

Facility layout planning in dynamic environments: A literature review

Pablo Pérez-Gosende, MSc^{1,2}, Josefa Mula, PhD² y Manuel Díaz-Madroño, PhD²

¹Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, pperezg@ups.edu.ec

²Centro de Investigación en Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP), Universitat Politècnica de València, España, fmula@cigip.upv.es, fcodiama@cigip.upv.es

Abstract– The facility layout problem is considered one of the most important design decisions in the framework of business operations strategies. Its proven impact on operational costs, efficiency, and productivity of manufacturing systems have made it a topic of extensive scientific discussion. However, the static planning approach has been given greater coverage in the literature, when in fact, in practice, the consideration of a dynamic or multi-period approach is more common. In this context, this article presents a literature review regarding the dynamic facilities layout problem (DFLP) from the perspective of operations management. The revised literature allowed us to define the frames of reference, design principles, modeling approaches, resolution strategies, as well as guidelines for future research.

Keywords: facility layout problem, dynamic layout, literature review, mathematical programming

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.505>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Planificación de la distribución en planta en entornos dinámicos: un estudio de revisión

Pablo Pérez-Gosende, MSc¹⁻², Josefa Mula, PhD² y Manuel Díaz-Madroñero, PhD²

¹Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, pperezg@ups.edu.ec

²Centro de Investigación en Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP), Universitat Politècnica de València, España, fmula@cigip.upv.es, fcodiama@cigip.upv.es

Resumen– El problema de la distribución espacial de plantas industriales es considerado como una de las decisiones de diseño de mayor importancia en el marco de las estrategias de operaciones empresariales. Su demostrada repercusión en los costes operacionales, la eficiencia y la productividad de los sistemas de fabricación, lo han convertido en un tema de amplia discusión científica. Sin embargo, en la literatura científica se le ha dado una mayor cobertura al enfoque de planificación estático, cuando en realidad, en la práctica, la consideración de un enfoque dinámico o multiperíodo es más común. En este contexto, este artículo presenta una revisión de la literatura científica relativa al problema de la distribución dinámica de plantas industriales (DFLP) desde la perspectiva de la dirección de operaciones. Los artículos revisados permitieron definir los diferentes marcos de referencia, principios de diseño, enfoques de modelado, estrategias de resolución, así como las directrices para futuras investigaciones.

Palabras clave– Distribución en planta, distribución dinámica, modelación matemática, revisión bibliográfica.

Abstract– The facility layout problem is considered one of the most important design decisions in the framework of business operations strategies. Its proven impact on operational costs, efficiency, and productivity of manufacturing systems have made it a topic of extensive scientific discussion. However, the static planning approach has been given greater coverage in the literature, when in fact, in practice, the consideration of a dynamic or multi-period approach is more common. In this context, this article presents a literature review regarding the dynamic facilities layout problem (DFLP) from the perspective of operations management. The revised literature allowed us to define the frames of reference, design principles, modeling approaches, resolution strategies, as well as guidelines for future research.

Keywords– Facility layout problem, dynamic layout, literature review, mathematical programming.

I. INTRODUCCIÓN

La distribución espacial de plantas industriales (DP), también conocida con el término anglosajón *layout*, puede definirse como el proceso de ordenamiento físico de todos los factores de producción que conforman el sistema productivo de forma que se cumplan adecuada y eficientemente los objetivos estratégicos de la organización. En el marco de las estrategias de operaciones empresariales, la DP es considerada como una de las decisiones de diseño de mayor importancia [1], [2]. De igual forma, tiene una repercusión significativa en la eficiencia de los sistemas de fabricación y su nivel de productividad [3]–[5].

Cuando se planifica la DP bajo el supuesto de que la

demanda se mantendrá constante durante todo el horizonte de planificación, el problema es conocido como distribución en planta estática o uniperíodo (SFLP). Este enfoque ha sido recomendado para casos de sistemas de producción con bajo coste de reorganización de instalaciones [6]. Sin embargo, la consideración de un único diseño puede resultar impráctico en la mayoría de los sectores industriales pues es poco probable que el flujo de materiales se mantenga invariable en el tiempo.

Las empresas necesitan adaptarse constantemente a las necesidades cambiantes de los mercados y para esto aumentan o contraen su capacidad productiva, cambian parcial o totalmente de tecnología, crean nuevos productos y servicios y mejoran e implementan nuevos procesos. En este contexto, es comprensible la necesidad de adoptar DP suficientemente flexibles [7]. A partir de este enfoque, denominado dinámico o multiperíodo (DFLP), se diseña una DP óptima para cada período de tiempo de modo que se minimicen los costes totales de transporte de materiales y los relacionados con la redistribución de las instalaciones [8]–[10].

Un estudio reciente demostró que la planificación de la DP mediante el enfoque de planificación dinámico ha tenido una menor connotación en la literatura científica que el enfoque estático [11]. De acuerdo a ese estudio, solo el 29.17%, entre 186 artículos publicados entre 1987 y 2016, abordaba el tema de la DP dinámica. Además de lo anterior, el estado del arte más reciente que aborda las particularidades de la DP dinámica data de 2012 [12]. En este contexto, este artículo presenta una revisión de la bibliografía relativa al DFLP publicada en los últimos diez años (2010-2019) con el fin de contribuir a cubrir la brecha de conocimiento que respecto a este problema pudiera haberse generado en la literatura científica.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 muestra la metodología de revisión empleada. En la sección 3 se ofrece una panorámica general del DFLP. Las características de los modelos matemáticos empleados en la formulación del problema, así como sus enfoques de resolución se abordan en la sección 4. La sección 5 señala los vacíos en la literatura y sugiere direcciones para futuras investigaciones. Finalmente, el artículo termina con las conclusiones en la sección 6.

II. METODOLOGÍA DE REVISIÓN

La búsqueda sistemática de la literatura relevante al DFLP se realizó considerando los artículos científicos publicados en revistas indexadas en el *Science Citation Index Expanded* (SCIE) de la colección principal de la *Web of Science* (WoS)

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.505>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

para una ventana temporal comprendida entre 2010 y 2019. A partir de los criterios de búsqueda dados en la Tabla I se identificaron 59 artículos científicos relacionados. Tales publicaciones fueron seleccionadas a partir del juicio crítico de los autores considerando, principalmente, aquellas que abordan el problema desde el ámbito de la dirección de operaciones, objetivo principal de este estado del arte.

