

EL CÁLCULO DEL NÚMERO DE VEHÍCULOS AGV'S NECESARIOS PARA EL MANEJO DE MATERIALES DESDE UN ENFOQUE SISTÉMICO

THE CALCULATION OF THE NUMBER OF REQUIRED AGV'S FOR MATERIAL HANDLING FROM A SYSTEMIC APPROACH

María Guadalupe Uribe Centeno

Tecnológico Nacional de México IT de Celaya, México
m2303010@itcelaya.edu.mx

Salvador Hernández González

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

José Alfredo Jiménez García

Tecnológico Nacional de México IT de Celaya, México
josealfredo.jimenez@itcelaya.edu.mx

Vicente Figueroa Fernández

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

Recepción: 11/abril/2024

Aceptación: 26/febrero/2025

Resumen

En este trabajo se realizará la construcción de un diagrama sistémico que permita analizar el cálculo del número de vehículos AGV's necesarios en el manejo de materiales de los sistemas de producción mediante la implementación de la teoría general de sistemas (TGS). Al ser una metodología que asume que todo fenómeno no se compone de las variables que le afectan, sino que está rodeado de otros sistemas que afectan a su resultado permite desarrollar un marco de referencia para analizar conjuntamente un fenómeno con un lenguaje común y entendible por especialistas de diferentes disciplinas. Finalmente, se abordará un caso de estudio, tomado de la obra "Manufacturing Facilities: Location, Planning, and Design" del autor [Sule, 2008], donde un vehículo autónomo (AGV) entregará piezas pequeñas desde el almacén a cuatro talleres en una planta y se encontrará la cantidad óptima de vehículos que permita maximizar el throughput total del sistema.

Palabras Clave: Manejo de materiales, Teoría general de sistemas, Vehículos de Guiado Automático (AGV's).

Abstract

*In this work, a systemic diagram will be constructed to analyze the calculation of the number of AGV vehicles needed for material handling in production systems through the implementation of General Systems Theory (GST). As a methodology that assumes any phenomenon is not solely composed of the variables affecting it but is surrounded by other systems influencing its outcome, it allows for the development of a reference framework to jointly analyze a phenomenon using a common language understandable to specialists from different disciplines. Finally, a case study will be addressed, taken from the book *Manufacturing Facilities: Location, Planning, and Design* by [Sule, 2008], where an autonomous vehicle (AGV) will deliver small parts from the warehouse to four workshops in a plant, and the optimal number of vehicles will be determined to maximize the system's total throughput.*

Keywords: Automatic Guided Vehicles (AGVs), General systems theory, Material handling.

1. Introducción

El manejo de los materiales puede llegar a ser el mayor problema de las empresas, porque agrega muy poco valor al producto, pero consume parte del presupuesto, representando para algunas empresas hasta el 50% de su costo de producción [Mora García, 2011; Mercado H., 2008]. Un buen manejo de materiales evita dificultades y contratiempos que se pueden convertir en problemas muy serios para la empresa y facilita el control en los gastos de operación, permitiendo mayores utilidades [Mercado H., 2008]. Un mal manejo de materiales provoca sobre estadías, un lento movimiento de materiales por la empresa y/o almacén, pérdidas de materiales, causar serios daños a los artículos, clientes inconformes, faltas de seguridad para los trabajadores y representar un costo que no es recuperable [Mora García, 2011]. El sistema de manipulación de materiales también es un área privilegiada para la automatización. Por dicha razón los vehículos de guiado

automático se están convirtiendo en una atracción para las líneas de producción automatizadas por estar diseñados para reemplazar los sistemas convencionales [Prombanpong, Kiattiphatthanukul, Songsanan y Sukin, 2012].

Los costos actuales de los AGV suelen ser elevados, oscilando entre los \$40,000 y \$200,000 [Goodwin, 2022]. Por dicha razón es importante determinar la cantidad adecuada de vehículos durante la etapa inicial del diseño de un sistema de vehículos guiados automatizados. Para estimar la cantidad necesaria de vehículos AGV's se implementa el modelo analítico dado por ecuaciones 1 a 4 [Sule, 2008].

$$t_e = t_1 + \frac{L_d}{v} + t_u + \frac{L_e}{v} \quad (1)$$

$$t_{tu} = \sum ((t_e)(N_v)) \quad (2)$$

$$t_{WL} = \frac{t_{tu}}{F_{ct}} \quad (3)$$

$$n = \text{entero máximo} \geq \frac{t_{WL}}{t_A} \quad (4)$$

Donde:

t_e : tiempo de entrega.

t_1 : tiempo de carga.

