

Residuos sólidos como estructuras disipativas¹

Juan Fernando Montoya Carvajal², Conrado Giraldo Zuluaga³, Luis Fernando Garcés Giraldo⁴

Resumen

Los residuos sólidos son materiales de desecho que inciden a un depósito natural y afectan el ecosistema a su alrededor volviendo imposible el surgimiento y permanencia de la vida de manera espontánea, esto debido al alto índice de agentes contaminantes y componentes tóxicos, por lo tanto, el reto actualmente es hacer una conversión de procesos para darles usos prácticos a estos residuos, tratando de mitigar el impacto ambiental de este tipo de contaminación. El

objetivo principal de este trabajo es proponer una reflexión a la luz de la segunda ley de la termodinámica que explique la mitigación del impacto de residuos sólidos. Desde la termodinámica, se propone un modelo de mitigación del impacto ambiental, considerando la estructura disipativa como el modelo para generar la transformación del caos al orden.

Palabras clave: residuos peligrosos, estructuras disipativas, entropía, caos.

1 Artículo de reflexión derivado de trabajo de investigación doctoral llevado a cabo en Unilasallista Corporación Universitaria y en la Universidad Pontificia Bolivariana desde enero de 2020.

2 Doctorando en Filosofía. Docente de tiempo completo de Unilasallista Corporación Universitaria.
Correo: jmontoya@unilasallista.edu.co, Orcid: 0000-0001-8476-4435.

3 Doctor en Filosofía. Profesor de tiempo completo de la Universidad Pontificia Bolivariana.
Correo: conrado.giraldo@upb.edu.co, Orcid: 0000-0003-1885-9158.

4 Doctor en Filosofía. Docente e Investigador de la Escuela de Posgrados de la Universidad Continental del Perú.
Correo: lgarcés@continental.edu.pe, Orcid: 0000-0003-3286-8704.

Autor para Correspondencia: jmontoya@unilasallista.edu.co

Recibido: 19/03/2024 Aceptado: 30/07/2024

*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

Solid waste as dissipative structures

Abstract

Solid waste is waste materials that affect a natural deposit, affecting the ecosystem around it, making it impossible for the emergence and permanence of life spontaneously, due to the high rate of polluting agents and toxic components, therefore, the challenge currently is to convert processes to give practical uses to this waste,

trying to mitigate the environmental impact of this type of pollution. The main objective of this work is to propose a reflection from the second law of thermodynamics that explains the mitigation of the impact of solid waste. From thermodynamics, a model for mitigating environmental impact is proposed, considering the dissipative structure as the model to generate the transformation from chaos to order.

Keywords: hazardous waste, dissipative structures, entropy, chaos

Resíduos sólidos como estruturas dissipativas

Resumo

Os resíduos sólidos são materiais residuais que afetam um depósito natural, afetando o ecossistema ao seu redor, impossibilitando o surgimento e a permanência da vida de forma espontânea, devido ao alto índice de agentes poluentes e componentes tóxicos, portanto, o desafio atualmente é converter processos de utilizações práticas a estes resíduos,

tentando mitigar o impacto ambiental deste tipo de poluição. O objetivo principal deste trabalho é propor uma reflexão a partir da segunda lei da termodinâmica que explica a mitigação do impacto dos resíduos sólidos. A partir da termodinâmica é proposto um modelo de mitigação do impacto ambiental, considerando a estrutura dissipativa como modelo para gerar a transformação do caos em ordem.

