

# **PROPUESTA DE SECUENCIA ÓPTIMA PARA IMPLEMENTAR TECNOLOGÍAS DE INDUSTRIA 4.0 UTILIZANDO ALGORITMO DE BÚSQUEDA TABÚ**

*OPTIMAL SEQUENCE PROPOSAL TO IMPLEMENT 4.0 INDUSTRY  
TECHNOLOGIES USING TABOO SEARCH ALGORITHM*

**Víctor Hugo Gómez Barrios**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*victor.360.hugo@gmail.com*

**Vicente Figueroa Fernández**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*vicente.figueroa@itcelaya.edu.mx*

**José Alfredo Jiménez García**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*alfredo.jimenez@itcelaya.edu.mx*

**Salvador Hernández González**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx*

**Recepción:** 20/noviembre/2019

**Aceptación:** 9/junio/2020

## **Resumen**

El nuevo esquema de producción propuesto por los alemanes a principios de la segunda década del siglo XXI, denominado como industria 4.0, está principalmente influenciado por el avance de tecnologías relacionadas con la interconectividad que permiten una mejor toma de decisiones y así mismo mejorar los sistemas productivos. La implementación de este tipo de tecnologías en los ámbitos industriales puede generar múltiples beneficios, sin embargo, alcanzar el nivel de conectividad y aplicación de estas herramientas resulta en una tarea ardua llegando a generar costos muy elevados. En este artículo se plantea, a través de la aplicación de técnicas metaheurísticas, específicamente el algoritmo de búsqueda tabú, dar orden lógico a la secuencia de implementación de herramientas industria 4.0, de tal manera que se obtenga el máximo beneficio minimizando los costos que estas conllevan. La aportación de este artículo radica en la innovación de la industria 4.0,

al no existir actualmente un orden de implementación, pudiéndose utilizar como referencia a futuros proyectos relacionados con el tema.

**Palabras Clave:** búsqueda tabú, conectividad, tecnologías de industria 4.0

## **Abstract**

*The new production scheme proposed by the Germans at the beginning of the second decade of the 21st century, called as industry 4.0, mainly influenced by the advancement of technologies related to interconnectivity that will allow better decision-making and improve production systems. The implementation of these types of technologies in industrial controls can generate multiple benefits, however, reaching the level of connectivity and application of these tools resulting in an arduous task reaching very high application costs. This article proposes, through the application of metaheuristic techniques, specifically the taboo search algorithm, to give logical order to the implementation sequence of industry 4.0 tools, in such a way that maximum benefit is obtained by minimizing the costs that these imply. The contribution of this article lies in the innovation of industry 4.0, as there is currently no order of implementation, being able to use as reference future projects related to the subject.*

**Keywords:** *Taboo search, connectivity, industry technologies 4.0*

## **1. Introducción**

Los avances tecnológicos han impulsado aumentos dramáticos en la productividad industrial desde el amanecer de la revolución industrial. Las fábricas con motor de vapor en el siglo XIX, la electrificación para producción en masa en la primera parte del siglo XX, así como el uso de la electrónica que automatizó la industria en la década de 1970 (Rubman, Lorentz, & Justus, 2015).

Sin embargo, actualmente la tecnología está dando las bases para establecer una nueva revolución industrial, según los alemanes es la cuarta y denominaron a esta como industria 4.0 a principios de la segunda década del siglo XXI. La Industria 4.0 (I4.0) es la digitalización del sector manufacturero y está impulsada por el aumento de los volúmenes de datos, la potencia de los sistemas computacionales, y la

conectividad. “Si bien muchas de las tecnologías que hoy convergen, ya existían, aunque de forma embrionaria y sin la robustez que hoy aporta la I4.0, la diferencia con el pasado se basa en la forma que se combinan para generar disrupciones significativas.” (Inés & Beliz, 2018).

