



PENSAR LA INCERTIDUMBRE

El estado de la cuestión: C. BLANCO PÉREZ. **Reflexión y crítica:** S. LUMBRERAS / A. VILLAR EZCURRA. **Ágora:** FJ. ARROCHA GARCÍA
Didáctica: C. DÍAZ HUMANES / N. MARTÍNEZ PARAMIO / C. GIL DÍAZ. **Informaciones.**

Diálogo Filosófico

**Revista cuatrimestral de reflexión, crítica e información
filosóficas editada por Diálogo Filosófico®.**

Diálogo Filosófico articula su contenido en artículos solicitados en torno a un tema o problema filosófico de actualidad en las secciones «Estado de la cuestión» y «Reflexión y crítica». Además, publica siempre artículos no solicitados en la sección «Ágora» (filosofía en general) y ocasionalmente en la sección «Didáctica» (relacionada con la enseñanza de la filosofía y la filosofía de la educación). Privilegia los de contenido no meramente histórico y expositivo, sino que reflexionan de manera original sobre los problemas reales o dialogan creativamente con los pensadores y las corrientes filosóficas presentes y pasadas. Dichos artículos pasan por un proceso de evaluación ciega por pares. Asimismo, acepta el envío de recensiones que recojan una confrontación crítica con libros de reciente publicación.

Director: Antonio Jesús María Sánchez Orantos (Universidad Pontificia Comillas).

COMITÉ DE DIRECCIÓN

Juan Jesús Gutierro Carrasco (Universidad Pontificia Comillas. ESCUNI Centro Universitario de Educación), Alberto Lavín Fernández (IE University), Mario Ramos Vera (Universidad Pontificia Comillas).

COMITÉ CIENTÍFICO

Vittorio Possenti (Università degli Studi di Venezia), Erwin Schadel (Otto-Friedrich Universität Bamberg), Mauricio Beuchot (Universidad Nacional Autónoma de México), Adela Cortina (Universidad de Valencia), Jean Grondin (University of Montreal), Charles Taylor (McGill University), João J. Vila-Chã (Universidade Católica Portuguesa), Miguel García-Baró (Universidad Pontificia Comillas), Peter Colosi (The Council for Research in Values and Philosophy).

CONSEJO DE REDACCIÓN

José Luis Caballero Bono (Universidad Pontificia de Salamanca), Ildefonso Murillo (Universidad Pontificia de Salamanca), José M.^a Vegas Mollá (Seminario Diocesano de San Petersburgo), Ignacio Verdú (Universidad Pontificia Comillas), Jesús Conill (Universidad de Valencia), Camino Cañón Loyes (Universidad Pontificia Comillas), Félix García Moriyón (Universidad Autónoma de Madrid), Juan Antonio Nicolás (Universidad de Granada), Juan J. García Norro (Universidad Complutense de Madrid), Agustín Domingo Moratalla (Universidad de Valencia), Leonardo Rodríguez Duplá (Universidad Complutense de Madrid), Isabel Beltrá Villaseñor (Universidad Francisco de Vitoria), Alicia Villar Ezcurra (Universidad Pontificia Comillas), Pilar Domínguez (Universidad Autónoma de Madrid), Clara Fernández Díaz Rincón (Colegio Fray Luis de León. Madrid), Félix González Romero (IES Nicolás Copérnico. Madrid), Francisco José Arrocha García (Universidad Pontificia Comillas).

Administración:

M.^a Jesús Ferrero

Dirección y Administración DIÁLOGO FILOSÓFICO
Corredera, 1 - Apartado de Correos 121 - 28770 COLMENAR VIEJO (Madrid)
Teléfono: 610 70 74 73
Información Electrónica: dialfilo@hotmail.com
www.dialogofilosofico.com

Esta revista está indexada en LATINDEX, RESH, CARHUS+,
ISOC, DICE, MIAR, FRANCIS, PASCAL, CIRC, DULCINEA,
The Philosopher's Index, Répertoire Bibliographique de la Philosophie,
International Directory of Philosophy.

Edita:

DIÁLOGO FILOSÓFICO / PUBLICACIONES CLARETIANAS

PRECIOS SUSCRIPCIÓN EN PAPEL (2024)

Número suelto: 16 euros (IVA incluido)

Suscripción anual: España: 34 euros (IVA incluido)
/ Extranjero: 42 euros (correo normal)

EN PORTADA: imagen sin título tomada de internet.

I.S.S.N.: 0213-1196 / Depósito Legal: M.259-1985

Diálogo Filosófico

Año 40

Enero/Abril

I/24

Presentación..... 3

El estado de la cuestión

BLANCO PÉREZ, C.: *Tres incertidumbres fundamentales*..... 4

Reflexión y crítica

LUMBRERAS, S.: *La incertidumbre desde la ingeniería* 23

VILLAR EZCURRA, A.: *Incertidumbre y certidumbre en Blaise Pascal* 41

Ágora

ARROCHA GARCÍA, F.J.: *La incertidumbre en el ser humano: una retrospectiva desde la psicología* 61

Didáctica

DÍAZ HUMANES, C., MARTÍNEZ PARAMIO, N., GIL DÍAZ, C.: *Grietas en las caryátides del futuro: la incertidumbre en la educación* 79

Informaciones

Crítica de libros	95
GUSTAVO, Leyva (ed.): <i>Guía Comares de Immanuel Kant</i> (José Luis Caballero Bono).	
SÁEZ CRUZ, Jesús: <i>Sobre el problema de la realidad divina. Una aproximación filosófica al misterio de Dios</i> (Ildefonso Murillo Murillo).	
BOLLORÉ, Michel-Yves / BONNASSIES, Olivier: <i>Dios, la ciencia, las pruebas. El albor de una revolución</i> (Ildefonso Murillo Murillo).	
Noticias de libros.....	105

