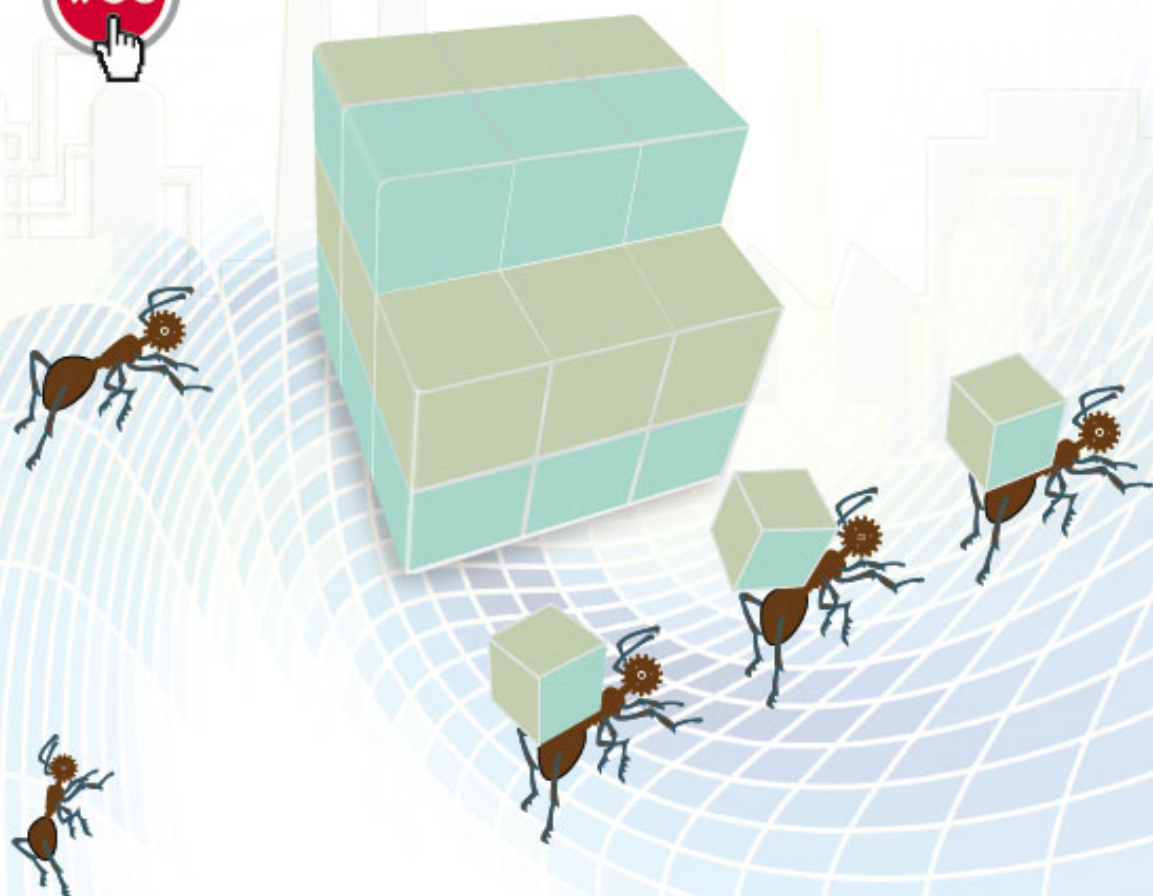


JOSÉ F. DOMINGO GONZÁLEZ ZÚÑIGA

Introducción a la **INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Contexto Occidental

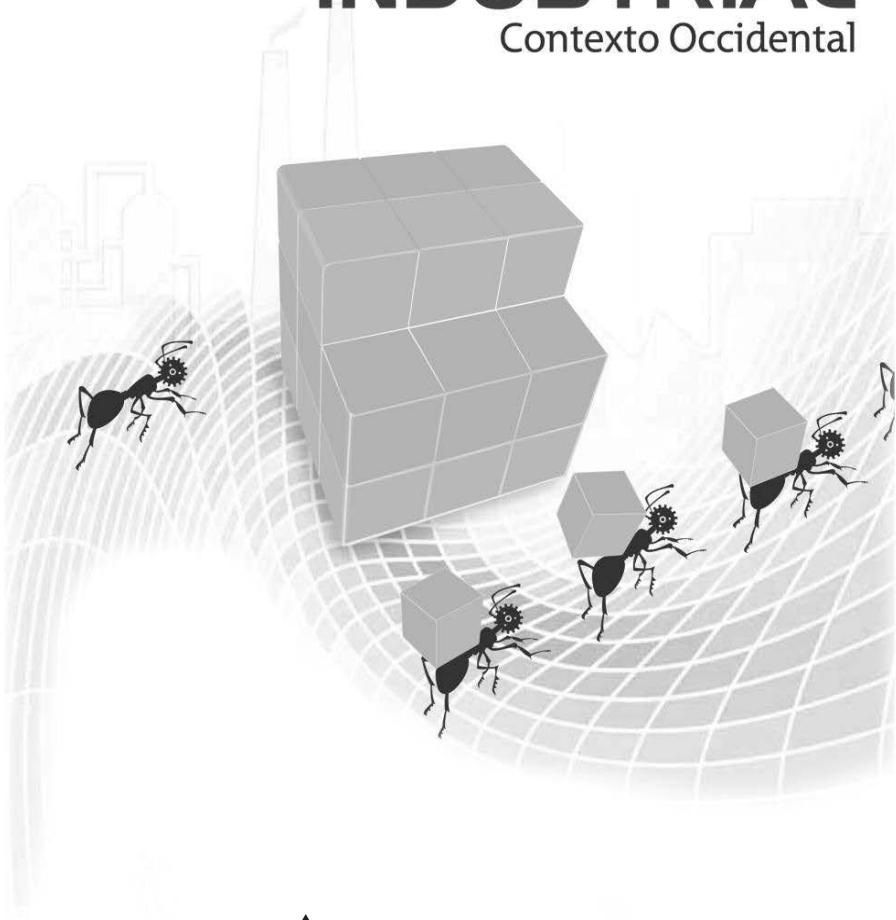
Apoyo en la



 **Alfaomega**

JOSÉ F. DOMINGO GONZÁLEZ ZÚÑIGA

Introducción a la
INGENIERÍA
INDUSTRIAL
Contexto Occidental



 **Alfaomega**

Director Editorial

Marcelo Grillo Giannetto
mgrillo@alfaomega.com.mx

Editor

Francisco Javier Rodríguez Cruz
jrodriguez@alfaomega.com.mx

Diagramación

L.D.G. Ingrid García Camacho

Datos catalográficos

González Zúñiga, José Fidencio Domingo
Introducción a la Ingeniería Industrial. Contexto occidental
Primera Edición

Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México

ISBN: 978-607-622-194-5

Formato 15.5 X 22.5 cm

Páginas: 448

Introducción a la Ingeniería Industrial. Contexto occidental

José Fidencio Domingo González Zúñiga

Derechos reservados © Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México

Primera edición: Alfaomega Grupo Editor, México, agosto de 2014

© 2014 Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

Pitágoras 1139, Col. Del Valle, 03100, México D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana

Registro No. 2317

Pág. Web: <http://www.alfaomega.com.mx>

E-mail: atencionalcliente@alfaomega.com.mx

ISBN: 978-607-622-194-5

Derechos reservados:

Esta obra es propiedad intelectual de sus autores y los derechos de publicación en lengua española han sido legalmente transferidos al editor. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del copyright.

Nota importante:

La información contenida en esta obra tiene un fin exclusivamente didáctico y, por lo tanto, no está previsto su aprovechamiento a nivel profesional o industrial. Las indicaciones técnicas y programas incluidos, han sido elaborados con gran cuidado por los autores y reproducidos bajo estrictas normas de control. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V. no será jurídicamente responsable por: errores u omisiones; daños y perjuicios que se pudieran atribuir al uso de la información comprendida en este libro, ni por la utilización indebida que pudiera dársele.

Empresas del grupo:

México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. – Pitágoras 1139, Col. Del Valle, México, D.F. – C.P. 03100.