A estas tecnologías se les conoce como pilares tecnológicos de la industria 4.0, entre las cuales se encuentran: 1. Big data, 2. Robots autónomos, 3. Simulación, 4. Sistemas de integración, 5. Internet de las cosas (Iot), 6. Ciberseguridad, 7. Computación en la nube (cc), 8. Fabricación digital aditiva, 9. Realidad aumentada (Tremosa, 2017).

A pesar de que la integración de estas tecnologías para lograr la máxima eficiencia pueda traer múltiples beneficios como optimizar procesos de fabricación, alcanzar una mayor flexibilidad, mayor eficiencia, y generar una propuesta de valor para sus clientes, así como responder de forma oportuna a las necesidades de su mercado (Ynzunza, Izar, & Bocarando, 2017), incorporar cualquier tipo de tecnología 4.0 podría cotizarse en millones de pesos; por lo que los inversionistas y empresarios simplemente prefieren apearse a esquemas tradicionales, que al final de cuentas es lo que les ha estado funcionando.

No obstante, esta revolución ya es un hecho a nivel mundial y el no adaptarse a estos cambios podría ser una condena a la pérdida de competitividad. La adaptación a este nuevo escenario se establece como una condición necesaria para la propia supervivencia de numerosas empresas industriales (Valdés, 2017).

De acuerdo con Standard & Poor's, el 40% de las empresas que no se hayan digitalizado desaparecerán en los próximos diez años.

Actualmente las empresas que intentan migrar industria 4.0 no cuentan con un estándar de implementación, lo que puede llegar a desalentar el proyecto. En este artículo se propone una secuencia óptima para implementar de manera lógica estas tecnologías logrando minimizar los costos de implementación, tomando como base la afinidad que existe entre ellas y clasificándolas con el uso que aportan a esta revolución industrial.

Según (Siemens, 2019) “la industria 4.0 se trata de la unión entre el mundo real y virtual en las fábricas, es decir, la aplicación de las tecnologías de la información a

los procesos de producción. Las instalaciones son autónomas y la cadena de producción autogestionable, lo que permite una configuración más flexible que da respuestas rápidas y eficientes a la demanda del mercado. Asimismo, toda la información que se deriva del proceso de fabricación está disponible en tiempo real en todas las áreas que integran la empresa.”

Dicho de otra manera, las tecnologías encargadas del manejo de información o TIC’s (tecnologías de la información y la comunicación) ayudan a implementar un sistema *interconectado*, logrando que los datos generados sean analizados en tiempo real, lo que permite que la *toma de decisiones* optimice la asignación de recursos y esto conlleva a que los *sistemas productivos* sean mucho más eficientes. Tomando en cuenta esta definición se obtienen las clasificaciones que darán una ponderación a la afinidad entre las tecnologías de industria 4.0, las cuales son: Conectividad, toma de decisiones y sistemas productivos. Todas las herramientas de la industria 4.0 influyen de manera directa e indirecta sobre alguna de estas clasificaciones, y es esta relación la que definirá la afinidad entre las mismas para poder así establecer una secuencia. Para lograr esto se requiere de una técnica de optimización conocida como metaheurísticas, más específicamente el algoritmo de búsqueda tabú.

## 2. Método

La metodología que se propone para el desarrollo de la secuencia óptima consta de cuatro pasos, que se muestran en la figura 1.

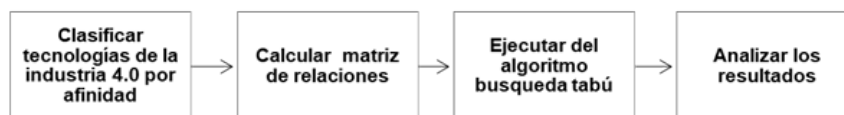


Figura 1 Método.

Partiendo de la definición de industria 4.0, se obtuvieron los tres rubros sobre los cuales se clasificaron los pilares tecnológicos, figura 2.

En tabla 1 se muestra un ejemplo de la estructura de la tabla de clasificación de tecnologías.



Figura 2 Rubros.

Tabla 1 Clasificación ejemplo.

