

# **MODELO MATEMÁTICO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN VEHÍCULO DE GUIADO AUTOMÁTICO PARA LA INDUSTRIA 4.0**

*MATHEMATICAL MODEL AND STRUCTURAL ANALYSIS OF AN  
AUTOMATED GUIDED VEHICLE FOR INDUSTRY 4.0*

***Hiroki Sasamoto Cruz***

Universidad Panamericana, México  
*hsasamoto@up.edu.mx*

***Ramiro Velázquez Guerrero***

Universidad Panamericana, México  
*rvelazquez@up.edu.mx*

***Sebastián Gutiérrez Calderón***

Universidad Panamericana, México  
*jsgutierrez@up.edu.mx*

***Luis Arturo Méndez Alba***

Universidad Panamericana, México  
*lamendez@up.edu.mx*

***Gastón Goñi Tascón***

Universidad Panamericana, México  
*glgoni@up.edu.mx*

**Recepción:** 3/noviembre/2021

**Aceptación:** 21/diciembre/2021

## **Resumen**

Este artículo presenta el diseño e implementación de un vehículo de guiado automático (AGV) destinado al transporte de materiales y herramientas en entornos industriales. Nuestra propuesta de AGV presenta un diseño innovador inspirado en las culturas prehispánicas de México. La implementación del prototipo fue realizada con materiales de alta resistencia y procesos de manufactura digital. Un análisis por elementos finitos (FEA) muestra que el AGV es capaz de transportar cargas de 700 kg sin sufrir ningún daño estructural y que los casos críticos donde se contemplan colisiones solo causarían daños mínimos. A su vez, el trabajo introduce un modelo matemático para entender las ecuaciones que definen la dinámica del AGV. Dicho

modelo permite simular su movimiento y puede ser utilizado para mejorar la productividad, incrementar el nivel de automatización y reducir los costos de transportación de materiales en la industria 4.0.

**Palabras Clave:** Análisis por elementos finitos (FEA), modelado, simulación, transporte de materiales, vehículo de guiado automático (AGV).

## **Abstract**

*This paper presents the design and implementation of an Automated Guided Vehicle (AGV) devoted to transport materials and tools in industrial facilities. An innovative design inspired in the pre-Hispanic cultures of Mexico is proposed for the AGV. The implementation of a prototype was conducted with highly resistant materials and automated manufacturing processes. A finite element analysis (FEA) shows that the AGV is capable of transporting 700 kg loads without suffering any structural damage and that critical cases involving collisions might cause only minimal harm. A mathematic model is introduced to better understand the equations governing its dynamics. Such model allows the simulation of the AGV's motion and can be used to improve productivity, increase automation, and reduce transportation costs in smart factories.*

**Keywords:** Automated guided vehicle (AGV), finite element analysis (FEA), material transportation, modeling, simulation.

## **1. Introducción**

La transportación de herramientas y materiales es un proceso clave en la industria de manufactura. El movimiento de materia prima, componentes, herramientas y productos terminados es uno de los tópicos principales en la optimización de procesos y líneas de producción [Urzúa, 2019].

Desde el inicio de la industria 3.0, el uso de robots móviles para el transporte eficiente de materiales ha ido incrementando gradualmente. Sin duda, se han convertido en elemento esencial de la industria 4.0. Los AGV (Automated Guided Vehicles) y los SDV (Self Driven Vehicles) son robots móviles cuyo propósito es mejorar el traslado de productos en espacios industriales como bodegas, fábricas o

plantas ensambladoras aumentando la confianza y seguridad en el proceso, así como reduciendo sus tiempos, costos e intervención humana.

Existe una gran diferencia entre los AGVs y los SDVs y se puede resumir en una comparación: automatización vs autonomía. Mientras que los AGVs dependen de cintas magnéticas, antenas y códigos de barras para poder desplazarse en un espacio definido, los SDVs cuentan con elementos como cámaras y/o LIDARs que, aunados a algoritmos de visión computacional y navegación autónoma, les permiten adaptarse a escenarios dinámicos. Si bien se puede concluir que los SDVs son vehículos dotados de una “inteligencia” superior a la de los AGVs para el transporte de materiales, la elección de uno u otro depende de múltiples factores como el costo, la complejidad de la tarea y los objetivos. En este trabajo centramos nuestra atención en los AGVs.

Actualmente se pueden encontrar múltiples prototipos en el mercado y en la literatura. [Cawood, 2015] propone un diseño de bajo costo orientado a la industria automotriz. Su prototipo utiliza cintas magnéticas y una serie de sensores con el fin de obtener suficiente información del entorno y así maniobrar con un control de baja complejidad. De manera similar, [Liu, 2018] introdujo un AGV que se guía por una serie de cintas magnéticas ubicadas en el piso de un almacén. [Martínez, 2010] describe un sistema guía basado en láser y odometría para aplicaciones industriales. [Xu, 2019] también propuso un sistema basado en tecnología láser, a diferencia, su diseño calcula la posición del AGV de manera más precisa apoyándose de las reflexiones del láser. [Taha, 2012] implementó un AGV capaz de detectar códigos de barras para guiar el vehículo en un ambiente industrial. [Liu, 2013] presentó un prototipo de almacén inteligente que recolecta información a través de códigos de barras y tarjetas RFID.