Palavras-chave: resíduos perigosos, estruturas dissipativas, entropia, caos

Introducción

Con la Ilustración, las luces de la razón se hicieron sobre el pensamiento humano, contribuyendo a la posibilidad de hacer el conocimiento por medios propios, con el hombre como el partícipe de su evolución cognitiva que hace de la realidad un espacio de pensamiento que se ha diversificado en áreas de conocimiento, formando la ciencia desde la duda y consolidando la tecnología desde la ejecución del conocimiento científico. El conocimiento científico ha sido hostil con el medio ambiente, ha dejado la hospitalidad con la naturaleza y por alguna razón se ha desfigurado el rostro de lo humano para con la casa común (Levinás, 2013). El ser humano en su trascendencia no puede alejarse de lo natural, porque no es un puente al superhombre, solo lo que es llamado al cuidado del medio ambiente es el puente entre lo humano y su esencia, pues el conocimiento de la naturaleza es lo que realmente le entrega la verdadera sabiduría al ser humano y quien se aleja de lo natural no trasciende como esencia (Nietzsche, 2022).

El avance tecnológico ha traído consigo la dilución de las capacidades ambientales, se ha elevado el índice de deforestación, la explotación de recursos y la contaminación ambiental, todo ello evidencia una mejora sustancial en la calidad tecnológica y en las condiciones de supervivencia, pero a su vez un mayor índice de disipación de las capacidades naturales del planeta (Zhao *et al.*, 2016). En general, lo humano ha trascendido y la comodidad de su expansión ha significado la disminución del espacio vital de la naturaleza, incurriendo en un

incremento desmesurado de entropía y una pérdida irreparable de condiciones naturales (Yilmaz *et al.*, 2017).

Los materiales empleados en la vida diaria generalmente son de cuatro tipos: cerámicos, metales, polímeros y materiales compuestos. Entre los materiales más usados se encuentran los plásticos, los cuales presentan considerable dificultad para ser compatibles con el medio ambiente y con el trabajo científico que se realiza para mitigar el impacto del polímero sintético en la naturaleza ha llevado al cambio de políticas y procesos en la actualidad (Zhang *et al.*, 2023). El uso de los diferentes materiales depende de las características físicas y químicas, en los casos más comunes están dirigidos a aplicaciones de naturaleza mecánica que requieren materiales de adecuado soporte estructural para usos que dependen de propiedades tales como densidad, resistencia mecánica, tenacidad, resiliencia, etc. Otro tipo de aplicaciones avanzadas hacen referencia a las capacidades de naturaleza física o química (eléctricas, térmicas, ópticas o magnéticas), ejemplo de ello son materiales empleados para el transporte de portadores de carga o las capacidades dieléctricas, siendo en este tipo de propiedades eléctricas aplicaciones de características físicas y químicas del material (Kim *et al.*, 2023).

Los materiales sólidos tienen una vida útil y deben ser reemplazados a medida que se deterioran o cumplen con las funciones específicas, así se generan residuos de estos materiales, lo que se ha convertido en una problemática a nivel mundial dada la enorme cantidad de desechos sólidos

que afectan el medio ambiente y la vida en general (Banaei *et al.*, 2023). Los desafíos en diversas áreas del conocimiento consisten en la reutilización de materiales sólidos, es decir, en propiciar el reciclaje de estos materiales con el fin de contribuir en un proceso sostenible, autónomo y limpio (Yang *et al.*, 2020). En el caso de materiales que no pueden ser reciclados, el reto consiste en mitigar el impacto ambiental (Yaashikaa y Senthil Kumar, 2022), partiendo del conocimiento de las características de los materiales y los efectos generados a partir de su condición de desecho (Zhang *et al.*, 2023).

La compatibilidad de materiales con el entorno depende de la composición química fundamentalmente (Farrokhi-Asl *et al.*, 2020), lo cual es complicado en muchos casos debido a que la forma orgánica requiere de composiciones similares o afines para la compatibilidad, pero resulta imposible en muchos casos que los contaminantes con radicales o contaminantes químicos puedan coexistir en un sistema orgánico ordenado y funcional (El-Saadony *et al.*, 2023).