La Fig. 1 muestra las revistas científicas donde fueron publicados los 44 artículos seleccionados. Solo tres de ellas han publicado aproximadamente el 30% de los artículos que han abordado el problema de la distribución dinámica en la última década.

III. PANORÁMICA GENERAL DEL PROBLEMA

El análisis sistemático de la literatura relacionada con el DFLP permitió identificar los criterios de clasificación que se muestran en la Fig. 2. Como puede observarse en esta figura las DP dinámicas pueden categorizarse en distribuciones flexibles, cíclicas o robustas.

Al planificar distribuciones flexibles, se diseña una DP óptima para cada período de modo que se minimicen los costes totales de transporte de materiales y los relacionados con la redistribución de las instalaciones. Estas han sido el tipo de distribución dinámica más frecuentemente abordada en la literatura en la última década (38 de 44 artículos, 86.36%).

Las distribuciones cíclicas fueron introducidas en [13] como un caso especial de las distribuciones dinámicas. En este enfoque, el horizonte de planificación se divide en T períodos, $t = 1, \dots, T$. Después del período T , la matriz de flujo de materiales entre departamentos regresa a su estado inicial en el período $t = 1$. Además de la demanda del producto, los requisitos de área de algunos departamentos también pueden cambiar de forma estacional.

TABLA I
 ESTRATEGIA DE REVISIÓN DE LA LITERATURA

Etiquetas de campo, palabras clave y operadores booleanos	(TI=(dynamic) or TI=(cyclic) or TI=(robust) or TI=("reconfigurable manufacturing system")) and (TI=("facilit* *layout problem") or TI=("facilit* *layout design") or TI=("facilit* *layout planning") or TI=("facilit* *layout") or TI=("plant* *layout design") or TI=("plant* *layout") or TI=("layout design") or TI=("facilit* design") or TI=("facilit* planning"))
Base de datos consultada	Web of Science (WoS)
Índice	Science Citation Index Expanded (SCIE)
Tipo de documentos	Artículos de investigación
Ventana temporal	2010-2019
Idioma	Inglés
Número inicial de artículos	59
Eliminados en base al título y el resumen	11
Eliminados en base al contenido	4
Número final de artículos	44

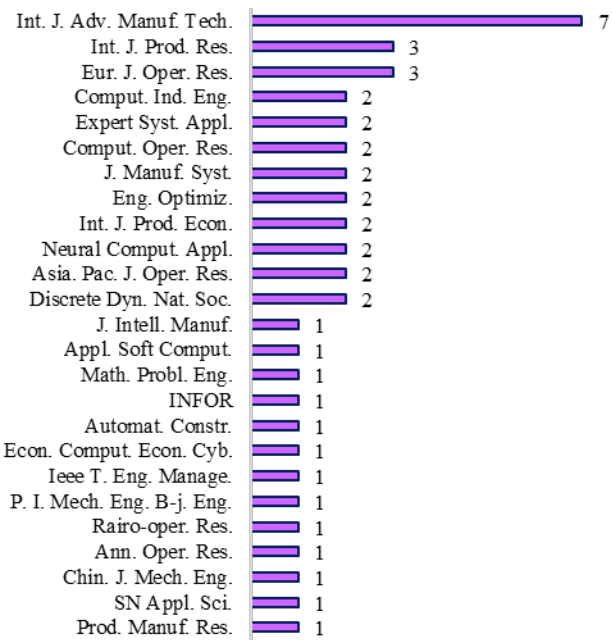


Fig. 1 Distribución de publicaciones relativas al DFLP por revista científica.

Por su parte, en el enfoque de diseño robusto se considera un único diseño de DP para todo el horizonte de planificación con diferentes escenarios de demanda estocástica. En realidad, este diseño único se utiliza para cada período y, por lo tanto, no hay un coste de reorganización en este enfoque. El diseño robusto no es necesariamente un diseño óptimo para un período de tiempo particular, pero es adecuado durante todo el horizonte de planificación temporal ya que minimiza el coste de transporte de materiales [14]. Por lo tanto, el enfoque robusto tiene la ventaja de no incurrir en costes de reorganización y la desventaja de no representar un diseño óptimo para cada período [15]. Este método es apropiado para entornos donde el coste de reorganización de la instalación es alto [6], como en el caso de aquellas empresas que requieren de maquinaria pesada para el desarrollo de sus operaciones. A pesar de su importancia, poca cobertura se le ha dado a este enfoque en la literatura relativa al DFLP en los últimos diez años (5 de 44 artículos, 11.36%).

La Tabla II muestra una panorámica general del DFLP. En ella, cada una de las 44 contribuciones analizadas fueron clasificadas de acuerdo al tipo de problema, el enfoque y la fase de planeación, la cantidad de instalaciones, la cantidad de pisos, la consideración del espacio en dos o tres dimensiones, la forma, dimensiones y área de los departamentos y la configuración del manejo de materiales. De igual forma, se han considerado las características de los enfoques de modelado del DFLP de acuerdo con la naturaleza discreta o continua del modelo matemático empleado en la formulación del problema, el tipo de función objetivo, la consideración de la demanda bajo condiciones de certeza o incertidumbre, el

