

Revolución Cuántica en la Industria 4.0. *Quantum revolution in industry 4.0*

Jaime Muñoz Flores¹

Resumen

El presente estudio pertenece a los campos de investigación de gestión organizacional y administración. El objetivo consiste en fundamentar una prognosis tendencial en el devenir de la industria 4.0. En su fase de desarrollo, se aplicaron las metodologías de análisis multifase y jerarquización analítica. Como resultado del análisis, se configuraron diversos esquemas prospectivos dinámicos referidos a la subversión de la industria digital 4.0 hacia la industria cuántica 5.0, incluyéndose las transiciones de fase y los ponderadores probabilísticos correspondientes. Se concluye que la deriva de la dinámica evolutiva del fenómeno de industrialización anuncia el despunte de la industria cuántica hacia finales de la presente década o principios de la década de los treinta.

Palabras clave: Industrialización ; Industrias manufactureras y de servicios ; Elección de tecnología


Código JEL: O14.

Abstract

The present study belongs to the research fields of organizational management and administration. In its development phase, the methodologies of multiphase analysis and analytical hierarchy were applied. As a result of the analysis, several dynamic prospective schemes were configured referring to the subversion of the digital industry 4.0 towards the quantum industry 5.0, including the phase transitions and the corresponding probabilistic weights. It is concluded that the drift of the evolutionary dynamics of the industrialization phenomenon announces the emergence of the quantum industry towards the end of this decade or, at most, at the beginning of the next one.

Keywords: Industrialization; Manufacturing and service industries; Technology Choice

JEL Code: O14.

¹Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, México. Profesor-Investigador. Doctor en Política Económica y Desarrollo, Áreas de especialidad: Macroeconomía Dinámica, Economía Matemática. Contacto: jmflores@correo.xoc.uam.mx  0000-0002-6683-0184

INTRODUCCIÓN

La sustentabilidad, derechos humanos, protección social, inclusión de género, raza, credo, orientación sexual, etc., son temas definitivamente comprendidos en la noción de progreso que reconocen las generaciones de hoy. Sin embargo, a lo largo de más de tres siglos, contados a partir de la invención del motor de pistones por Christiaan Huygens en 1640, la idea de progreso social se mantuvo estrechamente asociada con el avance de la industrialización.

Como un fenómeno *sui generis*, la industrialización ha mantenido desde sus primeras manifestaciones ritmos de avance progresivamente acelerados. Durante el siglo XX, las invenciones del transistor, en los años cincuenta, y del microprocesador digital, en los setenta, aceleraron aún más el avance de la industrialización de todos los sectores productivos, convirtiendo la mayor parte de los procesos manuales o mecanizados en procesos digitales.

Tras cuatro décadas de existencia de computadoras personales, y más de 20 años de dispositivos móviles inteligentes, los procesos de digitalización se han expandido hacia prácticamente todas las esferas del quehacer humano. El acceso a la capacidad digital, creado inicialmente como un poder exclusivo para las grandes empresas, hoy día se encuentra accesible para todos los segmentos de la sociedad. En el ámbito industrial, la expansión digital logró reducir significativamente las brechas que durante algún tiempo separaron las micro, pequeñas y medianas empresas de los grandes y tecnificados consorcios industriales.

Quizá eclipsado en los medios de comunicación y la opinión pública por la pandemia de COVID- 19, un acontecimiento tecnológico trascendental impuso un límite infranqueable para el avance de la era digital. En 2019, la empresa fabricante de procesadores digitales *Intel* dio a conocer al mundo el nano procesador más pequeño susceptible de ser fabricado por el hombre. Con una dimensión de únicamente 20 nanómetros, el procesador *It-234k* alcanzó el límite mínimo de dimensión de cualquier procesador de estado sólido.

Al no existir átomos más pequeños en la naturaleza, resulta imposible ensamblar en un espacio menor a los 20 nanómetros las tres capas atómicas que cualquier procesador digital requiere para su adecuado funcionamiento (Intel, 2021).

Sin embargo, cuando apenas comenzaban a propagarse especulaciones sobre las limitantes físicas con las que se habría topado la computación, el 18 de diciembre de 2020 la innovación tecnológica brindó al mundo el milagro científico que se estaba necesitando: la revista *Science* publicó las pruebas científicas sobre las asombrosas capacidades operacionales de los nuevos procesadores cuánticos (Zheng, 2020).

La computación cuántica constituye un asombro recurso tecnológico, capaz de transgredir los límites físicos de la materia. Construidos con base en los principios de físicos de entrelazamiento cuántico, superposición entre materia y energía, y ubicuidad cuántica,



los nuevos procesadores de datos -ya no digitales, sino cuánticos- gozan de una capacidad de cómputo millones de veces superior a la de las mejores super computadoras digitales.

Toda vez que se fundamenta en principios de física e ingeniería totalmente diferentes a los de la electrónica digital, la computación cuántica representa un cambio definitivamente revolucionario. Mediante transformaciones radicales de los métodos hasta ahora conocidos para gestionar información, la revolución cuántica catalizará la invasión de los algoritmos inteligentes y los algoritmos cognitivos en la mayoría de las actividades humanas.

A partir de sus primeras manifestaciones científicas reportadas en el año 2020, la diversificación de áreas de conocimiento invadidas por la computación cuántica está constituyendo un fenómeno inusitado. El cuadro número 1 ilustra la distribución relativa, según disciplina del conocimiento, de las más de 1,800 publicaciones científicas que, a partir de 2020, incluyen en su temática a la computación cuántica.