Tel.: (52-55) 5575-5022 – Fax: (52-55) 5575-2420 / 2490. Sin costo: 01-800-020-4396

E-mail: atencionalcliente@alfaomega.com.mx

Colombia: Alfaomega Colombiana S.A. – Calle 62 No. 20-46, Barrio San Luis, Bogotá, Colombia,

Tels.: (57-1) 746 0102 / 210 0415 – E-mail: cliente@alfaomega.com.co

Chile: Alfaomega Grupo Editor, S.A. – Av. Providencia 1443. Oficina 24, Santiago, Chile

Tel.: (56-2) 2235-4248 – Fax: (56-2) 2235-5786 – E-mail: agechile@alfaomega.cl

Argentina: Alfaomega Grupo Editor Argentino, S.A. – Paraguay 1307 P.B. Of. 11, C.P. 1057, Buenos Aires,

Argentina, – Tel./Fax: (54-11) 4811-0887 y 4811 7183 – E-mail: ventas@alfaomegaaeditor.com.ar

ACERCA DEL AUTOR



El Mtro. José Fidencio Domingo González Zúñiga es Ingeniero Mecánico Electricista por la Facultad de Ingeniería de la UNAM, y obtuvo el grado de Maestro en Ciencias y la Especialización en Ingeniería Industrial en la UPIICSA del IPN. Ha obtenido los diplomados en Enseñanza Superior (ENEP, UNAM), en Formación de Instructores (EDUMAC, IPN), en Metodología de Diagnóstico Empresarial Institucional (NAFINSA), así como la certificación Basic Most Applicator (H.B. MAYNARD AND COMPANY).

En el ámbito académico el Mtro. Domingo González ha sido profesor de diferentes asignaturas de la carrera de Ingeniería Industrial, ha dirigido más de veinticinco proyectos de investigación, ha publicado más de veinte artículos especializados, y ha desempeñado en la UPIICSA del IPN los cargos de Presidente de la academia de contexto oriental de la Ingeniería Industrial, Presidente de la academia de contexto occidental de la Ingeniería Industrial, Presidente de la academia de Introducción a la Ingeniería Industrial, Coordinador del Programa de Investigación y Servicio Social: Diagnóstico y Apoyo para Elevar la Productividad y la Calidad de las Empresas, y Jefe de la Academia de Ingeniería de Métodos.

Finalmente en la industria ha trabajado como Asesor en organización, métodos, estándares, productividad, balanceo de líneas y diagnóstico empresarial, Asistente de la gerencia de planta, Ingeniero de manufactura, y Jefe del área de unidades antisísmicas. También ha impartido entre otros los siguientes cursos de capacitación especializada: Las 5 S: eficiencia, eficacia y seguridad en el lugar de trabajo; Ergonomía; Most university; Ingeniería de métodos; Organización industrial.

“El ingeniero ideal es una combinación... Él no es un científico, no es un matemático, no es un sociólogo o un escritor; pero puede utilizar el conocimiento y las técnicas de cualquiera o de todas estas disciplinas en la solución de problemas de ingeniería.”

NW Dougherty, 1955

En primer lugar doy gracias a Dios por permitirme llegar hasta aquí.

A:

La memoria de mis padres.

Mi esposa, mis hijos e hijos políticos, mis nietas, con un amor profundo,

mucho respeto y amplio agradecimiento.

MENSAJE DEL EDITOR

Una de las convicciones fundamentales de Alfaomega es que los conocimientos son esenciales en el desempeño profesional, ya que sin ellos es imposible adquirir las habilidades para competir laboralmente. El avance de la ciencia y de la técnica hace necesario actualizar continuamente esos conocimientos, y de acuerdo con esto Alfaomega publica obras actualizadas, con alto rigor científico y técnico, y escritas por los especialistas del área respectiva más destacados.

Consciente del alto nivel competitivo que debe de adquirir el estudiante durante su formación profesional, Alfaomega aporta un fondo editorial que se destaca por sus lineamientos pedagógicos que coadyuvan a desarrollar las competencias requeridas en cada profesión específica.

De acuerdo con esta misión, con el fin de facilitar la comprensión y apropiación del contenido de esta obra, cada capítulo inicia con el planteamiento de los objetivos del mismo y con una introducción en la que se plantean los antecedentes y una descripción de la estructura lógica de los temas expuestos, asimismo a lo largo de la exposición se presentan ejemplos desarrollados con todo detalle y cada capítulo concluye con un resumen y una serie de ejercicios propuestos.

Además de la estructura pedagógica con que están diseñados nuestros libros, Alfaomega hace uso de los medios impresos tradicionales en combinación con las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) para facilitar el aprendizaje. Correspondiente a este concepto de edición, todas nuestras obras tienen su complemento en una página Web en donde el alumno y el profesor encontrarán lecturas complementarias así como programas desarrollados en relación con temas específicos de la obra.

Los libros de Alfaomega están diseñados para ser utilizados en los procesos de enseñanza-aprendizaje, y pueden ser usados como textos en diversos cursos o como apoyo para reforzar el desarrollo profesional, de esta forma Alfaomega espera contribuir así a la formación y al desarrollo de profesionales exitosos para beneficio de la sociedad, y espera ser su compañera profesional en este viaje de por vida por el mundo del conocimiento.

Contenido

Prólogo	XIII
Competencias generales	XV
Capítulo 1 Antecedentes	1
1.1 Introducción	2
1.1.1 Orígenes de la Ingeniería Industrial	3
1.1.2 Ingenierías precursoras	4
1.2 Precursores de la Ingeniería Industrial	9
1.2.1 La época de las ciencias económicas	9
1.2.2 La Revolución Industrial	14
1.2.3 Principios de la administración científica	26
1.3 Desarrollos al final de la Primera Guerra Mundial	30
1.3.1 El Fayolismo	30
1.4 Avances en la Segunda Guerra Mundial	39
1.5 Resumen	43
1.6 Ejercicios	45
Capítulo 2 Ingeniería Industrial convencional	47
2.1 Introducción	48
2.2 Importancia de la productividad	49
2.2.1 Definiciones básicas de productividad	50
2.2.2 Concepto de competitividad	57
2.3 Alcance de la Ingeniería Industrial	59
2.3.1 Análisis y diseño de sistemas de producción	60
2.3.2 Control de sistemas de producción	89
2.3.3 Administración de operaciones	116
2.4 Resumen	121
2.5 Preguntas	123
2.6 Ejercicios	124

Capítulo 3
Investigación de operaciones (IO) **127**

3.1 Introducción	128
3.2 Naturaleza y alcance de la IO	128
3.3 Metodología de la investigación de operaciones	138
3.4 Modelos matemáticos	139
3.4.1 Modelos deterministas	141
3.4.2 Modelos probabilísticos	145
3.5 Áreas de aplicación de la IO	148
3.6 Resumen	167
3.7 Preguntas	169
3.8 Ejercicios	170

Capítulo 4
Ingeniería de sistemas **173**

4.1 Introducción	174
4.1.1 Definiciones	174
4.1.2 Inicios	177
4.1.3 Avances en sistemas	178
4.2 Ingeniería de sistemas	179
4.2.1 Alcance de la ingeniería de sistemas	179
4.2.2 Importancia de la ingeniería de sistemas	181
4.3 Enfoque de sistemas	185
4.3.1 Enfoque de sistemas en la solución de problemas y en el diseño	196
4.3.2 Características del enfoque de sistemas	196
4.3.3 Metodología general del enfoque de sistemas	198
4.3.4 Enfoque de sistemas aplicado al diseño organizacional	199
4.4 Análisis de sistemas	201
4.4.1 Análisis de sistemas de organización	205
4.4.2 Análisis de sistemas complejos	211
4.5 Procesos de solución de problemas	212
4.5.1 Formulación del problema	214
4.6 Diseño del sistema	221
4.7 Desarrollo del sistema	222
4.7.1 Información para la fábrica y para el terreno	231
4.7.2 Consideraciones sobre patentes	232
4.7.3 Conclusión del proyecto	233
4.7.4 Prosecución técnica	233
4.8 Implementación o implantación del sistema	237
4.8.1 El axioma de sistemas: “La gente es el problema”	238
4.9 Operación del sistema	254
4.10 Resumen	260
4.11 Ejercicios	266

Capítulo 5 Teorías de sistemas, de decisiones, de la comunicación y de la información	269
--	------------