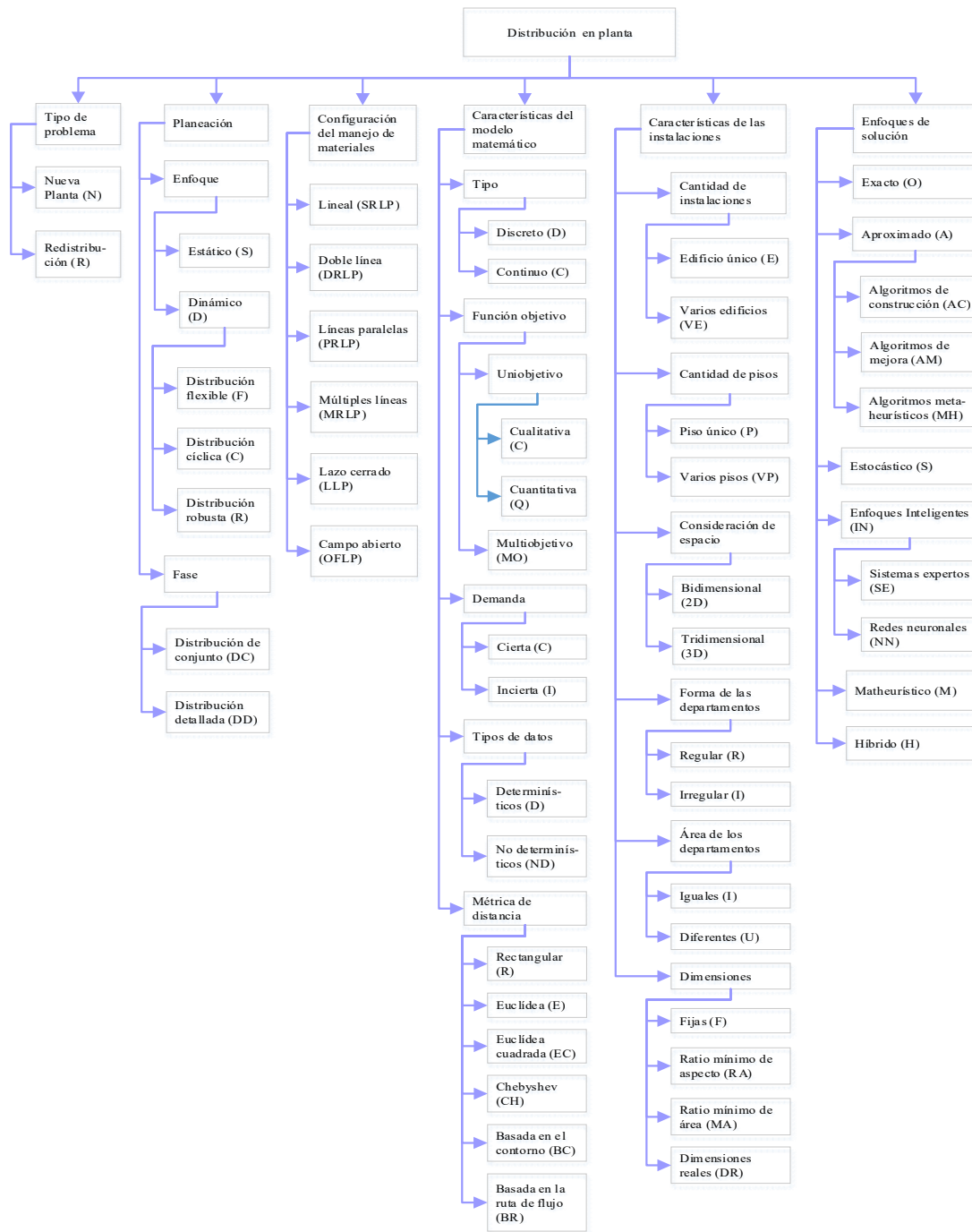


Fig. 2 Marco conceptual empleado en la clasificación de la literatura relativa al DFLP.

tipo de datos, la métrica de distancia y las estrategias de resolución del modelo. De igual forma, para cada caso se ofrece una descripción de las funciones objetivo, así como las restricciones consideradas en la formulación del DFLP.

En la literatura, de forma general, se le ha dado una mayor connotación a la distribución de plantas completamente nuevas (*green-field layout design*). En tales casos, se busca

diseñar el *layout* sin la influencia de las restricciones que, normalmente, se presentan al hacerlo en una instalación ya existente. Sin embargo, a pesar de su poca trascendencia, en la práctica el problema de la redistribución espacial de plantas ya existentes es más común [16]. Entre las fuentes bibliográficas consultadas como parte de esta investigación, solo el 4.55% abordó el segundo problema (dos artículos).

TABLA II
PANORÁMICA GENERAL DEL DFLP

Referencia	Tipo de problema	Fase de planeación	Enfoque de planeación	Cantidad de edificios	Cantidad de pisos	Espacio	Departamentos			Configuración del manejo de materiales	Tipo de modelo	Tipo de función objetivo	Función objetivo ^a	Restricciones ^b	Demanda	Tipo de datos	Métrica de distancia	Enfoque de solución
							Forma	Dimensiones	Área									
[2]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	C	MO	a,b,g	2,6,15	C	D	R	A
[6]	N	DC	R	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a	2	I	D	R	O,A
[7]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	MO	a,b,L	2	C	D	R	A
[8]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2	C	D	R	A
[9]	N	DC	F	VE	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2,6	C	D	E	A
[10]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	MO	a,b	1,15	C	D	R	A
[13]	N	DC	C	E	P	2D	R	RA	U	OFLP	C	Q	a,b	2,6	C	D	R	M
[14]	N	DC	R	E	P	2D	R	F	I	OFLP	D	MO	a,b	2	C	D	R	A
[15]	N	DC	R	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	15	I	ND	R	A,S
[17]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	U	OFLP	C	Q	a,b	2,6,9	C	D	R	A
[18]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2	C	D	R	A
[19]	N	DC	F	E	P	2D	R	RA	U	MRLP	C	MO	a,b,f,L	2,6,8	C	D	R	A
[20]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2	C	D	BR	A
[21]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	U	OFLP	C	MO	a,b,L,M	2,6,7,9	C	D	R	A
[22]	N	DC,DD	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b,h	2,3	C	D	R	O,A
[23]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2	C	D	R	A
[24]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I,U	MRLP	D	Q	a,b	2	C	D	R	A
[25]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2	C	D	R	A
[26]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2	I	D,ND	R	A,S
[27]	N	DD	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b,h	2,3,12,13	C	D	R	O,A
[28]	N	DC	F	E	P	2D	R	F,RA	U	MRLP	C	Q	a,b	2,6,8,9	C	D	R	A
[29]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	U	MRLP	D	MO	a,b,L	2	I	D,ND	R	A
[30]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2	C	D	R	A
[31]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	SRLP	D	MO	a,b,L,M	2	C	D	E	A
[32]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	MO	a,b,L	2	C	D	R	A
[33]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2	C	D	R	A
[34]	N,R	DC	F	E	VP	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b,h	2,3,11,12,13,14	C	D	R	A
[35]	N	DC	R	E	P	2D	R	F	U	SRLP	C	Q	a	2,6,10	C	ND	R	H(O,S)
[36]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2	C	D	R	A
[37]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	U	OFLP	C	Q	a,b	2,6	C	D	R	A
[38]	N,R	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	1,2	C	D	R	A
[39]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2	C	D	R	A
[40]	N	DC	R	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	2	I	D	R	A
[41]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	MO	a,b,g	2,15,18	C	D	R	A
[42]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	MO	a,b,g,e	2,4,7,15	I	D,ND	R	A
[43]	N	DD	F	E	P	2D	R	F	I	SRLP	D	MO	a,b,d,i,L	2	I	ND	R	A
[44]	N	DC,DD	F	E	P	2D	R	F	I	MRLP	D	Q	a,b	16	C	D	R	A
[45]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	U	OFLP	C	Q	a,b	2,6	C	D	R	H(S,A)
[46]	N	DC	F	E	P	2D	R	F	U	MRLP	C	Q	a,b	2,6,10	I	D,ND	R	A
[47]	N	DC	F	E	P	2D	R,I	RA	U	OFLP	C	Q	a,b	2,5,6,17	C	D	R	A
[48]	N	DC	F	E	P	2D	R	RA	U	OFLP	C	Q	a,b	2,5,6,7	C	D	R	M
[49]	N	DD	F	E	P	2D	R	F	U	OFLP	C	MO	a,b,j,k,N	1,2,6	C	D	R	A
[50]	N	DD	F	E	P	2D	R	F	U	MRLP	C	Q	c	2,6	I	D	R	A
[51]	N	DD	F	E	P	2D	R	F	U	OFLP	C	MO	a,b,N	2,6,10	C	D	R	A