CUADRO 1. DISTRIBUCIÓN RELATIVA DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE APLICACIONES DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA SEGÚN CAMPO DEL CONOCIMIENTO.

Disciplina	Porcentaje
Aplicaciones Interdisciplinarias de las Ciencias de la Computación	8.77%
Ingeniería de Software	2.58%
Arquitectura	2.35%
Nanociencias y Nanotecnología	1.57%
Telecomunicaciones	0.63%
Agricultura Multidisciplinar	0.29%
Métodos Matemáticos para las Ciencias Sociales	
Disciplinas Científicas Educativas	
Anestesiología	
Historia y Filosofía De La Ciencia	
Administración	
Finanzas Empresariales	
Ciencias Económicas	
Ciencias de la Tecnología Verde	
Urbanismo Regional	
Negocios	
Psicología Experimental	
Ciencias Sociales Interdisciplinarias	

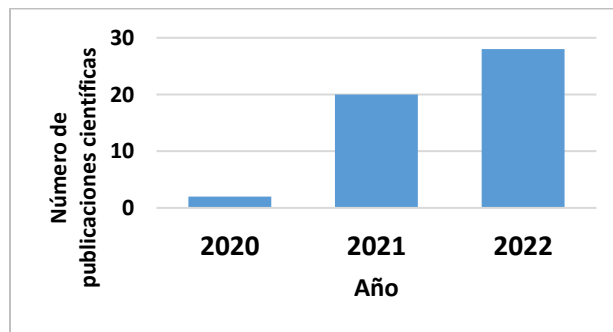
CUADRO 1. DISTRIBUCIÓN RELATIVA DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE APLICACIONES DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA SEGÚN CAMPO DEL CONOCIMIENTO.

Disciplina	Porcentaje
Música	
Ciencias Políticas	
Estudios Ambientales	
Derecho	
Tecnología Médica	
Otras disciplinas	83.81%

Elaboración propia con datos de Science Index (2023)

En total, el número de investigaciones científicas alusivas a la computación cuántica aumentó entre los años 2020 y 2023 (tiempo de pandemia) más de 1,800 %, mostrando una tendencia claramente exponencial (gráfica 1).

GRÁFICA 1. PUBLICACIONES CIENTÍFICAS ALUSIVAS A LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN LA INDUSTRIA.



Elaboración propia con datos de Science Index 2023.

COMPUTACIÓN DIGITAL VS. COMPUTACIÓN CUÁNTICA

En años recientes, el devenir de la industria 4.0 ha sido investigado desde diversos ángulos. Ghovakhloo (2020), Kamble (2018) y Awan (2021) encabezan lo que parece configurar una corriente de investigación orientada a la identificación y caracterización de la confluencia entre los procesos de digitalización industrial y las redefiniciones de éstos necesarias para que las nuevas modalidades de producción aporten elementos concretos del sector industrial en materia de sustentabilidad. El planteamiento de Ghovakhloo se fundamenta en una metodología modelística que analiza las tendencias de convergencia entre las funciones esenciales de la industria 4.0 y los compromisos industriales para fomentar la sustentabilidad de las empresas. Kamble, por su parte, aduce que la contribución de la industria 4.0 a los objetivos de sustentabilidad no necesariamente es directa y explícita,

pues el logro de mayor eficiencia en los procesos de manufactura y desempeño organizacional atribuibles a la digitalización contribuye *per se* al cumplimiento de las metas sectoriales en materia de sustentabilidad.

La vinculación entre la circularidad de los procesos productivos y la digitalización de los mismos ha sido estudiada por Awan (2021) desde una perspectiva que considera los criterios decisorios de los inversionistas empresariales. Con base en sus resultados de investigación, el autor propone la existencia de una clase de accionistas empresariales que pondera elementos como la circularidad de los procesos de manufactura. Al considerar estos elementos como claves de sus decisiones, los inversionistas empresariales ejercen una fuerza orientadora hacia las metas de sustentabilidad.

En un sentido lato, puede señalarse que la diversidad de investigaciones sobre las implicaciones de la expansión de la industria 4.0 en la sociedad contemporánea también se refieren, en mayor o menor medida, a la optimización de procesos y sus implicaciones en términos económico, social o ambiental. Lo anterior, principalmente en los campos de la ingeniería industrial (Bai, 2020), (Ghovaklhoo, 2018), (Frank, 2019); manufacturas y procesos (Benitez, 2020), (Mouef, 2018); administración y negocios (Sung, 2018), (Srivastava, 2022); computación, electrónica y comunicaciones (Zonta, 2020), (Muhuri, 2019), (Lu 2017).

A pesar del extraordinario incremento de publicaciones científicas alusivas a nuevas aplicaciones de la computación cuántica en la industria, la orientación general de éstas, así como los términos de su impacto sobre las diversas esferas de la sociedad no se han clarificado aún (Larson, 2018). Sin embargo, la asociación entre la revolución cuántica y el florecimiento de la industria 5.0 ya ha sido sugerida de manera explícita por importantes investigadores sobre el tema, como Baverstadler (2021), Bhasin, (2023), Coccia (2022) y Jain (2022).