Un sector de la ciencia y la ingeniería ha enfocado esfuerzos en la mitigación y recuperación de materiales sólidos que inciden al medio ambiente, empleando para ello diferentes alternativas que consideran, en general, un método de ejecución cuyo punto de partida suele ser una caracterización del residuo sólido, seguida de una identificación de propiedades, reconocimiento de potencialidades para posible reutilización (Cui *et al.*, 2022) y finalmente la mitigación, la cual podría ser mediante un reciclaje o por medio de la erradicación de la problemática (Xu y Yang,

2022). Dada la composición de algunos materiales, se hace imposible la adaptación de productos al medio ambiente, por lo tanto, la problemática se agrava cuando este tipo de residuos son desechados al medio ambiente sin control y sin un adecuado proceso de mitigación (Zhang *et al.*, 2022).

La termodinámica es una rama fundamental de la física, los postulados que la definen explican no solo los fenómenos naturales sino también los procesos a nivel industrial y las problemáticas de la realidad, lo cual facilitaría su contribución si se analizan los procesos desde las transformaciones de energía y el incremento de la entropía de los diferentes sistemas. Con este trabajo se propone una reflexión desde la termodinámica para explicar la mitigación del impacto de residuos sólidos en el medio ambiente, tomando como concepto principal la entropía y su inexorable generación.

Proceso de transformación del sistema

Sea un instrumento de operación con capacidad de ejecución y uso, se considera que este tiene una constitución variable con componentes funcionales que ajustados a un ciclo de procesos cumple con una tarea de uso denominada trabajo (W), lo cual se podrá entender como una capacidad energética asociada al uso del sistema. Con el fin de explicar el proceso de uso, a continuación, se explican las fases del proceso de transformación de un sistema en función de las condiciones energéticas de conformación y uso.

Etapa 1. Conformación del sistema o constitución del material

Tomando como sistema una cantidad específica de materia m cuya composición ha sido clasificada y caracterizada, se tiene una masa de control definida por una mezcla heterogéneas cuyas propiedades definen un estado termodinámico 1, al cual le corresponde una cantidad específica de energía E_1 . Esta cantidad de materia en un estado 1, a partir de un suministro de energía Q_H llevará el sistema a un siguiente estado 2, el cual se caracterizaría por una cantidad neta de energía E_2 , tal que de acuerdo con la primera ley de la termodinámica:

$$Q_H = E_2 - E_1$$

En el estado 2, se podría pensar que el sistema o material constituido es apto para su uso, por lo tanto, la usabilidad depende de las condiciones óptimas y con ello el estado 2 es el que garantiza la plenitud de las capacidades del material. El material, independiente de su composición, tiene asociada una usabilidad y por la energía de transformación desde el estado 1, el material tiene un valor monetario asociado y el uso del material corresponde a que el sistema en forma neta ejerce un trabajo W , dadas las condiciones del estado 2.

Etapa 2. Degradación del sistema o desecho del material

Considerando el uso del sistema, a medida que este realiza un trabajo neto W , se puede definir una eficiencia η del sistema como la cantidad de trabajo ejercido respecto a la cantidad energía disponible, es decir:

$$\eta = \frac{W}{Q_H}$$

De acuerdo con la experiencia, se puede suponer que la eficiencia es máxima para un valor de tiempo $t = 0$, es decir, la eficiencia es máxima cuando no se ha ejecutado (considerando condiciones óptimas de uso). A partir del uso del sistema, el material a medida que realiza un trabajo W de manera repetida, paulatinamente disminuye su eficiencia, es decir que la eficiencia disminuye en función del tiempo.

La eficiencia del sistema disminuye debido a una pérdida paulatina de sus capacidades, lo cual debe asociarse a una disminución de la energía disponible, lo cual energéticamente corresponde a una transformación de energía desde el estado 2 hasta el estado 3. El estado 2 se podría considerar como el estado óptimo y el estado 3 se podría considerar como el estado de mínima eficiencia, en el cual se hace necesario desechar del ciclo de uso.