Nota: La descripción de los códigos empleados en esta tabla puede consultarse en la Fig. 2.

^aEn la descripción de la función objetivo las letras minúsculas indican objetivos de minimización y las letras mayúsculas objetivos de maximización. **a** (coste del manejo de materiales), **b** (costes de rediseño), **c** (distancia recorrida por el flujo de trabajo), **d** (tiempo de transporte), **e** (trabajo en proceso), **f** (ratio de aspecto), **g** (costes relacionados con el sistema de manejo de materiales), **h** (costes relacionados a las operaciones de la maquinaria), **i** (nivel de riesgo asociado al recorrido de materiales y desechos peligrosos), **j** (costes de oportunidad), **k** (riesgos de seguridad y salud ocupacional), **L** (relaciones de proximidad o adyacencia entre departamentos), **M** (distancia mínima requerida entre departamentos), **N** (ratio de utilización del área).

^bRestricciones del modelo matemático: **1** (presupuesto), **2** (área), **3** (capacidad), **4** (trabajo en proceso), **5** (distancia), **6** (solapamiento entre departamentos), **7** (ubicaciones de puntos de recepción y despacho de materiales), **8** (ratio de aspecto), **9** (orientación), **10** (espacio libre entre departamentos), **11** (satisfacción de la demanda), **12** (disponibilidad de máquinas), **13** (ubicación de las máquinas), **14** (conservación del flujo de materiales), **15** (cantidad de dispositivos de manejo de materiales requeridos), **16** (número de máquinas por departamento), **17** (restricciones de ruptura de simetría), **18** (tiempo de transporte).

Tradicionalmente, la mayoría de los enfoques de solución del problema de la DP han seguido la metodología de planificación sistemática de distribución (*systematic layout planning*, SLP) [52]. Una investigación reciente concluyó que este era el enfoque más adecuado para manejar problemas de diseño de DP [53].

Como la mayoría de los problemas de diseño en ingeniería, el SLP se basa en un enfoque jerárquico. Como parte de una primera fase los departamentos son asignados a localizaciones concretas en el espacio físico de la planta en lo que, comúnmente, se denomina distribución de conjunto o *block layout*. Posteriormente, tiene lugar la fase de detalle, en la que se procede a la organización de los elementos que conforman el sistema de producción al interior de cada departamento [54]. Tales fases deberían abordarse de manera consecutiva, en lo que algunos autores han denominado enfoque *top-down* [55], sin embargo, la mayor parte de las investigaciones disponibles en el contexto del DFLP abordan ambas fases por separado. Solo [22] y [44] han abordado ambas fases como parte del mismo problema.

Tal como se representa en la Fig. 3, de acuerdo con la configuración del sistema de transporte de materiales, en la literatura se definen seis categorías de DP [11], las cuales son: configuración en línea (*single-row layout problem*, SRLP), en doble línea (*double-row layout problem*, DRLP), de líneas en paralelo (*parallel-row layout problem*, PRLP), de múltiples líneas (*multi-row layout problem*, MRLP), de lazo cerrado (*loop layout problem*, LLP) y de campo abierto (*open-field layout problem*, OFLP). Entre ellas, no se ha contemplado la categoría de clasificación de varios pisos (*multi-floor layout problem*, MFLP) establecida en [11], dado que se considera que en cada piso podría darse cualquiera de las seis configuraciones anteriores. No obstante, el criterio MFLP se ha considerado de forma independiente en la clasificación del DFLP de acuerdo con el número de pisos (Fig. 2).

Cabe destacar que, en el caso de la DFLP, la configuración MRLP ha sido la más extendida en la literatura consultada (70.45% de los casos), y en contraste, muy poca atención ha recibido el OFLP y el SRLP con el 22.73% y el 6.82% de los casos, respectivamente. En los últimos diez años no se ha abordado el DFLP para el resto de las configuraciones.

A pesar de que uno de los principios clásicos de la DP es obtener el máximo aprovechamiento posible del espacio en el interior de la planta industrial, se ha abordado escasamente en el contexto de la DFLP la consideración del espacio tridimensional en su planificación. De hecho, todo los artículos revisados han considerado el espacio, únicamente, desde el punto de vista bidimensional.

La mayoría de las investigaciones han considerado el diseño de la DP en el contexto de un único edificio y/o un solo piso, sin embargo, es muy común que grandes empresas consideren más de un piso e incluso varios inmuebles para el desarrollo de sus operaciones. En este contexto, solo un trabajo consideró la planeación de una distribución dinámica para varios edificios de forma simultánea [9], específicamente,

se consideraron un total de 25 edificios en un área de 500000 m² como parte de un proyecto de construcción a gran escala. De igual forma, solo un artículo consideró varios pisos en el diseño de una DP de un sistema de fabricación en un entorno dinámico [34].

