



INGENIERÍA DE LA RESILIENCIA EN EL DISEÑO DE PROCESOS

Jesús Manuel Núñez-López ^{a*}, Juan Gabriel Segovia-Hernández ^a

^a Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas,
Departamento de Ingeniería Química, Noria Alta s/n, 36050, Guanajuato, Gto., México.

jm.nunez@ugto.mx

Resumen

El término de resiliencia ha tomado relevancia en las últimas décadas. La resiliencia se aplica en diversos campos laborales y puede influir en cómo las personas manejan situaciones desafiantes en el entorno profesional; representa la capacidad de los individuos, organizaciones y sistemas para enfrentar, adaptarse y recuperarse de situaciones adversas. En un mundo caracterizado por cambios constantes, desafíos inesperados y complejidades crecientes, la resiliencia se convierte en una cualidad fundamental que influye en la forma en que enfrentamos los obstáculos y superamos las dificultades. Este concepto trasciende disciplinas, encontrando aplicaciones en la psicología, la ingeniería, la gestión organizacional y otros campos.

Palabras clave: adaptación; adversidad; ingeniería de procesos; resiliencia.

RESILIENCE ENGINEERING IN PROCESS DESIGN

Abstract

The term resilience has gained relevance in recent decades. Resilience is applied to various work fields and can influence how people handle challenging situations in professional environment; It represents the ability of individuals, organizations and systems to face, adapt and recover from adverse situations. In a world characterized by constant change, unexpected challenges and increasing complexities, resilience becomes a fundamental quality that influences the way we face obstacles and overcome difficulties. This concept transcends disciplines, finding applications to psychology, engineering, organizational management, and other fields.

Keywords: adaptation; adversity; process engineering; resilience



1. Introducción

El término de resiliencia tiene sus raíces en el área de la física, específicamente en la rama de ciencia de materiales, donde se utiliza para describir la capacidad de un material para recuperar su forma original después de ser sometido a tensiones. Aunque el término ha evolucionado y se ha expandido más allá del ámbito de la ingeniería, su aplicación en el contexto psicológico y social es más reciente. Se han propuesto distintas definiciones para este término en las diferentes áreas donde es utilizado; pero en general, la resiliencia es la capacidad de resistir y adaptarse a una perturbación y recuperar su estado normal (Ribeiro y Peña Jardim Gonçalves, 2019).

La historia de la resiliencia en el ámbito psicológico se remonta a la década de 1970, cuando los psicólogos comenzaron a estudiar la capacidad de algunas personas para enfrentar y recuperarse de experiencias traumáticas. En las décadas siguientes, el concepto de resiliencia se extendió más allá de la psicología para abarcar diversos campos, incluidos la educación, la salud, la gestión organizacional y la ingeniería. Se reconoció que la resiliencia no solo era relevante a nivel individual, sino también a nivel comunitario y organizacional.

Hoy en día, la resiliencia es un tema interdisciplinario ampliamente estudiado y aplicado. Se considera una habilidad clave para afrontar los desafíos de la vida, adaptarse a entornos cambiantes y promover el bienestar personal y colectivo. La comprensión y promoción de la resiliencia continúan evolucionando a medida que la sociedad enfrenta nuevos retos y se busca fortalecer la capacidad de las personas y comunidades para superar adversidades.

2. Resiliencia en la Ingeniería

En el área de la ingeniería, la resiliencia se refiere a la capacidad de los sistemas, infraestructuras y procesos para resistir, adaptarse y recuperarse de eventos inesperados, como desastres naturales, fallos en el sistema, o cualquier otro tipo de perturbación. En esta área, la resiliencia busca asegurar que las estructuras y sistemas puedan mantener su funcionalidad esencial, incluso frente a condiciones adversas.

Existen diferentes medios para abordar la resiliencia. La cuantificación de la resiliencia en los sistemas de optimización ha traído grandes beneficios ya que permite identificar los escenarios donde se pueden presentar algunas fallas que disminuyen el rendimiento



del sistema y así poder tomar decisiones sobre cómo abordar el problema antes, durante o después del diseño del sistema (Figura 1). Esto muestra la importancia de implementar marcos de planificación resilientes en comparación con los métodos de planificación convencionales.