Desde la primera ley de la termodinámica, se podría considerar que energéticamente la transformación de la energía sería un calor de uso Q_L que corresponde a la transformación de la energía desde el estado 2 hasta el estado 3, es decir que:

$$Q_L = E_3 - E_2$$

Si se Considera que el sistema alcanza su uso máximo y luego se degrada su capacidad de uso, se puede decir que trabajo neto disponible es cero, es decir, la eficiencia tiende a cero ($\eta = 0$).

En el esquema que se presenta en la **figura 1**, se ilustran los procesos energéticos asociados al uso del material en función de la transformación de la energía desde la

conformación de energía desde el estado 1 de materia prima hasta el estado de uso óptimo o estado 2 y luego la transformación hasta el estado de desecho o estado 3.

Figura 1.

Proceso de transformación energética en sistema funcional



Nota. Elaboración de los autores.

Análisis energético del sistema

Si se entiende que el sistema transforma su energía manteniendo fija su cantidad de materia, se puede considerar que el sistema energéticamente se ajusta al balance:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Donde t es la variable de tiempo, E es la energía del sistema, \dot{Q} la forma de energía calórica y \dot{W} la forma de energía de trabajo. Suponiendo que el trabajo de uso es un valor fijo y considerando que la energía del sistema es directamente proporcional a la energía calórica generada a partir del uso en función del tiempo, se tiene que:

$$\dot{Q} = \dot{W}(1 - e^{-kt})$$

Donde k es la constante de proporcionalidad entre el calor liberado y la energía del sistema. Con este resultado,

se puede analizar que inicialmente el calor liberado es nulo, es decir, para $t = 0$ se tiene que $\dot{Q} = 0$, lo cual da a entender que la eficiencia es máxima, por ende, no se ha empezado a degradar el sistema. Para el caso de tener un valor de tiempo de uso extendido, el valor de energía de desecho \dot{Q} tiende a ser la de uso \dot{W} , por lo tanto, el sistema para $t \rightarrow \infty$ se tiene que $\dot{Q} = \dot{W}$, lo cual significa que la eficiencia es cero ($\eta = 0$).

Eficiencia y generación de entropía

Partiendo de la desigualdad de Clausius, se tiene que para la transformación del sistema a través desde los estados $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, la eficiencia η sería:

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

A lo cual, la variación en el tiempo sería a su vez:

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{1}{Q_H} ((1 - \eta)\dot{Q}_H - \dot{Q}_L)$$

Esto significa que partiendo de un valor de eficiencia máxima y manteniendo fija la energía de formación Q_H se tiene que la eficiencia tiende a disminuir a medida que incrementa la energía calórica de uso, es decir que $\Delta\eta \sim -Q_L$, lo cual corresponde con lo analizado desde la primera ley.

Al igual que en el análisis de energía, el análisis de entropía sería la razón de cambio:

$$\frac{dS}{dt} = \Delta S_H + \sigma$$

Donde S es la entropía del sistema, ΔS_H la entropía asociada a la energía de disipación y σ la generación de entropía. De acuerdo con la relación de entropía, se puede deducir finalmente que el sistema degrada su capacidad de uso debido a un incremento entrópico, lo cual corresponde propiamente a que la generación neta de entropía desde su valor óptimo hasta su valor mínimo de uso sería:

$$\sigma = \sigma_0 e^{kt}$$

Donde t es el tiempo, σ_0 es el valor inicial de disipación, k una constante de proporcionalidad entre la entropía del sistema y la generación de entropía por parte del sistema. Este resultado da a entender que la generación de entropía es máxima a medida que aumenta el tiempo, por lo tanto, el sistema claramente degrada sus capacidades de uso a medida que es utilizado, es decir, la eficiencia del sistema disminuye hasta su valor mínimo.

Al disminuir las capacidades, el sistema sería obsoleto en cuanto el uso para el cual fue diseñado el sistema, por lo tanto, se requiere de un nuevo proceso para darle uso al sistema, dado que, al obtenerse la relación exponencial, se puede concluir que a medida que incrementa el tiempo el caos aumenta para el sistema, esto asumiendo k como una constante de Lipanov. Considerando este resultado, se da a entender que a medida que disminuye la eficiencia, incrementa la entropía generada y a su vez el sistema incrementa su caos, lo cual energéticamente disminuye sus capacidades hasta que la energía de uso W se vuelve igual a la energía de desecho Q_L .