Entre todas las repercusiones de corto plazo que tendrá la recién iniciada revolución cuántica, el presente trabajo se centra en el análisis de las implicaciones de los nuevos recursos de computación cuántica sobre la industria digital 4.0. Con fundamento en la metodología de análisis multifase, se propone un esquema prospectivo que busca coadyuvar a la caracterización del proceso de desacomplamiento entre la industria digital 4.0 y las grandes multinacionales que hoy día detentan de forma exclusiva el acceso a la computación cuántica. En las siguientes secciones se presenta la metodología utilizada para la construcción del esquema prospectivo y la asignación de coeficientes probabilísticos a las transiciones de fase. Por su relevancia en esta discusión, en la sección III se presenta una revisión de los instrumentos globales de política pública consensuados hasta ahora por los gobiernos de las principales economías industrializadas para regular el impacto de los algoritmos inteligentes sobre las actividades humanas. Con el apoyo de la aplicación especializada para diagramas dinámicos de fase *Bizagui*, y con base en la metodología de análisis multifase propuesta por Chilan (2013), en la sección IV se expone a manera de resultados un esquema prospectivo que ilustra los previsibles cambios que provocarán los



algoritmos cognitivos y la computación cuántica sobre la industria 4.0. Finalmente, la sección V se está dedicada a la exposición de algunas reflexiones finales y conclusiones.

INDUSTRIA 5.0: FUSIÓN ENTRE EL TRABAJO DEL HOMBRE Y EL DE LAS MÁQUINAS

La añeja fantasía de la existencia de un androide que fusiona las capacidades del hombre con las de las máquinas pareciera hoy día menos alejada de la realidad que en cualquier otra época. Los implantes cerebrales capaces de regular los neurotransmisores en el tratamiento de la depresión; la telepatía inalámbrica digital; los exoesqueletos que regresan el movimiento a los parapléjicos, entre otros experimentos exitosos de la era digital, incitan la prefiguración de escenarios prospectivos para la industria en los que el trabajo del hombre es, en el mejor de los casos, fusionado, o bien, totalmente reemplazado por el de las máquinas.

La incertidumbre que está generando en la sociedad de nuestros días la progresiva invasión de la inteligencia artificial sobre la mayor parte de las actividades humanas ha provocado que, desde el interior de disciplinas reflexivas por antonomasia como son la filosofía sociológica y filosofía de la ciencia, se comience a replantear la noción de progreso social. Sin embargo, en el curso de tales reflexiones valdrá tener presente el derrotero que siguieron otros inquietantes avances científicos del pasado reciente, como fue la clonación de seres de vivos, o el trasplante de cabezas de cuerpos enfermos hacia cuerpos sanos. En éstos, así como muchos otros casos controversiales en el universo de la ciencia y la tecnología, la política pública ha probado su capacidad para regular la experimentación científica de manera que no se torne en una amenaza contra el avance de la humanidad.

El marco axiológico indispensable para la sana coexistencia, desarrollo y eventual cooperación equilibrada entre los algoritmos inteligentes y los seres humanos ha captado ya la plena atención de los gobiernos de todo el mundo. Así como aconteció con diversos desarrollos tecnocientíficos de otras épocas, mismos que en su momento fueron considerados potencialmente amenazantes para la sociedad, las instancias internacionales para el establecimiento de políticas públicas globales han propuesto ya avances significativos para normar aspectos esenciales en favor del trabajo asistido por la inteligencia artificial.

En la cumbre internacional celebrada el día 2 de noviembre de 2023 en la ciudad inglesa de Blechley, 28 naciones, incluyendo a las mayores economías del mundo, celebraron un acuerdo trascendental para la definición del futuro del trabajo asistido por la inteligencia artificial (IA). En esencia, la declaración Blechley sobre (IA) enuncia lo siguiente:

La Inteligencia Artificial (IA) representa enormes oportunidades globales: tiene el potencial de transformar y mejorar el bienestar humano, la paz y la prosperidad. Para lograr esto, [...], por el bien de todos, la IA debe diseñarse, desarrollarse, implementarse y utilizarse de manera segura, confiable y responsable, [...principalmente...] centrada en el ser humano (United Kindom Government, 2023).



En el mismo tenor, la declaración Blechley conmina a la comunidad internacional a fortalecer los esfuerzos para utilizar la inteligencia artificial como mecanismo promotor no sólo de la innovación tecno industrial, sino también de los derechos y libertades fundamentales de los seres humanos, el crecimiento económico inclusivo y el desarrollo sustentable.

La confianza que logre adquirir la sociedad sobre el potencial benéfico de la inteligencia artificial fue considerada por las naciones participantes en la citada cumbre como clave fundamental para su pleno desarrollo. En el cuadro 2 se propone una taxonomía de otros aspectos centrales recogidos por la declaración Blechley, encausados mediante tres ejes transversales: i) La IA en la vida cotidiana de los ciudadanos; ii) Riesgos y temas de seguridad asociados a la IA; y, iii) Geopolítica y acuerdos internacionales.