L_d : distancia desde la carga hasta la descarga.

v : velocidad de viaje.

t_u : tiempo de descarga.

L_e : distancia de movimiento hasta la próxima entrega.

t_{tu} : tiempo total de uso del AGV.

N_v : número de viajes por hora.

t_{WL} : carga de trabajo total..

F_{ct} : factor de congestión del tráfico a considerar (en decimales)

n : número de vehículos AGV necesarios

t_A : tiempo de disponible.

Para esta Investigación se implementó la teoría general de sistemas para analizar el cálculo del número de vehículos AGV's necesarios en el manejo de materiales

de los sistemas de producción mediante la construcción de un diagrama sistémico. Dicha metodología de estudio asume que todo fenómeno no se compone de las variables que le afectan, sino que está rodeado de otros sistemas que afectan a su resultado. Lo anterior, también ocurre a la inversa, el objeto de estudio puede afectar a los sistemas que le rodean [Marín García, 2023]. Además, se abordará un caso de estudio, donde un vehículo autónomo (AGV) entregará piezas pequeñas desde el almacén a cuatro talleres en una planta y se encontrará la cantidad óptima de vehículos que permita maximizar el throughput total del sistema.

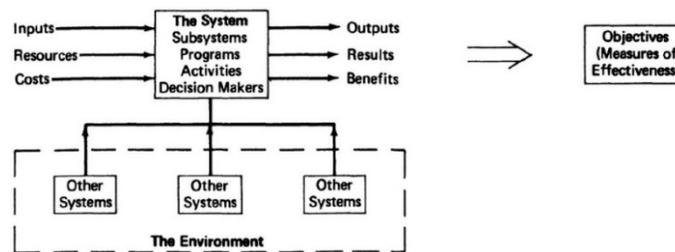
2. Métodos

La metodología de la TGS se basa en el análisis de los fenómenos como totalidades lógicas constituidas por partes interactuantes entre sí (sistemas). La TGS crea un Nuevo Sistema, constituido por Oídos Generalizados (Partes) que se comunican (Interactúan) entre sí, para analizar un fenómeno (Objetivo). Con la metodología se busca desarrollar un marco de referencia que contenga un lenguaje común que permita a dos o más especialistas de disciplinas diferentes analizar conjuntamente un fenómeno [Hurtado Carmona, 2011].

Según los autores [Van Gigch, 1991 & Hurtado Carmona, 2011], para realizar un mejor análisis a un sistema en estudio, este se debe caracterizar por los conceptos (Figura 1):

- **Objetivos:** representan el producto ideal que todo sistema debe generar. Pueden ser objetivos generales y/o específicos, en donde la unión de los específicos forma a los generales.
- **Sinergia:** describe y determina la presencia de relaciones entre las partes que conforman a un sistema.
- **Recursividad:** es la característica que tienen los sistemas de estar compuestos por elementos (subsistemas) que a su vez son, se comportan y se estudian como sistemas.
- **Corrientes de entrada:** son los insumos o materia prima que el sistema necesita para cumplir sus objetivos.

- **Proceso de conversión:** transforma los elementos de entrada en elementos de salida de manera tal que el sistema pueda lograr sus objetivos.
- **Corrientes de salida:** son los resultados del proceso de conversión del sistema y se cuentan como productos, resultados, consecuencias o beneficios.
- **Comunicación de retroalimentación:** es la información, producto del análisis de las corrientes de salida, que es introducida al sistema con el fin de realizar los ajustes necesarios para cumplir los objetivos.
- **Fronteras:** existen dos tipos de fronteras de los sistemas. La frontera física delimita el espacio geográfico o espacial en el que interactúa el sistema. La frontera funcional expresa límites con relación a la realización de actividades.
- **Entorno:** contiene todas las partes y sistemas del supersistema que no pertenecen al sistema en estudio.



Fuente: Van Gigch, J. [1991].

Figura 1 Elementos de un sistema.