Reflexión y crítica

La incertidumbre desde la ingeniería

Uncertainty from an engineering point of view

Sara Lumbreras

Resumen

Este artículo explora la importancia crítica de la incertidumbre en la ingeniería, destacando su influencia en la toma de decisiones. Presenta conceptos clave como la ambigüedad y el riesgo, y explora las metodologías principales para evaluar el impacto de la incertidumbre en los proyectos. Examina los criterios y técnicas más relevantes para tomar decisiones informadas frente a la incertidumbre, destacando la importancia de entender el contexto específico para elegir la estrategia más adecuada. El texto hace hincapié en la necesidad de adoptar un enfoque interdisciplinar que combine consideraciones técnicas con éticas, sociales y ambientales, promoviendo el desarrollo de soluciones tecnológicas responsables y sostenibles.

Abstract

This article explores the critical importance of uncertainty in engineering, highlighting its influence on decision making. It introduces key concepts such as ambiguity and risk and explores the main methodologies for assessing the impact of uncertainty on projects. It examines the most relevant criteria and techniques for making informed decisions on the face of uncertainty, highlighting the importance of understanding the specific context to choose the most appropriate strategy. The text emphasizes the need to adopt an interdisciplinary approach that combines technical with ethical, social and environmental considerations, promoting the development of responsible and sustainable technological solutions.

Palabras clave: incertidumbre, ambigüedad, riesgo, teoría de la decisión, ingeniería.

Keywords: uncertainty, ambiguity, risk, decision theory, engineering.

Introducción: La incertidumbre, en el corazón de la ingeniería

La Real Academia define ingeniería como el «conjunto de conocimientos orientados a la invención y utilización de técnicas para el aprovechamiento de los recursos naturales o para la actividad industrial.» De manera más general, nos referiremos a la ingeniería como tecnociencia en sentido amplio, como conocimiento aplicado a fines prácticos. El contexto de estos fines prácticos adjetiva a la ingeniería, e incluye, por ejemplo, a la agricultura (ingeniería agrónoma), a la construcción (ingeniería civil), al transporte (ingeniería mecánica, naval o aeroespacial), a las comunicaciones (ingeniería de telecomunicaciones), a la producción de bienes y servicios (ingeniería industrial) o a la gestión de sistemas digitales (ingeniería informática).

Además, es posible clasificar no sólo el contexto sino también la naturaleza de estos fines prácticos. Entre ellos aparecen niveles de mayor o menor novedad. El mayor de ellos sería el posibilitar una tarea nueva: por ejemplo, volar, o el uso de un nuevo tipo de energía (la invención del motor de vapor, o de las placas solares). Otras aplicaciones con menor nivel de novedad podrían consistir en la realización de una tarea ya factible, pero de manera más fácil, eficiente o predecible (por ejemplo, la automatización de procesos industriales).

La incertidumbre aparece en el corazón de una gran parte de estos objetivos. Para empezar, las aplicaciones reales se llevan a cabo en forma de proyectos. En ellos es necesario enfrentar incertidumbres relacionadas con plazos, costes y disponibilidad de recursos. La gestión efectiva de proyectos implica identificar, analizar y mitigar riesgos para asegurar que los proyectos se completen con éxito dentro de sus restricciones. Por ejemplo, en la construcción de una carretera las incertidumbres pueden surgir debido a condiciones geológicas imprevistas, como la presencia de agua subterránea o suelos inestables. Al fabricar un nuevo smartphone, la incertidumbre puede incluir la integración de la última tecnología de baterías, la obtención de componentes de proveedores globales o el cumplimiento de las expectativas cambiantes de los consumidores. Al construir un parque eólico, pueden aparecer retrasos en la obtención de permisos u oposición local al proyecto. En el desarrollo de un nuevo sistema de software, podría haber cambios de última hora en los requisitos del cliente o «bugs» (fallos) durante las fases de prueba. En los proyectos de I+D, las incertidumbres tecnológicas son clave (no sabemos cómo hacer algo o, a veces, ni siquiera si es posible hacerlo).

Además, en muchos de los proyectos es necesario incorporar la incertidumbre no sólo durante la etapa de construcción, sino la de operación del proyecto. Por ejemplo, en el parque eólico resultaría fundamental incorporar las diferentes situaciones de viento posibles, o las del mercado eléctrico, que será el que determine a qué precio se remunera la energía generada. En otros casos, la incertidumbre es el objeto mismo sobre el que se actúa. Por ejemplo, el parque eólico mencionado podría beneficiarse de sistemas de predicción de la producción renovable, o de sistemas para la predicción del precio de la electricidad que serían también proyectos de ingeniería.

La formación en estadística (que podríamos definir como la cuantificación de la incertidumbre, la ciencia que estudia cómo recolectar, analizar e interpretar datos que, por definición, no son un único valor) es clave en cualquier ingeniería desde que se abrieron las primeras escuelas. Además, durante las últimas décadas se han desarrollado herramientas nuevas que nos han ayudado a trabajar con conjuntos de datos mayores o encontrando patrones más sutiles: *el Big Data* y la Inteligencia Artificial.

La visión de la ingeniería sobre la incertidumbre es clave para comprender su naturaleza, dado que está en la posición más práctica de todas. Sabemos que el mundo es incierto, pero, ¿exactamente de qué manera? ¿Cómo podemos cuantificar esta incertidumbre y sus efectos? ¿De qué manera debemos adaptar nuestras acciones a la incertidumbre? Todas estas cuestiones, fundamentales, se han preguntado y respondido desde el ámbito de las ciencias aplicadas, y serán expuestas junto con reflexiones más generales en las páginas que siguen.