CUADRO NO. 2. TAXONOMÍA DE LOS ACUERDOS DE BLECHLEY SOBRE LA REGULACIÓN DE LA IA

<p>IA en la vida Cotidiana</p>	<p>Los sistemas de IA ya están implementados en muchos ámbitos de la vida diaria, incluidos la vivienda, el empleo, el transporte, la educación, la salud, la accesibilidad y la justicia, y es probable que su uso aumente. Reconocemos que este es, por lo tanto, un momento único para actuar y afirmar la necesidad de que el desarrollo seguro de la IA y de que las oportunidades transformadoras de la IA se utilicen para bien y para todos, de manera inclusiva en nuestros países y a nivel mundial. Esto incluye servicios públicos como salud y educación, seguridad alimentaria, ciencia, energía limpia, biodiversidad y clima, para hacer realidad el disfrute de los derechos humanos y fortalecer los esfuerzos para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.</p>
<p>Riesgos de la IA y temas de seguridad</p>	<p>Además de estas oportunidades, la IA también plantea riesgos importantes, incluso en esos ámbitos de la vida diaria. Con ese fin, acogemos con satisfacción los esfuerzos internacionales pertinentes para examinar y abordar el impacto potencial de los sistemas de IA en los foros existentes y otras iniciativas relevantes, y el reconocimiento de que la protección de los derechos humanos, la transparencia y la explicabilidad, la equidad, la rendición de cuentas, la regulación, la seguridad, la adecuada Es necesario abordar la supervisión humana, la ética, la mitigación de prejuicios, la privacidad y la protección de datos. También observamos el potencial de riesgos imprevistos derivados de la capacidad de manipular contenido o generar contenido engañoso. Todas estas cuestiones son de importancia crítica y afirmamos la necesidad y urgencia de abordarlas.</p>
<p>Riesgos de la IA y temas de seguridad</p>	<p>Surgen riesgos de seguridad particulares en la "frontera" de la IA, entendida como aquellos modelos de IA de propósito general altamente capaces, incluidos los modelos básicos, que podrían realizar una amplia variedad de tareas, así como IA específicas relevantes que podrían exhibir capacidades que causen daño, que igualan o superan las capacidades presentes en los modelos más avanzados de hoy. Pueden surgir riesgos sustanciales debido a un posible uso indebido intencional o problemas de control no deseados relacionados con la alineación con la intención humana. Estos problemas se deben en parte a que esas capacidades no se comprenden completamente y, por lo tanto, son difíciles de predecir. Nos preocupan especialmente estos riesgos en ámbitos como la ciberseguridad y la biotecnología, así como donde los sistemas de inteligencia artificial de vanguardia pueden amplificar riesgos como la desinformación. Existe la posibilidad de que se produzcan daños graves, incluso catastróficos, ya sean deliberados o no, derivados de las capacidades más importantes de estos modelos de IA. Dado el rápido e incierto ritmo de cambio de la IA, y en el contexto de la aceleración de la inversión en tecnología, afirmamos que es especialmente urgente profundizar nuestra comprensión de estos riesgos potenciales y de las acciones para abordarlos.</p>
<p>Geopolítica y acuerdos multinacionales</p>	<p>Muchos riesgos que surgen de la IA son de naturaleza intrínsecamente internacional y, por lo tanto, la mejor manera de abordarlos es mediante la cooperación internacional. Resolvemos trabajar juntos de manera inclusiva para garantizar una IA centrada en las personas, confiable y responsable que sea segura y apoye el bien de todos a través de los foros internacionales existentes y otras iniciativas relevantes, para promover la cooperación para abordar la amplia gama de riesgos que plantean AI. Al hacerlo, reconocemos que los países deben considerar la importancia de un enfoque regulatorio y de gobernanza proporcionado y pro-innovación que maximice los beneficios y tenga en cuenta los riesgos asociados con la IA. Esto podría incluir realizar, cuando corresponda, clasificaciones y categorizaciones de riesgo basadas en las circunstancias nacionales y los marcos legales aplicables. También observamos la importancia de la cooperación, cuando corresponda, en enfoques como principios y códigos de conducta comunes. Con respecto a los riesgos específicos que probablemente se encuentren en relación con la IA de frontera, decidimos intensificar y mantener nuestra cooperación, y ampliarla con más países, para identificar, comprender y, según corresponda, actuar, a través de los foros internacionales existentes y otras iniciativas relevantes, incluidas futuras cumbres internacionales sobre seguridad de la IA.</p>

CUADRO NO. 2. TAXONOMÍA DE LOS ACUERDOS DE BLECHLEY SOBRE LA REGULACIÓN DE LA IA

<p>Riesgos de la IA y temas de seguridad</p>	<p>Todos los actores tienen un papel que desempeñar para garantizar la seguridad de la IA: las naciones, los foros internacionales y otras iniciativas, las empresas, la sociedad civil y el mundo académico deberán trabajar juntos. Al señalar la importancia de una IA inclusiva y reducir la brecha digital, reafirmamos que la colaboración internacional debe esforzarse por involucrar a una amplia gama de socios, según corresponda, y acogemos con agrado los enfoques y políticas orientados al desarrollo que podrían ayudar a los países en desarrollo a fortalecer la creación de capacidades y el aprovechamiento de la IA. el papel facilitador de la IA para apoyar el crecimiento sostenible y abordar la brecha de desarrollo.</p>
<p>Riesgos de la IA y temas de seguridad</p>	<p>Afirmamos que, si bien la seguridad debe considerarse en todo el ciclo de vida de la IA, los actores que desarrollan capacidades de IA de vanguardia, en particular aquellos sistemas de IA que son inusualmente poderosos y potencialmente dañinos, tienen una responsabilidad particularmente fuerte de garantizar la seguridad de estos sistemas de IA, incluso a través de sistemas. para pruebas de seguridad, mediante evaluaciones y mediante otras medidas apropiadas. Alentamos a todos los actores relevantes a brindar transparencia y rendición de cuentas apropiadas al contexto en sus planes para medir, monitorear y mitigar capacidades potencialmente dañinas y los efectos asociados que puedan surgir, en particular para prevenir el uso indebido y problemas de control, y la amplificación de otros riesgos.</p>