El AGV más icónico en la industria es sin duda el robot Kiva utilizado por Amazon en sus instalaciones. Esta empresa utiliza AGVs para mejorar el manejo de sus productos y agilizar la logística de sus centros de distribución, ver figura 1. Amazon ha utilizado AGVs desde el año 2012 y actualmente cuenta con más de 45,000 unidades en operación en sus 20 centros de distribución a nivel mundial [Murphy, 2012].



Figura 1 El AGV de Kiva utilizado por la compañía Amazon.

Otros modelos que destacan en el mercado son el iGo neo CX 20 de Dematic Co. [Dematic Co, 2021] y los prototipos del grupo AGVE [AGVek, 2021] y Logic Cube [Logicbus, 2021]. En este contexto, este artículo presenta un novedoso diseño capaz de desplazar cargas importantes dentro de industrias inteligentes o industria 4.0. El primer prototipo cuenta con una masa de 120 kg y es capaz de mover hasta 700 kg. Esta primera versión se guía a través de una cámara de video capaz de detectar líneas en el piso y utiliza un sensor láser en la parte frontal para identificar obstáculos no previstos a lo largo de su trayecto. El presente trabajo aborda la parte del diseño, el proceso de manufactura del prototipo y la electrónica vinculada (Sección 2. Métodos), la validación del diseño a través del análisis por elementos finitos y el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico del AGV (Sección 3. Resultados), la discusión de los resultados obtenidos (Sección 4. Discusión) y las conclusiones y trabajos a futuro que cierran el trabajo (Sección 5. Conclusiones).

## **2. Métodos**

En esta sección se aborda el diseño y la implementación del prototipo de AGV. Para el concepto estético del vehículo, se eligió utilizar un lenguaje visual que fuera capaz de comunicar los siguientes conceptos: tecnología avanzada, aspecto robusto, una evidente diferencia respecto de soluciones disponibles en el mercado, un desarrollo mexicano. El reto consistió en lograr concretar un diseño que abarcara todos estos conceptos de forma competitiva.

Dentro de las propuestas se encontraban conceptos basados en íconos de la historia prehispánica de México tales como el guerrero águila, el guerrero jaguar y deidades como Quetzalcóatl. El diseño elegido consta de una integración de diferentes elementos clave encontrados en diferentes piezas de la cultura mexicana. Los principales atributos para resaltar son la forma alargada, inspirada en las serpientes emplumadas encontradas en la zona arqueológica del centro histórico de la Ciudad de México figura 2a, y la cabeza de jaguar figura 2c que tiene una gran similitud con las encontradas en zonas arqueológicas mayas. En las figuras 2b y 2d se muestran los bocetos finales que integran estos elementos. Una vez establecido el diseño, se comenzó con la etapa de modelado 3D mediante software CAD. La figura 3 muestra la vista isométrica del modelo.



a) *Serpiente prehispánica en pirámide azteca.*



b) *Diseño del cuerpo del AGV*



c) *Cabeza de jaguar.*



b) *Diseño de la parte frontal del AGV.*

Figura 2 Inspiración y diseño del AGV.

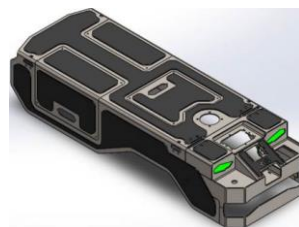


Figura 3 Modelo CAD en 3D del prototipo de AGV.

El material elegido para la carcasa exterior fue acero inoxidable 304 (AISI 304 C-12) debido a las ventajas que ofrece por ser un acero inoxidable austenítico: no

magnético, valor adecuado en resistencia mecánica y no se ve afectado por procesos térmicos. Adicionalmente, posee buenas propiedades de ductilidad, resistencia a golpes y es estético. Todas las ventajas antes mencionadas se vieron reflejadas en los diferentes procesos de manufactura a los que se sometieron las láminas de materia prima: en la figura 4a se muestra la etapa de corte láser en donde se dio forma a las piezas. En la figura 4b se aprecia la lámina doblada con ayuda de máquinas de control numérico (CNC) y soldada a uno de los soportes laterales. El ensamblaje final se presenta en la figura 5. A nivel de implementación electrónica, la figura 6 muestra el diagrama de bloques del sistema del prototipo

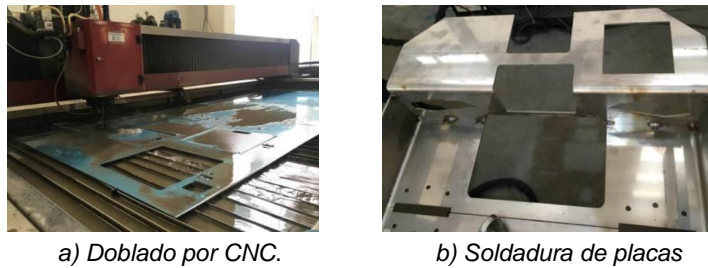


Figura 4 Detalles de la manufactura del AGV.