La mitigación del impacto ambiental como un proceso de estructuración disipativa

Boltzmann (como se citó en Prigogine, 1993), define la entropía así:

$$S = k_B \ln \Omega$$

Donde k_B es la constante de Boltzmann, S es la entropía y Ω es la distribución de probabilidad que define las condiciones energéticas del macroestado termodinámico. Considerando la transformación de estados termodinámicos $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, y empleando la desigualdad de Clausius se obtiene la relación:

$$(S_2 - S_1) - (S_3 - S_2) < 0$$

Donde cada entropía define cada estado. Suponiendo que la transformación entre estados es un conjunto de procesos

irreversibles se tiene que la generación de entropía σ sería:

$$\sigma = (S_3 - S_2) + (S_1 - S_2)$$

Partiendo de la definición de Boltzmann se obtiene la relación.

$$\sigma = K \left[\ln\left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right) + \ln\left(\frac{\Omega_3}{\Omega_2}\right) \right]$$

Donde k es una constante de proporcionalidad asociada a la dimensionalidad de los macroestados. A los macroestados termodinámicos se asocian condiciones de distribución estadística $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$. Considerando la generación de entropía asociada a condiciones de disponibilidad energética de cada estado, la posibilidad de usabilidad define las capacidades energéticas potenciales del material. A partir de un incremento entrópico, la estructura disipativa toma forma desde la maximización de la entropía para luego conformarse siguientes sistemas funcionales. Para el caso de generación entrópica el sistema tendría la siguiente relación de incremento entrópico:

$$\sigma \sim \ln\left(\frac{\Omega_1 \Omega_3}{\Omega_2 \Omega_2}\right)$$

Esta relación indica la generación de entropía debida a la transformación de los estados y a la pérdida de la calidad de la energía disponible, siendo el valor significativo de aumento de irreversibilidad la diferencia entre los estados 3 y 2, lo cual corresponde a la pérdida de calidad entre los valores máximos y mínimos de la eficiencia del sistema.

Para completar el proceso de mitigación del sistema en estado 3, es necesario transferir energía para alcanzar un estado 4, siendo este estado una condición de energía adicionada con el fin de facilitar el reciclaje o la mitigación del impacto. En la **figura 2** se pueden evidenciar los cambios hipotéticos de energía, presentándose cambios de energía para suministrarle calidad al sistema y evitar la dilución de las capacidades, es decir, se hace necesario un último proceso para completar un ciclo termodinámico. La contribución de energía podría ser hipotética, pues dada la situación de una minimización de la energía de uso, sería teóricamente imposible que el sistema recupere su usabilidad y en ese caso el desecho debe ser neutralizado para evitar un impacto ambiental significativo.

En el caso de incluirse un estado 4, al emplear la desigualdad de Clausius y la definición de Boltzmann, se obtiene la relación para generación de entropía:

$$\sigma = K \left[\ln\left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right) + \ln\left(\frac{\Omega_3}{\Omega_2}\right) + \ln\left(\frac{\Omega_3}{\Omega_4}\right) \right]$$

Es decir que la generación de entropía neta para este tipo de proceso sería:

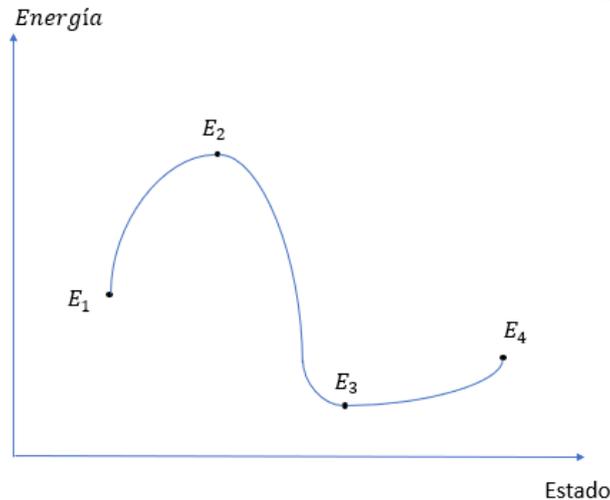
$$\sigma = K \ln\left(\frac{\Omega_1 \Omega_3 \Omega_3}{\Omega_2 \Omega_2 \Omega_4}\right)$$

Lo cual se podría reescribir mediante la relación:

$$\sigma = K \ln\left(\frac{\Omega_1}{\Omega_4}\right) + 2K \ln\left(\frac{\Omega_3}{\Omega_2}\right)$$

Figura 2.

Esquema de estados donde se evidencian los cambios de energía



Nota. Elaboración de los autores.

A partir de esta relación, se puede interpretar que solo sería posible considerar procesos irreversibles, implicaría que los cambios entre los estados serían despreciables, lo cual significa diferencias de energía despreciables, siendo esto poco probable dado que la transformación del sistema mediante cambios de estado implica variaciones de energía significativa para el sistema. Para el caso en que los estados 1 y 4 sean similares, entonces se tendría que la generación de entropía solo dependería de la transformación entre los estados 2 y 3, es decir, la generación de entropía es máxima cuando el sistema pierde calidad desde la eficiencia máxima hasta la eficiencia mínima, es decir:

$$\sigma \approx 2K \ln\left(\frac{\Omega_3}{\Omega_2}\right)$$

La anterior relación solo sería válida en el caso en que los estados 1 y 4 sean similares,

es decir que luego de ser desechado el material, tendría las mismas posibilidades de uso que en el estado de materia prima (estado 1), lo cual es factible cuando el sistema podría ser reciclado o parcialmente reutilizado. Para el caso en que el sistema alcance un posible estado similar al estado 2, se podría suponer que el sistema sería activo y plenamente reutilizable, siendo este caso el menos probable, dado que luego de ser desechado el material recuperaría sus condiciones óptimas y para ello la generación de entropía debería ser mínima.

Para que el sistema, luego de ser desechado, se transforme en un conjunto de sistemas disipativos, es necesario evaluar la diferencia entre los estados, pues la degradación entre los estados 2 y 3 es la componente de mayor contribución a la entropía generada por parte del sistema, haciendo que el proceso tenga mayor índice de irreversibilidad y, por ende, mayor índice

de caos al interior del funcionamiento y con ello un mínimo en la eficiencia. Para el caso de tener un sistema donde los cambios de estados 1 y 4 energéticamente sean similares, se podría esperar que el sistema pueda emplearse como una estructura disipativa con capacidades de uso y potencialidades de transformación favorable a la eficiencia de uso. De acuerdo con la relación de generación de entropía, también se podría asumir una división en componentes del sistema, con el fin de contribuir a un incremento de energía al dividir en componentes y con ello inducir a procesos de estructuración disipativa, lo cual sería ideal para diversificar los usos de los materiales o dispositivos en la realidad. Si el estado 4 dista de la energía mínima de adaptación en el medio ambiente, la entropía del sistema aumenta y la del medio ambiente disminuiría, induciendo pérdida de la calidad de la energía disponible del entorno, lo cual sería una contaminación o degradación, presentándose una estabilidad por procesos de naturaleza eléctrica si se busca neutralizar carga, o un proceso de equilibrio termodinámico para igualar condiciones térmicas o de propiedades de sustancia.