Tecnología	Conectividad	Toma de decisiones	Sistemas productivos
a	10	5	1
b	3	6	9
n	2	4	6

De esta manera se ponderaron las diferentes tecnologías, clasificándolas de acuerdo con el grado de influencia que tengan sobre los rubros, tomando una escala de 1 a 10, donde 10 es la máxima influencia. Para obtener la matriz de relación se utilizaron valores de la tabla de clasificación, el llenado de la matriz se enfoca en los cruces de dos tecnologías para cada espacio, que nos dará como resultado el porcentaje de afinidad que comparten ambas, en el caso de la comparación de la misma tecnología se colocó un null debido a que es un dato incongruente. La tabla 2 muestra un ejemplo.

Tabla 2 Matriz relación ejemplo.

	Tecnología a	Tecnología b	Tecnología n
Tecnología a	null	%	%
Tecnología b	%	null	%
Tecnología n	%	%	null

Para el cálculo del porcentaje de afinidad se utilizó la ecuación 1.

$$Afinidad(a, b) = \frac{\left[ \left[ 1 - \frac{|VC a - VC b|}{10} \right] + \left[ 1 - \frac{|VTD a - VTD b|}{10} \right] + \left[ 1 - \frac{|VSP a - VSP b|}{10} \right] \right]}{3} \quad (1)$$

Donde:

VC = Valor conectividad.

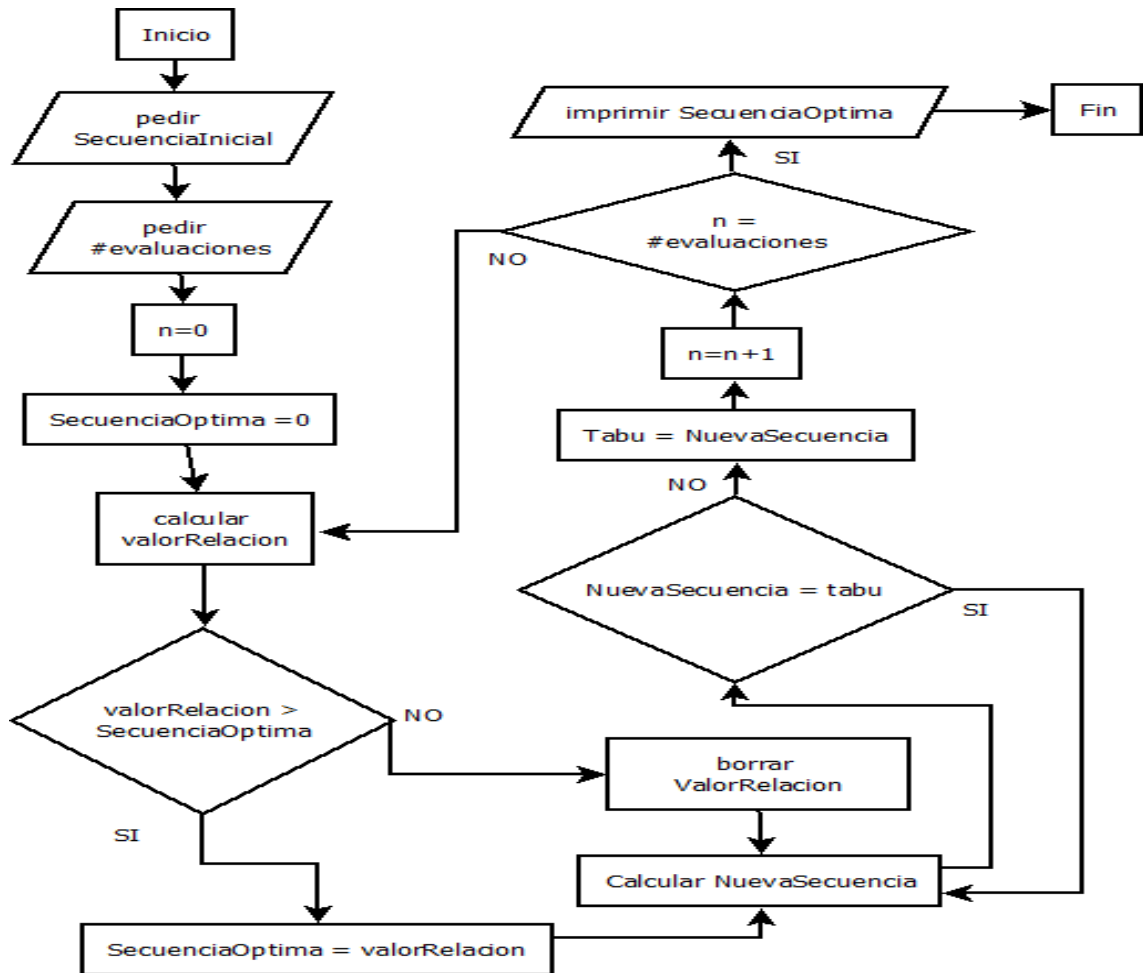
VTD = Valor toma de decisiones.