1. Brevísima historia práctica de la probabilidad

La historia del concepto de probabilidad y la estadística, y de su relación con la ingeniería, se remontan al siglo XVI, cuando matemáticos como Girolamo Cardano se hicieron algunas de las primeras reflexiones sobre las probabilidades en los juegos de dados (así, la estadística tiene un origen práctico en las apuestas) (Stigler, 1990). Sólo en el siglo XVII, con el intercambio de cartas entre el filósofo Blaise Pascal y Pierre de Fermat, se sentaron las bases formales de lo que hoy conocemos como teoría de la probabilidad. Estos intercambios abordaron también problemas de juegos de azar, pero plantearon además conceptos fundamentales que son pilares en el campo actual de la probabilidad como el de esperanza matemática (también

conocido como valor esperado, que es el resultado de obtener la suma de todos los resultados posibles ponderados por su probabilidad). Como veremos, la esperanza matemática es un concepto clave en la decisión con incertidumbre.

Jacob Bernoulli realizó contribuciones significativas con su obra *Ars Conjectandi* publicada póstumamente en 1713, donde desarrolló la ley de los grandes números, un teorema esencial en la probabilidad que afirma que, bajo ciertas condiciones, la frecuencia relativa de un evento aleatorio tiende a estabilizarse cerca de su probabilidad teórica a medida que se repite el experimento un gran número de veces. Esta ley proporcionó una base sólida para conectar la teoría de la probabilidad con la estadística, ya que nos permite calcular la probabilidad de un cierto evento como la fracción de los experimentos en los que sucede.

En el siglo XVIII, Pierre-Simon Laplace hizo avances significativos consolidando y expandiendo el trabajo de sus predecesores. Por ejemplo, Laplace popularizó el *Teorema de Bayes* (propuesto por Thomas Bayes), que nos permite actualizar la probabilidad de un evento en base a la evidencia encontrada. Es la base de la *estadística bayesiana* que está siendo desarrollada a partir de la última parte del siglo XX. Además, Laplace también propuso la primera versión del *Teorema Central del Límite*, que tan útil nos resulta a los ingenieros: cuando se suman suficientes sucesos independientes, podemos entender su efecto conjunto como una distribución normal, que tiene propiedades especialmente interesantes que la hacen muy sencilla de manejar.

Durante el siglo XIX y principios del siglo XX, la teoría de la probabilidad y la estadística continuaron desarrollándose como disciplinas matemáticas con aplicaciones en ciencias naturales y sociales. Se hicieron contribuciones fundamentales que incluyen herramientas que todo ingeniero debe conocer. Presentamos varios ejemplos. La teoría de errores se ocupa del análisis y la interpretación de los errores, que resulta fundamental en las ciencias empíricas ya que los experimentos no devuelven un único valor, sino que en condiciones reales aparece siempre un error en las medidas. Los análisis de correlación nos sirven para evaluar en qué medida dos variables están relacionadas. Yendo un poco más lejos, las técnicas de regresión nos permiten analizar una variable como combinación de otras. Son precisamente estas técnicas las que han avanzado espectacularmente gracias a la Inteligencia Artificial y el Aprendizaje Automático. Las técnicas de análisis de la varianza nos permiten evaluar si diferentes

muestras provienen del mismo grupo o no (lo cual nos es útil, por ejemplo, para discernir si una determinada acción ha tenido un efecto o si, por el contrario, no hay diferencias entre el resultado anterior y el actual). La inferencia estadística nos ayuda a extraer conclusiones sobre una distribución a partir de una muestra.

Estos conceptos y técnicas han pasado a formar parte de un acervo de conocimiento básico que encuentra innumerables aplicaciones en las ingenierías. Ellas facilitan la comprensión de fenómenos complejos y apoyan la toma de decisiones. Esta toma de decisiones construye sus propias técnicas basándose en las de la estadística, y nos referimos a ella como *Teoría de la Decisión*.

2. Los conceptos principales: incertidumbre, ambigüedad y riesgo

Los conceptos de incertidumbre, ambigüedad y riesgo forman el fundamento de la decisión con incertidumbre (Gilboa, 2009), que es la que nos atañe, y en la que eventos o resultados futuros nos son desconocidos.

La ambigüedad se presenta cuando hay información insuficiente o contradictoria sobre estos eventos o sus probabilidades. Un ejemplo podría ser la evaluación de nuevos materiales de fabricación sobre los que no tengamos aún datos fiables, o la decisión sobre cómo abastecer una nación de materias primas cuando existe la posibilidad de que surjan tensiones geopolíticas que den lugar a una escasez sobrevenida.

Un tipo particular de ambigüedad es la incertidumbre epistémica, derivada de la falta de conocimiento o información sobre un evento o fenómeno (Schlosser & Paredis, 2007). Este tipo de riesgo está asociado con nuestra capacidad (o incapacidad) para comprender completamente todos los aspectos y variables que influyen en un sistema o decisión. El riesgo epistémico puede reducirse también a través de la investigación, la búsqueda de nuevos datos y el análisis detallado, aunque con frecuencia no es posible eliminar la incertidumbre epistémica de manera completa.

En la ambigüedad, en general, no conocemos todos los posibles resultados o «estados de la naturaleza» e ignoramos las probabilidades de los que sí conocemos.

En lo que denominamos riesgo, sin embargo, sí conocemos los posibles «estados de la naturaleza» y hemos podido estimar sus probabilidades. Un ejemplo sería el de la velocidad y dirección del viento en el caso de la planta eólica. Aunque no nos sea posible anticipar

con certeza el viento que hará mañana, sí es posible conocer su distribución de probabilidad gracias a los estudios meteorológicos, que nos dan estos valores por ejemplo en función de la hora y la época del año. Desde la perspectiva de las finanzas, el riesgo se refiere a la variabilidad o volatilidad de los retornos asociados con una inversión o decisión financiera y la posibilidad de que el resultado real difiera de lo esperado (Hull, 1993). Este concepto es central en el campo financiero y también en el de la ingeniería, ya que ambas establecen métricas de retorno para los proyectos o inversiones según el caso.