Figura 5 Ensamblaje final de la estructura.

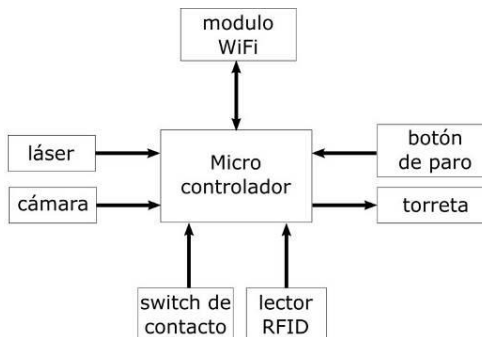


Figura 6 Componentes del sistema electrónico del AGV.

Esta propuesta consta de cuatro sensores:

- Sensor láser encargado de detectar obstáculos en la trayectoria del vehículo.
- Cámara responsable de la detección de líneas en el piso que sirven de guía al AGV a lo largo del complejo industrial.
- Sistema RFID (identificación por radio frecuencia) que consta de un lector de tarjetas en el vehículo y unas tarjetas ubicadas en las zonas donde el AGV necesita detenerse
- Switch de contacto ubicado al frente del vehículo con el fin de detectar una colisión. Aunado a esto, el AGV está equipado con un botón de paro de emergencia para que cualquier operador sea capaz de detenerlo, y una torreta que se enciende cada que el vehículo se encuentra en movimiento.

La unidad de control principal es un microprocesador de la marca Atmel modelo MYDSAM9X5-V2 habilitado para ambientes difíciles; se eligió Linux como sistema operativo. El procesador opera a 400 MHz y está destinado principalmente al procesamiento de imágenes y algoritmos de visión. La tarjeta embebida está dotada de una amplia variedad de puertos y periféricos, entre estos se encuentra un módem que se utiliza para comunicar al AGV con una estación central de monitoreo fija.

Con los elementos antes mencionados, es posible desplegar una infraestructura de comunicación por red inalámbrica de sensores (WSN por sus siglas en inglés) que se integre al funcionamiento de la nave industrial [Garzón, 2021]. La figura 7 muestra la arquitectura principal de dicha red inspirada en [Del Valle, 2020]: un grupo de  $n$  número de AGVs transmiten la información recaba a través de su antena Wi-Fi a un Gateway que sirve de puente entre los vehículos autónomos y la estación central. Una vez recabada la información, es posible visualizarla y de ser necesario, enviar una serie de instrucciones a los vehículos a través del mismo medio.

### **3. Resultados**

En esta sección de resultados abordamos particularmente el análisis mecánico de la estructura propuesta y el modelo matemático que explica su dinámica. El prototipo de AGV en pruebas preliminares se muestra en la figura 8.

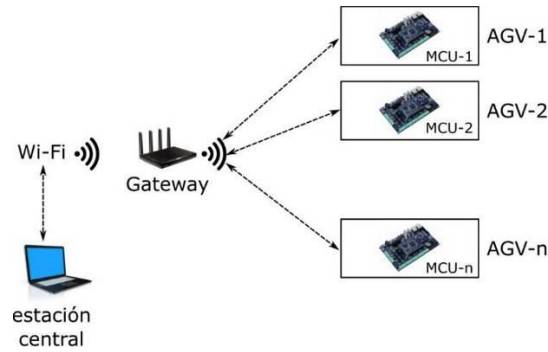


Figura 7 Grupo de AGVs en una WSN.

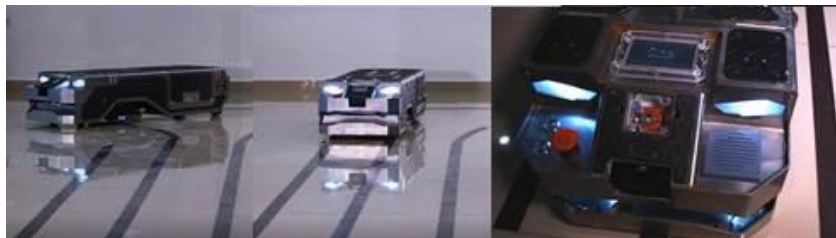


Figura 8 Primer prototipo de AGVs en tarea de seguimiento de líneas.

Para analizar la estructura del AGV, se utilizó una herramienta de análisis por elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés) con el fin de determinar los esfuerzos sufridos por el chasis en instantes de interés. Con este tipo de herramientas es posible identificar fallas en el diseño debido a una geometría deficiente o zonas débiles debido a los esfuerzos sufridos en determinadas áreas [Magos, 2018], [Hernández, 2009].

El interés de evaluar la deformación bajo ciertos escenarios yace en el tipo de componentes que se encuentran dentro del robot y principalmente, debido a la forma de sujeción. Si el soporte de las llantas sufriera una ligera flexión durante la operación normal, entonces el AGV podrá continuar su operación, pero si debido a un impacto, uno de los soportes de los elementos guía sufre una deformación, entonces es probable que se comprometan los elementos electrónicos.