Abordar la resiliencia es un factor clave para un sistema sostenible. En el sector alimentario, la resiliencia se ha incorporado a los sistemas de la cadena de suministros para mejorar la seguridad de la misma (Martínez-Guido y col., 2020). Además, se han abordado estudios sobre procesos de mitigación para desarrollar cultivos resilientes al clima, y se han propuesto nuevas estrategias de manejo que consideran las interacciones entre el suelo y la planta (Fahad y col., 2021). En el sector del agua, los estudios se han centrado en la resiliencia del suministro de agua ante los desastres, la gestión del agua y la calidad de la misma (Imani y col., 2021). En estudios anteriores, la resiliencia en el sector energético se ha abordado centrándose en los fenómenos meteorológicos, que son la causa de la mayoría de las interrupciones del suministro de energía, las condiciones geopolíticas y las fallas técnicas (Cadini y col., 2017). En este sentido, se han propuesto indicadores o

métricas para la planificación de sistemas energéticos y modelos de simulación. Recientemente, se ha prestado especial atención al estudio de la predicción energética en construcciones y la distribución de energía teniendo en cuenta el cambio climático, proporcionando así recomendaciones para reducir el consumo de energía.

Un sistema resiliente debe poder minimizar las pérdidas en la prestación de sus servicios, para cualquier modo de falla posible y durante todos los períodos operacionales (Núñez-López y col., 2021). Tales fallas pueden ir desde fallas aleatorias de los componentes del sistema, hasta ataques deliberados, y errores del personal. En cualquier caso, uno o varios componentes del sistema fallarían, por lo que la funcionalidad del sistema se ve comprometida si el sistema no es totalmente resiliente. Algunos de los aspectos a considerar en la incorporación del término de resiliencia en la ingeniería son: un diseño robusto, que pueda resistir tensiones y perturbaciones sin colapsar; la planificación para contingencias (Bragatto y col., 2021), para hacer frente a situaciones imprevistas; sistemas de recuperación, que permitan la rápida recuperación después de eventos adversos, minimizando el tiempo de inactividad; monitoreo y evaluación continua



y utilizar avances tecnológicos para mejorar la capacidad de adaptación y respuesta ante situaciones críticas (Leng y col., 2023).

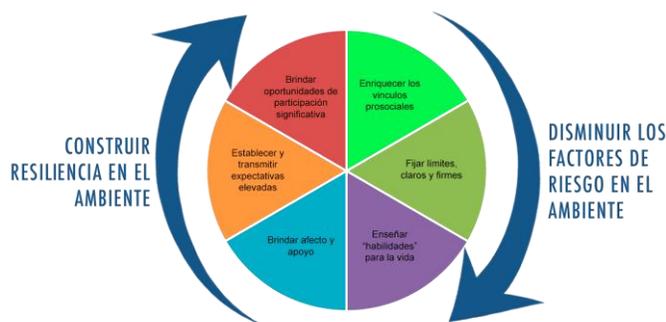


Figura 1. Beneficios de la incorporación de la resiliencia.

3. Integración de la resiliencia en procesos sustentables.

En los últimos años, se ha hablado mucho de las adversidades a las cuales se está enfrentando la población, debido a los grandes cambios que se presentan en el planeta (Figura 2); por lo cual, la integración de la resiliencia en procesos sustentables es esencial para garantizar que las prácticas y sistemas puedan adaptarse y recuperarse de desafíos ambientales, económicos y sociales. Algunas de las estrategias para incorporar la resiliencia en procesos sustentables son (Ashouri y col., 2021):

- **Evaluación de riesgos ambientales:** Identificar y evaluar los riesgos

ambientales que podrían afectar la sostenibilidad de los procesos. Esto incluye cambios climáticos, eventos extremos y otras amenazas ambientales. Desarrollar planes de contingencia y adaptación en consecuencia.

- **Eficiencia de recursos:** Diseñar procesos que minimicen el uso de recursos y maximicen la eficiencia.
- **Diversificación y flexibilidad:** La diversificación brinda resiliencia ante posibles interrupciones en la cadena de suministro y cambios en las condiciones del mercado.
- **Innovación sostenible:** La adopción de nuevas soluciones sostenibles no solo mejora la eficiencia, sino que también garantiza la adaptabilidad a medida que surgen enfoques más avanzados.
- **Participación de la comunidad:** Involucrar a la comunidad local en el diseño y la implementación de procesos sustentables. La resiliencia comunitaria es fundamental para enfrentar desafíos, y la participación activa fomenta la aceptación y el apoyo continuo.