La cuantificación del riesgo es clave, con modelos y medidas como la varianza, la desviación estándar, el valor en riesgo (VaR) y el riesgo condicional en el peor de los casos (CVaR), que se usan para estimar la incertidumbre con respecto a los retornos y la probabilidad de pérdidas extremas (Duffie & Pan, 1997). Estas medidas ayudan a los gestores a tomar decisiones informadas que tengan el efecto deseado sobre las medidas de riesgo. En particular, se emplean para identificar los riesgos que tengan un mayor impacto en el proyecto, así como las medidas más eficientes para su mitigación.

Estos conceptos juegan roles cruciales en la planificación y ejecución de los proyectos. Como veremos más adelante, las técnicas de decisión con incertidumbre los emplean como su punto de partida. Para poder tomar decisiones con incertidumbre nos hacen falta dos cosas. Primeramente, es necesario realizar una evaluación de las alternativas disponibles. Esto requiere, por ejemplo, calcular medidas de valor esperado o valor en riesgo correspondientes a cada una de estas alternativas. En la sección posterior presentaremos la simulación, que debemos entender como la principal metodología para realizar esta función. Después veremos cómo integrar esta información en la toma de decisiones.

3. Evaluando la incertidumbre: la simulación y la construcción de escenarios

La evaluación de la incertidumbre es la primera etapa en la toma de decisiones. ¿Cuál es el impacto que tendría cada uno de los futuros posibles? La simulación es una técnica que se utiliza para entender y predecir el comportamiento de un sistema a partir de un modelo simplificado de éste (Ross, 2022). Una de las formas más conocidas de simulación es la *Simulación Monte Carlo*, que se basa en la generación de números aleatorios para modelar la incertidumbre y calcular probabilidades de eventos de interés y sus distribuciones. Tenemos,

por un lado, simulación en tiempo continuo, que se emplea para modelar sistemas que cambian de manera continua; y la simulación de eventos discretos, en la que los cambios ocurren en momentos específicos. Un ejemplo clásico de estas últimas son los sistemas de colas, como el proceso de espera en bancos o aeropuertos, donde los eventos (como la llegada de clientes o la finalización del servicio) ocurren en momentos concretos. Estos sistemas aparecen en tantos contextos diferentes que existen desarrollos matemáticos específicos para ellos y los ingenieros reciben formación expresa para utilizarlos (Meisling, 1958).

La simulación requiere tomar muestras para evaluar la incertidumbre, pero a veces resulta difícil obtener conclusiones si el sistema tiene un comportamiento muy volátil. Esto nos lleva a que cada muestra sea muy diferente de las anteriores y sea difícil extraer conclusiones generales. Existen técnicas para solucionar este problema, como el *muestreo estratificado* (Parsons, 2014), que divide la incertidumbre en situaciones más o menos homogéneas. Otra alternativa es el *muestreo por importancia* (Tokdar & Kass, 2010), que se centra en las regiones de muestreo que contribuyen más significativamente al resultado final, aumentando la eficiencia de la simulación. En el análisis de riesgos financieros, por ejemplo, permite concentrarse en escenarios de mercado extremos pero relevantes.

A la simulación pueden complementarla los análisis de sensibilidad, que cuantifican cómo diferentes valores de los factores de un problema pueden afectar al resultado cuando sus valores cambian ligeramente (Borgonovo & others, 2017). Muy recientemente se han propuesto extensiones a los análisis de sensibilidad que permiten hacerse una idea de los efectos de los factores no sólo en pequeños cambios sino para todo el «paisaje de lo posible» (Iooss & Lemaître, 2015). Aún son muy complejos y presentan problemas de implementación práctica, pero presentan perspectivas prometedoras.

La simulación nos ha permitido estudiar una amplia gama de fenómenos en diferentes campos. Nos permite diseñar adecuadamente instalaciones industriales o de servicios. También nos posibilita conocer el impacto, por ejemplo, de los fallos que pueden suceder en grandes sistemas como la red eléctrica. Más allá de la ingeniería, por ejemplo, las simulaciones han sido fundamentales para predecir la propagación de enfermedades infecciosas como la COVID-19 y para diseñar estrategias de intervención efectivas.

Es necesario destacar que la simulación puede sólo aplicarse cuando conocemos una distribución de probabilidad sobre el evento

incierto, es decir, cuando conocemos sus valores posibles y la probabilidad con la que puede tomarlos. Sin embargo, este tipo de incertidumbre, al que nos hemos referido como riesgo, no responde al total de la incertidumbre práctica que nos encontramos. En muchas ocasiones nos enfrentamos a la ambigüedad, en la que no conocemos ni todos los valores posibles ni sus probabilidades. Cuando esto sucede, una de las maneras principales de intentar cuantificar las alternativas es la del análisis de escenarios. El análisis de escenarios es una técnica utilizada para explorar y evaluar las posibilidades futuras de un sistema, proyecto o decisión, considerando diferentes condiciones y factores que podrían influir en los resultados. En lugar de predecir un único resultado basado en una estimación, el análisis de escenarios presenta varios futuros alternativos, cada uno basado en un conjunto distinto de suposiciones. Estos escenarios pueden variar desde muy optimistas hasta muy pesimistas, incluyendo también opciones intermedias, para cubrir un amplio espectro de posibilidades. Es importante diseñar estos escenarios para que cubran, en su conjunto, la mayor parte del rango de posibilidad (que sean exhaustivos) y que sean diferentes, sin presentar solape entre ellos (mutuamente exclusivos). La elaboración de escenarios implica identificar los factores clave que afectan al sistema en estudio, como pueden ser cambios económicos, tecnológicos, políticos o sociales, y luego combinar estos factores de maneras diversas para construir narrativas coherentes sobre el futuro (Schnaars, 1987).