El modelo original integra componentes tanto mecánicos como electrónicos tales como una computadora, sensores, baterías y cámara, entre otros. Para simplificar la simulación, sólo se consideraron los elementos estructurales dentro del análisis de deformación y se puso especial atención a las zonas que sostienen los



componentes electrónicos para evitar deformaciones. La tabla 1 muestra los parámetros utilizados para el análisis de elementos finitos.

Tabla 1 Resumen de los parámetros involucrados en el FEA del prototipo de AGV.

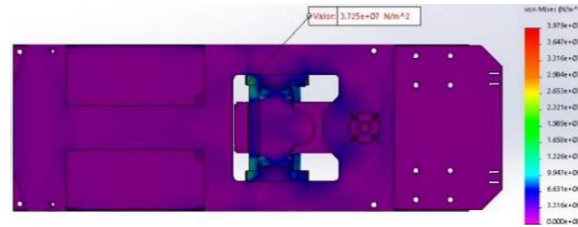
Parámetro	Valor	Unidades	Referencia
$V_{min}$	0.028	m/s	Parámetro de diseño
$V_{max}$	0.833	m/s	Parámetro de diseño
$\mu$	0.8	-	Literatura [Ezzat, 2008]
$r_{min}$	0.6	m	Medición
$m$	120	kg	Medición

$V_{min}$  y  $V_{max}$  son las velocidades mínimas y máximas deseadas en el AGV, respectivamente,  $\mu$  es el coeficiente estático de fricción entre las llantas de poliuretano del AGV y el suelo industrial,  $r_{min}$  es el radio de rotación más pequeño del vehículo y  $m$  es la masa total del AGV.

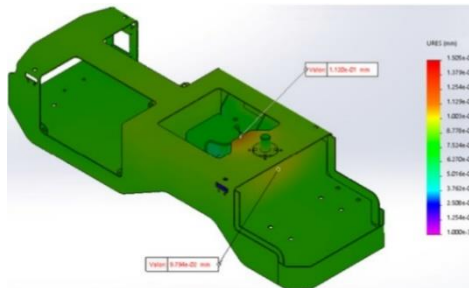
**Operación bajo condiciones normales:** Este escenario considera al AGV transportando una carga de 700 kg a través de un acoplamiento parecido al de los tráileres. Uno de los escenarios críticos aparece cuando el vehículo debe detenerse súbitamente. Gracias a las herramientas digitales se pudo determinar el porcentaje del peso del AGV que cargan las llantas que brindan tracción al sistema y de ahí conocer la fuerza de fricción máxima con la que se puede desacelerar el conjunto AGV-carga. Se encontró que las llantas de tracción soportan el 70% del peso del vehículo. La figura 9a muestra las zonas que sufren esfuerzo mecánico mediante un gradiente de colores. El valor máximo de esfuerzo combinado reportado por el análisis es de 39.79 MPa y pertenece a un nodo alojado en el soporte de las llantas de tracción. Considerando que el valor del límite elástico para un AISI 304 comienza alrededor de los 200 MPa, se puede observar que el esfuerzo de ningún nodo en esta simulación rebasa el 20% del límite elástico del material y, por lo tanto, el chasis tolerará las cargas relacionadas al frenado.

La figura 9b muestra la deformación de la estructura medida en URES (desplazamiento resultante). Se pueden identificar dos puntos que sobresalen del promedio: una deformación  $\delta=0.112$  mm y otra de  $\delta=0.098$  mm. Ambas deformaciones son despreciables y, por lo tanto, se puede concluir que la estructura es capaz de tolerar los esfuerzos sufridos por desplazar una carga completa a velocidad máxima sin sufrir una deformación plástica. Las simulaciones dinámicas

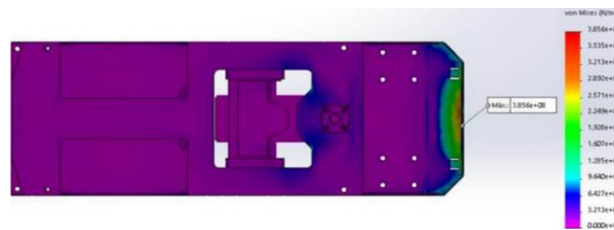
muestran que la distancia requerida para detener por completo el vehículo en esas condiciones es de 0.43 m.



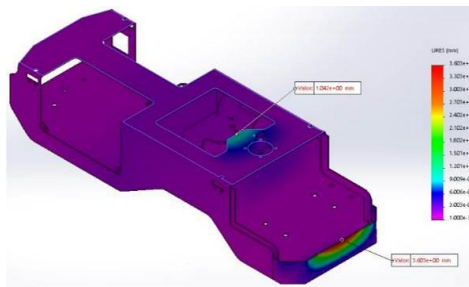
a) Caso I: operación normal – simulación de esfuerzos



b) Caso II: operación normal – simulación de deformaciones



c) Caso II: colisión frontal – simulación de esfuerzos



d) Caso II: colisión frontal - simulación de deformaciones

Figura 9 FEA de la estructura. AGV con carga máxima y moviéndose a  $V_{max}$ .