Elaboración propia con base en los textos de la declaración Blechley

A pesar de que el creciente influjo de la IA sobre el trabajo humano y el fenómeno de industrialización no aparecen en el primer plano de la declaración Blechley, el reconocimiento multinacional explícito del ser humano como centro y primera prioridad de todo desarrollo IA se interpreta como el conectivo necesario con la problemática del trabajo humano en la era IA. En el mismo sentido, el consenso declaratorio sobre un desarrollo económico inclusivo y sustentable alude directamente al tipo de industrialización IA que busca promover el consorcio de naciones.

DINÁMICA EVOLUTIVA DEL FENÓMENO DE INDUSTRIALIZACIÓN

A pesar de su complejidad, la diversidad de metodologías de análisis de la dinámica evolutiva de fenómenos socioeconómicos complejos, como lo es el fenómeno de la industrialización, es basta. La propuesta de esquematización prospectiva planteada en este trabajo se fundamenta en una metodología que destaca sobre otras por su claridad, así como la relativa sencillez de las representaciones que ofrece. Entre otros fundamentos, el análisis multifase parte de que toda modelación dinámica de sistemas complejos debe iniciarse por la identificación unívoca de los fenómenos que les dan origen (fase inicial), así como la descripción de la variedad de trayectorias evolutivas en términos probabilísticos (fases subsiguientes). Ello coincide con principios análogos postulados desde la teoría del cambio, quizá con la diferencia de que los sistemas multifase son generalizaciones de los sistemas dinámicos que pueden incluir variaciones en los parámetros -sean éstos probabilísticos o determinísticos- para modelar los cambios de estado del sistema (Chilan, 2013).

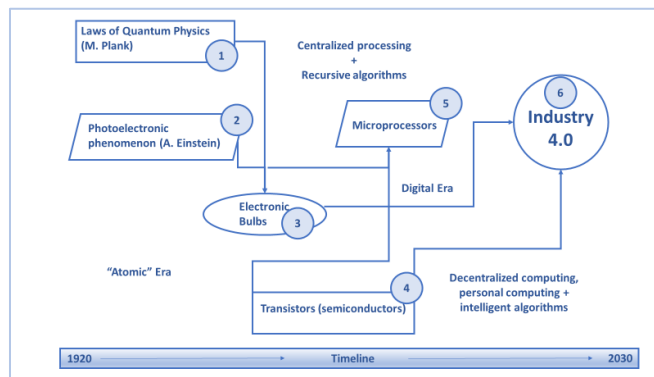
Una versión simple y clara —y por tanto de gran valor— de la metodología de análisis multifase para prospección de rutas evolutivas fue difundida los años noventa por Robert A. Russel (Russel, 1991). Haciendo referencia a esta modalidad, y como resultado un análisis hermenéutico realizado *ex professo* para esta investigación, proponemos dos niveles esquemáticos para la representación prospectiva de la dinámica del fenómeno de industrialización durante la tercera década del siglo XXI. En el primer nivel, se plantea como fase inicial el despunte que logró la industria 4.0 a partir en la década de los noventa,

proyectando la deriva de ésta hasta fusionarse con la industria 5.0. Lo anterior, bajo el contexto que impone el inminente arribo de la revolución cuántica.

Los diagramas 1, 2 y 3 representan una versión simplificada del paso de la industria 4.0 hacia la industria 5.0, con la salvedad de que en dicha esquematización no se observan las reglas del lenguaje simbólico propias de las teorías de grafos y diagramas de flujo. Se trata de una grafía simplificada, elaborada mediante de trazos y figuras convencionales, que pretende ilustrar mediante pocos elementos la prospectiva del fenómeno en cuestión en términos dinámicos.

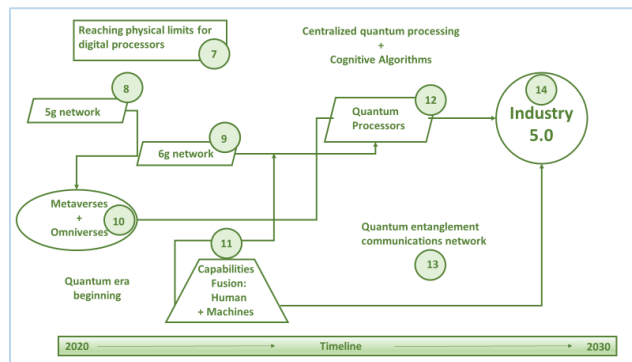
Toda vez que de modelación de los esquemas anteriores mediante diagramas de fases dinámicos demanda el uso de una simbología y un lenguaje muy especializado, en este trabajo se han reservado para un apéndice técnico las versiones de los esquemas 1 a 3 desarrolladas con la app de IA BIZAGUI, desarrollada específicamente para la simulación de diagramas de fase dinámicos (segundo nivel). Los lectores versados en temas de simulación, o aquéllos interesados en simular variantes dinámicas del paso de la I4.0 a la I5.0; o bien, interesados en suprimir, añadir o modificar elementos diversos a los escenarios probabilísticos aquí presentados, encontrarán en dicho apéndice los hipervínculos a los archivos BIZAGUI elaborados y dispuestos para simulaciones irrestrictas de los coeficientes probabilísticos de las transiciones de fase y líneas del tiempo.