Para que un sistema se adapte a un nuevo ciclo de uso, la energía asociada al estado debe cumplir un valor mínimo de uso, pues la calidad de la energía se disipa a medida que se da uso y una vez alcanzado el mínimo de energía y por ende el máximo de entropía, no se podría disponer de este para uso, por lo tanto, sería necesaria una inversión de energía para lograr mitigar el impacto, lo cual para muchas situaciones sería invertir

esfuerzos energéticos (equivalente a valor monetario) en residuos que se consideran basura apta para un relleno sanitario, que a su vez no será otra cosa que un factor adicional a la contaminación del medio ambiente y el hecho de no estar neutralizado, es decir, al no tener la energía mínima necesaria para adaptarse al medio ambiente, cumpliría con una condición inestable que afecta el entorno a partir de la necesidad de neutralizarse o alcanzar el equilibrio natural, es decir, los desechos que su estado de energía mínima no es apto para condición de energía requieren de una condición de estabilidad, extrayendo esta energía del medio ambiente y con ello, la disminución de posibilidades de uso, dado que la neutralización del desecho degrada el entorno, minimizando la entropía del desecho pero a su vez, acelerando la entropía del medio ambiente, acelerando el proceso de contaminación o dilución de las capacidades energéticas naturales.

Conclusiones

La transformación de la materia se asocia a cambios de energía y a partir del estado óptimo de uso de un sistema o material, se presenta una tendencia inexorable a la pérdida de capacidades energéticas de usabilidad, disminuyendo a su vez su posibilidad de uso debido a un incremento entrópico, lo cual es producto de la transformación de la energía a partir de la transferencia de energía disponible en forma de calor. El trabajo realizado por el sistema se transforma en calor de desecho, lo cual es propio de un incremento entrópico por parte del material, siendo propio de la irreversibilidad de las

transformaciones llevadas a cabo entre los cambios de estados termodinámicos.

A partir de la entropía, se puede concluir que la capacidad de uso se asocia a la posibilidad de uso del sistema, lo cual se hace evidente desde la ecuación de Boltzmann, donde se evidencia la relación entre la entropía del proceso con la distribución estadística asociada al macroestado termodinámico. El incremento de la entropía es propio de la contribución del caos sobre el sistema, significando que espontáneamente es imposible que el sistema recupere condiciones iniciales de capacidad energética, lo que hace necesario un incremento de energía sobre el sistema para llevar el sistema a un ciclo de uso.

Si la entropía generada en el sistema es un indicador del caos, se hace evidente que la única posibilidad de que un sistema cambie de estados posibles es que los procesos sean irreversibles, es decir que mientras más parecidos sean los estados termodinámicos mayor posibilidad de uso por parte del sistema. Para el caso en que el sistema presenta procesos con mayor irreversibilidad menor será la posibilidad de ser utilizado.

A favor de la reversibilidad, la estructuración espontánea de procesos disipativos corresponde a menor índice de caos en los materiales en el estado 3, por lo tanto, la estructura disipativa se constituye cuando existe menor entropía generada entre los estados 2 y 3, lo cual corresponde a la pérdida de capacidades desde el estado óptimo al de mínima energía de uso o mayor entropía de proceso.

Cuando el sistema de uso es degradado energéticamente, requiere de un valor de energía para alcanzar el mínimo necesario para su estabilidad, lo que lleva a procesos catalíticos de naturaleza física o química en la disminución de la energía del medio ambiente, generando degradación de las capacidades de uso y con ello, un acelerado proceso de contaminación o incremento de entropía en el entorno del desecho que genera un caos desmesurado para afrontar nuevas posibilidades de uso. Espontáneamente, un sistema podría evolucionar hasta hacer parte de un nuevo ciclo natural, pero en condiciones de mínima energía no sería posible lograr un sistema eficiente con usabilidad positiva, sería lo contrario, se cumpliría el postulado de Clausius, lo cual sería: “es imposible que un sistema se ordene espontáneamente luego de cumplir su vida útil si la energía de estado es menor al valor mínimo de energía de uso o adaptación natural”. Con esto, se podría concluir que, si un sistema luego de cumplir un proceso de uso es desechado, actuaría como una estructura disipativa para alcanzar su equilibrio incrementando la entropía a partir de la dilución del entrono o medio que lo contiene.