**Caso crítico: colisión e impacto frontal:** Se consideró un escenario extraordinario en el cual el sistema electrónico falla y el AGV sufre un impacto frontal llevando una carga máxima y viajando a  $V_{max}$ .

La figura 9c muestra el resultado de una simulación de esfuerzos sobre la estructura. En este escenario, la simulación revela una zona en donde la magnitud

del esfuerzo sufrido (385 MPa) supera el límite elástico del material (200 MPa), en otras palabras, la estructura se deformará de manera permanente después de un impacto frontal. La deformación simulada en la figura 9 d) muestra un valor de hasta 3.6 mm en algunas zonas dentro del volumen destinado para los componentes electrónicos. Con el fin de minimizar daños previsibles, se concluyó alejar los componentes del área susceptible a una deformación plástica y no sujetar los componentes electrónicos de los elementos deformables.

Un segundo análisis de interés es el modelado del AGV. El propósito de formular un modelo matemático que describa la dinámica del prototipo es entender cómo éste se moverá en respuesta a un comando de entrada y resulta esencial para el diseño de esquemas de control retroalimentado.

[Campion, 2008] clasificó la movilidad de robots móviles basados en ruedas. Los autores propusieron cinco estructuras genéricas correspondientes a un par de índices  $(m,s)$ : grado de movilidad  $m$  y grado de control de dirección  $s$ . El primer índice se refiere a la cantidad de grados de libertad que el robot puede tener instantáneamente desde su posición actual sin alterar la dirección de cualquiera de sus ruedas, mientras que el segundo índice se refiere al número de ruedas que se pueden orientar de forma independiente para dirigir el robot. En particular los robots de tipo  $(2,0)$  no tienen ruedas con dirección controlable ( $s = 0$ ) pero tienen ya sea una o varias ruedas fijas en un eje común. El eje común restringe la movilidad a un plano bidimensional ( $m = 2$ ).

La figura 10 muestra la estructura mecánica del AGV propuesto basada en una estructura diferencial con 2 ruedas direccionables (ruedas de tracción), 2 ruedas locas o de castor frontales y 2 ruedas fijas en la parte posterior cuyo único propósito es extender la longitud del robot y servir como vagón de carga. Este robot presenta claramente una estructura tipo  $(2,0)$ . El equipo ha desarrollado previamente varios prototipos de robot  $(2,0)$  [Romero, 2009], [Martínez, 2009], [Delgado, 2013].

La figura 11a muestra la representación esquemática del robot AGV. Aquí, **B** representa el centro del eje que conecta ambas ruedas de tracción, **G** representa el centro de masa (vehículo) y por simplicidad, se considera el punto a controlar en posición  $(x, y)$  y orientación  $(\varphi)$ . El primer subíndice de la figura 11a indica el tipo de

rueda (r para trasera y c para castor). El segundo subíndice indica la posición (r para derecha, l para izquierda).

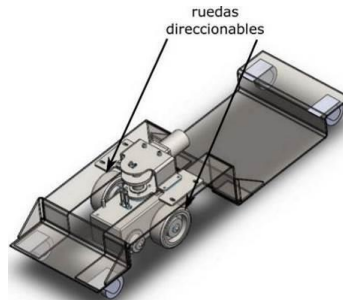
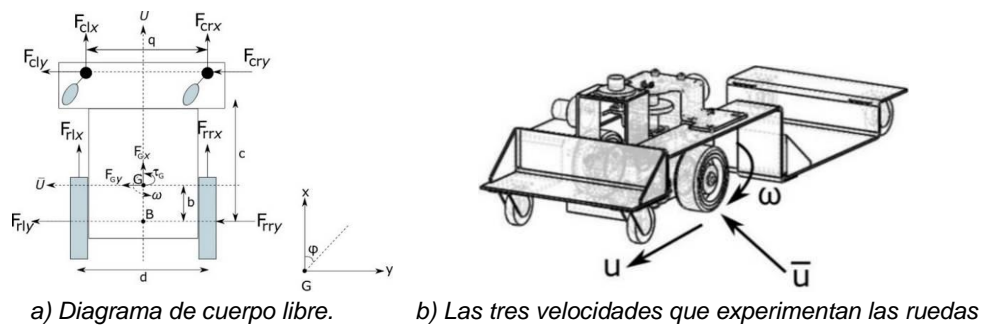


Figura 10 Estructura tipo (2,0) del AGV.



a) Diagrama de cuerpo libre. b) Las tres velocidades que experimentan las ruedas

Figura 11 Modelado del AGV.