ESQUEMA 1. FASES DE LA ERA DIGITAL



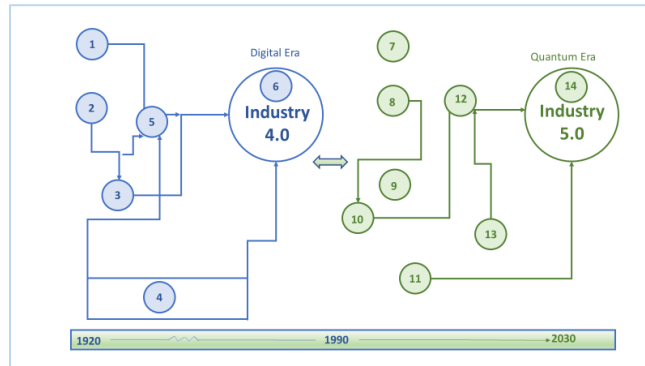
Fuente: Elaboración propia 12/02/2024

ESQUEMA 2. FASES HACIA LA ERA CUÁNTICA.



Elaboración propia 12/02/24

ESQUEMA 3. TRANSICIONES DE FASE



Elaboración propia 12/02/24

Simulador transiciones de Fase BIZAGUI

Respecto de estos últimos coeficientes, cabe aclarar que para la elaboración de los esquemas 1 a 3, los valores probabilísticos asignados a las transiciones de fase con relación a las líneas del tiempo se fundamentan en estimaciones propuestas por el autor. Aquí debe reconocerse que la sugerencia comúnmente emanada de las teorías de prospección consistente en que los vectores probabilísticos para transiciones de fase se construyan colectivamente, ha sido pasada por alto. Es decir, conducir la construcción de los parámetros probabilísticos mediante alguna metodología especializada que facilite el consenso entre el colectivo de investigadores involucrado en el proceso de configuración de los escenarios prospectivos. El método aquí propuesto para tal propósito es el denominado *multi-criteria decision making* (MCDM), o, equivalentemente, *analytic hierarchy process*, citado en adelante como proceso de jerarquización analítica (PJA).

ASIGNACIÓN DE COEFICIENTES PROBABILÍSTICOS PARA LAS TRANSICIONES DE FASE MEDIANTE PJA.

La metodología PJA

En términos generales, el principio que sustenta a los modelos PJA consiste en establecer, primeramente, y ponderar posteriormente los criterios de decisión consensuados en una etapa *a priori* al análisis y asignación de los parámetros probabilísticos para las transiciones de fase (figuras 1 a 4). Lo común es que los evaluadores de escenarios prospectivos no deseen asignar el mismo peso a todos los criterios. Por ello, a cada criterio le es asignado un coeficiente inicial de ponderación por parte de los evaluadores, sea éste con base en elementos subjetivos, experiencias previas, o simple intuición. Los valores iniciales que se asignen a las ponderaciones de los criterios revisten una importancia relativa, en virtud de que los métodos PJA soportados por algoritmos de inteligencia artificial refinan recursivamente el valor de los coeficientes de ponderación con base en ensayos repetidos, hasta lograr plena satisfacción del colectivo evaluador.

FIGURAS 1 A 4. FASES DEL PROCESO DE JERARQUIZACIÓN ANALÍTICA.

