueden ser parte de las aleaciones de alta entropía. Por consiguiente, es fundamental saber que la formación de estas familias corresponde a propiedades similares entre los elementos que la conforman, es decir, un tamaño similar del átomo, su estructura cristalina (forma en que se

acomodan los átomos) y su electronegatividad (afinidad de unirse por fuerzas de enlace con otros elementos), es por eso que se clasifican en las siguientes familias, de acuerdo con Changning *et al.* (2015):

- 1) Ligeras: este tipo de aleaciones utilizan principalmente elementos ligeros, entre los cuales están: Li, Be, Mg, Sc, Y, B, C, N, Si, Ge, Sn, Bi.
- 2) De transición: estas aleaciones se forman principalmente por elementos de transición tales como el: Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Al, Ru, Pd, Ag, Au.
- 3) Refractarias: estas aleaciones se caracterizan por estar formadas principalmente por elementos con alto punto de fusión tales como: Ti, V, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W.

Además, existen excepciones de mezclas de elementos provenientes de diferentes familias como los bronce y latones; este tipo de aleación se distingue, como se mencionó anteriormente, por la utilización de cobre-estaño o cobre-zinc, cuyas principales características son: excelente resistencia al desgaste y compresión; buena conductividad térmica y buen coeficiente de fricción cuando se combina con grafito.

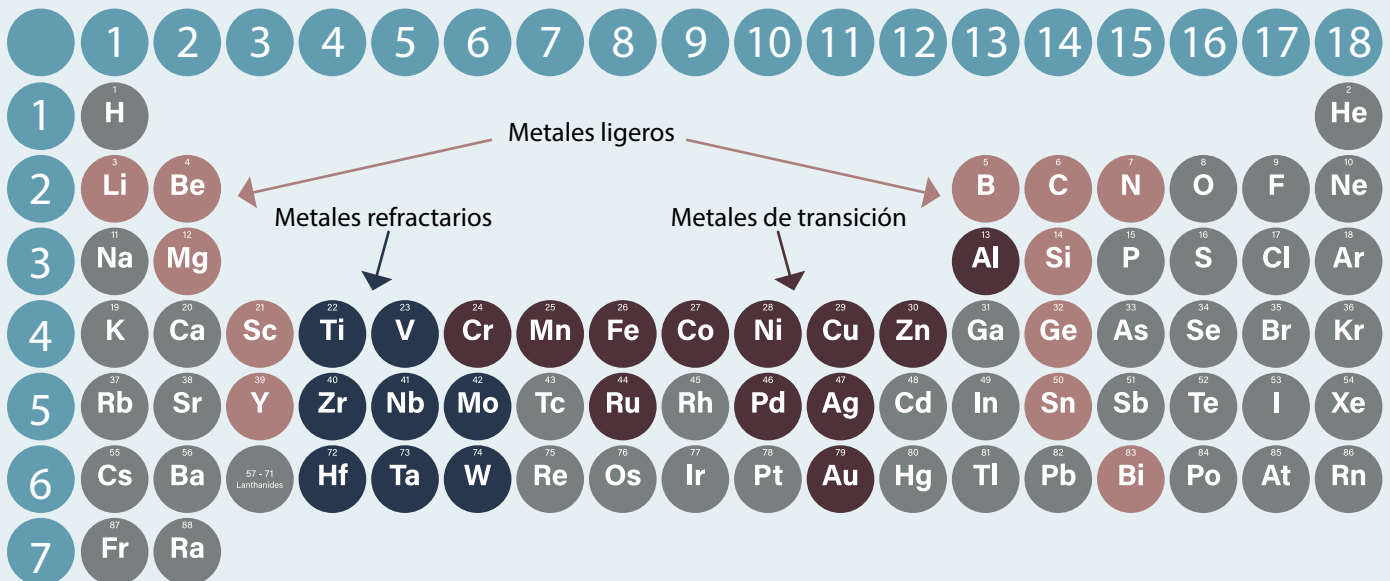


Figura 3. Clasificación de las familias de las aleaciones de alta entropía (adaptado de Changning *et al.*, 2015)