Las fuerzas y momentos resultantes en el robot AGV se pueden expresar por las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\sum F_x = m(\dot{u} - \bar{u}\omega) = F_{rrx} + F_{rlx} + F_{crx} + F_{clx} + F_{Gx} \quad (1)$$

$$\sum F_y = m(\dot{\bar{u}} + u\omega) = F_{rry} + F_{rly} + F_{cry} + F_{cly} + F_{Gy} \quad (2)$$

$$\sum M_z = I\dot{\omega} = \frac{d}{2}(F_{rrx} - F_{rlx}) - b(F_{rry} + F_{rly}) + (c - b)(F_{cry} + F_{cly}) + \frac{q}{2}(F_{crx} - F_{clx}) + \tau_G \quad (3)$$

Donde  $m$  es la masa total del robot,  $I$  es el momento de inercia de la estructura rotando alrededor de  $\mathbf{G}$  y  $u$ ,  $\bar{u}$  y  $\omega$  son las velocidades: lineal, transversal deslizante y angular del robot AGV, respectivamente, ver figura 11b. La velocidad  $\bar{u}$  puede ser despreciada si se considera que las ruedas no se deslizan durante el movimiento.

Por su parte,  $u$  y  $\omega$  se pueden expresar mediante las ecuaciones 4 y 5.

$$u = \frac{1}{2}[r(\omega_r + \omega_l) + (u_r + u_l)] \quad (4)$$

$$\omega = \frac{1}{d}[r(\omega_r - \omega_l) + (u_r - u_l)] \quad (5)$$

Donde  $r$  es el radio de las ruedas de tracción,  $d$  es la distancia entre las ruedas de tracción, ver figura 11a,  $\omega_r$  y  $\omega_l$  son las velocidades angulares de las ruedas derecha e izquierda, respectivamente y  $u_r$  y  $u_l$  son las velocidades lineales de las ruedas derecha e izquierda, respectivamente.

La cinemática del punto **G** se relaciona con  $u$  y  $\omega$  mediante las ecuaciones 6, 7 y 8.

$$\dot{x} = u \cos \varphi - b \omega \sin \varphi \quad (6)$$

$$\dot{y} = u \sin \varphi + b \omega \cos \varphi \quad (7)$$

$$\dot{\varphi} = \omega \quad (8)$$

Las ruedas de tracción son impulsadas por motores de DC. Éstos pueden ser modelados mediante las ecuaciones 9 y 10.

$$\tau_r = \frac{k_a}{R_a}(E_r - k_b \omega_r) \quad (9)$$

$$\tau_l = \frac{k_a}{R_a}(E_l - k_b \omega_l) \quad (10)$$

Donde  $\tau_r$  y  $\tau_l$  son los torques desarrollados por los motores en las ruedas derecha e izquierda a partir de los voltajes DC de entrada  $E_r$  y  $E_l$ , respectivamente;  $k_a$  y  $k_b$  son las constantes de torque y de fuerza contra-electromotriz del motor, respectivamente mientras que  $R_a$  es la resistencia eléctrica del motor. Los voltajes inductivos han sido ignorados. Ecuaciones 11 y 12 describen sistema rueda-motor.

$$I_e \dot{\omega}_r + D_e \omega_r = \tau_r - F_{rrx} \hat{r} \quad (11)$$

$$I_e \dot{\omega}_l + D_e \omega_l = \tau_l - F_{rlx} \hat{r} \quad (12)$$

Donde  $I_e$  y  $D_e$  son el momento de inercia y el coeficiente de fricción viscosa del sistema rueda-motor, respectivamente y  $\hat{r}$  es el radio nominal de los neumáticos de las ruedas de tracción.

Usando y combinando las ecuaciones 1 a 12, la dinámica del robot AGV se puede resumir en la ecuación 13.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \\ \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \varphi - b \omega \sin \varphi \\ u \sin \varphi + b \omega \cos \varphi \\ \omega \\ \frac{a_3}{a_1} \hat{r} r \omega^2 - 2 \frac{a_4}{a_1} u \\ -2 \frac{a_3}{a_2} \hat{r} r u \omega - \frac{a_4}{a_2} d^2 \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{2r}{a_1} & 0 \\ 0 & \frac{2rd}{a_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_u \\ E_\omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

Con las entradas:  $E_u = \frac{E_r + E_l}{2}$ ,  $E_\omega = \frac{E_r - E_l}{2}$ .

y las variables:  $a_1 = \frac{R_a}{k_a} (m \hat{r} r + 2I_e)$  [ $Vs^2$ ],  $a_2 = \frac{R_a}{k_a} [I_e d^2 + 2 \hat{r} r (I + mb^2)]$  [ $Vm^2s^2$ ],

$a_3 = \frac{R_a}{k_a} mb$  [ $Vs^2/m$ ],  $a_4 = \frac{R_a}{k_a} \left( \frac{k_a k_b}{R_a} + D_e \right)$  [ $Vs/rad$ ].

La ecuación 13 relaciona el movimiento del robot AGV con el voltaje aplicado a los motores. Este modelo puede ser representado por el diagrama de bloques de la figura 12. Este diagrama funcional distingue la parte electrónica, los motores de DC y la dinámica del robot AGV [Velázquez, 2012].