5.1 Introducción	270
5.2 Teoría general de sistemas	270
5.2.1 Enfoque de sistemas aplicado	275
5.2.2 Optimización del sistema global	286
5.2.3 Diferencias entre el diseño real y el óptimo (costos de oportunidad)	303
5.2.4 Predicción de resultados futuros (prospectiva)	319
5.2.5 Extrospectiva: Del sistema hacia el exterior	340
5.3 Teoría de decisiones	345
5.3.1 Aspectos normativos y descriptivos	346
5.3.2 Las fases del proceso de decisiones	348
5.3.3 Decisiones y valor	354
5.3.4 La utilidad esperada	355
5.3.5 La toma de decisiones bajo incertidumbre	357
5.3.6 Teoría de decisiones sociales	360
5.4 Teoría de la comunicación y de la información	364
5.4.1 El objeto de estudio de la teoría de la comunicación	365
5.4.2 Comunicación e información	367
5.4.3 Modelos básicos de comunicación	374
5.4.4 Teorías sobre la sociedad de la información	385
5.5 Resumen	396
5.6 Preguntas	406

Bibliografía	409
---------------------	------------

Índice analítico	419
-------------------------	------------

Prólogo

Este material se escribió para dar un enfoque de la evolución de la Ingeniería Industrial desde sus orígenes considerando el punto de vista occidental y permitir a los interesados en la carrera valorar la importancia del conjunto de técnicas que la integran ubicándose en el contexto de la época en que se desarrollaron identificando la problemática existente y como se fue gestando su metodología a partir de la experiencia, del ensayo y error hasta encontrar un sustento fundamental en el procedimiento universal de solución de problemas que se basa en los elementos principales del método científico, esencialmente en la observación, registro y análisis de los hechos, metodología que fue evolucionando con las nuevas aportaciones desarrolladas para enfrentar problemas cada vez más complejos, que siempre han acompañado a la humanidad y que están asociados, principalmente, a problemas militares, y que como consecuencia de una necesidad imperiosa de resolverlos, han impulsado el desarrollo de nuevas metodologías para su solución, apoyadas en los avances disponibles en cada época. Dichas metodologías, se han aplicado con éxito en la solución de problemas en todo tipo de áreas, como: manufactura, servicios, gobierno, comercio, etcétera.

En los capítulos correspondientes se identifican las siguientes etapas de evolución de la Ingeniería Industrial en este contexto:

- I. Orígenes e ingenierías precursoras.
- II. Ingeniería Industrial convencional, asociada a los estudios de movimientos y tiempos (Gilbreth, Taylor y otros precursores).
- III. Ingeniería Industrial apoyada en modelos de Investigación de Operaciones.
- IV. Ingeniería Industrial apoyada en sistemas.
- V. Ingeniería Industrial apoyada en las teorías de sistemas, decisiones, comunicación e información, etcétera.

De manera que podemos observar la gestación de la mejora continua a partir de Gilbreth que formuló el principio: *¡siempre hay una mejor manera de hacer el trabajo!* Lo que sirvió de fundamento para el enfoque de mejoramiento de sistemas orientado a la eficiencia, soportado con las ideas de Taylor y otros contemporáneos que aportan el enfoque de los inicios del método científico aplicado al estudio del trabajo, comúnmente conocido como procedimiento universal de solución de problemas, desarrollando sus

trabajos en las áreas fundamentales para la operación de las empresas de: análisis y diseño, control y administración de operaciones de sistemas de manufactura o de servicios, siempre enfocadas al mejoramiento.

Los subsecuentes avances que se gestaron durante la segunda guerra mundial, conocidos como modelos de Investigación de Operaciones, que proporcionaron una metodología racional y sistemática para la toma de decisiones en solución de problemas de control de sistemas con objeto de mejorar su rendimiento.

En la época de la postguerra a raíz del impulso generado por la guerra en la investigación se desarrollaron varios enfoques, uno particularmente importante, el de sistemas, se encontró de utilidad en la solución de problemas complejos dando pauta al desarrollo de la Ingeniería de Sistemas o Ingeniería Industrial apoyada en sistemas.

El impulso en la investigación continuo con desarrollos en diversos campos y teorías, de estas resultaron particularmente importantes para la Ingeniería Industrial las de sistemas, las de decisiones y la teoría de comunicación e información, que se describen en el capítulo V y que sentaron las bases para la época actual conocida como la de la sociedad del conocimiento.

Todo esto se hizo con la idea de proporcionar un panorama amplio de la carrera de la Ingeniería Industrial y darle oportunidad al interesado en estudiarla de ubicarse e identificar el área o áreas en las que le gustaría desempeñarse, pero principalmente de enamorarse de la carrera, dado que tiene toda una gama de posibilidades de aplicación en el análisis, diseño, control, administración y mejoramiento o rediseño de los sistemas de manufactura o servicios, buscando siempre una manera mejor de hacer las cosas.

José Fidencio Domingo González Zúñiga,
México D. F. México

Competencias Generales

- Evaluar las técnicas de ingeniería industrial, como un producto de la actividad, cultura y contexto occidental, mediante la comparación de la aplicación de la teoría con la práctica en las empresas.
- Analizar la evolución de la ingeniería industrial en el contexto occidental, ubicando los principales avances realizados por los precursores e ingenieros industriales.
- Estructurar una visión básica de la aplicación, alcance, funciones e importancia de la ingeniería industrial, mediante el análisis de información relevante en los conceptos y técnicas de la misma en el contexto occidental.
- Convertirse en persona autónoma, formándose un perfil enfocado en un proceso permanente de innovación y dinamismo, acorde con los avances científicos y tecnológicos dentro de un modelo interdisciplinario, para explotar la autonomía de su aprendizaje.
- Comunicar de manera integral su aprendizaje mediante el pensamiento sistémico que lo lleve a una vinculación con las diferentes unidades de aprendizaje de su plan de estudio, tanto horizontal como verticalmente.
- Identificar su propio trabajo como profesional autónomo, mediante una respuesta eficaz y diligente a los cambios y versiones que le ofrezcan los contextos en los que interactúe.

Capítulo 1

ANTECEDENTES

- 1.1 Introducción
- 1.2 Precursores de la Ingeniería Industrial
- 1.3 Desarrollos al final de la Primera Guerra Mundial
- 1.4 Avances en la Segunda Guerra Mundial
- 1.5 Resumen
- 1.6 Ejercicios

“En todo trabajo, siempre existe una mejor manera.”

F. B. Gilbreth

COMPETENCIAS DEL CAPÍTULO

Sintetizar los principales eventos y las aportaciones que han contribuido al origen y la evolución de la Ingeniería Industrial en el contexto occidental.

1.1 INTRODUCCIÓN

Este libro presenta un panorama de la Ingeniería Industrial en el contexto occidental a partir de sus orígenes, la Ingeniería Industrial convencional apoyada en el método científico (capítulo 1), y continúa con la exposición de los modelos de investigación de operaciones apoyados en modelos matemáticos (capítulo 2), para proseguir con la ingeniería de sistemas (capítulo 3) hasta llegar a las teorías de sistemas y subsecuentes (capítulo 4), ubicando los principales avances que se generaron desde los precursores hasta los ingenieros industriales en la época actual en dicho contexto, de tal manera que el propósito es que el lector tenga una visión de las áreas que integran la Ingeniería Industrial e identifique la función que puede desempeñar al desarrollar esta carrera.

Asimismo, se presenta una visión básica de la aplicación, el alcance, las funciones y la importancia de la Ingeniería Industrial mediante el análisis de la información relevante en los conceptos y las técnicas de la misma en dicho contexto, para formarse un perfil enfocado en un proceso permanente de innovación y dinamismo, acorde con los avances científicos y tecnológicos, dentro de un modelo interdisciplinario de mejora continua.

Tradicionalmente, los ingenieros industriales son los que determinan las maneras más efectivas para usar los factores básicos de producción: gente, máquinas, materiales, información y energía para elaborar un producto o para proveer un servicio. Ellos son el puente entre las metas de la dirección y el cumplimiento operacional. Son también quienes se interesan más en la productividad creciente mediante la dirección de gente, los métodos de organización de negocio y la tecnología requerida.

El aspecto más distintivo de la Ingeniería Industrial es la flexibilidad que ofrece. Ya sea en una línea de producción, modernizando una sala de operaciones, distribuyendo productos en el ámbito mundial o en la fabricación de automóviles superiores, los ingenieros industriales comparten la meta común de ahorrar el dinero de la empresa y aumentar su eficiencia. Saben cómo hacer mejor las cosas. Diseñan procesos y sistemas que mejoran la calidad, la productividad y la competitividad. Trabajan para eliminar desperdicio de tiempo, dinero, materiales, energía y otras mercancías.

El ingeniero industrial (IE) es sinónimo de integrador de sistemas; en otras palabras, es un pensador de imagen amplia. Es quien toma lo que existe hoy y conceptúa lo que debe haber en el futuro.



Los IE dedican la mayoría de su tiempo en el ambiente operativo real, donde obtienen soluciones con enfoques científicos a los problemas.