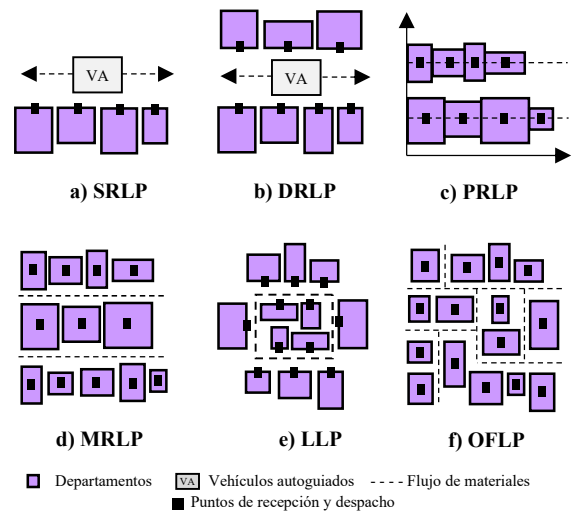


Fig. 3 Configuraciones de distribución en planta de acuerdo al recorrido del flujo de materiales.

IV. TENDENCIAS ACTUALES EN EL MODELADO MATEMÁTICO DEL DFLP

El problema de la DFLP ha sido clasificado como un problema de optimización NP-hard (*non-polynomial hard problem*) de acuerdo con la teoría de la complejidad computacional, pues no existe un algoritmo que proporcione una solución óptima en un tiempo polinómico razonable [56]. Sin embargo, a pesar de este grado de complejidad, distintos autores han aportado soluciones aceptables en tiempos de cálculo realistas, aplicando desde técnicas exactas hasta algoritmos heurísticos de última generación.

En los últimos diez años los enfoques de programación matemática más utilizados en el modelado del DFLP han sido, en orden decreciente de frecuencia, el modelo de asignación cuadrática (QAP) con el 34% de los casos consultados [8], [10], [15], programación no lineal entera mixta (MINLP) con aproximadamente el 16% [37], [38], [48], programación lineal entera mixta (MILP) con un poco más del 11% [34], [47] y programación no lineal (NLP) con casi el 5% [36], [41]. Sin embargo, también se ha aplicado programación lineal entera (LIP) [9] y programación bi-nivel (BLPM) [2] al caso específico de configuraciones MRLP, e incluso, programación estocástica difusa (FSPM) [35] para modelar el DFLP bajo una configuración SRLP.

Tales modelos, de forma general, han estado sujetos a 18 tipos de restricciones diferentes. Entre ellas, las más empleadas en orden de frecuencia son: las restricciones de área, solapamiento entre departamentos, cantidad de dispositivos de manejo de materiales requeridos, presupuesto,

capacidad, ubicaciones de puntos de recepción y despacho de materiales, orientación de las instalaciones y espacio libre entre departamentos.

La mayoría de los modelos de optimización del DFLP consideran una única función objetivo de naturaleza cuantitativa que involucra de forma simultánea el coste de manejo de materiales y los costes de rediseño de la DP. Sin embargo, al resolver cualquier problema de DP, considerar factores cuantitativos como una función objetivo única puede generar soluciones no necesariamente óptimas, pues en algunos contextos industriales y de servicios, factores cualitativos como las relaciones de proximidad entre los departamentos (*closeness ratings*), la flexibilidad o la seguridad pueden ser de mayor relevancia. Solo un 31.82% de la literatura revisada abordó el DFLP mediante modelos de optimización multiobjetivo.

De manera general, los métodos usados en la búsqueda de soluciones óptimas o cercanas al óptimo al DFLP pueden clasificarse en exactos, aproximados, estocásticos e inteligentes [11]. Adicionalmente, como puede observarse en la Fig. 2, a estas categorías se han agregado los enfoques híbridos y matheurísticos por haber sido identificados entre los enfoques de solución empleados en la literatura revisada como parte de este estudio.

Dada la naturaleza *NP-hard* del problema, muy pocos autores han conseguido encontrar soluciones óptimas al DFLP, y los que lo han intentado han empleado el método *Branch and bound* [22], [27] o programación dinámica [6] para un número reducido de máquinas o departamentos. Es, por ello, que la mayoría de autores han recurrido a soluciones subóptimas para problemas de mayor tamaño mediante la aplicación de algoritmos heurísticos o aproximados.

En las referencias revisadas, los métodos aproximados más populares en la resolución del DFLP han sido los algoritmos metaheurísticos. Se identificaron exactamente 17 de estos algoritmos aplicados a la resolución de modelos de optimización del DFLP, siendo los más frecuentes: el recocido simulado, los algoritmos genéticos, el enjambre de partículas, los algoritmos de búsqueda de entornos variables y la búsqueda tabú, con 16, 13, 6, 5 y 4 artículos, respectivamente. Un resumen del análisis anterior puede observarse en la Tabla III.

V. DIRECTRICES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS

En el contexto del DFLP, al planificar distribuciones flexibles y cíclicas se diseña una DP óptima para cada período de modo que se minimicen los costes totales de transporte de materiales y los relacionados con la redistribución de las instalaciones. Sin embargo, los trabajos que han abordado estos enfoques de planificación no han considerado los costes de oportunidad en los que se incurre durante el período de tiempo en el que se proyecte la redistribución. En virtud de lo anterior, se recomienda que investigaciones futuras consideren minimizar estos tiempos para reducir el impacto de tales costos sobre la rentabilidad de la organización.

En esta misma línea, cabe destacar que la mayoría de las investigaciones relativas al DFLP buscan optimizar el *layout* en el caso de plantas completamente nuevas, por lo que investigaciones futuras deben poner mayor atención a la redistribución espacial de plantas ya existentes. En este último caso, la tarea es tanto o más compleja dada la presencia de restricciones y objetivos adicionales. La implementación de cambios en un *layout* existente requiere de inversión adicional y retrasos o interrupción total de los planes de producción durante el período que dure la redistribución.

