

Desarrollo de sistema de control de un robot delta lineal basado en la norma ANSI/RIA R15.06-2012

Juan Sebastian Pinzon, Jorge Alejandro Angel,
sebastianpinzon@javerianacali.edu.co, jorgeangell@javerianacali.edu.co

Resumen—Utilizando la normativa ANSI/RIA R15.06-2012 se desarrolló un sistema de control que garantiza la seguridad de los usuarios del robot delta lineal ubicado en el Centro de Automatización de Procesos en la Universidad Javeriana de Cali, en Colombia. La metodología utilizada para llevar a cabo este proyecto se dividió en cuatro etapas: Definición de requerimientos, Diseño de la arquitectura, Implementación de la arquitectura y Evaluación del sistema. En la primera etapa se realizó un análisis de riesgos para determinar qué características debe cumplir el robot al final de este proyecto. En la etapa de diseño, para el software, se elaboraron diagramas de flujo para describir el funcionamiento de los diferentes modos de operación y para el hardware, se elaboraron modelos en 3D de diferentes equipos como el teach pendant, usando como base los requerimientos establecidos anteriormente. En la tercera etapa se implementó el hardware y software diseñados anteriormente, donde se utilizaron herramientas como Python e impresión 3D para este fin. En la última etapa se evaluó el sistema utilizando un plan de pruebas diseñado previamente, para determinar si el sistema cumple con los requisitos. Con la asistencia de un experto se realizó esta validación, la cual concluyó que el sistema diseñado cumple con los requisitos establecidos inicialmente, por lo que el robot delta lineal ahora cumple con el estandar ANSI/RIA R15.06.

Palabras clave—Robótica, Automatización, Control robótico, Programación robótica, Seguridad.

I. INTRODUCTION

La historia de los robots en la producción industrial se remonta a la década de 1930, cuando se utilizaron para tareas como el pick & place. Con el inicio de la Segunda Guerra Mundial y su creciente demanda de producción, los autómatas tomaron gran importancia, al ser implementados para realizar tareas peligrosas o difíciles. Sin embargo, la seguridad se convirtió en una preocupación, especialmente con la introducción de sistemas robóticos

El presente documento corresponde al artículo científico del proyecto de grado del programa de Ingeniería Electrónica

personalizados, debido a los altos costos y la necesidad de cumplir con regulaciones especializadas [1]. Este artículo se centra en abordar estos problemas mediante el desarrollo de un sistema de seguridad para un robot Delta Lineal en la Universidad Javeriana de Cali, siguiendo normas como la ANSI/RIA R15.60 - 2012 [2]. Se propone una metodología en cuatro etapas: definición de requisitos, diseño de arquitectura, implementación y evaluación del sistema. Este proyecto establecerá un precedente en la implementación de robótica segura y destacará la importancia de la seguridad en el diseño de robots en entornos académicos e industriales, contribuyendo a la adopción de soluciones robóticas personalizadas en la industria nacional.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

II-A. Robot Delta Lineal:

El robot delta lineal es un tipo de robot paralelo que se distingue por su base móvil, la cual se desplaza siempre en planos paralelos a sus guías. Está compuesto por un conjunto de tres bielas, cada una de las cuales cuenta con un sistema de actuación independiente que une la base. Su uso se destaca en aplicaciones de cargas livianas y distancias cortas debido a su velocidad y flexibilidad de movimiento. Son ideales para aplicaciones de Pick&Place, con motores en bases fijas [3].

II-B. Sistema de seguridad en robótica:

El sistema de seguridad de un robot debe asegurar que el dispositivo se detenga en ciertas circunstancias, como un golpe a un operario, una colisión con un objeto o un fallo mecánico. Por esta razón, al limitar la velocidad de movimiento y alcance, se protege a los operarios que se encuentren en el área de trabajo del robot. De igual manera, la restricción de la intensidad de corriente contribuye a prevenir fallas técnicas en los motores [4].

II-C. Estándar ANSI/RIA R 15.06:

La norma ANSI R15.06-1999 establece pautas para mejorar la seguridad en la fabricación e integración de robots industriales, se enfoca en métodos como la evaluación de riesgos para asegurar una implementación segura de la robótica colaborativa. Incluye 14 cláusulas para reducir al mínimo los riesgos asociados. [5]

III. METODOLOGÍA

III-A. Requisitos del sistema

Antes de iniciar el proyecto, el robot delta lineal requería una inspección, tanto de condiciones y funciones de software como de hardware, necesario para determinar el estado actual del mismo, y poder identificar las posibles problemáticas con las que este cuenta, que podrían intervenir en la aplicación de los requerimientos que expone la norma *ANSI RIA 15.06* [5].