John Samuels, vicepresidente de Norfolk Sur.¹

De manera concreta, el Instituto estadounidense de Ingenieros Industriales (IIE) la define de la siguiente forma:

La Ingeniería Industrial se ocupa del diseño, el mejoramiento y la instalación de sistemas integrados de personas, materiales y equipo, con base en conocimientos y habilidades especializadas en ciencias matemáticas, físicas y sociales, junto con los principios y métodos del análisis y diseño de ingeniería, con la finalidad de especificar, pronosticar y evaluar qué ha de obtenerse en tales sistemas.

1.1.1 Orígenes de la Ingeniería Industrial

Los precursores de ingenieros, artistas y artesanos prácticos procedieron principalmente mediante prueba y error. No obstante, es bien sabido que la creatividad combinada con la imaginación produce dispositivos maravillosos. Muchos monumentos antiguos no dejan de incitar a la admiración, admiración que se personifica con el término de *ingeniero*, que tiene su origen en el siglo XI y proviene del latín *ingeniator*, que significa “alguien con ingenio, el ingenioso”. El nombre, que se utilizaba para los constructores de fortificaciones o fabricantes de dispositivos ingeniosos, estaba estrechamente relacionado con la noción del ingenio, que fue capturado en el antiguo significado de “motor” (*engine* en inglés), hasta que la palabra se utilizó para referirse a las máquinas de vapor y similares. Cabe recordar que los cuadernos de Leonardo da Vinci, que tenía el título oficial de *Ingegnere generale*, revelan que algunos ingenieros del Renacimiento comenzaron a preguntarse sistemáticamente “cómo funciona y por qué”.

Hay muchos ejemplos en la Antigüedad de la práctica los trabajos ingenieriles, tales como las pirámides u otras construcciones de diversas culturas alrededor del mundo, así como las siete maravillas del mundo antiguo (la gran pirámide de Guiza, los jardines

colgantes de Babilonia, el templo de Artemisa, la estatua de Zeus en Olimpia, el museo de Halicarnaso, el Coloso de Rodas y el faro de Alejandría), además de la Gran Muralla de China y los proyectos de construcción romanos, entre otros.

1.1.2 Ingenierías precursoras

En sus inicios, la ingeniería estuvo vinculada casi exclusivamente a actividades militares, gubernamentales y religiosas. En este sentido se construyeron caminos, puentes, murallas, torres, faros, puertos, monumentos funerarios y demás para beneficiarlas o para honrar a un caudillo. En tiempos de paz, la ingeniería fue puesta al servicio del bienestar del ser humano, al margen de la guerra y los ejércitos, de ahí que cuando, en el siglo XIX, algunas universidades empezaron a ofrecer esta carrera la llamaron ingeniería civil con el propósito de distinguirla de la ejercida por los militares (ingeniería militar). Algunas de las primeras escuelas universitarias en Europa fueron la École Nationale des Ponts et Chaussées de París, Francia, en 1747; la Academia de Artillería en Segovia, España, en 1764; la Academia de Minas de Freiberg, Alemania, en 1765; la Academia Real de Fortificação, Artilharia e Desenho, en Lisboa, Portugal, en 1790.

En México, el Real Seminario de Minería comenzó a operar en enero de 1792. Estuvo encargado de la iniciativa de formar ingenieros para “promover el bien común y el progreso” mediante la aplicación de la ciencia a la innovación técnica, según los ideales de su época. Es por tanto la primera institución de su tipo en América, tradición que han seguido la Facultad de Ingeniería de la UNAM y el Instituto Politécnico Nacional (IPN), así como otras escuelas de ingeniería nacionales.

Al Real Seminario de Minería de México siguieron la Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho, en Río de Janeiro, Brasil, en 1792; la Escuela Técnica Superior de Praga, en 1806; la Universidad de Ciencias Aplicadas de Ámsterdam, Holanda, en 1877; la Escuela Técnica Superior de Viena, Austria, en 1815; la Escuela Técnica Superior de Karlsruhe, Alemania, en 1825.

En Estados Unidos la primera escuela de ingenieros se creó en Nueva York en 1849, mientras que en 1913 se fundó la Escuela Nacional de Aviación en Getafe, España.

La necesidad de eficiencia en el diseño y el análisis de puentes, caminos y edificios dio lugar a las bases con las que inició la ingeniería, cuya aplicación de principios paulatinamente hizo surgir subdisciplinas de la ingeniería. A continuación se exponen algunas de ellas.

Ingeniería militar. Aunque no es sino hasta la Edad Media que empiezan a utilizarse los términos de «ingenio» e «ingeniero» para definir los artefactos de la guerra y a sus

constructores, existe constancia de que el empleo de la fortificación y de las armas para asaltarla datan de los mismos orígenes de la humanidad. Si retrocedemos a la Edad del Bronce nos encontraremos con que en España hay vestigios de fortificaciones, que tal vez sean los más antiguos en la historia de la humanidad y se ubican en Los Millares, Almería. Hay hallazgos datados hacia el año 1,000 a. C. de fortalezas (fortificaciones militares), en Galicia y la Meseta, que son importantes, pues nos indican que los iberos fueron los primeros en comenzar a ubicar sus ciudades en cerros bien defendidos, cuyas murallas estaban hechas de piedras unidas en seco, y también en disponer de torretas, fosos, empalizadas, etcétera, elementos todos que proporcionaban una defensa suplementaria. La *ingeniería militar* es la rama de la ingeniería que da apoyo a las actividades de combate y logística de los ejércitos mediante un sistema MCP (movilidad, contra movilidad y protección) con la construcción de puentes, campos minados, pasarelas, etcétera, cuya enseñanza primero se dio en las academias militares.

Ingeniería civil. Está estrechamente vinculada a los avances en el conocimiento de la física y las matemáticas a través de la historia. Debido a que el campo de aplicación de la ingeniería civil es muy amplio, incluyendo varias subdisciplinas, su historia está relacionada con el estudio y la comprensión de estructuras, ciencia de materiales, geografía, geología, suelos, hidrología, medio ambiente, mecánica y otros campos.

En la Antigüedad y en la Edad Media, la mayoría de las construcciones de obras arquitectónicas fue llevada a cabo por artesanos, en calidad de albañiles y carpinteros, que luego pasaban a ser maestros de obras. Tal conocimiento se mantuvo durante mucho tiempo entre los gremios y rara vez era modificado por los avances que se iban sucediendo, mientras que las estructuras, los caminos y las infraestructuras, repetitivas, se incrementaban a escala.

Uno de los primeros ejemplos del uso de la física y las matemáticas aplicables a la ingeniería civil es el trabajo de Arquímedes (287–212 a.C.), que incluye el principio de Arquímedes y la solución al bombeo de agua, que se dio gracias al tornillo que inventó.

Brahmagupta, un matemático indio, utilizó la aritmética en el siglo VII d.C. basado en la numeración arábigo-hindú, para calcular el volumen de las excavaciones.

Ingeniería mecánica. Las aplicaciones de esta ingeniería datan de épocas muy anteriores. Por ejemplo, en la antigua Grecia las obras de Arquímedes han influido profundamente en la mecánica occidental, en tanto que Herón de Alejandría (c. 10-70 d.C.), creó la primera máquina de vapor.² En China, Zhang Heng (78-139 d.C.) mejoró un reloj de agua e inventó un sismómetro; Ma Jun (200-265 d. C.) inventó un carro con diferencial de engranajes, y el ingeniero Su Song (1020-1101 d.C.) incorporó un mecanismo de escape en su torre del reloj astronómico dos siglos antes de que cualquier fuga se pudiese encontrar en los relojes de la Europa medieval, así como la primera cadena de transmisión.³ Durante los siglos VIII al XV, en la llamada Edad de Oro islámica, hubo notables contribuciones de los musulmanes en el campo de la tecnología

mecánica. Al Jaziri, un ingeniero musulmán, escribió su famoso *Libro del conocimiento de ingeniosos dispositivos mecánicos* en 1206, en el cual presentó muchos diseños mecánicos, pero también es considerado el inventor de tales dispositivos mecánicos que ahora forman la base árboles de levas y cigüeñales.⁴

Un hecho importante en la creación de la ingeniería mecánica sucedió en Inglaterra durante el siglo XVII, cuando Isaac Newton formuló sus tres leyes y desarrolló el cálculo. Newton fue reacio a publicar sus métodos y leyes por años, pero finalmente fue persuadido por sus colegas (entre otros Edmundo Halley (8 de noviembre de 1656 – 14 de enero de 1742) para el beneficio de toda la humanidad. Históricamente, esta rama de la ingeniería nació en respuesta a diferentes necesidades que fueron surgiendo en la sociedad. Como se requería de nuevos dispositivos con funcionamientos complejos en su movimiento o que soportaran grandes cantidades de fuerza, esta disciplina tuvo que estudiar el movimiento y el equilibrio. Asimismo, tuvo que encontrarse una nueva manera de hacer funcionar las máquinas, ya que en un principio se utilizaba fuerza humana o fuerza animal, por lo que la invención de las máquinas que funcionan con energía proveniente del vapor, del carbón, de petroquímicos (como la gasolina) y de la electricidad trajo grandes avances, lo que dio origen a la Revolución Industrial, que estalló a mediados del siglo XVIII. Años después, se abriría paso la producción en serie.