- **Monitoreo y evaluación continuos:**
Establecer sistemas de monitoreo para evaluar constantemente el desempeño de los procesos sustentables. La retroalimentación constante permite realizar ajustes o mejoras en respuesta a cambios en el entorno.
- **Capacitación y concienciación:**
Proporcionar capacitación y concienciación a los empleados sobre prácticas sostenibles y la importancia de la resiliencia en un contexto sostenible.

La integración de la resiliencia en procesos sustentables no solo protege contra posibles impactos adversos, sino que también contribuye a la preservación a largo plazo de los recursos y al bienestar de las comunidades involucradas. En cuanto al aspecto económico, de primera instancia el diseñar un proceso resiliente incrementaría el costo fijo asociado al proceso, debido a la instalación de diferentes equipos o estrategias alternas para que el proceso no pierda su funcionalidad en caso de una falla o perturbación; sin embargo, a largo plazo se tendría un retorno de este costo asociado a estos nuevos equipos, debido a que se minimizarían las pérdidas de producción y los costos de variables de operación del proceso.

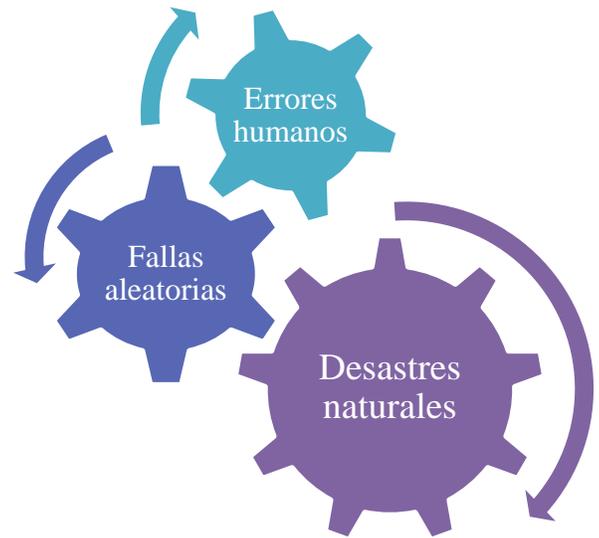


Figura 2. Adversidades y cambios a las cuales se enfrenta el planeta.

3.1 Retos

La incorporación de la resiliencia en procesos sustentables enfrenta varios desafíos que deben abordarse para asegurar su efectividad a largo plazo. Algunos de los retos clave son que los procesos sustentables a menudo operan en sistemas complejos que involucran múltiples variables, la exposición a los impactos del cambio y eventos climáticos extremos como sequías, inundaciones, sismos, etc., la presión económica, las fluctuaciones de las demandas del mercado, entre otros.

La superación de estos retos requiere un enfoque integral que integre la resiliencia en



la planificación, la gestión y la innovación continua de los procesos sustentables. La adaptabilidad y la capacidad de aprendizaje constante son clave para abordar los desafíos cambiantes en el camino hacia la sostenibilidad (Leise y col., 2021).

3.2 Oportunidades

La integración de la resiliencia en procesos sustentables no solo aborda desafíos, sino que también brinda diversas oportunidades muy significativas para mejorar la eficacia y sostenibilidad a largo plazo. Entre ellas está el fomento a la innovación continua en prácticas y tecnologías sustentables, y la expansión de la participación en mercados emergentes. La resiliencia en procesos sustentables implica la identificación y la superación proactiva de obstáculos. Esto puede conducir a una mayor eficiencia operativa al anticipar y abordar problemas antes de que se conviertan en crisis, lo que resulta en un ahorro de costos y recursos. De igual manera, promueve la colaboración y el establecimiento de redes sólidas con otras organizaciones y partes interesadas. Esta colaboración puede generar oportunidades para compartir mejores prácticas, conocimientos y recursos, fortaleciendo aún

más la posición en el ámbito sostenible. Así, como también ayuda a garantizar el cumplimiento de las normativas ambientales y sociales, lo que mitiga los riesgos legales y reputacionales.