Bien a través de simulación en el caso de riesgo o de análisis de escenarios es posible obtener valores para cada una de las alternativas de decisión posibles. A partir de estos valores se aplicarán técnicas de decisión con incertidumbre.

4. Decidiendo con incertidumbre: un catálogo de criterios

Cuando un ingeniero aprende a decidir con incertidumbre, una de las primeras lecciones es la de los distintos criterios que puede aplicar para seleccionar la mejor alternativa (Gilboa, 2009). La mera existencia de distintos criterios es clave: cada alternativa podría ser la mejor en un determinado escenario y no en los otros. Veremos varios ejemplos a lo largo de esta sección. Los criterios son eminentemente prácticos, y sólo puede elegirse entre ellos, como mostraremos, cuando se tiene una comprensión profunda del fin del proyecto y los valores que le subyacen.

Comenzaremos por los criterios en los que no es necesario conocer una probabilidad. Uno de los criterios más simples es el de Wald,

también conocido como el criterio pesimista o minimax, ya que se centra en minimizar la peor pérdida posible. Este enfoque es particularmente útil en las situaciones en las que el peor caso resulta inasumible. Por ejemplo, si un resultado desastroso supone la bancarrota de una empresa, o la muerte del decisor, resulta razonable centrarnos en evitar esa posibilidad.

Por el contrario, el criterio optimista o maximax busca maximizar el mejor resultado posible. Es ideal cuando las pérdidas pueden asumirse y lo que se busca es una estrategia de alto riesgo con la posibilidad de obtener la mayor ganancia. Por ejemplo, si una empresa está evaluando lanzar uno de varios productos innovadores, analizaría el potencial de mercado y el retorno de inversión máximo proyectado para cada producto, eligiendo invertir en el proyecto con el mayor potencial de éxito.

Si estos criterios parecen (y, con razón), demasiado extremos, tenemos el criterio de Hurwitz, o el enfoque de optimismo-pesimismo, que equilibra entre el mejor y el peor escenario posible mediante un coeficiente de optimismo. La mejor opción aquí es obtener una respuesta en función este coeficiente, que nos pudiera decir algo del estilo a: «Si se es de poco a medianamente optimista se ha de escoger el producto A, y si se es muy optimista deberemos seleccionar el B, pero en ningún caso deberemos escoger el C». El criterio de Laplace es otra opción equilibrada, que a falta de conocer las probabilidades asume que todos los estados de la naturaleza son igualmente probables y toma decisiones basadas en el promedio de los resultados posibles.

Otro criterio clave y muy utilizado es la minimización del arrepentimiento, propuesta por Savage y que busca reducir el arrepentimiento de no haber elegido la mejor opción posible comparando cada decisión contra lo que habría sido óptimo a posteriori. Un equipo de ingenieros que decide entre varios proyectos de investigación sobre energías renovables podría utilizar este criterio para elegir el proyecto que, si bien puede no resultar ser el más revolucionario, les causaría el menor arrepentimiento si no logra el impacto esperado en la lucha contra el cambio climático. De igual manera podemos minimizar el arrepentimiento cuando decidimos comprar el billete de lotería que todos nuestros compañeros han comprado ya para evitarlos el disgusto de quedarnos fuera si el premio cae.

Cuando disponemos de probabilidades para evaluar los posibles resultados de las diferentes alternativas posibles, se pueden aplicar varios criterios y métodos para guiar la toma de decisiones. Entre

estos se incluyen el criterio de valor esperado y otras técnicas que serán definidas a continuación, como la optimización estocástica, la optimización robusta y el uso de medidas como el VaR y el CVaR. Cada uno de estos enfoques tiene sus propios méritos y es adecuado para diferentes tipos de situaciones y niveles de aversión al riesgo.

El criterio de valor esperado, que es la base de lo que conocemos como Optimización Estocástica (Schneider & Kirkpatrick, 2007), se basa en escoger la alternativa que resulte en un mejor valor esperado. Este criterio es útil en situaciones donde el decisor es neutral al riesgo y está interesado en maximizar los rendimientos esperados a largo plazo. Es importante caer en la cuenta de que este criterio asume que las desviaciones positivas pueden utilizarse para cancelar las desviaciones negativas. Por tanto, de alguna manera cuando tomamos este criterio estamos asumiendo que estaremos repitiendo la misma decisión, o decisiones similares, a lo largo de varias iteraciones. Por ejemplo, tiene sentido que el operador de la planta eólica de nuestros ejemplos siga el criterio de valor esperado para su operación diaria, ya que la planta estará funcionando durante décadas y las desviaciones, efectivamente, se compensarán en ambas direcciones. Sin embargo, no tendría demasiado sentido utilizar el valor esperado para escoger entre dos técnicas diferentes para incrementar la seguridad de una planta nuclear, en la que un período de operación especialmente bueno no puede en ningún caso compensar un accidente.

En estos casos en los que deseamos centrarnos en los escenarios más negativos, puede resultar conveniente recurrir a la *Optimización Robusta* (Ben-Tal et al., 2009). Esta técnica busca soluciones que sean óptimas en el peor de los casos considerando una determinada distribución de probabilidad. Otras versiones más sofisticadas pueden buscar la mejor solución posible en términos de valor esperado garantizando que la solución siga siendo válida en un amplio rango de condiciones. Por ejemplo, podemos determinar cuál es la mejor gestión de los recursos energéticos para satisfacer la demanda eléctrica de un país, garantizando que el sistema seguirá funcionando de manera estable incluso si falla alguno de los elementos cruciales del sistema (como cualquier planta de generación o líneas de transporte).