FIGURA 1

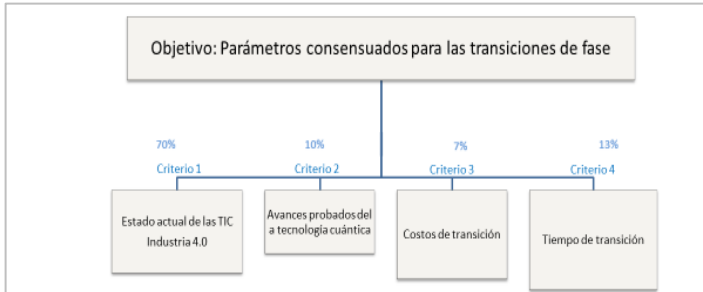


FIGURA 2

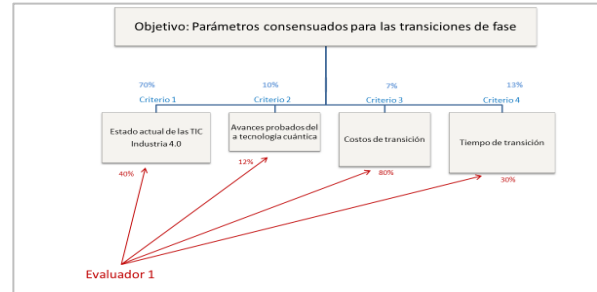


FIGURA 3

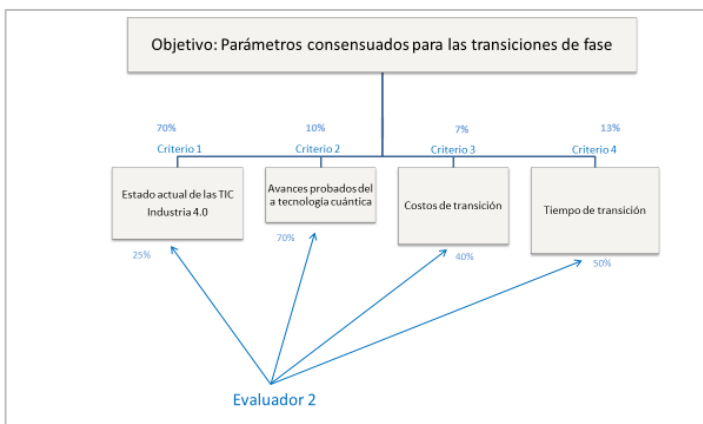
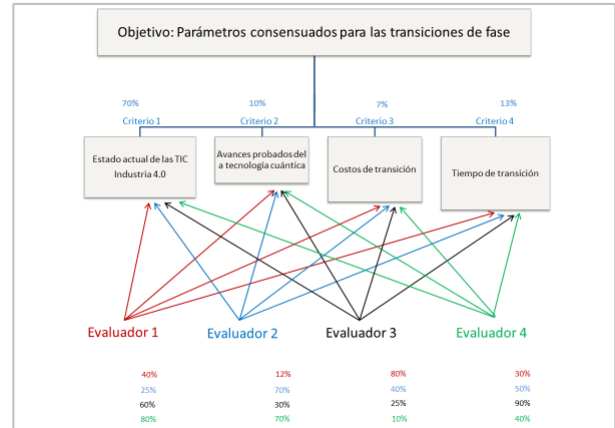


FIGURA 4



Fuente: Elaboración propia 12/02/24

Una vez determinadas las ponderaciones de los criterios de decisión, el colectivo decisorio debe establecer, a su juicio, la probabilidad para cada una de las transiciones de fase (figuras 4 a 6). Sobre esa base, se aplica un conjunto de formulaciones de álgebra lineal y programación matemática que resultan en una lista de prelación encabezada por los coeficientes probabilísticos de mayor consenso.

Las condiciones de aplicación de los modelos PJA son las siguientes (Nallakaruppan, 2023):

- i. La alternativa seleccionada debe contribuir a alcanzar diversos objetivos simultáneamente.
- ii. La alternativa seleccionada debe cumplir diversos criterios simultáneamente.
- iii. La alternativa seleccionada debe encabezar una prelación que resulta de la aplicación del MCDM.
- iv. La prelación de alternativas resultante del PJA debe ser consistente.

La consistencia a la que se refiere la condición iv significa que, ante un escenario donde la alternativa A es preferida a la B, y la alternativa B es preferida a la C, la alternativa C no puede ser preferida sobre la A; si fuera el caso, se caería en una inconsistencia. Debido a que

los modelos PJA sí permiten dominios continuos para la asignación de probabilidades, mediante ciertas formulaciones matemáticas se puede estimar la consistencia de las decisiones; ésta se traduce en un coeficiente que toma valores entre cero y cien por ciento. La construcción de dicho coeficiente es significativamente compleja, pues implica la combinación de diversas ramas de las matemáticas, como álgebra lineal, análisis combinatorio, optimización y, en las versiones más avanzadas, lógica difusa. La traducción de la modelación matemática de los PJA a algoritmos computacionales también es un proceso complejo, y lo es también la traducción de éstos a programas en algún lenguaje compatible con las plataformas de cómputo avanzado.

Los investigadores dedicados a los estudios prospectivos en el campo de la tecnología industrial, así como los diseñadores de métodos y estrategias de cambio tecnológico interesados en profundizar en comprensión de los alcances que tienen estas poderosas herramientas, encontrarán en el libro de Abhishek Behl “Multi Criteria Analysis and Management” (Behl, 2020) abundantes ejemplos que describen la aplicación de los modelos PJA paso a paso. Los lectores versados en el uso de aplicaciones tecnológicas para la prospección de escenarios encontrarán en el siguiente enlace los códigos de programación necesarios para instrumentar directamente en MATLAB diversas variantes de PJA (también denominado MCDM):

Los investigadores, diseñadores y planificadores involucrados con la tecnología, tienen a su alcance métodos analíticos y aplicaciones computacionales de avanzada, como MATLAB, para robustecer el análisis, diseño, o prospección de escenarios tecnológicos industriales. Es importante resaltar, por último, que las dificultades que hasta hoy ha representado la enorme demanda de procesamiento de datos que exige la aplicación de estas metodologías a problemas reales, quedará totalmente superada en los años (quizá meses) venideros, como producto de la vertiginosa carrera tecnológica que se está librando en el campo de la computación cuántica.

CONCLUSIONES

A poco más de medio siglo de la revolución de los microprocesadores digitales, la inexorable revolución cuántica ha dado ya sus primeras manifestaciones. Como una bola de billar que es impactada en movimiento, la industria 4.0 será fuertemente impulsada hacia adelante por la computación cuántica. Sin embargo, los procesadores cuánticos requieren actualmente grandes edificaciones y condiciones energéticas especiales para su funcionamiento. Esto hace predecible el retorno de los esquemas de cómputo centralizado, similares a los que primaron en las décadas de los años setenta y ochenta.