VSP = Valor sistemas productivos.

a y b = Tecnologías que se están comparando.

Lo anterior debe realizarse n veces como tantas tecnologías se tengan hasta completar la matriz.

Con los datos de la matriz de relación, se ejecutó el algoritmo de búsqueda tabú, el cual se describe en el siguiente diagrama (figura 3).



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Diagrama de flujo.

El algoritmo inicia estableciendo cualquier secuencia inicial, un ejemplo sería a, b, c y d. Posteriormente se pide el número de iteraciones que se repetirán durante el proceso, con la secuencia inicial se calcula el valor de la misma, tomando el valor que indica la tabla, para el ejemplo de la secuencia sería (a,b)+(b,c)+(c,d), el resultado de esta operación es el valor de la secuencia, los valores ab, bc y cd se toman de la matriz de relación, el valor de relación, la que llamaremos “z” se guarda

en una variable, la cual será comparada en cada iteración conservando el valor óptimo y desechando el valor anterior.

Para la siguiente iteración se calcula la nueva secuencia, permutando la secuencia con la que se trabajó anteriormente, se selecciona uno al azar y se calcula nuevamente el valor de z, esto se repetirá tantas veces como iteraciones se hayan establecido en un inicio.

Para evitar tener óptimos locales, el algoritmo penaliza o restringe el uso de la secuencia anterior como una nueva secuencia, para este caso los valores penalizados se restringen por 3 iteraciones, sin embargo, esto puede variar por problema y es definido por el autor. Después de la tercera iteración el valor restringido se vuelve a liberar para ser considerado en la secuencia; a esto se le llama búsqueda tabú.

El resultado del algoritmo es buscar la secuencia que tenga el mayor promedio de afinidad entre sí, para ello se desarrolló un código de programación en el ambiente del software Matlab.

### 3. Resultados

En la tabla 3 se muestran los pilares tecnológicos de la industria 4.0 así como el valor de influencia que tienen sobre la conectividad, la toma de decisiones y los sistemas productivos.

Tabla 3 Clasificación.

	<b>Tecnología</b>	<b>Conectividad</b>	<b>Toma de decisiones</b>	<b>Sistemas de producción</b>
1	Big data	7.5	9.5	6
2	Ciberseguridad	9.75	1.5	1.5
3	Internet de las cosas	9.5	3	5
4	Computación en la nube	9.5	8	4.5
5	Simulación	2	8	6.5
6	Sistemas de integración	9.75	1.5	5
7	Realidad aumentada	1.5	7.5	5
8	Robots	6	2	9.75
9	Fabricación 3D	2	6.5	8.5

Para poder definir la ponderación en cada rubro se tomó en consideración la literatura especializada en temas como industria 4.0 y tecnologías de la información y la comunicación.

A partir de los valores de la tabla 3 se calculó con la fórmula de afinidad la relación que existe entre ellos, tabla 4.