Cuando conocemos la distribución de probabilidad nos es posible calcular el arrepentimiento esperado y minimizarlo, así como establecer nuestro propio equilibrio entre valor esperado (que podría representar los beneficios de un proyecto) y el VaR o CVaR, que representaría las peores posibilidades. Dependiendo del caso y de nuestra aversión al riesgo, deberíamos seleccionar un equilibrio u otro. Por

ejemplo, un gestor de fondos de inversión buscaría maximizar los rendimientos ajustados al riesgo de su cartera. Al conocer la distribución de probabilidad de los retornos de los diferentes activos, puede calcular el valor esperado de los rendimientos y compararlo con el VaR o CVaR para entender el riesgo de pérdidas significativas. Por ejemplo, si un fondo se centra en maximizar el crecimiento, podría estar dispuesto a aceptar un mayor VaR/CVaR, lo que implica una mayor posibilidad de pérdidas en el peor de los casos. Sin embargo, si el fondo prioriza la preservación del capital, optaría por una estrategia que minimice el VaR/CVaR, incluso si eso significa sacrificar cierto potencial de valor esperado. El equilibrio elegido reflejará la aversión al riesgo del administrador y los objetivos del fondo. Dando otro ejemplo, una empresa que contemplase expandirse a nuevos mercados internacionales debería evaluar los potenciales beneficios (valor esperado) contra los riesgos asociados con la volatilidad política, los cambios en las tasas de cambio, y las diferencias culturales (VaR/CVaR). Al modelar los posibles resultados de la expansión, incluyendo los mejores y peores escenarios en términos de aceptación del mercado y rentabilidad, la empresa puede calcular el arrepentimiento esperado de no expandirse frente al riesgo de una expansión no rentable. Dependiendo de su tolerancia al riesgo, la empresa podría decidir proceder con la expansión en mercados con un perfil de riesgo-recompensa óptimo, seleccionando aquellos donde el balance entre el alto valor esperado de los beneficios y un aceptable VaR/CVaR indique una oportunidad favorable.

La principal ventaja de las técnicas que utilizan probabilidades es que nos es posible concentrar toda la distribución de posibles estados de la naturaleza en unas pocas medidas que podamos comparar. Esto hace que resulten especialmente sólidas. Por ello, algunos autores han sugerido realizar estimaciones, aunque sean crudas, de las probabilidades de los distintos escenarios, a las que llamamos *probabilidades subjetivas* (Anscombe et al., 1963). Es necesario reconocer que las probabilidades subjetivas mayoritariamente se refieren a eventos que sucederán en el futuro y que, por definición, sólo sucederán una vez, por lo que no es posible estimar una probabilidad empleando la ley de los grandes números. No podemos realizar un experimento que mida, por ejemplo, cuáles son las probabilidades de que la Unión Europea cumpla con sus objetivos de reducción de emisiones para 2050. Así, la probabilidad es asignada por expertos basándose en su juicio personal, percepción o creencia sobre la ocurrencia de ese evento, en lugar de basarse en frecuencias relativas o propiedades intrínsecas del fenómeno observado.

Un aspecto interesante de la probabilidad subjetiva es cómo se forma y ajusta en la mente de las personas. Solemos utilizar una combinación de heurísticos y sesgos cognitivos para evaluar la probabilidad de eventos futuros. Por ejemplo, el sesgo de disponibilidad hace que sobreestimemos la probabilidad de eventos que podemos recordar fácilmente, mientras el sesgo de representatividad puede llevar a subestimar o sobreestimar probabilidades dependiendo de cómo de típico nos parece un evento en relación con su categoría general. En el ámbito de la ingeniería industrial, por ejemplo, un gestor de proyectos podría usar la probabilidad subjetiva para evaluar el riesgo de retrasos en las etapas del proyecto basándose en su experiencia con proveedores similares, en lugar de depender únicamente de datos históricos. Esto puede ser particularmente útil en situaciones relativamente nuevas. A pesar de su subjetividad, las probabilidades subjetivas pueden ser razonablemente precisas si el individuo tiene experiencia relevante, buena intuición y acceso a información adecuada. Sin embargo, también están sujetas a errores y sesgos que pueden llevar a sobreestimaciones o subestimaciones significativas del riesgo y afectar negativamente la toma de decisiones.

La teoría de probabilidades imprecisas puede mejorar la aplicación de las probabilidades subjetivas en algunos casos, ya que permite el uso de intervalos de probabilidad en vez de valores precisos para las probabilidades. Por ejemplo, si una moneda no está sesgada le daríamos una probabilidad del 50% al evento obtener «cara». Sin embargo, si sabemos que está ligeramente sesgada podríamos establecer un intervalo de probabilidad entre el 40 y el 60%. Esto es especialmente útil en ciertos contextos en los que resulte especialmente problemático asignar probabilidades subjetivas, como en el ejemplo de la planificación energética (Aughenbaugh & Paredis, 2006).

Cada uno de estos criterios y métodos ofrece una herramienta para navegar la incertidumbre. La elección entre ellos depende de la naturaleza del problema, la disposición al riesgo del decisor, y los datos de los que se dispone.