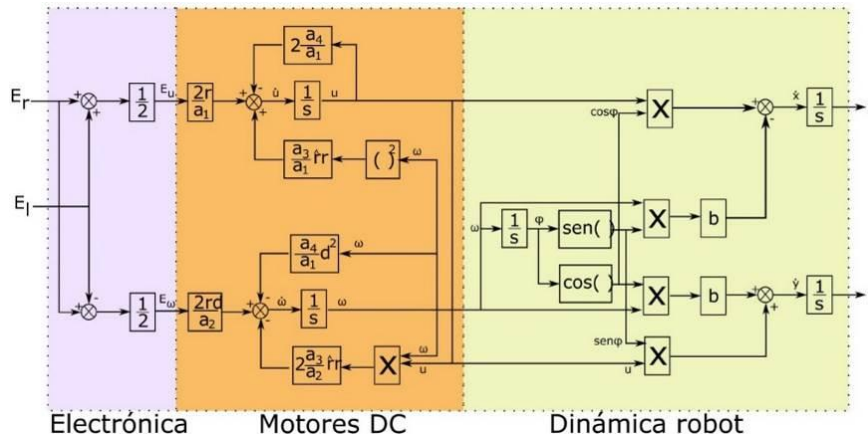


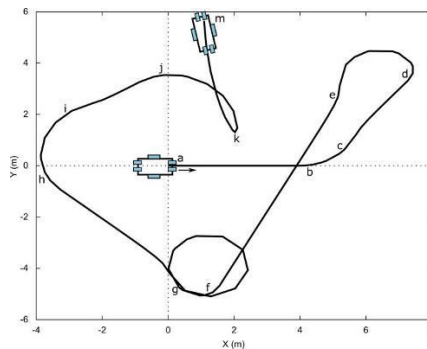
Figura 12 Diagrama de bloques del robot AGV.

Los valores de los parámetros que intervienen en el diagrama de bloques de la figura 12 pueden ser fácilmente medidos del prototipo y las especificaciones de los motores de DC empleados pueden ser obtenidos del fabricante. Estos datos se muestran en la tabla 2.

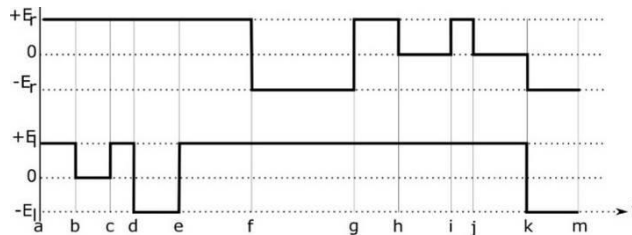
Tabla 2 Resumen de los parámetros involucrados en el modelo del AGV.

Parámetro	Valor	Unidades
Motores DC		
$E_r, E_l$	24	V
$R_a$	4	$\Omega$
$k_a$	0.05	N-m/A
$k_b$	0.11	V-s/rad
Estructura del AGV		
$m$	150	kg
$\hat{r}$	0.05	m
$r$	0.065	m
$I_e$	$0.75 \times 10^{-4}$	kg-m <sup>2</sup>
$d$	0.236	m
$I$	113.47	kg-m <sup>2</sup>
$b$	0.168	m
$D_e$	$1 \times 10^{-5}$	N-m-s/rad

El diagrama de bloques de la figura 12 permite la simulación por computadora de la dinámica del AGV.



a) Ejemplo de trayectoria simulada



b) Las señales eléctricas correspondientes

Figura 13 Simulaciones obtenidas a partir del modelo obtenido.

La figura 13a muestra cierta trayectoria obtenida en plano XY. Observe que el robot AGV propuesto puede ser considerado como un vehículo no-holonómico, ya que no puede cambiar su dirección instantáneamente; necesita rotar previamente. La figura 13b muestra las señales eléctricas de control aplicadas a los motores de DC.

## **4. Discusión**

Se llevaron a cabo dos análisis: simulación de esfuerzos mediante análisis por elementos finitos (FEA) y modelado dinámico. El primero valida tanto la elección del material como el diseño de la estructura para operar bajo condiciones normales y prevé que en situaciones extremas (colisiones frontales) con condiciones límite (carga de 700 kg y  $V_{max}=0.833$  m/s) el prototipo continuará funcionando correctamente. El segundo análisis permitió conocer las ecuaciones que gobiernan la dinámica del AGV y que dan pie a la automatización de las trayectorias y el diseño de estrategias de control [Velázquez, 2014]. El modelo puede ser utilizado para mejorar la productividad, incrementar el nivel de automatización y reducir los costos de transportación de materiales en la industria 4.0.

## **5. Conclusiones**

Este artículo ha presentado un prototipo novedoso de AGV cuyo objetivo es transportar herramienta, material o productos terminados en un ambiente industrial. Su diseño está inspirado en la cultura prehispánica de México, dotándolo de una identidad inconfundible y lo distingue de otros productos comercialmente disponibles. La implementación del AGV se llevó a cabo con sistemas avanzados de manufactura apoyados en el control numérico para asegurar la precisión de los elementos y facilitar su ensamblaje. Se eligió un material con alta resistencia mecánica, un acero inoxidable AISI 304, capaz de tolerar las condiciones ambientales a las que se someterá el producto final.