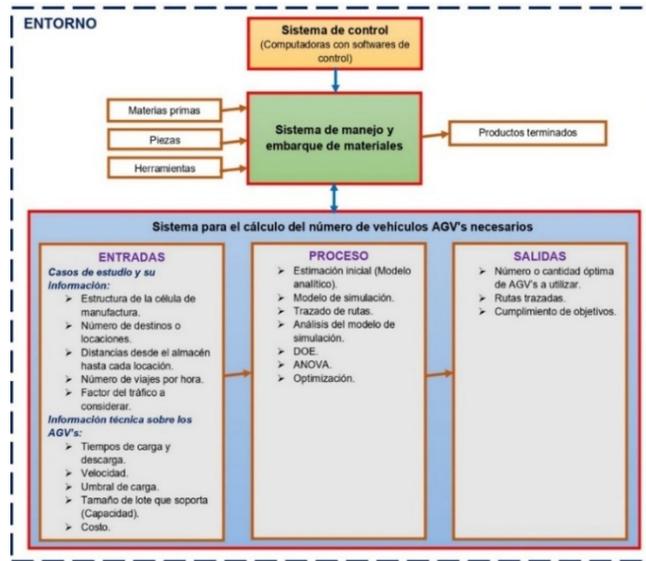
3. Resultados

En la Figura 2 se muestra el diagrama realizado del sistema para calcular el número de vehículos AGV's necesarios para el manejo de materiales. En dicha figura se puede observar el sistema principal con sus respectivos elementos, así como los subsistemas con los que se relaciona.

Entradas

Suponiendo que se elige un sistema de AGV para la entrega de piezas pequeñas desde el almacenamiento a cuatro talleres en una planta, como se muestra en la Figura 3. Determinar la cantidad de vehículos necesarios, dada la información en la Tabla 1. Se debe suponer que cada vehículo puede transportar piezas solo hacia y

desde un taller a la vez. Los AGV bajo consideración pueden viajar a una velocidad de 60.96 m/min (200 pie/min) y el factor de congestión del tráfico a considerar es de 0.85.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Diagrama del sistema.



Fuente: Sule, D. R. [2008]

Figura 3 Layout.

Tabla 1 Datos del sistema de distribución con AGV (Sule, 2008).

Taller	Distancia desde el almacén	Número de viajes (por hora)	Tiempo de Carga/Descarga (min)
1	91.44 m (300 pie)	14	2
2	152.4 m (500 pie)	16	3
3	182.88 m (600 pie)	5	3
4	243.84 m (800 pie)	8	2

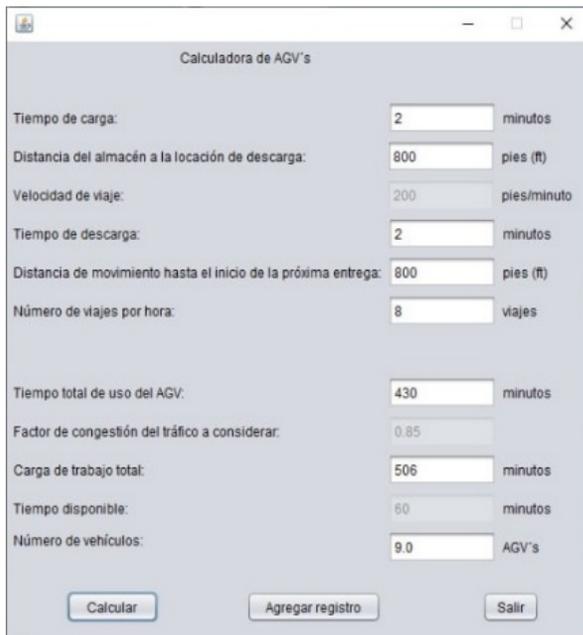
Fuente: Sule, D. R. [2008].