La gran amplitud de combinaciones de elementos que puede haber gracias a este tipo de aleación, abre la puerta a grandes expectativas para satisfacer las nuevas necesidades que la industria quiera satisfacer, ya que sigue una tendencia de buenos resultados. De acuerdo con Wu *et al.* (2006), las principales características son:

- 1) Dureza de entre 100 a 1100 Vickers
- 2) Conservación de sus propiedades en altas temperaturas
- 3) Alta resistencia a la corrosión

### Aplicaciones

Si todo avance surge por una necesidad, ¿cuál es la necesidad de seguir investigando hoy en día? En 1889, Charles H. Duell, quien era el Comisionado de la Oficina de Patentes y Marcas Registradas de los Estados Unidos de América, mandó un oficio al presidente de la misma comisión, apuntando que la Oficina de Patentes pronto se reduciría y eventualmente cerraría, con el argumento de que: "Todo lo que se puede inventar ha sido inventado". Sin embargo, la relevancia de la frase va más allá de quién y cuándo la mencionó por primera vez, pues lo importante es que la historia nos demuestra que la humanidad debe seguir investigando y mejorando a pesar de los descubrimientos hechos en el pasado.

Foto 1.

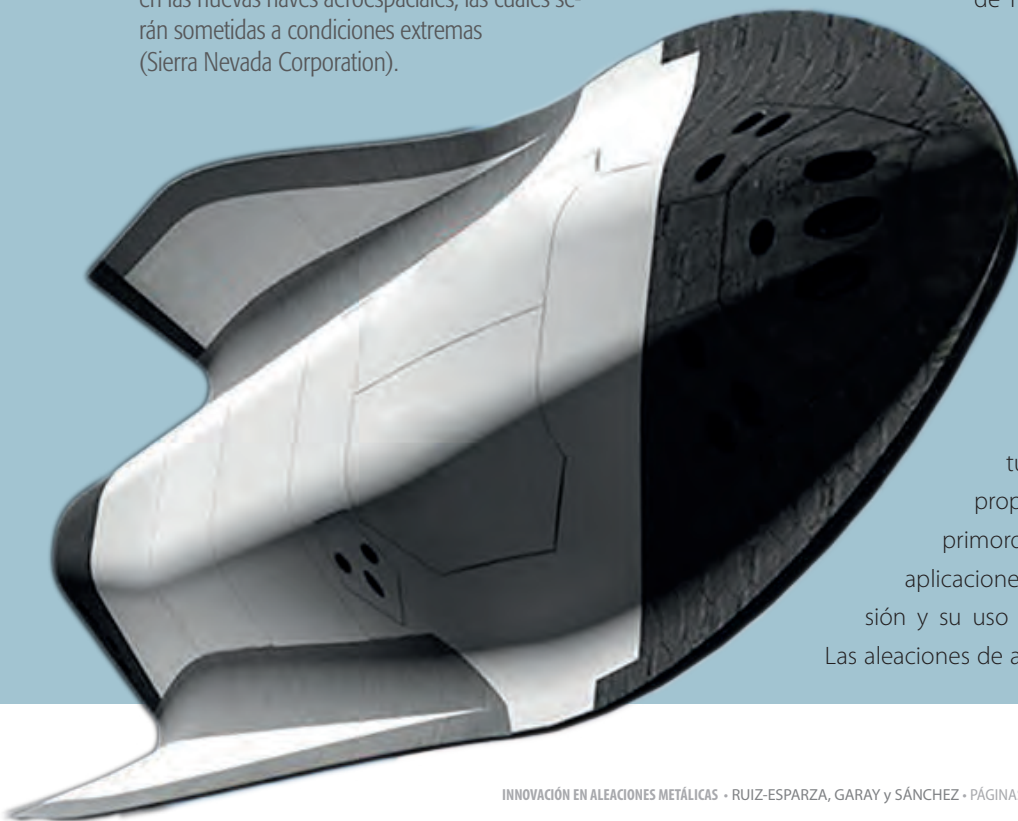
Las aleaciones de alta entropía en un futuro podrían usarse en las nuevas naves aeroespaciales, las cuales serán sometidas a condiciones extremas (Sierra Nevada Corporation).