Referencias

Banaei, G., García-Rodríguez, A., Tavakolpournegari, A., Martín-Pérez, J., Villacorta, A., Marcos, R. and Hernández, A. (2023). The release of polylactic acid nanoplastics (PLA-NPLs) from commercial teabags. Obtention, characterization, and hazard effects of true-to-life PLA-

- NPLs. *Journal of Hazardous Materials*, 458, 1-12.
- Cui, Z., Xu, G., Ormeci, B. and Hao, J. (2022). Kill two birds with one stone: The management of hazardous waste and the preparation of efficient adsorbents for Pb (II) were realized by the pyrolysis of penicillin mycelial dreg. *Environmental Pollution*, 316(21-22). <https://lc.cx/qnHkbZ>
- El-Saadony, M., Saad, A. M., El-Wafai, N., Abou-Aly, H., Salem, H., Soliman, S., El-Mageed, T., Elrys, A., Selim, S., El-Hack, M., Kappachery, S., El-Tarabily, K. and AbuQamar, S. (2023). Hazardous wastes and management strategies of landfill leachates: A comprehensive review. *Environmental Technology and Innovation*, 31. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186423001463>
- Farrokhi-Asl, H., Makui, A., Ghousi, R. and Rabbani, M. (2020). Developing a hazardous waste management system with consideration of health, safety, and environment. *Computers and Electrical Engineering*, 82(3). <https://lc.cx/oQU-nq>
- Kim, D.-M., Lim, W.-L., Im, D.-G., Hwang, J.-W., Yu, S., Yun, S.-T. and Kim, J.-H. (2023). Fractionation behaviors of Cu, Zn, and S-O isotopes in groundwater contaminated with petroleum and treated by oxidation. *Journal of Hazardous Materials*, 458. <https://lc.cx/AADaYP>
- Levinás, E. (2013). *Totalidad e infinito*. Sígueme.
- Nietzsche, F. (2022). *Así habló Zaratustra*. Panamericana.
- Prigogine, I. (1993). *Las leyes del caos*. Tusquets.
- Xu, X. and Yang, Y. (2022). Municipal hazardous waste management with reverse logistics exploration. *Energy Reports*, 8(1), 4649-4660.
- Yaashikaa, P. R. and Senthil Kumar, P. (2022). Bioremediation of hazardous pollutants from agricultural soils: A sustainable approach for waste management towards urban sustainability. *Environmental Pollution*, 312(38). https://lc.cx/_wLAeI
- Yang, P., Zhang, L. J., Wang, X. J. and Wang, Z. L. (2020). Exploring the management of industrial hazardous waste based on recent accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 67. <https://lc.cx/TQ-OEF>
- Yilmaz, O., Kara, B. and Yetis, U. (2017). Hazardous waste management system design under population and environmental impact considerations. *Journal of Environmental Management*, 203, 720-731.
- Zhang, J., Guo, N., Ding, W., Han, B., Zhao, M., Wang, X., Wang, J., Cao, B., Zou, G. and Chen, Y. (2023). Microplastic pollution and the related ecological risks of organic composts from

different raw materials. *Journal of Hazardous Materials*, 458. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389423011949>

Zhang, S.-T., Li, T., Deng, S.-K., Spain, J. and Zhou, N.-Y. (2023). A cytochrome P450 system initiates 4-nitroanisole degradation in *Rhodococcus* sp. strain JS3073. *Journal of Hazardous Materials*, 458. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.05.077>

Zhang, Z., Malik, M., Khan, A., Ali, N., Malik, S. and Bilal, M. (2022). Environmental impacts of hazardous waste, and management strategies to reconcile circular economy and eco-sustainability. *Science of the Total Environment*, 807. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721059349>

Zhao, J., Huang, L., Lee, D.-H. and Peng, Q. (2016). Improved approaches to the network design problem in regional hazardous waste management systems. *Transportation Research Part E*, 88, 52-75.