Proceso

El proceso para calcular la cantidad ideal de vehículos AGV's a utilizar en el proceso de traslado de mercancías en el sistema analizado, estuvo conformado por

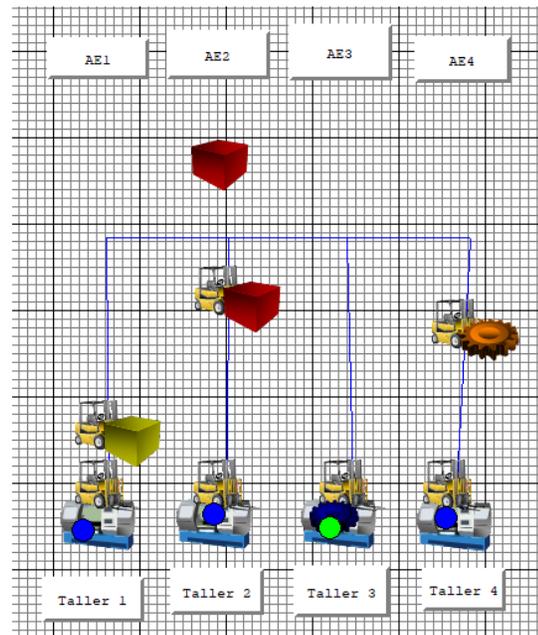
una estimación inicial (Figura 4), un modelo de simulación (Figura 5), la creación de un diseño de experimentos (Tablas 2 y 3) e implementación de ANOVA en el sistema USCS (Tabla 4) que permitió obtener el metamodelo de regresión (Ecuaciones 5a y 5b), la creación de una gráfica tridimensional de superficie de respuesta (Figura 6), para finalizar con la construcción y resolución en Lingo de un modelo de optimización mixto entero no lineal (Figura 7). Se puede observar que de acuerdo con el criterio de Valor p los modelos son significativos por lo que se considera acertado el ajuste que se seleccionó. Como resultado se obtuvo un metamodelo de regresión para TH_{total} (*unidades/min*) (Ecuaciones 5a y 5b), donde A es el número de vehículos y B' la velocidad en m/min y B la velocidad en pie/min .

$$TH_{total} = -38.518 + 45.741A + 0.17449B' - 3.3920A^2 - 0.002014AB' \quad (SI) \quad (5a)$$

$$TH_{total} = -38.518 + 45.741A + 0.57246B - 3.3920A^2 - 0.006606AB(USCS) \quad (5b)$$


Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Estimación inicial.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Modelo de simulación.

Tabla 2 Niveles de los factores.

Factor	Nombre	Bajo (-1)	Alto (+1)
A	Vehículos	1	9
B	Velocidad	30.48 m/min (100 pie/min)	91.44 m/min (300 pie/min)

Fuente: elaboración propia

Tabla 3 Matriz del diseño experimental para TH_{total} .

Run	Vehículos	Velocidad	%Operación				Respuesta TH_{total} (unidades/min)
			Taller 1	Taller 2	Taller 3	Taller 4	
1	5	60.96 m/min (200 pie/min)	49.93	43.05	67.04	53.13	213.15
2	9	30.48 m/min (100 pie/min)	35.10	29.88	50.00	34.39	149.37
3	1	30.48 m/min (100 pie/min)	9.81	8.59	26.33	15.63	60.36
...
15	9	30.48 m/min (100 pie/min)	35.67	28.91	50.00	35.81	150.39

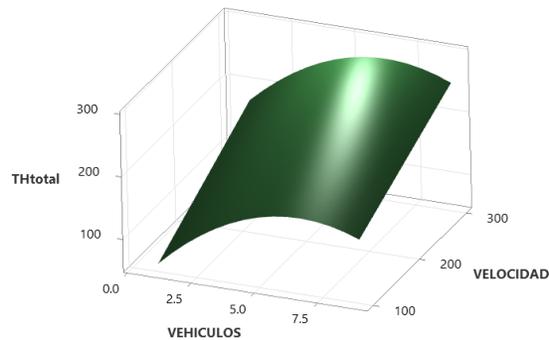
Fuente: elaboración propia

Tabla 4 ANOVA para el TH_{total} (throughput total).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	4	63237.7	15809.4	129521.72	0.000
A	1	11081.8	11081.8	90789.97	
B	1	15346.2	15346.2	125727.02	
A^2	1	7069.2	7069.2	57915.86	
AB	1	83.8	83.8	686.50	
Error	10	1.2	0.1		
Total	14	63238.9			

Fuente: elaboración propia

Posteriormente, se creó una gráfica tridimensional de superficie de respuesta para el TH_{total} (Figura 6).



Fuente: elaboración propia

Figura 6 Superficie de respuesta para el TH_{total} .