A principios del siglo XIX, en Inglaterra, Alemania y Escocia, el desarrollo de herramientas llevó a desarrollar un campo dentro del campo de la ingeniería en mecánica el cual abarca el suministro de máquinas de fabricación y de sus motores.⁵ En Estados Unidos, la American Society of Mechanical Engineers (ASME) se formó en 1880, convirtiéndose en la tercera sociedad de profesionales de ingeniería, después de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (1852) y el Instituto Americano de Ingenieros de Minas (1871). Las primeras escuelas en ese país que ofrecían una enseñanza de la ingeniería fueron la Academia Militar 1817, una institución conocida como Universidad de Norwich desde 1819, y el Instituto Politécnico Rensselaer en 1825. La educación en ingeniería mecánica se ha sustentado históricamente en una base sólida en matemáticas.

Ingeniería eléctrica. La electricidad ha sido materia de interés científico desde principios del siglo XVII. El primer ingeniero electricista fue probablemente William Gilbert (1804-1890), quien diseñó el *versorium*, un aparato que detectaba la presencia de objetos estáticamente cargados. Él también fue el primero en marcar una clara distinción entre electricidad magnética y electricidad estática, además de que se le atribuye la creación del término *electricidad*. En 1775 la experimentación científica de Alessandro Volta (1745-1827) llevó a la creación del electróforo, un aparato que producía carga eléctrica estática, gracias a la cual, en 1800, Volta inventó la pila voltaica, predecesora de la batería eléctrica. Thomas Alva Edison (1847-1931) construyó la primera red de energía eléctrica del mundo. No fue sino hasta años después que las investigaciones dentro de la ingeniería eléctrica empezaron a intensificarse. Algunos de los desarrollos notables en el siglo XIX incluyen el trabajo de Georg Ohm (1789-1854), quien en 1827 midió la relación entre corriente eléctrica y la diferencia de potenciales en un conductor. Otros

destacados personajes fueron Michael Faraday (1791-1867), quien descubrió la inducción electromagnética en 1831 y James Clerk Maxwell (1831-1879), quien en 1873 publicó la teoría unificada de la electricidad y el magnetismo en su tratado *Electricity and Magnetism*. Además, Nikola Tesla (1856-1943) hizo posibles las redes de transmisión de energía eléctrica de larga distancia. Durante estos años, el estudio de la electricidad era ampliamente considerado como una rama de la física. No fue sino hasta finales del siglo XIX que las universidades empezaron a ofrecer carreras en ingeniería eléctrica.

Ingeniería química. Como disciplina, en sus orígenes la ingeniería química era básicamente una extensión de la ingeniería mecánica, que se aplicaba a resolver los problemas de fabricación de sustancias y materiales químicos, que era la tarea tradicional de la química industrial. En contraste, la ingeniería química moderna está estructurada alrededor de un sistema de conocimientos propio acerca de fenómenos y procesos vinculados con la producción de sustancias y materiales mediante cambios en las propiedades físicas o químicas, o ambas, de la materia. Debe tomarse en cuenta que en el campo de la ingeniería química es posible reconocer tendencias y momentos cruciales que se consideren paradigmáticos. El primero de ellos data de 1915, cuando en el Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) los profesores Walker, Lewis y McAdams le dieron forma al concepto de *operaciones unitarias* como una serie de operaciones comunes a muchos procesos industriales, tales como la transferencia de energía, la destilación, el flujo de fluidos, la filtración, la trituración, la molienda y la cristalización, lo cual permitió unificar, a la vez que dar sustento científico y leyes generales, a las diversas operaciones y variados procesos de la naciente ingeniería química. Este modelo de las operaciones unitarias, que implicaba el estudio de tales operaciones separadas de los procesos industriales específicos, como una forma de abordar y solucionar los problemas de escala industrial fundamentalmente empírico, se utilizó con éxito durante muchos años. En 1960 surgió el segundo gran paradigma de la ingeniería química con la publicación del libro *Fenómenos de transporte*, de R. B. Bird, W. E. Stewart y E. N. Lightfoot, quien estableció un método distinto para el análisis y estudio de los fenómenos físico-químicos además de ser quien buscaría explicaciones moleculares para los fenómenos macroscópicos. El estudio de los fenómenos de transporte comprende aquellos procesos en donde hay una transferencia o un transporte neto de materia, energía o *momentum* lineal en cantidades macroscópicas, desde los puntos de vista microscópico o molecular. Si bien los dos paradigmas citados han hecho posible la solución de muchos problemas en ingeniería química, hoy comienzan a configurarse desde las ciencias básicas (química, física, biología) fundamentos científicos para estructurar un nuevo enfoque, el cual ampliaría el horizonte de la ingeniería química y abordaría problemas a los que hasta ahora se les han dado soluciones incompletas con métodos empíricos.

Así, la biología molecular, la ingeniería genética y la ingeniería molecular (ciencias del área de la nanotecnología) aportan conocimientos que pueden ser la base para construir un tercer paradigma de la ingeniería química.

Ingeniería Industrial. A medida que surgían aparatos y se descubrían nuevas fuentes de energía, crecía la necesidad de organizar las fábricas para que aprovecharan las innovaciones, de tal manera que la Ingeniería Industrial fue desarrollada a partir de las evidencias empíricas y de su comprensión, luego de la investigación y el diseño de una base más científica. Las raíces empíricas de la Ingeniería Industrial datan de la Revolución Industrial.

El concepto de sistema de producción, que es la base de la práctica moderna y de la investigación de la Ingeniería Industrial, tuvo su génesis en las fábricas abiertas como resultado de las innovaciones de la Revolución Industrial. Los conceptos presentados por Adam Smith (1723-1790), en su tratado *La causa de la riqueza de las naciones*, también son fundamento de lo que se convirtió en la teoría y la práctica de la Ingeniería Industrial. Sus escritos y conceptos, tales como la división del trabajo y la “mano invisible” del capitalismo, sirvieron para motivar a muchos de los innovadores tecnológicos a establecer e implementar sistemas de fabricación.

Otros ejemplos empíricos son la puesta en marcha de los sistemas de control de Arkwright para regular la mano de obra y la producción, así como la fábrica bien organizada de Watt hijo, quien, junto con su asociado, Matthew Boulton (1728-1809), se dio a la tarea de producir motores de vapor. También cabe mencionar los resultados que obtuvo Charles Babbage (1791-1871) en sus visitas a las fábricas en Inglaterra y Estados Unidos al comienzo del siglo XIX, las cuales fueron documentadas en su libro titulado *En la Economía de la Maquinaria y de los Fabricantes*, que incluye temas tales como el tiempo requerido para aprender una tarea particular, los efectos de subdividir tareas en elementos más pequeños y menos detallados, el tiempo y el ahorro en costos asociados al cambio a partir de una tarea a otra y las ventajas de hacer tareas repetitivas. En su ejemplo clásico, considerando la fabricación de alfileres, Babbage extiende la idea de Adam Smith en la división del trabajo demostrando que podría ahorrarse dinero si se asignaran trabajadores de menor ingreso (mujeres y niños en esos días) a las operaciones que requerían menos habilidad y si se restringiera a los trabajadores pagados con un nivel de formación más alto solo para aquellas operaciones que requerían niveles de habilidad más específicos y detallados. Babbage también discute aspectos relacionados con los pagos del salario, con el plan actual de participación en los beneficios e incluso con ideas asociadas con la organización de trabajo y de relaciones laborales.

Las ideas de Babbage se vieron apoyadas con los esfuerzos de Eli Whitney (1765-1825) y Simeon North (1765-1852) en cuanto a la innovación de piezas intercambiables. Con el sistema de Whitney se produjeron piezas individuales en masa a las tolerancias suficientemente estrechas para permitir su uso en cualquier producto final.