No habiéndose consolidado aún las subversiones sociales, organizacionales y tecno industriales inducidas por la era digital y sus algoritmos inteligentes, la tecnología 4.0 dispondrá sólo de un brevísimo lapso de tiempo para preparar el tremendo impacto de la tecnología cuántica y sus algoritmos cognitivos. Durante su primera fase de expansión, por lo menos, el acceso a los recursos del cómputo cuántico será exclusivo para las grandes




empresas. Ello generará nuevas brechas entre la industria no automatizada, las MIPYMES, la industria 4.0, y la apenas floreciente pero ya poderosa industria cuántica 5.0.

En el presente trabajo se construye un esquema de corte prospectivo que busca contribuir a la caracterización del inminente desacoplamiento entre el selecto grupo de grandes empresas con tecnología cuántica, y la industria 4.0. Esta última, impedida por ahora de acceder a los beneficios de la revolución cuántica.

La insólita dinámica tecno industrial característica de la tercera década del siglo XXI está dificultando las tareas de planeación y prospectiva. Nadie sabe con precisión qué tan inmediatas, o benéficas, resultarán las transformaciones acarreadas por la revolución cuántica. Por primera vez en la historia, los avances científicos y tecnológicos lograron superar los límites físicos de la materia. La esencia de la quinta revolución industrial se ha vuelto un tema de debate.

La aplicación de la metodología de análisis multifase resulta adecuada para dirimir el papel de la ciencia moderna de datos, inteligencia artificial, metaversos y cómputo cognitivo como factores evolutivos de la actual industria digital 4.0. La metodología PJA, por su parte, ofrece una ruta simple para una parametrización consistente y consensuada de los coeficientes probabilísticos de las transiciones de fase.

Con sobrado potencial para dominar en poco tiempo el trabajo realizado por el ser humano, la tecnología IA en la industria 4.0 se encuentra plenamente en boga. No obstante, la vertiginosa dinámica que la era digital indujo en todos los procesos industriales será acelerada aún más por el inminente arribo de la era cuántica. El sector de la industria 4.0, las universidades, centros de investigación e instancias gubernamentales de políticas de innovación, deben afrontar conjuntamente el reto de trazar directrices para las transformaciones tecno industriales, laborales y socio culturales que traerá consigo la era cuántica: una revolución que hoy se encuentra a punto de estallar. 



REFERENCIAS

- Awan, U. (2021). Industry 4.0 and the circular economy: A literature review and recommendations for future research. *Business Strategy and the Environment*. 30(4), pp 2038 -2060.
- Bai, C. (2020). Industry 4.0 technologies assesment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*. 229(2).
- Baverstadler A. (2021). Industry quantum computing applications. *Quantum technology*. 8(1). 215 – 219.
- Behl, A. (2020). Muli Criteria Analysis to Management. *Indian Institute of Technology*. Ed. IGI Global. Bombay, India.
- Bhasin, A. (2023). Quantum computing at inflection point: are we ready for a new paradigm? *IEEE Transactions on Engineering Management*. 70(7). pp. 2546 – 2557.
- Coccia, M. (2022). Technological trajectories in quantum computing to design a quantum ecosystem for industrial change. *Technology Analysis & Strategic Management*. 11(1). pp. 70 – 91.
- Frank, A. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*. 210(2). pp. 15 – 26.
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitalization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*. 252(2) pp. 112 – 143.
- Ghobalkhloo, M. (2018). The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 29(6). pp. 910 – 936.
- Intel (2021). Hot Corporate Report: The World's Smallest Transistor Ever. <https://timeline.intel.com/2001/the-world's-smallest-transistor>.
- Jain, D. (2022). Enabling unmanned aerial vehicle borne secure communication with classification framework for industry 4.0. *IEE Transactions on Industrial Informatics*. 18(8), pp 5477 - 5484.
- Kamble, S. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature indentifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*. 117(2), pp 408 – 425.
- Larson, C. (2018). If artificial intelligence ask questions, will nature aswer? Preserving free will in a recursive self-improving AI cyber-secure quantum computing world. *Cosmos and History – Journal of Natural and Social Philosophy*. 14(1). 71 -82.
- Russel, R. (1991). A multiphase approach to period routing problem. *Networks: An International Journal*. 3(1), pp. 43 – 56.
- Science Index (2023b). Clarivate web of science. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/5d66849c-05c4-4b55-8483-e26977fec795-9ac62966/relevance/1>
- Srivastava, O. (2022). Adopting Industry 4.0 by leveraging organizational factors. *Technological Forecasting and Social Change*. 176(1). pp. 123 – 131.
- Sung, T. (2018). Industry 4.0: A Korea perspective. *Technological Forecasting and Social Change*. 132(3) pp. 40 – 45.



United Kindom Government (2023). Blechley International Declaration about Devolopment of Artificial Intelligence. <https://www.gov.uk/government/publications/ai-safety-summit-2023-the-bletchley-declaration/the-bletchley-declaration-by-countries-attending-the-ai-safety-summit-1-2-november-2023>.

Zhong, H. (2020). Quantum computational advantage using photons. *Science*. 370(6623), pp. 1460 – 1463.

Zonta, T. (2020). Predictive maintenance in de industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*. 150(1). pp. 214 -219.





Como citar:

Muñoz Flores, J., (2024), Revolución Cuántica en la Industria 4.0. *Administración y Organizaciones*, 27 (Especial)

<https://doi.org/10.24275/IHFA9553>

Administración y Organizaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco se encuentra bajo una licencia Creative Commons. Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada 4.0 Internacional License.