De acuerdo con lo que se presenta en las superficies de respuesta se observa que para maximizar el TH_{total} , el número máximo de vehículos AGV que se deben utilizar son 5 con una velocidad de 60.96 m/min (200 pie/min).

Para optimizar el TH_{total} se construyó en Lingo el modelo de optimización mixto entero no lineal que se muestran en la Figura 7. En dicho modelo la variable “Velocidad (B)” es continua y la variable “Vehículos (A)” es entera.

```
Lingo Model - OPTIMIZACION TESIS TH SIN FALLAS
[Throughput]Max=-38.518+45.741*A+0.57246*B-3.3920*A*A-0.006606*A*B;
A>=1;
B>=100;
A<=9;
B<=300;
@gin(A);
```

Fuente: elaboración propia

Figura 7 Modelo de optimización en Lingo para TH_{total} .

Salidas

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos con el modelo de optimización para TH_{total} , donde se interpreta que se deben utilizar 6 vehículos AGV's con una velocidad de 91.44 m/min (300 pie/min), con los cuales se obtendría un throughput total (TH_{total}) de 273.6632 ($unidades/min$).

Variable	Value	Reduced Cost
A	6.000000	-3.055193
B	300.0000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
THROUGHPUT	273.6632	1.000000
2	5.000000	0.000000
3	200.0000	0.000000
4	3.000000	0.000000
5	0.000000	0.5328240

Fuente: elaboración propia

Figura 8 Resultados obtenidos en la optimización con Lingo para TH_{total} .

Con los parámetros óptimos, definidos con el modelo de optimización en Lingo se utilizó nuevamente el modelo de simulación para correr tres replicas y analizar el TH_{total} (Tablas 5 a 7).

Tabla 5 Throughput (TH_{total}) por estimación inicial.

Vehículos	Velocidad	TH_{total} (simulado)	TH_{total} (analítico)
9	60.96 m/min (200 pie/min)	214.51 $unidades/min$	201.00 $unidades/min$
		214.76 $unidades/min$	
		215.02 $unidades/min$	

Fuente: elaboración propia

Tabla 6 Throughput (TH_{total}) por diseño de experimentos.

Vehículos	Velocidad	TH_{total} (simulado)	TH_{total} (analítico)
5	60.96 m/min (200 pie/min)	213.15 unidades/min	213.27 unidades/min
		212.97 unidades/min	
		213.7 unidades/min	

Fuente: elaboración propia

Tabla 7 Throughput (TH_{total}) por optimización.

Vehículos	Velocidad	TH_{total} (simulado)	TH_{total} (analítico)
6	91.44 m/min (300 pie/min)	251.16 unidades/min	273.66 unidades/min
		251.21 unidades/min	
		251.54 unidades/min	

Fuente: elaboración propia

4. Discusión

Un sistema para realizar el cálculo del número de vehículos AGV's necesarios para el manejo de materiales en una empresa estaría relacionado directamente con el sistema de manejo de materiales que implemente la organización. Dicho sistema, a su vez, tendría relación con un Sistema de Control conformado por computadoras con softwares de control instalados.

El sistema para el cálculo del número de vehículos AGV's necesarios implica la necesidad de información de entrada, una serie de procesos o metodologías que transformaran dicha información para finalmente obtener una o varias salidas u objetivos. Las entradas estarían representadas por la información de los casos de estudio o situaciones que se buscan analizar, así como información técnica de los vehículos AGV's que se contempló utilizar. Dicha información pasaría por una serie de metodologías propuestas y necesarias para finalmente poder obtener la cantidad óptima de vehículos a utilizar para lograr los objetivos que la organización persiga (salidas).

La relación existente entre el sistema para el cálculo del número de vehículos AGV's necesarios y el sistema de manejo y embarque de materiales tiene un sentido bidireccional. Esto se debe a que, la información proporcionada por el sistema de manejo de materiales afecta al funcionamiento del sistema para el cálculo. Por otro lado, la información obtenida en las salidas del sistema para el cálculo de los vehículos necesarios (el número óptimo de AGV's a utilizar y las rutas trazadas)

afectarán el desempeño del sistema de manejo de materiales, contribuyendo a la mejora de su eficiencia, reducción de los costos de inversión y el cumplimiento de los objetivos de la organización.