Dado que la mayoría de la literatura científica en el contexto del DFLP aborda la distribución de conjunto y de detalle de forma separada, en la práctica sería de mayor utilidad para los gerentes de operaciones que futuras investigaciones consideraran ambas fases como parte del mismo problema mediante un enfoque jerárquico.

A pesar de que uno de los principios clásicos de la DP es la optimización del espacio al interior de la planta industrial, en los últimos diez años ninguna investigación ha abordado la consideración del espacio tridimensional en la planificación del DFLP. El análisis del espacio solo ha sido considerado desde el punto de vista bidimensional.

En general, las investigaciones analizadas como parte de este estudio han considerado el diseño de la DP en el contexto de un único edificio y un único piso. Sin embargo, es muy común que grandes empresas consideren más de un inmueble y varios pisos para el desarrollo de sus operaciones. Esto representa un desafío para la modelación matemática del DFLP y definitivamente abre una brecha que debe ser llenada por futuras investigaciones. De igual forma, deben considerarse configuraciones del sistema de transporte de materiales aún no abordadas en ese contexto, como el caso del DRLP, PRLP, LLP.

La mayoría de los modelos de optimización del DFLP buscan minimizar una única función objetivo de naturaleza cuantitativa. No obstante, en la práctica, la consideración de factores cuantitativos y cualitativos de forma simultánea puede ser determinante para gran cantidad de sistemas de producción. Esto ciertamente implicaría que la comunidad científica pusiera más atención en la modelación matemática multiobjetivo del DFLP. Para ello, el desarrollo y la aplicación de enfoques metaheurísticos, matheurísticos y basados en inteligencia artificial podrían constituir una estrategia prometedora de resolución.

Otro elemento importante a destacar es que los modelos de optimización matemática del DFLP disponible en la literatura se focalizan, fundamentalmente, en la resolución de problemas de referencia clásicos (denominados *test problems* o *benchmark instances*), los cuales muchas veces son desarrollados teóricamente y no responden a casos de estudio de la realidad. En este contexto, se recomienda que investigaciones futuras modelen situaciones reales con el fin de contribuir a llenar el vacío que representa la limitada aplicación de la investigación desarrollada en el ámbito de la DP en la práctica [55].

TABLA III
REVISIÓN DE ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS EMPLEADOS EN LA RESOLUCIÓN DEL DFLP

Referencia	SA	GA	PSO	VNS	TS	ACO	ABC	AIS	FA	BSA	DE	ICA	WFA	PEA	BFO	TLBO	EM
[2]			√														
[6]	√																
[7]	√	√									√						
[8]	√														√		
[10]	√	√															
[13]	√																
[14]	√																
[15]		√															
[17]					√												
[18]		√															
[19]				√													
[20]				√													√
[21]			√														
[22]	√																
[23]					√												
[24]			√														
[25]	√		√														
[26]	√	√															
[27]	√																
[28]		√															
[29]		√	√	√	√												
[30]						√											
[31]					√												
[32]						√											
[33]	√			√								√					
[34]		√															
[36]	√	√															
[37]			√														
[38]	√																
[39]								√									
[40]		√															
[41]													√				
[42]	√																
[43]	√								√								
[46]		√								√							
[47]														√			
[48]	√			√													
[49]							√										
[50]		√														√	
[51]		√															

SA (recocido simulado), GA (algoritmos genéticos), PSO (enjambre de partículas), VNS (búsqueda de entornos variables), TS (búsqueda tabú), ACO (colonias de hormigas), ABC (colonias de abejas artificiales), AIS (sistema inmune artificial), FA (algoritmo de luciérnaga), BSA (algoritmo de búsqueda con retroceso), DE (evolución diferencial), ICA (algoritmo competitivo imperialista), WFA (algoritmo de flujo de agua), PEA (algoritmo de evolución de problemas), BFO (algoritmo de forrajeo bacteriano), TLBO (optimización basada en enseñanza-aprendizaje), EM (algoritmo basado en el electromagnetismo).

VI. CONCLUSIONES

La distribución espacial de plantas industriales involucra el proceso de ordenamiento físico de todos los factores de producción que conforman el sistema productivo de forma que se cumplan adecuada y eficientemente los objetivos estratégicos de la organización. Su consideración como una de las decisiones de diseño de mayor importancia en el marco de las estrategias de operaciones empresariales, así como su demostrada repercusión en los costes operacionales, la eficiencia y la productividad de los sistemas de fabricación, lo han convertido en un tema de amplia cobertura científica. Sin embargo, en la literatura se le ha dado mayor cobertura al

enfoque de planificación estático, cuando en realidad, en la práctica, la consideración de un enfoque dinámico o multiperíodo es más común. En este contexto, este artículo presentó una revisión sistemática de la literatura científica relativa al problema de la distribución dinámica de plantas industriales. La búsqueda bibliográfica fue realizada a través del motor de búsqueda de la WoS, enfocada a artículos publicados en revistas científicas del SCIE para una ventana temporal comprendida entre 2010 y 2019.

Como resultado del análisis del estado del arte relacionado con la DP en entornos dinámicos, se ha podido clasificar las DP dinámicas en distribuciones flexibles, cíclicas o robustas. Además, otros criterios relevantes como el tipo de

problema; el enfoque y la fase de planeación; la cantidad de instalaciones; la cantidad de pisos; la consideración del espacio; la forma, dimensiones y área de los departamentos y la configuración del manejo de materiales también han ido considerados.

Del mismo modo, teniendo en cuenta las características de los modelos matemáticos empleados en el diseño de la DP dinámica, se pudo clasificar la literatura consultada de acuerdo al tipo de modelo, el tipo de función objetivo, la consideración de la demanda cierta o incierta, el tipo de datos, la métrica de distancia y el enfoque de solución empleado.

Por último, como resultado de este estudio se identificaron, además, las tendencias actuales en el estudio de la DP en entornos dinámicos y, a su vez, se identificaron posibles pautas a seguir por investigaciones futuras en esta temática de tanta relevancia en el ámbito de la administración de operaciones.