La incorporación efectiva de la resiliencia en procesos sustentables no solo mejora la capacidad de superar desafíos, sino que también posiciona a las organizaciones para aprovechar oportunidades emergentes en el panorama sostenible y fortalecer su impacto positivo en el entorno y la sociedad.

El concepto de resiliencia también puede beneficiar en un contexto social, a través de una seguridad laboral, la cual se obtiene al implementar las diferentes medidas preventivas, minimizando la probabilidad de accidentes; y contribuyendo a una mejor calidad de vida, al garantizar la disponibilidad de los recursos esenciales y la continuidad de operaciones en situaciones adversas.

3.3 Futuro de la resiliencia

El futuro de la resiliencia en los procesos sustentables se perfila como un componente esencial para garantizar la viabilidad y efectividad a largo plazo de las prácticas sostenibles. A medida que las organizaciones



y la sociedad en general continúan enfrentando desafíos y cambios significativos, la resiliencia desempeñará un papel crucial en la evolución de la sostenibilidad.

Se espera que la resiliencia se integre cada vez más en las estrategias empresariales globales. Las organizaciones buscarán no solo cumplir con estándares de sostenibilidad, sino también desarrollar procesos que sean robustos y adaptables a los cambios del entorno (Senkel y col., 2021). Con un enfoque creciente en el cambio climático, se espera que la resiliencia se oriente hacia la evaluación y mitigación de impactos climáticos en los procesos sustentables. Además de los aspectos ambientales, también se centrará en la medición y mejora del impacto social de los procesos sustentables. Esto incluirá la atención a cuestiones de equidad, inclusión y bienestar de la comunidad. En conjunto con los puntos anteriores, la aplicación de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial, pueden proporcionar datos en tiempo real, facilitar la toma de decisiones informada y optimizar la eficiencia operativa (Figura 3).



Figura 3. Beneficios de incorporación de resiliencia con la tecnología.

3.4 Aplicaciones de resiliencia

El concepto de resiliencia ha sido utilizado en distintos procesos que nos rodean día a día. Algunos destacables entre ellos son la síntesis y el diseño de procesos (Orosz y col., 2022), la gestión de cadenas de suministro en la industria alimentaria (Figura 4) (Martínez-Guido y col., 2020) y la producción de energías renovables (Osman y col., 2023).

La incorporación de la resiliencia en la síntesis y el diseño de procesos es fundamental para poder crear sistemas que sean robustos y adaptables a cualquier cambio; estos sistemas deben de resistir y ser capaces de recuperarse de perturbaciones y/o cambios inesperados. En el caso de las



cadena de suministro en la industria alimentaria, la resiliencia implica la capacidad para adaptarse a interrupciones en dicho proceso; como cambios en la disponibilidad de algunos productos. Las empresas requieren utilizar estrategias como la diversificación de proveedores, el almacenamiento de inventarios y la implementación de sistemas de monitoreo de la calidad para mitigar estos riesgos y garantizar la continuidad del proceso de producción. Mientras que en el caso de producción de energías renovables un ejemplo sería la instalación de paneles solares para satisfacer las demandas energéticas de una vivienda; donde estos sistemas pueden diseñarse en conjunto con un sistema de

almacenamiento de energía para proporcionar energía incluso durante la noche o en días nublados. El concepto de resiliencia nos ayuda a abordar algunos de los principales problemas a los cuales pueden enfrentarse los procesos anteriormente mencionados, entre ellos las fallas operativas de diferentes equipos (Zinetullina y col., 2021), las fluctuaciones en la oferta y la demanda de materias primas y productos, eventos imprevistos como son los desastres naturales, en donde la resiliencia sirve como base para crear e implementar sistemas de respaldo y planes de contingencia para que los procesos puedan adaptarse rápidamente a estos cambios bruscos.



Figura 4. Cadena de suministro.



4. Conclusiones

La resiliencia en ingeniería implica la aplicación de principios y prácticas que aseguren la capacidad de los sistemas para resistir y recuperarse ante perturbaciones, garantizando la continuidad de operaciones esenciales y la protección de las personas y los recursos. Hace algunos años la implementación de este concepto en el área de ingeniería, se había estado realizado de una manera más cualitativa, recientemente se han utilizado distintas estrategias para evaluar la resiliencia de los procesos de manera cuantitativa; sin embargo, se suelen evaluar aspectos económicos principalmente, por lo cual sería importante en un futuro poder incluir diferentes indicadores para incorporar aspectos ambientales y sociales a estas metodologías para la cuantificación de procesos resilientes sustentables.