Finalmente, el sistema de manejo de materiales se relaciona con un sistema de control. Este sistema se encargaría de controlar por computadora los vehículos AGV's, indicándoles las rutas que deberán seguir para realizar correcta y eficientemente el manejo de los materiales por el almacén y las estaciones de trabajo de la empresa.

La metodología e información generada en este trabajo de investigación será útil para las personas responsables de la toma de decisiones al momento de incorporar sistemas de vehículos guiados automatizados en los sistemas de producción para el traslado de mercancías, piezas, herramientas y/o accesorios.

Al automatizar el transporte de materiales, se disminuye la necesidad de operarios dedicados exclusivamente a esta tarea.

Los AGVs están programados para moverse eficientemente dentro del espacio disponible, permitiendo una mejor optimización del área de producción.

Los AGVs funcionan en rutas optimizadas y minimizan tiempos de transporte, lo que incrementa la velocidad de movimiento de materiales.

Al ser automatizados y controlados, los AGVs reducen el daño de materiales y productos que puede resultar del manejo manual.

Al integrarse los AGVs con sistemas de gestión de inventarios, se obtiene un flujo de materiales más preciso y con menor posibilidad de errores.

5. Conclusiones

Los sistemas de manipulación de materiales también son un área privilegiada para la automatización. Por esta razón, los vehículos de guiado automático (AGV's) al estar diseñados para reemplazar a los sistemas convencionales se están convirtiendo en una atracción para las líneas de producción automatizadas [Prombanpong, Kiattiphatthanukul, Songsanan y Sukin, 2012].

En la actualidad, los costos de los vehículos AGV suelen ser elevados, oscilando entre los \$40,000 y \$200,000 [Goodwin, 2022]. Por dicha razón es importante

determinar la cantidad adecuada de vehículos durante la etapa inicial del diseño de un sistema de vehículos guiados automatizados [Tao, Chen, Liu, Liu, & Fu, 2010]. Por otro lado, la cantidad de vehículos influye en gran medida en el rendimiento de sistemas multi-AGV, por lo que, es esencial determinar el tipo y la cantidad correcta de vehículos [Rjeb, Gayon, & Norre, 2021]. Lo anterior se puede lograr mediante la combinación de simulación y modelos analíticos para el diseño y análisis de los requisitos de vehículos AGV's [Fethi & Mehdi, 2019].

La aplicación de la metodología de la teoría general de sistemas al estudio del cálculo del número de vehículos AGV's necesarios para el manejo de materiales permitió mejorar la comprensión de los elementos que caracterizan dicho sistema.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Fethi, A., & Mehdi, S. (2019). The effect of AGVs number on a flexible manufacturing system. The 3rd International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID), 25-27.
- [2] Goodwin, L. (25/10/2022). Flexqube. <https://www.flexqube.com/es-mx/noticias/cuanto-cuesta-un-agv/>.
- [3] Hurtado Carmona, D. (2011). Teoría General de Sistemas: un enfoque hacia la ingeniería de sistemas 2Ed. Reino Unido: Lulu.com.
- [4] Mercado H., S. (2008). Tráfico internacional. Administración y Aplicaciones. México: Limusa.
- [5] Mora García, L. (2011). Gestión logística en centros de distribución, bodegas y almacenes. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- [6] Marín García, A. (09 de Octubre de 2023). economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/teoria-general-de-sistemas-tgs.html>.
- [7] Prombanpong, S., Kiattiphatthanukul, W., Songsanan, A., & Sukin, A. (2012). The Design of an AGV in the Manufacturing Cell. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 1006-1009.
- [8] Rjeb, A., Gayon, J. P., & Norre, S. (2021). Sizing of a homogeneous fleet of robots in a logistics warehouse. IFAC PapersOnLine, 552–557.

- [9] Sule, D. R. (2008). *Manufacturing Facilities: Location, Planning, and Design*. New York: CRC Press.
- [10] Tao, Y., Chen, J., Liu, M., Liu, X., & Fu, Y. (2010). An Estimate and Simulation Approach to Determining The Automated Guided Vehicle Fleet Size in FMS. *IEEE*, 342-435.
- [11] Van Gigch, J. (1991). *System design modeling and metamodeling*. New York: Springer.