Se realiza una evaluación de riesgos para identificar peligros asociados al funcionamiento del robot. La matriz considera la severidad del riesgo, la frecuencia de exposición del operario, los controles de ingeniería y administrativos, y los elementos de protección personal para mitigarlos. Los requisitos se basan en la norma ANSI/RIA R15.06, que proporciona directrices para el diseño seguro y medidas de protección de robots industriales. Se seleccionan requerimientos específicos relacionados con modos de funcionamiento, límites de velocidad, tipos de paradas y el funcionamiento de la HMI, tras revisar la norma y los aspectos identificados durante la evaluación de riesgos.

III-B. Diseño de la arquitectura

III-B1. Software: Según los requisitos, se ha definido que el sistema debe incorporar cuatro modos de funcionamiento: Manual baja velocidad, Manual alta velocidad, Automático y Remoto. Además, se ha establecido que el sistema deberá incluir un Estado de Seguridad. Por otra parte, se han identificado la necesidad de realizar cambios en la programación del PLC, el cual tiene la responsabilidad de controlar los motores y, por ende, los movimientos del robot. Estas modificaciones en la programación implicarán la implementación de una máquina de estados para determinar en qué modo se encuentra

el robot y diversas funciones de parada que podrían ejecutarse cuando sea necesario.

- Manual baja velocidad: movimientos de máximo $255 \frac{mm}{s}$
- Manual alta velocidad: movimientos hasta velocidad máxima.
- Automático: Realiza rutinas enseñadas.
- Remoto: Usuario da instrucciones de control desde otro lugar.
- Estado de seguridad: Detiene el funcionamiento hasta que se solucione el error.

III-B2. Hardware: De acuerdo a los requerimientos encontrados en el análisis de riesgo, se ha definido que el sistema debe poseer los siguientes dispositivos:

- **Teach Pendant:**
 - Computadora - Raspberry PI 4
 - Pantalla táctil - Display LCD 7"
 - Botón de parada de emergencia
 - Switch de tres posiciones - A4E-C211VA OMRON
 - Estructura
- **Guardas de seguridad Física:**
 - Láminas de policarbonato
 - Interlock - G9SE-401 OMRON
- **Baliza de 5 colores**
- **3 Botones de paro de emergencia:**
 - Botón 1 ubicado en Teach pendant
 - Botón 2 ubicado al interior de la zona de peligro
 - Botón 3 ubicado en la cara frontal exterior del robot

A continuación se observa el diseño realizado para la implementación del teach pendant, con sus componentes ensamblados, como también el diseño del encierro en láminas de policarbonato puestas en la estructura metálica del robot, con su respectiva puerta de ingreso a la zona de peligro en la cara frontal, en las figuras 1 y 2, respectivamente.



Figura 1. Diseño de estructura ensamblada teach pendant

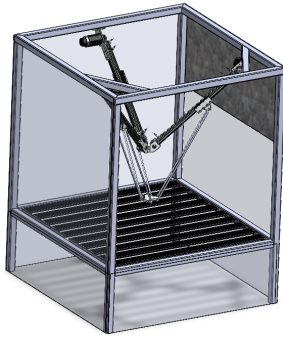


Figura 2. Diseño de las guardas de seguridad (completa)

III-C. Implementación de la arquitectura

III-C1. Software: Se desarrolló una interfaz gráfica, utilizando el lenguaje de programación Python, con la que el usuario puede interactuar y le ofrece botones para ejecutar acciones e indicadores para mostrar el estado en que se encuentran diferentes variables de interés, como se pueden ver en la figura 3. La interfaz gráfica cuenta con tres secciones, en el segmento izquierdo, se pueden realizar acciones como Encendido(POWER), Reinicio(RESET), rutina de homing(HOMING), Parada suave(SLOW STOP) y muestra variables de interés como la posición actual, IP y estado de los ejes. En el segmento derecho, se pueden ver botones e indicadores, los cuales hacen referencia a los diferentes modos en los que el robot puede operar. Los botones se utilizan para cambiar entre modos y los testigos muestran en que modo se encuentra el robot actualmente.