Los ingenieros especializados en el área de procesos se encuentran desarrollando nuevas estrategias que minimicen el uso de los recursos, así como los desechos y las emisiones, y maximizando la eficiencia energética; asegurándose que estos procesos puedan adaptarse a cambios en las condiciones operativas, en la disponibilidad de los recursos y las distintas regulaciones

ambientales, a través de la adopción de nuevas tecnologías como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático.

En última instancia, el futuro de la resiliencia en la incorporación de procesos sustentables implica un enfoque holístico y dinámico que se adapte a las cambiantes realidades económicas, sociales y ambientales, abordando los objetivos de desarrollo sostenible planteados en la Agenda 2030. La capacidad de anticipar, adaptarse y aprender continuamente será clave para construir procesos sostenibles que perduren y prosperen en un mundo en constante evolución.

Referencias Bibliográficas

Ashouri, M., Fung, B.C.M., Haghghat, F., y Yoshino, H. (2020), Systematic approach to provide building occupants with feedback to reduce energy consumption. *Energy*, 194, 116813.

Bragatto, P., Vairo, T., Milazzo, M. F., y Fabiano, B. (2021). The impact of the COVID-19 pandemic on the safety management in Italian Seveso industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 70, 104393.



Cadini, F., Agliardi, G.L., y Zio, E. (2017), A modeling and simulation framework for the reliability/availability assessment of a power

Fahad, S., Sönmez, O., Saud, S., Wang, D., Wu, C., Adnan, M., y Turan, V. (2021), *Sustainable Soil and Land Management and Climate Change* (1st ed.). CRC Press.

Imani, M., Hasan, M.M., Bittencourt, L.F., McClymont, K., y Kapelan, Z. (2021), A novel machine learning application: Water quality resilience prediction Model. *Science of the Total Environment*, 768, 144459.

Leise, P., Niessen, P., Schulte, F., Dietrich, I., Kirchner, E., y Pelz, P. F. (2021, May). Potentials and Challenges of Resilience as a Paradigm for Designing Technical Systems. In *International Conference on Uncertainty in Mechanical Engineering* (pp. 47-58). Cham: Springer International Publishing.

Leng, J., Zhong, Y., Lin, Z., Xu, K., Mourtzis, D., Zhou, X., Zheng, P., Liu, Q., Zhao, J.L., y Shen, W. (2023). Towards resilience in Industry 5.0: A decentralized autonomous manufacturing paradigm. *Journal of Manufacturing Systems*, 71, 95-114.

transmission grid subject to cascading failures under extreme weather conditions. *Applied Energy*, 185, 267-279.

Martínez-Guido, S.I., Núñez-López, J.M., y Ponce-Ortega, J.M. (2020), Involving resilience in synthesizing food networks in low-income communities. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 5(1), 139-157.

Núñez-López, J. M., Rubio-Castro, E., y Ponce-Ortega, J. M. (2021). Involving resilience in optimizing the water-energy-food nexus at macroscopic level. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 259-273.

Orosz, Á., Pimentel, J., Argoti, A., y Friedler, F. (2022). General formulation of resilience for designing process networks. *Computers & Chemical Engineering*, 165, 107932.

Osman, A. I., Chen, L., Yang, M., Msigwa, G., Farghali, M., Fawzy, S., Rooney, D.W., y Yap, P. S. (2023). Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 741-764.



Ribeiro, P.J.G., y Pena Jardim Gonçalves, L.A. (2019), Urban resilience: A conceptual framework. *Sustainable Cities and Society*, 50, 101625.

Senkel, A., Bode, C., y Schmitz, G. (2021), Quantification of the resilience of integrated energy systems using dynamic simulation.

Reliability Engineering & System Safety, 209, 107447.

Zinetullina, A., Yang, M., Khakzad, N., Golman, B., y Li, X. (2021). Quantitative resilience assessment of chemical process systems using functional resonance analysis method and Dynamic Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*, 205, 107232