La división del trabajo de Adam Smith se realizó a un grado nunca antes visto, con trabajadores individuales produciendo solo las partes en lugar de productos terminados. El resultado fue una reducción significativa de la necesidad de especialización de los trabajadores, lo que eventualmente condujo al ambiente industrial que se convirtió en el objeto del estudio de Frederick Winslow Taylor (1856-1915).

1.2 PRECURSORES DE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL

Se considera a Fredrick Winslow Taylor como el Padre de la Ingeniería Industrial, no obstante que sus ideas no todas fueron originales. Algunas de las influencias anteriores, además de las mencionadas, quizá sean Adam Smith (1776) y su *Tratado de la riqueza de las naciones*; Thomas Malthus (1798), con el *Ensayo sobre la población*; David Ricardo (1817) y sus *Principios de la tributación y economía política*; John Stuart Mill (1848) con sus *Principios de economía política*; Boulton y Watt (1800), gracias al mejoramiento organizacional en la fundición, y Charles Babbage (1832), con sus aportaciones a la división del trabajo en manufactura.

1.2.1 La época de las ciencias económicas

Todos estos trabajos proveyeron explicaciones liberales clásicas para los éxitos y las limitaciones de la Revolución Industrial. De hecho, Adam Smith era un economista como la mayoría de sus contemporáneos. "Las ciencias económicas" es la frase para describir este campo en Inglaterra anterior a la industrialización estadounidense.

Adam Smith⁶

En 1759 publicó *Teoría de los sentimientos morales*, obra profundamente influida por el utilitarismo de Jeremías Bentham y John Stuart Mill, en la que describía la formación de los juicios morales en el marco de un "orden natural" de ámbito social, sobre cuyos principios basaría su posterior liberalismo económico. Smith veía en el comportamiento humano la presencia de una dualidad entre razón e impulsos pasionales.



La naturaleza humana, individualista y racional al mismo tiempo, empuja al hombre tanto al enfrentamiento como a la creación de instituciones destinadas a la consecución del bien común. Asimismo, expuso la creencia en una "mano invisible" armonizadora de los intereses individuales en el marco de la actividad colectiva.

En Francia inició la redacción de su obra más importante, la *Investigación sobre la naturaleza y las causas de la riqueza de las naciones* (*An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*), que dividió en cinco libros y tardó en escribir seis años en su pueblo natal de Kirkcaldy, cerca de Edimburgo, el cual publicó

después de una estancia de tres años en Londres, en 1776. Su principal aportación teórica con su obra es el análisis del mecanismo mediante el cual el libre juego de mercado (tanto escala interna como en las relaciones comerciales con otros países) entre los diversos sectores de la economía genera el máximo beneficio económico del conjunto.

En consecuencia, se mostró siempre contrario a cualquier intervención o regulación de la actividad económica, con lo que redujo el papel del Estado al de garante de las reglas del juego. Asimismo, se opuso al mercantilismo, al considerar la riqueza de una nación como la producción anual de bienes y servicios ("las cosas necesarias y útiles para la vida"), en lugar de las reservas de metales preciosos, y a la escuela fisiócrata, al descartar la tierra como el origen de toda riqueza y proponer en su lugar el factor trabajo. A este respecto, Smith incidió en la especialización (división del trabajo) como el determinante de la capacidad de una sociedad para aumentar su productividad y, en consecuencia, su crecimiento económico. Estableció, por otro lado, una teoría del valor de un bien que distinguía entre su valor de cambio (capacidad de ser intercambiado por otros bienes) y su valor de uso (utilidad que aporta).



Thomas Robert Malthus

Malthus estaba interesado en todo lo relacionado con la población. Por ello, acumuló por mucho tiempo las cifras de nacimientos, defunciones, la edad del matrimonio y la maternidad, así como los factores económicos que contribuyen a la longevidad. Su principal aportación fue poner de relieve la relación entre la oferta de alimentos y la población. Los seres humanos no deben sobrepoblar la tierra

hasta el punto de morir de hambre, sostuvo, solo *porque* la gente cambia su comportamiento frente a los incentivos económicos.

Tomando nota de que si bien la producción de alimentos tiende a aumentar aritméticamente, la población tiende a aumentar naturalmente a una velocidad (más rápida) geométrica, Malthus argumentó que no es de extrañar que la gente debe *elegir* para reducir (o "controlar") el crecimiento de la población. Las personas pueden aumentar la producción de alimentos, pensaba, sólo mediante métodos lentos y difíciles, tales como recuperación de tierras ociosas o de la agricultura intensiva. Malthus no estaba fascinado con la inevitabilidad de la muerte humana, sino con la razón de por qué los seres humanos *no* mueren frente a esos enormes obstáculos. Como economista, estudió las respuestas a los incentivos. Él es probablemente el economista más mal entendido y mal interpretado de todos los tiempos. El adjetivo "malthusiano" se utiliza para describir una predicción pesimista de la desaparición paso a paso de una humanidad condenada al hambre a consecuencia de la superpoblación. Cuando su hipótesis fue declarada en su *best-seller* por primera vez en su *Ensayo sobre el principio de población* (1798),⁷ el

alboroto que causó entre los no economistas opacó el respeto instantáneo que inspiró entre sus colegas economistas. Así de irrefutable y simple era su ilustrativa comparación de que una aritmética y una serie geométrica de alimentos aumentan de manera más lenta que la población, lo que a menudo se toma fuera de contexto.

La observación principal es en realidad tan dura que todavía es fácil perder de vista la conclusión real de Malthus: que debido a que los seres humanos hambrientos *no tienen* todas las opciones económicas, debe ser en el trabajo donde la gente encuentre la salida, pues es el trabajo de un economista es estudiar esas opciones.

Malthus trató muchos otros temas. *Principios de economía política* (1820)⁸ fue el primer texto para describir un calendario de demanda como algo separado de la cantidad demandada a un precio determinado. Su exposición de las curvas de demanda aclaró el debate sobre la ley de Say⁵¹ (a la que se opuso a la larga, con el argumento del autoajuste de los mercados). Su trabajo se centró en el contraste a largo plazo -como lo demuestra el crecimiento de la población- con el corto plazo, lo cual se refleja en eventos cíclicos como los que afectan a la agricultura. Como escribió sus *Principios... antes de la Revolución Industrial*, Malthus no tuvo la oportunidad de hablar plenamente en su obra sobre el impacto de la tecnología (por ejemplo, los pesticidas, la refrigeración, maquinaria agrícola y aumento de los rendimientos de los cultivos) en la producción de alimentos.

David Ricardo

Este personaje (1772-1823) hizo su primer artículo sobre economía a la edad de 37 años y pasó los siguientes 14 años como economista profesional. Ricardo ganó fama entre los economistas durante la "controversia del oro." En 1809 escribió que la inflación en Inglaterra fue el resultado de la propensión del banco oficial de ese país a emitir billetes en exceso. En resumen, Ricardo era un creyente de principios de la teoría cuantitativa del dinero o de lo que se conoce como *monetarismo*.



En su *Ensayo sobre la influencia de un bajo precio de maíz en las utilidades del capital* (1815), Ricardo plasmó en sus textos la que llegó a ser conocida como la ley de los rendimientos marginales decrecientes, una de las leyes más famosas de la economía, la cual considera que los recursos, a medida que más y más se combinan en la producción con un recurso fijo, por ejemplo cuanto más mano de obra y maquinaria se utilizan en una cantidad fija de tierra, las adiciones a la producción disminuirán.

Ricardo también se opuso a las leyes proteccionistas del maíz, que restringían las importaciones de trigo. Además, al abogar por el libre comercio, formuló la idea de los costos comparativos, actualmente llamada *ventaja comparativa*, una idea muy sutil que es la base principal para la mayoría de los economistas que creen en el

libre comercio, La idea es la siguiente: un país que comercia los productos que puede obtener a un coste menor de otro país, está en mejor situación que si hubiera hecho los productos en casa.

Por ejemplo, Poorland llega a producir una botella de vino con cinco horas de trabajo y una hogaza de pan con diez horas. Trabajadores de Richland son más fructíferos; ellos producen una botella de vino con tres horas de mano de obra y una hogaza de pan con una hora. Uno pensaría en principio que Richland requiere menos horas de trabajo para producir el bien.