Se pueden ver en la figura 3, en la sección central, botones los cuales hacen parte de el modo de control por teclado, que le da al usuario la posibilidad de establecer el valor de los parámetros con los que se realizara el movimiento, por ejemplo Velocidad Máxima(mm/s), Aceleración(mm/s^2), X(mm), Y(mm), Z(mm).

En la figura 4, se pueden ver en la sección central diferentes elementos los cuales hacen parte de el modo de control por botones, estos se utilizan para indicarle al autómatas en que dirección moverse. Se cuenta con dos pulsadores para cada eje, lo cual le permite realizar movimientos en el sentido positivo y negativo de cada eje, los cuales son Z+(arriba), Z-(abajo), X+(izquierda), X-(derecha), Y+(atrás), Y-(adelante).

IP: 192.168.0.100 EJE 1: ENCENDIDO EJE 2: ENCENDIDO EJE 3: ENCENDIDO		CONTROL TECLADO	CONTROL BOTONES	LISTA DE MODOS
POWER	<input checked="" type="checkbox"/>	Velocidad Máxima(mm/s)=	250	MODO AUTOMATICO <input checked="" type="checkbox"/>
RESET	<input type="checkbox"/>	Aceleración(mm/s ²)=	10000	MODO MANUAL BAJA VELOCIDAD <input checked="" type="checkbox"/>
HOMING	<input checked="" type="checkbox"/>	X (mm)=	0	MODO MANUAL ALTA VELOCIDAD <input checked="" type="checkbox"/>
SLOW STOP	<input type="checkbox"/>	Y (mm)=	0	MODO REMOTO <input checked="" type="checkbox"/>
TCP OFFSET(mm)	-	Z (mm)=	200	ESTADO SEGURIDAD <input checked="" type="checkbox"/>
POSICION ACTUAL		· Movimiento Absoluto · Movimiento Relativo		BLOQUEAR MODO <input checked="" type="checkbox"/>
X (mm)= 0		Tiempo: 1.692		RUN
Y (mm)= 0		Posiciones: [385.28 385.28 385.28]		
Z (mm)= 199		Distancias: [385.28 385.28 385.28]		
HOLD-TO-RUN	<input checked="" type="checkbox"/>	Velocidades: [250.0, 250.0, 250.0]		
		Aceleraciones: [220.65, 220.65, 220.65]		
		Jerks: [973.7, 973.7, 973.7]		

Figura 3. Interfaz gráfica modo Manual Baja velocidad (Control por teclado)

IP: 192.168.0.100 EJE 1: ENCENDIDO EJE 2: ENCENDIDO EJE 3: ENCENDIDO		CONTROL TECLADO	CONTROL BOTONES	LISTA DE MODOS
POWER	<input checked="" type="checkbox"/>	Z+	Z-	MODO AUTOMATICO <input checked="" type="checkbox"/>
RESET	<input type="checkbox"/>			MODO MANUAL BAJA VELOCIDAD <input checked="" type="checkbox"/>
HOMING	<input checked="" type="checkbox"/>			MODO MANUAL ALTA VELOCIDAD <input checked="" type="checkbox"/>
SLOW STOP	<input type="checkbox"/>	X+	X-	MODO REMOTO <input checked="" type="checkbox"/>
TCP OFFSET(mm)	-			ESTADO SEGURIDAD <input checked="" type="checkbox"/>
POSICION ACTUAL		Y+	Y-	BLOQUEAR MODO <input checked="" type="checkbox"/>
X (mm)= 0				RUN
Y (mm)= 0				
Z (mm)= 618				
HOLD-TO-RUN	<input checked="" type="checkbox"/>			

Figura 4. Interfaz gráfica modo Manual Baja velocidad (Control ejes individuales)

Cabe resaltar que el sistema arroja notificaciones en pantalla para alertar al usuario en caso de que se presente un error en el sistema. Estas notificaciones están ligadas con el Estado de seguridad, que se enciende cuando el robot no tiene las condiciones de seguridad mínimas para su operación. La notificación y el estado se mantienen hasta que el usuario resuelva la falla detectada y luego podrá volver a cambiar a uno de los modos de funcionamiento.

Por otro lado, utilizando la herramienta Connected Components Workbench de Rockwell Automation, se elaboro el programa principal que ejecuta el PLC. Dentro de este se definieron funciones para monitorear y controlar los actuadores conectados, como lo son los drivers, baliza e interlock. Además, se programo la maquina de estados que controla en que modo se encuentra el robot en todo momento.