Por el momento, los componentes electrónicos continúan su proceso de depuración para operar de manera óptima en ambientes industriales. Nuestro trabajo futuro reportará el rendimiento individual de los componentes y del sistema dentro de una arquitectura WSN.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Delgado Mata, C., Velazquez, R. & Gutierrez, C. A., A Differential-Drive Mobile Robot Driven by an Ethology Inspired Behaviour Architecture, *Procedia Technology*, Vol. 3, 157-166, 2012.



- [2] AGVek, (2021). Chungcheongnam-do, 331-808, South Korea: <https://www.agvegroup.com/>.
- [3] Campion, G. & Chung, W., *Wheeled Robots*, Springer Handbook of Robotics, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 391-410, 2008.
- [4] Cawood, G. J. & Gorlach I. A., *Navigation and Locomotion of a Low-Cost Automated Guided Cart*. 2015 Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics International Conference. Port Elizabeth, South Africa, 2015.
- [5] Del Valle Soto, C., Mex Perera, C., Nolazco Flores, J. A., Velazquez, R. & Rossa Sierra, A. *Wireless Sensor Network Energy Model and its Use in the Optimization of Routing Protocols*, *Energies*, Vol. 13, No. 3, 728, 2020.
- [6] Dematic Co., (2021). 756 W Peachtree St NW, Atlanta, GA 30308 USA: [www.dematic.com/](http://www.dematic.com/).
- [7] Ezzat, F. H, Hasouna, A. T. & Ali, W., *Friction Coefficient of Rough Indoor Flooring Materials*, *JKAU: Eng. Sci.*, Vol.19, No.2, 53-70, 2008.
- [8] Garzon Castro C. L. & Velazquez, R., *Fundamentals and Paradigms in the Internet of Things*. In: Cardona, M, Solanki, V.K. & García-Cena, C. E. (Eds.), *Internet of Medical Things: Paradigm of Wearable Devices*, CRC Press, 1-18, 2021.
- [9] Hernandez, H., Preza, E., & Velazquez, R., *Characterization of a Piezoelectric Ultrasonic Linear Motor for Braille Displays*. 2009 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. Cuernavaca, Mexico, 2009.
- [10] Liu, C., Fan, M. & Song, R., *A Novel Intelligent and Agile Warehouse System for Energy Meter Storage*. 2013 IEEE Third International Conference on Information Science and Technology. Yangzhou, China, 2013.
- [11] Liu, F., Li, X. & Wang, Y., *Design of Automatic Guided Vehicle Motion Control System Based on Magnetic Navigation*. 2018 Chinese Control and Decision Conference. Shenyang, China, 2018.
- [12] Martínez, J. S., Moran, G., Romero, B., Camacho, A., Gutheim, D., Varona, J. & Velazquez, R., *Multifunction All-Terrain Mobile Robot IVWAN: Design and First Prototype*. 2nd Israeli Conference on Robotics. Herzlia, Israel, 2008.

- [13] Logicbus, (2021). Prol. Av. Alcalde 1822, Guadalajara, Mexico: [www.logicbus.com.mx](http://www.logicbus.com.mx).
- [14] Magos Rivera, M., Velazquez, R., Gomez, A. S. & Gutierrez, C. A., Design and Construction of a New Door Driving Mechanism for Mexico's City Metro. IEEE Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVIII). San Salvador, El Salvador, 2018.
- [15] Martinez, H. & Herrero, D., Autonomous Navigation of an Automated Guided Vehicle in Industrial Environments, *Robot Cim-Int Manuf.*, Vol. 26, No. 4, 296-311, 2010.
- [16] Murphy, A., (2021). AGV Deep Dive: How Amazon's 2012 Acquisition Sparked a \$10B Market: <https://loupventures.com/agv-deep-dive-how-amazons-2012-acquisition-sparked-a-10b-market/>.
- [17] Romero, B., Camacho, A., Varona, J., Delgado Mata, C., Velazquez, R. A Low-Cost Electric Power Wheelchair with Manual and Vision-Based Control Systems. AFRICON 2009, Nairobi, Kenya, 2009.
- [18] Taha, Z., Mat-Jizat, J. A. & Ishak, I., Bar Code Detection Using Omnidirectional Vision for Automated Guided Vehicle Navigation. International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence, Xiamen, China, 2012.
- [19] Velazquez, R. & Lay-Ekuakille, A., A Review of Models and Structures for Wheeled Mobile Robots: Four Case Studies. 15th International Conference on Advanced Robotics, Tallin, Estonia, 2011.
- [20] Velazquez, R. & Gutierrez, C.A., Modeling and Control Techniques for Electric Powered Wheelchairs: An Overview. IEEE Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIV). Panama, Panama, 2014.
- [21] Urzua, M., Mendoza, A., & Gonzalez A. O., Evaluating the Impact of Order Picking Strategies on the Order Fulfilment Time: A Simulation Study, *Acta Logist. Int. Sci. J. Logist*, Vol. 6, No. 4, 103-114, 2019.
- [22] Xu, H., Xia, J., Yuan, Z. & Cao, P., Design and Implementation of Differential Drive AGV Based on Laser Guidance. 2019 3rd International Conference on Robotics and Automation Sciences, Wuhan, China, 2019.