5. Un ejemplo de valor esperado y riesgo: cartera de generación eléctrica

En el contexto de una empresa de energía que evalúa diferentes proyectos de inversión en energías renovables, como parques eólicos, plantas solares fotovoltaicas o proyectos de biomasa, el uso del criterio de valor esperado permite analizar y comparar el retorno

potencial de cada proyecto teniendo en cuenta la incertidumbre de los futuros precios de la energía, las variaciones en la producción de energía debido a la intermitencia de las fuentes renovables y los cambios en la regulación ambiental. Para cada proyecto, la empresa calcularía el valor esperado de los retornos financieros multiplicando los posibles resultados (por ejemplo, altos retornos, retornos moderados, bajos retornos) por sus respectivas probabilidades de ocurrencia, basadas en análisis de mercado, tendencias históricas y modelos climáticos. Esta aproximación permite a la empresa identificar el proyecto que ofrece el mayor retorno esperado ajustado por el riesgo. Por ejemplo, aunque un parque eólico en una ubicación con alta variabilidad del viento pueda ofrecer altos picos de producción, su valor esperado de retorno podría ajustarse hacia abajo debido a la mayor incertidumbre en la producción energética comparado con una planta solar en una zona de irradiación solar más consistente.

6. Un ejemplo de criterio pesimista: el riesgo nuclear

Al diseñar la seguridad de instalaciones nucleares, el concepto de riesgo se enfoca en la minimización de cualquier posibilidad de accidente o fallo, dado que podría tener consecuencias catastróficas para la salud humana y el medio ambiente. Este enfoque se basa en el principio de *defensa en profundidad*, que implica la implementación de múltiples capas de sistemas de seguridad y procedimientos de operación para proteger contra una serie de escenarios de fallo, tanto previsibles como imprevisibles. Este concepto de riesgo incluye no solo la probabilidad de eventos adversos, como fallos en el sistema o errores humanos, sino también la magnitud de las consecuencias potenciales de tales eventos.

El diseño de seguridad de instalaciones nucleares también incorpora el principio de ALARA (As Low As Reasonably Achievable), que busca reducir la exposición a la radiación y los riesgos asociados a niveles tan bajos como sea razonablemente posible (Calcines Pedreira & others, 2021).

7. La incertidumbre invisible, el factor de seguridad y el principio de prudencia

Un concepto que podría pasar desapercibido es el de coeficiente o factor de seguridad. El factor de seguridad en los diseños de inge-

nería es un margen adicional incorporado en el diseño y construcción de elementos estructurales, componentes mecánicos, sistemas eléctricos, y otros proyectos de ingeniería, para asegurarse de que puedan soportar cargas o esfuerzos mayores a los que normalmente se esperarían durante su uso operativo. Este margen adicional tiene como objetivo compensar incertidumbres en el diseño, variaciones en los materiales, posibles errores en la construcción, cambios en las condiciones de uso, y el desgaste natural a lo largo del tiempo, garantizando así la seguridad. Esto se expresa típicamente como un coeficiente o ratio entre la capacidad de carga (resistencia) de un material o estructura y la carga (esfuerzo) aplicada o esperada. Por ejemplo, un factor de seguridad de 2 significa que la capacidad de carga de la estructura o componente es dos veces la carga máxima esperada o aplicada.

Consideremos el diseño de un puente que debe soportar cierta carga máxima de vehículos y condiciones ambientales, como viento y nieve. Si se estima que la carga máxima esperada sobre el puente en cualquier momento es de 10,000 kilogramos (kg), y se desea aplicar un factor de seguridad de 2, el diseño del puente se realizará de tal manera que pueda soportar al menos 20,000 kg sin fallar.

El coeficiente de seguridad reconoce que existen incertidumbres que han pasado desapercibidas, e introduce el principio de prudencia en todos y cada uno de los diseños desde la humildad de no comprender siquiera cuál es exactamente su fuente para una instancia concreta.

8. La incertidumbre que la ingeniería no ve

Hay ciertos tipos de incertidumbre que la ingeniería tiende a pasar por alto, no por una incapacidad inherente, sino debido a su preferencia por enfoques que priorizan lo cuantificable y lo inmediatamente medible. Entre estas incertidumbres menos reconocidas se encuentran la incertidumbre ética y social, relacionada con el impacto de las tecnologías y proyectos de ingeniería en la sociedad. Esto es especialmente relevante en los casos en los que no existe un diálogo con las partes afectadas por un proyecto (*stakeholders*) que puedan poner de manifiesto sus necesidades y preocupaciones. Por ello, cada vez más, este tipo de conversaciones abiertas se incluyen en las etapas de diseño y evaluación de los proyectos. Como ilustración, podemos recordar el ejemplo de un proyecto de cooperación en el que se construyó un pozo con una fuente en un poblado,

para evitar que específicamente sus mujeres debieran caminar más de una hora diariamente hasta el arroyo más cercano para llevar el agua necesaria a sus casas. A los pocos días de inaugurarse, un acto de sabotaje había estropeado la bomba, siendo necesarias semanas para repararla. Una vez conseguido, alguien volvió a estropearla. En un principio, el equipo del proyecto estaba convencido de que los daños se debían a una venganza machista, quizá por asumir que el buscar agua era parte integral del rol de las mujeres en el poblado. Sin embargo, una investigación concluyó que eran las mismas mujeres las que se oponían al pozo, ya que era el buscar agua juntas, caminando y conversando, la parte de su día que más disfrutaban. No deseaban ayuda en ese ámbito, y el proyecto no había considerado cuáles eran sus verdaderas necesidades antes de comenzarse. Sólo un diálogo abierto puede evitar este tipo de situaciones, en las que pueden dedicarse recursos a fines inadecuados, o que causen perjuicios evitables a grupos afectados.

Además, entre las hipótesis asumidas comúnmente en la ingeniería, está que las implicaciones más allá del horizonte del proyecto son, o bien inexistentes, o bien despreciables. Esto nos lleva a no considerar, por ejemplo, los efectos ambientales a largo plazo, que además están sujetos a incertidumbres considerables. De forma relativamente reciente, han empezado a realizarse estudios de impacto ambiental y los llamados estudios del ciclo de vida, que tratan de cuantificar el efecto del proyecto en el entorno natural y a lo largo de todas sus etapas, incluyendo también el desmantelamiento. Estos son pasos en la dirección correcta, aunque aún subyacen incertidumbres que tienen que ver con los efectos acumulativos, o con las interacciones entre impactos diferentes.