En este sentido, un ejemplo de los avances que todavía pueden efectuarse utilizando las aleaciones de alta entropía, está en las industrias aeroespacial, automotriz, de energías limpias y transporte, las cuales deben estar en constante innovación, ya que su demanda de crecimiento es proporcional a la cantidad de población que necesita un medio de transporte que sea seguro y amigable para el medio ambiente. Por lo cual, demandan nuevos materiales que tengan alta resistencia a esfuerzos y que, a su vez, se mantengan ligeros para reducir el impacto ambiental en el consumo de combustibles fósiles. Si bien el costo de fabricación de las aleaciones de alta entropía es mayor en comparación a la de las aleaciones comerciales comúnmente usadas; éstas pueden utilizarse para materiales especializados en la industria aeroespacial que requiere de materiales con una mayor resistencia a condiciones extremas (foto 1).

### ¿Qué es lo que viene?

Una de las preguntas que el ser humano se ha hecho desde sus inicios como ser pensante es: ¿qué habrá más allá de las estrellas?, y esa es una de las razones por las cuales llegamos al espacio en 1961, después a la luna en 1969 y actualmente hay equipos explorando Marte. A sabiendas de lo bas-


to que es el universo, la innovación de materiales siempre será un reto. Las aleaciones convencionales han fallado a la hora de tratar de cumplir con los requerimientos de la industria aeroespacial, ya que, al momento de estar sometidos a una alta temperatura no mantienen las propiedades deseadas, algo primordial, sobre todo en las aplicaciones de motores a propulsión y su uso en ambientes hostiles. Las aleaciones de alta entropía tendrán su





MARCO ANTONIO RUIZ-ESPARZA RODRÍGUEZ

Es maestro en Ciencia de Materiales por el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, en donde estudia el posgrado y realiza el proyecto "Síntesis de aleaciones de alta entropía".

participación sobre todo en la industria aeroespacial, ya que este nuevo tipo de aleaciones presentan un gran rango de propiedades, como peso ligero, una elevada relación resistencia-peso, buena resistencia a la oxidación, a la fatiga, a temperaturas elevadas, al desgaste y a la termofluencia, por mencionar algunas. Así con el continuo desarrollo de estas aleaciones existirán más opciones a la hora de seleccionar una aleación que nos pueda permitir explorar la inmensidad de nuestro universo (foto 2). 

Referencias bibliográficas:

- Murty, B. S., Yeh, J. W., Ranganathan, S. y Bhattacharjee, P. P. (2019). A brief history of alloys and the birth of high-entropy alloys. En *High-Entropy Alloys* (2ª Ed.) pp. 1-12. Amsterdam: Elsevier.
- Eißmann, N., Klöden, B., Weißgärber, T. y Kieback, B. (2017) High-entropy alloy CoCrFeMn-Ni produced by powder metallurgy, *Powder Metallurgy*, 60(3), pp. 184-197. <https://doi.org/10.1080/00325899.2017.1318480>.
- Changning, N. (2015). *First Principles Studies of NiFeCrCoMn High Entropy Alloys* (tesis de doctorado). Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Estatal de Raleigh, Carolina del Norte.
- Gao, M. C., Yeh, J. W., Liaw, P. K. y Zhan, Y. (2016). *High-Entropy Alloys Fundamentals and Applications*. Suiza: Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27013-5>.
- Wu, W. H., Yang, C. C., Yeh, J. W. (2006). Industrial development of high-entropy alloys. *European Journal of Control*, 31. pp. 737-747. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.737-747>.



Foto 2.

Viajar a otros planetas y colonizarlos siempre ha sido una fuente de misterios e intriga ¿Qué encontraremos? (Greg Rakozy / Unsplash).