Tabla 4 Matriz de relaciones.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	null	50.83%	68.33%	83.33%	75.00%	62.50%	70.00%	57.50%	63.33%
2	50.83%	null	82.50%	67.50%	35.83%	88.33%	40.83%	58.33%	34.17%
3	68.33%	82.50%	null	81.67%	53.33%	94.17%	58.33%	69.17%	51.67%
4	83.33%	67.50%	81.67%	null	68.33%	75.83%	70.00%	50.83%	56.67%
5	75.00%	35.83%	53.33%	68.33%	null	47.50%	91.67%	55.83%	88.33%
6	62.50%	88.33%	94.17%	75.83%	47.50%	null	52.50%	70.00%	45.83%
7	70.00%	40.83%	58.33%	70.00%	91.67%	52.50%	null	50.83%	83.33%
8	57.50%	58.33%	69.17%	50.83%	55.83%	70.00%	50.83%	null	67.50%
9	63.33%	34.17%	51.67%	56.67%	88.33%	45.83%	83.33%	67.50%	null

En esta matriz se estableció la relación que tienen las diferentes tecnologías: si se observa la tabla 3 el valor de 1 está asociada al big data y el valor de 2 a ciberseguridad, por lo tanto en la tabla 4 al encontrar en cruce de 1 con 2 se tiene un 50.83%, es decir que el big data y la ciberseguridad comparten un 50.83% de afinidad con relación a la influencia que tiene sobre la conectividad, la toma de decisiones y los sistemas productivos.

El algoritmo de búsqueda se ejecutó en 10 pruebas para diferentes iteraciones, en cada prueba se repitió el algoritmo 10 veces, en la tabla 5 se muestran los resultados. El algoritmo se ejecutó en diez pruebas en donde a cada prueba se asignó un número de iteraciones, iniciando en 500 hasta llegar a 900,000, repitiendo cada prueba con la misma iteración diez veces, para un total de cien pruebas. Una de las primeras observaciones es que el algoritmo mostraba resultados más precisos en relación con el incremento de iteraciones, esto se muestra en la tabla 6. La secuencia numérica mostrada en los resultados se asocia el número con la tecnología de la tabla 3.

#### 4. Discusión

El algoritmo arrojó en las 100 pruebas 10 resultados diferentes (figura 4), cada uno con un porcentaje distinto de afinidad, los resultados del algoritmo muestran una secuencia que destaca sobre el resto, con un 61% de repeticiones en el



algoritmo y un 73.89% de afinidad, siendo el más alto en esta característica, la secuencia A, mostrados en la tabla 6.

Como conclusión en la figura 5 se muestra la secuencia óptima de implementación de tecnologías de industria 4.0, tomando como base la afinidad que poseen cada una de ellas sobre los rubros de conectividad, toma de decisiones y sistemas productivos.

Tabla 5 Resultados.

Prueba	Iteraciones	Repeticiones	Promedio de afinad	Secuencia
1	500	10	71.20%	341759862
2	1,000	1	70.37%	175983264
		9	70.65%	15974263
3	10,000	2	72.50%	826341597
		1	72.59%	897514632
		6	72.87%	862341759
		1	73.89%	263417598
4	30,000	1	72.59%	236417598
		2	72.59%	143628957
		2	72.87%	975143628
		3	72.87%	862341759
5	50,000	2	72.87%	975143628
		8	73.89%	263417598
6	100,000	1	72.50%	759814362
		9	73.89%	263417598
7	300,000	10	73.89%	263417598
8	500,000	10	73.89%	263417599
9	700,000	10	73.89%	263417599
10	900,000	10	73.89%	263417599

Tabla 6 Secuencias.