REFERENCIAS

- [1] F. Ghassemi Tari and H. Neghabi, "A new linear adjacency approach for facility layout problem with unequal area departments," *J. Manuf. Syst.*, vol. 37, no. 1, pp. 93–103, Oct. 2015.
- [2] A. Kheirkhah, H. Navidi, and M. Messi Bidgoli, "Dynamic Facility Layout Problem: A New Bilevel Formulation and Some Metaheuristic Solution Methods," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 62, no. 3, pp. 396–410, Aug. 2015.
- [3] S. Altuntas and H. Selim, "Facility layout using weighted association rule-based data mining algorithms: Evaluation with simulation," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 1, pp. 3–13, Jan. 2012.
- [4] H. Navidi, M. Bashiri, and M. Messi Bidgoli, "A heuristic approach on the facility layout problem based on game theory," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 50, no. 6, pp. 1512–1527, Mar. 2012.
- [5] M.-Y. Ku, M. H. Hu, and M.-J. Wang, "Simulated annealing based parallel genetic algorithm for facility layout problem," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 6, pp. 1801–1812, 2011.
- [6] G. Moslemipour, T. S. Lee, and Y. T. Loong, "Performance Analysis of Intelligent Robust Facility Layout Design," *Chinese J. Mech. Eng.*, vol. 30, no. 2, pp. 407–418, Mar. 2017.
- [7] S. Emami and A. S. Nookabadi, "Managing a new multi-objective model for the dynamic facility layout problem," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 68, no. 9–12, pp. 2215–2228, Oct. 2013.
- [8] B. Turanoğlu and G. Akkaya, "A new hybrid heuristic algorithm based on bacterial foraging optimization for the dynamic facility layout problem," *Expert Syst. Appl.*, vol. 98, pp. 93–104, May 2018.
- [9] A. Al Hawarneh, S. Bendak, and F. Ghanim, "Dynamic facilities planning model for large scale construction projects," *Autom. Constr.*, vol. 98, pp. 72–89, Feb. 2019.
- [10] N. Pournaderi, V. R. Ghezavati, and M. Mozafari, "Developing a mathematical model for the dynamic facility layout problem considering material handling system and optimizing it using cloud theory-based simulated annealing algorithm," *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 8, 2019.
- [11] H. Hosseini-Nasab, S. Fereidouni, S. M. T. F. Ghomi, and M. B. Fakhrazad, "Classification of facility layout problems: a review study," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, no. 1–4, pp. 957–977, 2018.
- [12] G. Moslemipour, T. S. Lee, and D. Rilling, "A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 60, no. 1–4, pp. 11–27, 2012.
- [13] S. Kulturel-Konak and A. Konak, "A large-scale hybrid simulated annealing algorithm for cyclic facility layout problems," *Eng. Optim.*, vol. 47, no. 7, pp. 963–978, Jul. 2015.
- [14] V. Madhusudan Pillai, I. B. Hunagund, and K. K. Krishnan, "Design of robust layout for Dynamic Plant Layout Problems," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 61, no. 3, pp. 813–823, Oct. 2011.
- [15] Y. Peng, T. Zeng, L. Fan, Y. Han, and B. Xia, "An Improved Genetic Algorithm Based Robust Approach for Stochastic Dynamic Facility Layout Problem," *Discret. Dyn. Nat. Soc.*, vol. 2018, pp. 1–8, Dec. 2018.
- [16] S. Kulturel-Konak, "Approaches to uncertainties in facility layout problems: Perspectives at the beginning of the 21st Century," *J. Intell. Manuf.*, vol. 18, no. 2, pp. 273–284, 2007.
- [17] A. R. McKendall and A. Hakobyan, "Heuristics for the dynamic facility layout problem with unequal-area departments," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 201, no. 1, pp. 171–182, Feb. 2010.
- [18] C.-L. Yang, S.-P. Chuang, and T.-S. Hsu, "A genetic algorithm for dynamic facility planning in job shop manufacturing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 52, no. 1–4, pp. 303–309, Jan. 2011.
- [19] M. Abedzadeh, M. Mazinani, N. Moradinasab, and E. Roghanian, "Parallel variable neighborhood search for solving fuzzy multi-objective dynamic facility layout problem," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 1–4, pp. 197–211, Mar. 2013.
- [20] X. Guan, X. Dai, B. Qiu, and J. Li, "A revised electromagnetism-like mechanism for layout design of reconfigurable manufacturing system," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 63, no. 1, pp. 98–108, Aug. 2012.
- [21] F. Jolai, R. Tavakkoli-Moghaddam, and M. Taghipour, "A multi-objective particle swarm optimisation algorithm for unequal sized dynamic facility layout problem with pickup/drop-off locations," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 50, no. 15, pp. 4279–4293, 2012.
- [22] R. Kia, A. Baboli, N. Javadian, R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Kazemi, and J. Khorrami, "Solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system with alternative process routings, lot splitting and flexible reconfiguration by simulated annealing," *Comput. Oper. Res.*, vol. 39, no. 11, pp. 2642–2658, Nov. 2012.
- [23] A. R. McKendall and W.-H. Liu, "New Tabu search heuristics for the dynamic facility layout problem," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 50, no. 3, pp. 867–878, Feb. 2012.
- [24] P. Azimi and E. Saberi, "An efficient hybrid algorithm for dynamic facility layout problem using simulation technique and PSO," *Econ. Comput. Cybern. Stud. Res.*, vol. 47, no. 4, pp. 109–125, 2013.
- [25] H. Hosseini-Nasab and L. Emami, "A hybrid particle swarm optimisation for dynamic facility layout problem," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 51, no. 14, pp. 4325–4335, Jul. 2013.
- [26] M. Kaveh, V. M. Dalfard, and S. Amiri, "A new intelligent algorithm for dynamic facility layout problem in state of fuzzy constraints," *Neural Comput. Appl.*, vol. 24, no. 5, pp. 1179–1190, Apr. 2014.
- [27] R. Kia, N. Javadian, M. M. Paydar, and M. Saidi-Mehrabad, "A simulated annealing for intra-cell layout design of dynamic cellular manufacturing systems with route selection, purchasing machines and cell reconfiguration," *Asia-Pacific J. Oper. Res.*, vol. 30, no. 04, p. 1350004, Aug. 2013.
- [28] M. Mazinani, M. Abedzadeh, and N. Mohebbi, "Dynamic facility layout problem based on flexible bay structure and solving by genetic algorithm," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 5–8, pp. 929–943, Mar. 2013.
- [29] H. Samarghandi, P. Taabayan, and M. Behroozi, "Metaheuristics for fuzzy dynamic facility layout problem with unequal area constraints and closeness ratings," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 9–12, pp. 2701–2715, Aug. 2013.
- [30] G. Y.-H. Chen, "A new data structure of solution representation in hybrid ant colony optimization for large dynamic facility layout problems," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 142, no. 2, pp. 362–371, 2013.
- [31] N. Bozorgi, M. Abedzadeh, and M. Zeinali, "Tabu search heuristic for efficiency of dynamic facility layout problem," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 77, no. 1–4, pp. 689–703, Mar. 2015.
- [32] G. Y.-H. Chen and J.-C. Lo, "Dynamic facility layout with multi-objectives," *Asia-Pacific J. Oper. Res.*, vol. 31, no. 04, p. 1450027, Aug. 2014.
- [33] S. Hosseini, A. Al Khaled, and S. Vadlamani, "Hybrid imperialist competitive algorithm, variable neighborhood search, and simulated annealing for dynamic facility layout problem," *Neural Comput. Appl.*, vol. 25, no. 7–8, pp. 1871–1885, Dec. 2014.
- [34] R. Kia, F. Khaksar-Haghani, N. Javadian, and R. Tavakkoli-Moghaddam, "Solving a multi-floor layout design model of a dynamic cellular manufacturing system by an efficient genetic algorithm," *J.*