III-C2. Hardware: Se diseñaron una serie de sistemas físicos, que de la mano con la aplicación programada, garantiza que se cumplan los requerimientos:

- **Guarda de encierro:**

Para la implementación de la guarda de encierro, se instalaron las láminas de policarbonato en todas las caras del robot y se fabricaron

los soportes y guías para la puerta corrediza, en la que se utilizó soportería y guías en aluminio que permiten su movimiento lateral, permitiendo un espacio para la entrada del operario a la zona de peligro. En la figura 5 se muestra la celda robótica con guarda de encierro finalizada.

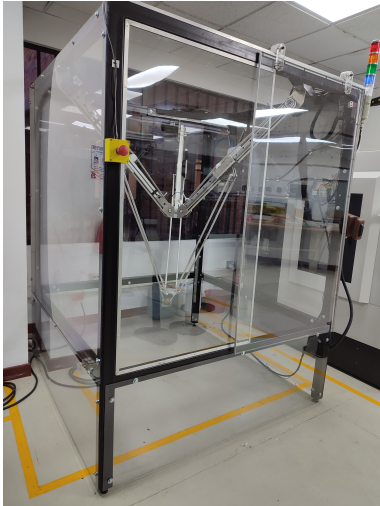


Figura 5. Celda robótica con las guardas y puerta implementadas

- Teach pendant:** Se integró una Raspberry Pi 4 en el teach pendant la cual funciona como computador del robot, la cual corre la interfaz gráfica que se muestra en la pantalla táctil de 7". Se incluye un interruptor Omron de 3 posiciones como botón de habilitación del sistema de control y también cuenta con un botón de paro de emergencia, mostrado en la figura 6.

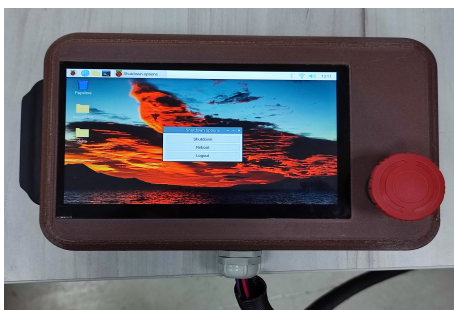


Figura 6. Implementación de teach pendant completo

- Botones de emergencia:** Se implementaron 3 botones de emergencia en puntos críticos y

frecuentemente accesibles para el usuario, ubicados estratégicamente en los puntos listados anteriormente, logrando cubrir las zonas más críticas y frecuentadas por el operario.

■ **Baliza:**

La implementación de la baliza, y la relación de sus colores que representan el estado del robot, están regidos bajo la normativa IEC 60204-1, la cual especifica en la tabla I la asociación de cada color con el estado del robot [6].

Color	Representación
Rojo	El robot presenta un error.
Amarillo	Ejecución de movimiento en proceso.
Verde	Reinicio del motion control o rutina de homing finalizada
Azul	Requiere intervención de usuario para realizar acción que permita continuar la operación.
Blanco	El robot se encuentra con los motores apagados

Cuadro I

REPRESENTACIÓN DE COLORES DE LA BALIZA

III-C3. Integración: La arquitectura diseñada se llevó a cabo integrando el hardware y software desarrollados para que el sistema de seguridad funcione correctamente y cumpla con los requisitos definidos. El establecer una conexión eficiente entre las dos partes, le dará al sistema un mejor desempeño, logrando aprovechar al máximo las herramientas que brinda el hardware y procesando las diferentes señales en el software para que tome las decisiones pertinentes.

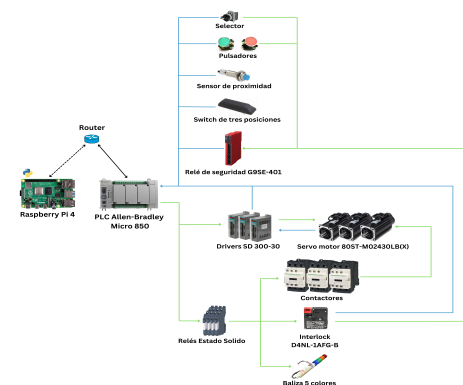


Figura 7. Diagrama de integración de la arquitectura

En la figura 7 se ve un diagrama donde se ilustran las conexiones entre los dispositivos utilizados en la arquitectura. Se puede ver como la Raspberry Pi 4 y el PLC Micro 850 se comunican por medio de

un router, esto quiere decir que su comunicación es inalámbrica.