Porcentaje de afinidad	Secuencia	Frecuencia	Secuencia numérica
73.89%	A	61	236417598
72.87%	B	9	862341759
72.59%	C	2	143628957
72.59%	D	1	897514632
72.59%	E	4	975143628
72.50%	F	1	759814362
72.50%	G	2	826341597
71.20%	H	10	341759862
70.65%	I	9	15974263
70.37%	J	1	175983264

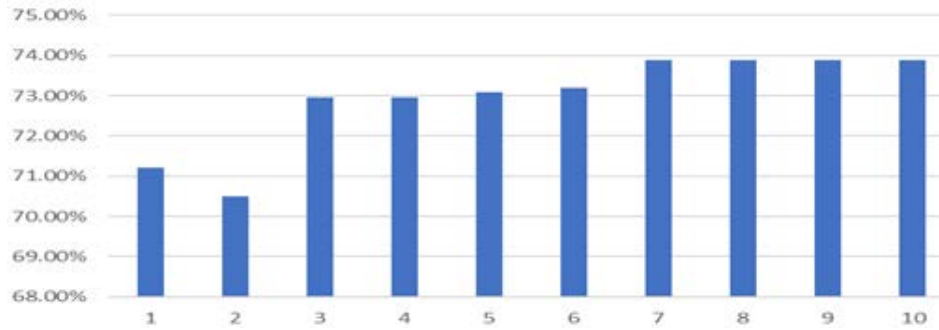


Figura 4 Pruebas.



Figura 5 Secuencia óptima.

En esta secuencia se podría tomar como un nivel 1 los sistemas de integración ya que estos son los que harán la conexión del sistema, a su vez la ciberseguridad entraría en el nivel 0, ya que es fundamental para la seguridad de la información y más aún en un entorno donde todo está conectado, más adelante en el nivel 2 internet de las cosas, computación en la nube y el big data servirán como conectores, transportadores y analizadores de la información que se vaya produciendo en el sistema, después el nivel 3 con la realidad aumentada, simulación y la fabricación 3D, en un entorno casi completamente digital estas herramientas sirven para manipular la información que se va generando, las cuales sirven para adelantarse a situaciones imprevistas o demasiado costosas para llevar a cabo de manera “física”, y por ultimo el nivel 4, tenemos la robótica, entes conectados al sistema que reciben y envían información sobre su estado actual así como la información que requieren para la producción, todo en un entorno completamente digital.

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] Díaz, D. T. (2016). Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos. *Dialnet*, 118-14.

- [2] Grifantini, K. (2009). *Faster Maintenance with Augmented Reality. technologyreview.*
- [3] Inés, A., & Beliz, G. P. (2018). *Industria 4.0, Fabricando el futuro.* Buenos aires, Argentina .
- [4] Manyika, J. (2011). *Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity.* San Diego, California: McKinsey Global Institute.
- [5] Rubman, M., Lorentz, M., & Justus, J. (09 de 04 de 2015): [http://www.inovasyon.org/pdf/bcg.perspectives\\_Industry.4.0\\_2015.pdf](http://www.inovasyon.org/pdf/bcg.perspectives_Industry.4.0_2015.pdf)
- [6] Scanlan, M. (2018). *Engineering USA.* Recuperado el 24 de 05 de 2019: [https://www.engusa.com/en/posts/manufacturing-simulation-for-industry-4-0.](https://www.engusa.com/en/posts/manufacturing-simulation-for-industry-4-0)
- [7] Siemens. (2019). *¿Qué es la Industria 4.0?:* [https://new.siemens.com/es/es/empresa/temas-clave/industria-40.html.](https://new.siemens.com/es/es/empresa/temas-clave/industria-40.html)
- [8] Tremosa, L. (2017). *Industria 4.0 y nuevas necesidades de formación profesional:* [https://www.infoplcn.net/plus-plus/tecnologia/item/104015-industria-4-0-nuevas-necesidades-formacion-profesional.](https://www.infoplcn.net/plus-plus/tecnologia/item/104015-industria-4-0-nuevas-necesidades-formacion-profesional)
- [9] Valdés, M. B. (2017). La industrial conectada 4.0. *La economía digital en España*, 89-100.
- [10] Weber, R. H. (2010). *Internet of Things Legal Perspectives.* Springer.
- [11] Ynzunza, C., Izar, M., & Bocarando, J. (2017). El entorno de la industria 4.0: implicaciones y perspectivas futuras. *Conciencia tecnológica*, 54, 33-45.