- Manuf. Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 218–232, Jan. 2014.
- [35] J. Nematian, “A robust single row facility layout problem with fuzzy random variables,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 72, no. 1–4, pp. 255–267, Apr. 2014.
- [36] H. Pourvaziri and B. Naderi, “A hybrid multi-population genetic algorithm for the dynamic facility layout problem,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 24, pp. 457–469, Nov. 2014.
- [37] A. Derakhshan Asl and K. Y. Wong, “Solving unequal-area static and dynamic facility layout problems using modified particle swarm optimization,” *J. Intell. Manuf.*, vol. 28, no. 6, pp. 1317–1336, Aug. 2017.
- [38] L. Li, C. Li, H. Ma, and Y. Tang, “An Optimization Method for the Remanufacturing Dynamic Facility Layout Problem with Uncertainties,” *Discret. Dyn. Nat. Soc.*, vol. 2015, pp. 1–11, 2015.
- [39] B. Ulutas and A. A. Islier, “Dynamic facility layout problem in footwear industry,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 36, pp. 55–61, Jul. 2015.
- [40] F. Zarea Fazlelahi, M. Pourmader, M. Gharakhani, and S. J. Sadjadi, “A robust approach to design a single facility layout plan in dynamic manufacturing environments using a permutation-based genetic algorithm,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 230, no. 12, pp. 2264–2274, Dec. 2016.
- [41] S. S. Hosseini and M. Seifbarghy, “A novel meta-heuristic algorithm for multi-objective dynamic facility layout problem,” *RAIRO-Operations Res.*, vol. 50, no. 4–5, pp. 869–890, Oct. 2016.
- [42] H. Pourvaziri and H. Pierreval, “Dynamic facility layout problem based on open queueing network theory,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 259, no. 2, pp. 538–553, Jun. 2017.
- [43] A. Tayal and S. P. Singh, “Integrating big data analytic and hybrid firefly-chaotic simulated annealing approach for facility layout problem,” *Ann. Oper. Res.*, vol. 270, no. 1–2, pp. 489–514, Nov. 2018.
- [44] R. Kumar and S. P. Singh, “A similarity score-based two-phase heuristic approach to solve the dynamic cellular facility layout for manufacturing systems,” *Eng. Optim.*, vol. 49, no. 11, pp. 1848–1867, Nov. 2017.
- [45] J. Liu, D. Wang, K. He, and Y. Xue, “Combining Wang–Landau sampling algorithm and heuristics for solving the unequal-area dynamic facility layout problem,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 262, no. 3, pp. 1052–1063, Nov. 2017.
- [46] S. Vitayasak, P. Pongcharoen, and C. Hicks, “A tool for solving stochastic dynamic facility layout problems with stochastic demand using either a Genetic Algorithm or modified Backtracking Search Algorithm,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 190, pp. 146–157, Aug. 2017.
- [47] Y. Xiao, Y. Xie, S. Kulturel-Konak, and A. Konak, “A problem evolution algorithm with linear programming for the dynamic facility layout problem—A general layout formulation,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 88, pp. 187–207, Dec. 2017.
- [48] S. Kulturel-Konak, “The zone-based dynamic facility layout problem,” *INFOR*, vol. 57, no. 1, pp. 1–31, 2019.
- [49] J. Li, X. Tan, and J. Li, “Research on Dynamic Facility Layout Problem of Manufacturing Unit Considering Human Factors,” *Math. Probl. Eng.*, 2018.
- [50] S. Vitayasak and P. Pongcharoen, “Performance improvement of Teaching-Learning-Based Optimisation for robust machine layout design,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 98, pp. 129–152, May 2018.
- [51] X. Wei, S. Yuan, and Y. Ye, “Optimizing facility layout planning for reconfigurable manufacturing system based on chaos genetic algorithm,” *Prod. Manuf. Res. Open Acces J.*, vol. 7, no. 1, pp. 109–124, 2019.
- [52] R. Muther, *Systematic Layout Planning*. Boston: Industrial Education Institute, 1961.
- [53] P. Sharma and S. Singhal, “Implementation of fuzzy TOPSIS methodology in selection of procedural approach for facility layout planning,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 5–8, pp. 1485–1493, Feb. 2017.
- [54] Y. Bukchin and M. Tzur, “A new MILP approach for the facility process-layout design problem with rectangular and L/T shape departments,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 52, no. 24, pp. 7339–7359, Dec. 2014.
- [55] R. D. Meller, Z. Kirkizoglu, and W. Chen, “A new optimization model to support a bottom-up approach to facility design,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 37, no. 1, pp. 42–49, Jan. 2010.
- [56] J. Grobelny and R. Michalski, “A novel version of simulated annealing based on linguistic patterns for solving facility layout problems,” *Knowledge-Based Syst.*, vol. 124, pp. 55–69, May 2017.