Piense otra vez. El coste de producción de vino de Poorland, aunque superior al de Richland, en términos de horas de trabajo, es menor en términos de pan. Por cada botella producida, Poorland renuncia a la mitad de un pan, mientras Richland tiene que renunciar a tres panes para hacer una botella de vino. Por lo tanto, Poorland tiene una ventaja comparativa en la producción de vino. Del mismo modo, para cada hogaza de pan que produce, Poorland se da por vencido con dos botellas de vino, pero Richland rinde solo un tercio de una botella. Por lo tanto, Richland tiene una ventaja comparativa en la producción de pan.

Si cambian el vino y el pan uno por uno, Poorland pueden especializarse en la producción de vino y el comercio y Richland especializarse en la producción de pan, pero Richland y Poorland estarán mejor si se quedan como están. Al cambiar, digamos, diez horas de trabajo de producción de pan, Poorland abandona el pan que este trabajo podría haber producido, pero el trabajo reasignado produce dos botellas de vino, que se comercian por dos hogazas de pan. Resultado: redes de comercio de Poorland y una hogaza de pan adicional. Tampoco la ganancia de Poorland viene a expensas de Richland. También Richland tiene ganancias, sino no cambiaría. Al cambiar tres horas de producción de vino, la producción de vino de Richland se reduce a una botella, pero aumenta la producción a tres panes. Sus acciones se negocian así: dos de estos panes por dos botellas de vino de Poorland. Richland tiene una botella más de vino de las que tenía antes y una hogaza de pan adicional.

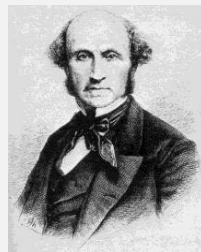
Ricardo observó que tales ganancias se originan cuando cada país se especializa en la producción de la mercancía para la cual su coste comparativo es más bajo. Sobre eso escribió un siglo antes de que Paul Samuelson y otros economistas popularizaran el uso de ecuaciones. Lo mejor del caso es que Ricardo sigue siendo apreciado por su asombrosa habilidad para llegar a conclusiones complejas sin ninguna de las herramientas matemáticas que ahora se consideran esenciales. Como economista, David Friedman lo expresó, en 1990, en su libro: *La teoría de precios*: "El economista moderno leyendo los *Principios* de Ricardo se siente más bien como un miembro de una de las expediciones al monte Everest, al llegar a la cima de la montaña, lo que sentiría al encontrarse con un caminante vestido en zapatos tenis y camiseta.¹

Una de las principales contribuciones de Ricardo, a la que llegó sin herramientas matemáticas, es su teoría de las rentas. La tomó prestada de Thomas Malthus, con

con quien mantuvo una relación muy estrecha, aunque a menudo fue diametralmente opuesto a él. Ricardo explicaba que entre más tierra se cultivaba, los agricultores tendrían que comenzar a usar tierra menos productiva. Pero debido a que un bushel de maíz de las tierras menos productivas se vende por el mismo precio de una fanega de tierra altamente productiva, los agricultores arrendatarios estarían dispuestos a pagar más para alquilar la tierra altamente productiva. El resultado de esto es que los terratenientes, no los agricultores arrendatarios, son los que obtienen la tierra productiva. Este hallazgo ha resistido la prueba del tiempo. Hoy los economistas utilizan el razonamiento ricardiano para explicar por qué el soporte de precios de la agricultura no ayuda a los agricultores por sí solos, pero sí facilita que los propietarios de tierras agrícolas sean más ricos. Los economistas utilizan un razonamiento similar para explicar por qué los beneficiarios de las leyes que restringen el número de taxis no son taxistas *per se*, sino más bien los que poseían el número limitado de placas de taxis (licencias) cuando la restricción se impuso por primera vez.

John Stuart Mill

Sus primeros escritos aparecieron publicados en las páginas de los diarios *The Traveller* y *The Morning Chronicle*; estos escritos se ocuparon fundamentalmente de la defensa de la libre expresión. En 1824, la aparición de *The Westminster Review*, órgano de transmisión de las ideas filosóficas radicales, proporcionó a Mill un atrio privilegiado desde donde logró difundir su ideario liberal.



En el campo de la ética, Mill defendió una suerte de matizado utilitarismo en el cual se entrevén influencias de Bentham e introdujo una constante preocupación por incluir en el concepto habitual de “utilidad” las satisfacciones derivadas del libre ejercicio de la imaginación y la conciencia crítica. En cuanto a las principales tendencias filosóficas de su tiempo, Mill se manifestó a favor del positivismo comtiano y contrario al intuicionismo de Hamilton.

Políticamente mostró siempre un gran entusiasmo por la forma democrática de gobierno atemperado por el pesimismo sobre la incidencia real en el bienestar social de su práctica. Sus trabajos sobre lógica y metodología de las ciencias revistieron gran importancia en su tiempo, fundamentalmente mediante su búsqueda constante de un principio válido para la inferencia de leyes generales; tras los pasos de Hume, Mill definió la causalidad como un proceso empírico que denominó *inducción por enumeración*.

En su papel como economista, Mill es considerado históricamente como un representante tardío de la escuela clásica inglesa; algunos autores posteriores, como Marx, discutieron dicha filiación y destacaron su alejamiento de la noción del

valor-trabajo. Su obra principal en el campo de la economía política apareció en 1848 con el título de *Principles of Political Economy* (Principios de economía política), en los que cabe distinguir tres partes diferenciadas.

En su primer texto, Mill elaboró un completo análisis del proceso de formación de los salarios, que entendió determinado por la interacción entre la oferta de trabajo y la demanda del mismo en forma de fondo de salarios. Asimismo, consideró el beneficio como renta del capital y lo hizo dependiente del nivel general de precios. En su teoría del intercambio introdujo la utilidad como factor determinante del valor de cambio de un bien, a la par con su coste de producción. En el campo de la economía internacional se le debe la introducción del término *relación real de intercambio*.

En la segunda parte se ocupó de cuestiones de estática y dinámica, a la vez que expuso su idea de una evolución hacia el estancamiento de la totalidad del sistema capitalista a causa de una tendencia irreversible a la reducción de los beneficios, concepto que sería recuperado por Marx. La tercera parte es la que mejor refleja su talante reformista, pues trata de las medidas necesarias para favorecer una más justa distribución de la renta, entre las que Mill propuso la limitación de la herencia, la cooperación obrera e interterritorial, así como la promoción de la pequeña propiedad campesina.

1.2.2 La Revolución Industrial



Eli Whitney

Whitney (1765-1825) fue un estadounidense conocido por la invención de la despepitadora de algodón, uno de los elementos fundamentales de la Revolución Industrial, que dio sustento a la economía de la preguerra del sur,¹⁰ ya que convirtió el cultivo de algodón de tierras altas en un cultivo rentable, lo que fortaleció la base económica de la esclavitud en Estados

Unidos. A pesar del impacto social y económico de su invento, Whitney tuvo que enfrentar la pérdida de los beneficios en muchas batallas legales por violación de la patente de la despepitadora de algodón. A partir de entonces, su atención se volvió hacia los contratos que se hacían con el gobierno en la fabricación de fusiles para el recién formado ejército continental. Él continuó haciendo e inventando armas hasta su muerte acaecida en 1825.

Whitney es famoso por dos innovaciones que más tarde dividieron a Estados Unidos de mediados del siglo XIX: la despepitadora de algodón (1793) y su defensa de las partes intercambiables. En el sur, la despepitadora de algodón revolucionó la manera de cosechar el algodón y revigorizó la esclavitud. En el norte, la adopción de partes intercambiables revolucionó la industria manufacturera y contribuyó grandemente a la victoria de este bando en la Guerra Civil. A menudo se atribuye erróneamente a Eli Whitney la introducción de la idea de inventar partes intercambiables, que él defendió durante años como un fabricante de fusiles; sin embargo, hay que hacer nota que tal cuestión es anterior a Whitney, cuyo papel fue solo para promocionar y popularizar esas partes, no inventarlas. Lo que sí tuvo fue una aportación importante cuando el gobierno se quejó del precio que Whitney exigía por mosquete comparado desfavorablemente con el de los producidos en los arsenales del gobierno. En esa ocasión, Whitney fue capaz de calcular un precio real por mosquete mediante la inclusión de los costes fijos, como los seguros y la maquinaria, que el gobierno no había incluido. De este modo hizo contribuciones pioneras tanto en el concepto de contabilidad de costos como en el concepto de la eficiencia de la industria privada.