Por último, la incertidumbre en la innovación y la disrupción tecnológica, donde la rapidez de la innovación puede alterar industrias establecidas de manera impredecible, puede cambiar rápidamente el panorama competitivo y hacer que las predicciones a largo plazo sean arriesgadas. Esto significa que, desafortunadamente, todo proyecto a largo plazo se sustenta necesariamente sobre hipótesis erróneas. Sin embargo, salvo honrosas excepciones, la ingeniería trabaja de espaldas a la incertidumbre con respecto a los costes y características de las tecnologías. Comprensiblemente, estos elementos son complejos y difíciles de manejar. Sin embargo, el motivo por el cual no son incorporados a los análisis no es su dificultad, sino el interés selectivo en los impactos en el corto plazo, que son los que se miden para evaluar el éxito de un proyecto.

De la misma manera, la incertidumbre epistémica que se considera desde la tecnología está sujeta a una limitación clara: sólo interesa, como decíamos, la que tiene un impacto medible en los fines del proyecto. Esto es: no es preciso conocer el mundo, sino sólo aquellas características que nos permitan dominarlo. El resto de la realidad, que es indiferente a la meta que se persigue, puede ignorarse. Esta ignorancia no es una elección superficial, sino que está profundamente justificada: sólo simplificando suficientemente la realidad pueden aplicarse a ella las herramientas de la matemática, en las que la ingeniería confía para realizar sus avances. De igual manera en la que el privilegio de algunos individuos los lleva, según el paradigma de la epistemología de la ignorancia (Kassar 2018), a ignorar la experiencia de grupos menos favorecidos de manera inconsciente pero cómoda, la ingeniería ignora la parte de la realidad o de sus mismas creaciones que, como la parte del iceberg que queda bajo la superficie, no se ve, al menos en los términos de las métricas que maneja para decidir su propio éxito. No tiene sentido crear un modelo más complejo de lo que sea estrictamente necesario, puesto que de ello sólo se derivarán costes añadidos y se ofuscarán los resultados. La simplificación, por así decirlo, es un arte que conforma el corazón de la ingeniería. Sin esa habilidad, el ingeniero poco puede hacer. Es por ello que otras disciplinas, y en particular las humanidades, deben iluminar sus puntos ciegos y las incertidumbres que escoge desatender.

Sólo un trabajo interdisciplinar puede aspirar a integrar las consideraciones técnicas desde un conocimiento profundo de los fines de cada proyecto, con perspectivas éticas, sociales, ambientales y políticas. La colaboración entre la ingeniería y las humanidades es crucial para desarrollar soluciones tecnológicas que sean responsables, equitativas y sostenibles, asegurando que se consideren todas las formas de incertidumbre en el proceso de diseño y desarrollo tecnológico.

Bibliografía

- ANSCOMBE, F.J. / AUMANN, R.J. et al.: «A definition of subjective probability», en *Annals of Mathematical Statistics* 34/1 (1963), pp.199-205.
- AUGHENBAUGH, J.M. / PAREDIS, C.J. : «The value of using imprecise probabilities in engineering design», en *Journal of Mechanical Design* 128/4 (2006), pp. 969-979.
- BEN-TAL, A. / EL GHAOUI, L. / NEMIROVSKI, A. : *Robust optimization* (vol. 28). Princeton University Press, Princeton/Oxford, 2009.

- BORGONOVO, E. et. al.: *Sensitivity analysis. An Introduction for the Management Scientist International Series in Operations Research and Management Science*. Springer, Cham (Suiza), 2017.
- CALCINES PEDREIRA, A. et al.: *El carácter único del riesgo nuclear y radiológico*. Universidad de Valladolid, Valladolid, 2021.
- DUFFIE, D. / PAN, J. : «An overview of value at risk», en *Journal of Derivatives* 4/3 (1997), pp. 7-49.
- GILBOA, I. : *Theory of decision under uncertainty* (vol. 45). Cambridge University Press, New York, 2009.
- HULL, J. : *Options, futures, and other derivative securities* (vol. 7). Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.
- IOOSS, B. / LEMAÎTRE, P.: «A review on global sensitivity analysis methods», en *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications* (2015), pp. 101-122.
- EL KASSAR, N.: «What ignorance really is. Examining the foundations of epistemology of ignorance», en *Social Epistemology* 32/5 (2018), pp. 300-310.
- MEISLING, T.: «Discrete-time queuing theory», en *Operations Research* 6/1 (1958), pp. 96-105.
- PARSONS, V.L.: «Stratified sampling» en *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online* (2014), pp. 1-11.
- ROSS, S.M. : *Simulation*. Academic Press, Cambridge, Mass, 2022.
- SCHLOSSER, J. / PAREDIS, C.J.: «Managing multiple sources of epistemic uncertainty in engineering decision making», en *SAE Transactions*, 2007, pp. 1340-1352.
- SCHNAARS, S.P.: «How to develop and use scenarios», en *Long Range Planning* 20/1 (1987), pp. 105-114.
- SCHNEIDER, J. / KIRKPATRICK, S.: *Stochastic optimization*. Springer Science & Business Media, Berlín, 2007.
- STIGLER, S.M. : *The history of statistics*. Harvard University Press, Cambridge, Mass. 1990.
- TOKDAR, S.T. / KASS, R. E.: «Importance sampling: A review», en *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 2/1 (2010), pp. 54-60.

Solicitado el 8 de enero de 2024
Aprobado el 6 de marzo de 2024

Sara Lumbreras
Universidad Pontificia Comillas-IIT
slumbreras@comillas.edu