El PLC cuenta con entradas, las cuales se conectan a dispositivos como Selectores, Pulsadores, Sensores de proximidad, Switch de tres posiciones y el Relé de seguridad. Estos elementos le envían información al controlador programable, el cual utiliza esto para tomar decisiones y controlar, dependiendo de esto, a otros actuadores.

El PLC también posee salidas, las cuales están conectadas a los drivers SD 300-30 y a un grupo de Relés de estado sólido. Los drivers se encargan de controlar los movimientos de los servomotores, para ejecutar los movimientos del robot. Los relés de estado sólido controlan a su vez otros dispositivos, como lo son los contactores, el Interlock D4NL-1AFG-B y la baliza de indicación. Los contactores se encargan de alimentar los servomotores para que estos funcionen. El interlock se encarga de asegurar y desasegurar la puerta de acceso a la celda robótica. La baliza de 5 colores se encarga de indicarle al usuario el estado del robot.

IV. RESULTADOS

Se llevaron a cabo diferentes tipos de validaciones iniciales para cumplir con la normativa de seguridad ANSI/RIA R15.06 y los estándares relacionados, tanto a nivel de software como de hardware, garantizando así la seguridad del robot y su manejo seguro por parte de los usuarios. Se siguieron las metodologías sugeridas en el capítulo 6 de la norma ANSI/RIA R15.06 para probar el sistema robótico implementado, seleccionando los requisitos aplicables y realizando la validación correspondiente. Además, se realizaron pruebas exhaustivas para evaluar el desempeño y cumplimiento de las funcionalidades del robot, divididas en requerimientos universales y funciones específicas relacionadas con distintos modos de operación, y se confirmó el cumplimiento de los requisitos y la seguridad del sistema junto al ingeniero experto en robótica, Simón Plata.

V. CONCLUSIÓN

El proyecto alcanzó su objetivo al desarrollar un sistema de control para un robot delta lineal, cumpliendo con la normativa ANSI/RIA R15.06-2012. Se aplicaron meticulosamente requisitos de hardware y software para optimizar el rendimiento

y la seguridad del robot. La implementación de medidas de seguridad, supervisada por el ingeniero Simón Plata, fortaleció la integridad del sistema. Su adaptabilidad abre diversas posibilidades futuras, aunque se destaca la necesidad de un análisis de riesgos adicionales para usos específicos. El cumplimiento de normas sienta una base sólida para investigaciones y aplicaciones futuras en robótica.

VI. BIBLIOGRAPHY

- [1] D. Marshall y C. Bredin, "Historia de un éxito: una mirada retrospectiva a la aportación de ABB a la robótica industrial," *Revista ABB*, n.º 2, págs. 56-62, 2008.
- [2] S. Robla-Gómez, V. M. Becerra, J. R. Llata, E. González-Sarabia, C. Torre-Ferrero y J. Pérez-Oria, "Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments," *IEEE Access*, vol. 5, págs. 26754-26773, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2773127.
- [3] F. A. F. D. A. Santos, "Diseño Conceptual Y Estudio Cinemático de un Robot Delta De Tres Grados De Libertad," *Universidad Autónoma de Bucaramanga*, Available at https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/12203/2011_Articulo_Daniel_Santos_Marin.pdf?sequence=2&isAllowed=y, 2012.
- [4] M. B. L. Kaiser A. Schlotzhauer, "Safety-Related Risks and Opportunities of Key Design-Aspects for Industrial Human-Robot Collaboration: Third International Conference," en *Interactive Collaborative Robotics*, vol. 1, 2018, págs. 95-104. DOI: 10.1007/978-3-319-99582-3_11.
- [5] R. I. ASSOCIATION, *ANSI/RIA R15.06-1999, for Industrial Robots and Robot Systems — Safety Requirements*, Available at <https://webstore.ansi.org/Standards/RIA/ansiriar15062012>, 1999.
- [6] T. Saito, T. Hoshi, H. Ikeda y K. Okabe, "Global harmonization of safety regulations for the use of industrial robots-permission of collaborative operation and a related study by JNIOOSH," *Industrial health*, vol. 53, n.º 6, págs. 498-504, 2015.