Los intentos de intercambiabilidad de las piezas se remontan hasta las Guerras Púnicas y se conocen gracias a los restos arqueológicos de barcos que se encuentran en el Museo Archeologico Baglio Anselmi y otros contemporáneos.¹¹ En los tiempos modernos, la idea fue desarrollada durante décadas entre varias personas. Un precursor fue Jean-Baptiste Vaquette de Gribeauval (1715-1789), un ingeniero francés y oficial de artillería del siglo XVIII, quien creó una buena cantidad de piezas de artillería estandarizadas, aunque no con una verdadera intercambiabilidad¹² de las piezas. Él inspiró a los demás, incluyendo a Honoré Blanc (1736-1801) y Louis de Tousard (1749-1817). A mediados del siglo XVIII, Honoré Blanc se inspiró en la obra de artilleros franceses dirigidos por Jean-Baptiste Vaquette de Gribeauval, que había comenzado a perseguir la intercambiabilidad en artillería. El sistema Gribeauval involucraba la estandarización de cañones y proyectiles. Blanc aplicó estos conceptos a los mosquetes, además de utilizar indicadores y plantillas de presentación para hacer duplicados de piezas para intercambio. Ellos se aproximaban así a tolerancias de ingeniería, aunque la terminología de metrología y los conceptos alrededor de las tolerancias no eran como los conocemos hoy. Por ejemplo, no había micrómetros disponibles para Blanc; por otro lado, aunque probablemente existían los calibradores Vernier, no se sabe si se usaba alguno. Por el contrario, la uniformidad de las piezas se logró a través de métodos de cortar y probar, para lo que se utilizaban plantillas, medidores y modelos maestros con la finalidad de guiar el acabado a mano.

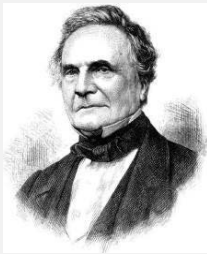
A medida que cada parte se elaboraba, se comparaba repetidamente contra un calibre o modelo (una pieza declarada como modelo para todas las otras con la finalidad de compararla con la primera), así como con la capacidad natural de los ojos y de las manos para detectar pequeñas diferencias, tales como una ligera variación hacia arriba o hacia abajo desde la pieza maestra, asegurando un intercambio suficiente. En el siglo XIX estos esfuerzos produjeron el "sistema de armamento" o sistema americano de fabricación. Algunos otros habitantes de Nueva Inglaterra, incluyendo al capitán John Hancock Hall (1781-1841) y Simeón Norte, llegaron a la intercambiabilidad con éxito antes que la armería Whitney. La armería Whitney lo logró finalmente, no mucho después de su muerte en 1825.



Sir Richard Arkwright

Arkwright (1732-1792) fue un industrial inglés que patentó la máquina de hilar movida por agua bautizada como *Water Frame* en 1769 y fundó la primera factoría hidráulica de algodón del mundo en Cromford, Derbyshire, 1771, siendo uno de los catalizadores de la Revolución Industrial.

En 1775, Arkwright, tras desarrollar la máquina especializada en el cardado del algodón, registró una nueva patente que abarcaba el proceso completo de la producción de hilo, uniéndola a la máquina de cardado a la *Water Frame*, a la que denominó *RovingFrame*.



Charles W. Babbage

Babbage fue profesor de matemáticas en la Universidad de Cambridge. Una de sus contribuciones importantes al campo fue su libro: *Sobre la economía de maquinaria y fabricación*, en 1832, en el que discute muchos temas diferentes que tienen que ver con fabricación, algunos sumamente familiares para el IE.

Babbage discutía la idea de la curva aprendizaje, la división de la tarea y cómo se afecta el aprendizaje, así como el efecto del aprendizaje sobre la generación de desperdicio. También se interesó mucho en métodos diferentes de la administración de sueldos y participación en las utilidades sugerida como un enfoque viable.

Charles Babbage fue la primera persona en sugerir la construcción de una computadora mecánica, "máquina analítica de cálculo", como él la llamó, con el propósito de resolver problemas matemáticos complejos. Una idea que estaba más allá de la tecnología de su tiempo, pero que luego resultó un concepto valioso para el ingeniero industrial moderno.

Henry Robinson Towne

En Estados Unidos, durante la última parte del siglo XIX, surgieron más desarrollos que condujeron a la formalización de la Ingeniería Industrial. Henry R. Towne acentuó el aspecto económico del trabajo del ingeniero. ¿Cómo estaba el ingeniero mejorando el resultado final para la compañía? Towne perteneció a la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (ASME), como muchos otros pioneros estadounidenses en este nuevo campo. En la ASME, Towne expresó la necesidad desarrollar un campo enfocado en sistemas de fabricación.



Publicó un artículo en la *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* titulado "El ingeniero como un economista", en el que recalca la necesidad de que los ingenieros se ocuparan de los efectos económicos de sus decisiones. Hasta esa época los ingenieros batallaban sobre todo con los elementos, aunque se suponía que los costos eran una necesidad relativamente incontrolable para ganar la batalla contra la naturaleza.

George Albert Wentworth¹³

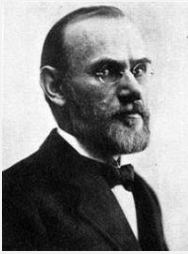
Este destacado docente y autor de libros de texto de matemáticas ampliamente utilizados en escuelas y colegios, nació en el norte de Wakefield. Se graduó en la Universidad de Harvard en 1858, después de asistir a Wakefield Academia y Phillips Exeter Academy, para luego enseñar en la última escuela durante 33 años.



Wentworth Comenzó como aprendiz de operador de máquinas en Enterprise Hydraulic Works, obtuvo el título de ingeniero mecánico por el Instituto Stevens y fue jefe de ingenieros en Midvale Steel Company; además, determinó el tiempo para resolver problemas de matemáticas dejados de tarea a los alumnos, calculando el tiempo que los estudiantes requerían para resolver los problemas en clase.

Fredrick Arthur Halsey

Conjuntamente con Towne, Halsey (1856-1935) trabajó y presentó en ASME el plan de incentivos de jornal creciente. El propósito de su plan era aumentar la productividad del trabajador sin afectar negativamente el coste de producción. El plan también sugería que algunas de las ganancias se repartieran con los empleados como un incentivo para mantenerlos funcionando.



Carl George Barth¹⁴

En 1899, Frederick W. Taylor contrató a Barth (1860-1939) para trabajar con él en Bethlehem Steel Company. Carl Barth ayudó a desarrollar reglas adecuadas para el cálculo de alimentación y velocidad de máquinas herramienta.¹⁵ En 1902, Taylor y Barth fueron a trabajar con William Sellers en la firma de máquinas-herramienta William Sellers & Company de Filadelfia.

Un registro de su aplicación de las reglas de cálculo se publicó en los *Anales de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos* en 1904.^{16 y 17}

Barth inició en 1905 su carrera como ingeniero consultor independiente. Se convirtió en un consultor pionero de la administración científica y más tarde enseñó en la Universidad de Harvard. Barth presentó varios artículos para su publicación de la Escuela de Correspondencia Internacional de Scranton, Pennsylvania, en la revista *Home Study*. En 1909 llevó a cabo la instalación de la administración científica en el Arsenal de Watertown en Massachusetts.



Henry Laurence Gantt

Gantt (1861-1919) nació en el condado de Calvert, Maryland. Se graduó en la escuela McDonogh en 1878 y más tarde estudió en el Instituto de Tecnología de Stevens en Nueva Jersey. Trabajó como profesor y dibujante antes de convertirse en ingeniero mecánico.

En 1887 se unió a Frederick W. Taylor en la aplicación de los principios de la administración científica en su trabajo en la compañía Midvale Steel and Bethlehem hasta 1893. En su carrera como consultor en administración hizo desarrollos como la invención del diagrama que lleva su nombre (de Gantt), el sistema de pago de los salarios 'tarea y bono', así como los métodos de medición de la eficacia y la productividad de los trabajadores.

En 1916, influenciado por Thorstein Veblen, estableció la asociación La Nueva Máquina, la cual pretendía aplicar criterios de eficiencia industrial a la política del proceso. La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) otorga una medalla anual en honor de Henry Laurence Gantt.

A continuación se lista el legado de Henry Gantt a la administración de la producción.

- *Diagrama de Gantt*. Todavía hoy se considera una importante herramienta de administración; ofrece un calendario gráfico para el trabajo de planificación, control y registro de la progresión de las etapas de un proyecto. Este diagrama tiene una variante moderna, PERT (programa de evaluación y revisión técnica).