

ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO EN LA NORMATIVIDAD APLICABLE EN CELDAS DE MANUFACTURA FLEXIBLE

BIBLIOGRAPHICAL ANALYSIS IN THE APPLICABLE REGULATION IN FLEXIBLE MANUFACTURING CELLS

Leonardo Fabio Guerrero Becerra

Universidad Tecnológica de Pereira
leonardo.guerrero@utp.edu.co

Carlos Alberto Montilla Montaña

Universidad Tecnológica de Pereira
cmontilla@utp.edu.co

Recepción: 11/noviembre/2022

Aceptación: 19/marzo/2023

Resumen

El vacío encontrado respecto a normas de seguridad aplicables en celdas de manufactura flexible en Colombia; fue la principal motivación para el desarrollo del presente trabajo. Se realizó una revisión bibliográfica sobre el tema, así como una investigación sobre los marcos normativos disponibles a nivel nacional e internacional, aplicables a los robots y su interacción con los seres humanos; así como un análisis de los aspectos técnicos de seguridad involucrados. Como resultado de esta investigación, se destacan las pautas generales a considerar cuando se pretende diseñar, integrar o actualizar una celda de manufactura flexible desde un contexto normativo aplicable. Se encontró que existen varios grupos de normas: las que están armonizadas con la directiva de maquinaria 2006/42/EC; las que aplican a requisitos de seguridad; las que aplican a robots montados sobre vehículos guiados, y las que aplican a robots en general.

Palabras Clave: FMC, HRC, HRI.

Abstract

The gap found regarding applicable safety standards in flexible manufacturing cells in Colombia; was the main motivation for the development of this work. A bibliographic review on the subject was carried out, as well as an investigation on

the regulatory frameworks available at the national and international level, applicable to robots and their interaction with human beings; as well as an analysis of the technical security aspects involved. As a result of this research, the general guidelines to be considered when intending to design, integrate or update a flexible manufacturing cell from an applicable regulatory context are highlighted. It was found that there are several groups of standards: those that are harmonized with the machinery directive 2006/42/EC; those that apply to security requirements; those that apply to robots mounted on guided vehicles, and those that apply to robots in general.

Keywords: FMC, HRC, HRI.

1. Introducción

Una celda de manufactura flexible FMC (*Flexible Manufacturing Cell*) se considera como un grupo de máquinas que realizan un proceso particular, o una parte de un proceso de manufactura gestionado por un sistema de manufactura flexible FMS (*Flexible Manufacturing System*). Un FMS, consiste en un grupo de estaciones de procesamiento (por lo general, máquinas herramienta CNC) interconectadas mediante un sistema automatizado de manejo y almacenamiento de material y controladas por medio de un sistema integrado de computadoras, [Groover, 2007]. En los sistemas FMS se puede realizar el procesamiento de múltiples tipos de piezas de forma simultánea, en diferentes estaciones de trabajo. Es relevante considerar que algunos sistemas y celdas altamente automatizados poseen baja flexibilidad, dado que están dedicados a producir masivamente un tipo de pieza, y esto crea confusión en el concepto de flexibilidad.

En un FMS deben integrarse de forma eficiente y confiable lo siguientes:

- Estaciones de trabajo y celdas.
- Estaciones de inspección.
- Un sistema de manejo y transporte automatizado de materiales (que normalmente pueden contar con robots industriales, vehículos guiados, bandas transportadoras o de rodillos y mecanismos de transferencia, entre otros).

- Un sistema de control que posibilita la comunicación entre todos los componentes.
- Está la participación de personal cuyas funciones son manipulación de piezas del sistema. Esta incluye el cargue en el almacén, como descargue de piezas terminadas, cambio y preparación de las herramientas de corte, mantenimiento y reparación del equipo, programación de piezas con control numérico, programación y operación del sistema de cómputo, así como la administración general del sistema [Groover, 2007].

En la última década, una especie de revolución silenciosa ha cambiado la forma en que se planifica y realiza la fabricación; está surgiendo un nuevo paradigma de fabricación con ciclos de vida de productos más cortos, personalización masiva e interacciones entre humanos y robots en estrecha proximidad [Ahmad, 2020]. El panorama de la fabricación se está volviendo cada vez más complejo y crece la necesidad de ser adaptativo, flexible y rentable [Ahmad, 2020]. La habilitación de células de trabajo colaborativo humano-robot; ha sido el resultado de lograr una alta personalización del producto, mediante la implementación de sistemas de producción flexibles y altamente reconfigurables, que pueden cambiar rápidamente entre diferentes productos de diferentes tamaños de lote [Michalos, 2015]. Ante este panorama, lo que tradicionalmente se había considerado como aspectos de seguridad de sistemas de producción rígidos, con máquinas que trabajaban de forma aislada en un entorno industrial controlado; ahora son ambientes de interacción colaborativa entre máquinas y personas. Para el desarrollo del presente trabajo, se pretendió dar una revisión general sobre los aspectos normativos que deben considerarse cuando se diseña, integra o actualiza una celda de manufactura flexible, utilizando el marco normativo disponible, y su armonización con las normas aplicables al sector tanto a nivel nacional como internacional.

2. Métodos

El objetivo de la presente investigación es definir qué aspectos normativos de seguridad se deben considerar cuando se diseña, integra, o actualiza una celda de

manufactura flexible en Colombia. Desde una mirada en el ámbito normativo, se realizó una revisión bibliográfica en el idioma español en Colombia y Latinoamérica, estudiándose los aspectos de seguridad aplicables a los robots y su interacción con los seres humanos. Esta investigación incluyó diferentes artículos, publicaciones o proyectos de grado; y se realizó sobre 24 artículos. Luego, se procedió con una revisión bibliográfica en el idioma inglés desarrollada a nivel internacional, estudiándose otros 35 artículos. Con base en estos resultados, se logró disponer de una visión general del marco normativo existente y de los conceptos técnicos aplicables a los robots y su interacción con los seres humanos. Por último, se realizaron las recomendaciones generales que se deben considerar a la hora de diseñar, integrar, o actualizar una FMC para aplicación a la industria en Colombia. En la figura 1 se expone de forma general la metodología desarrollada.

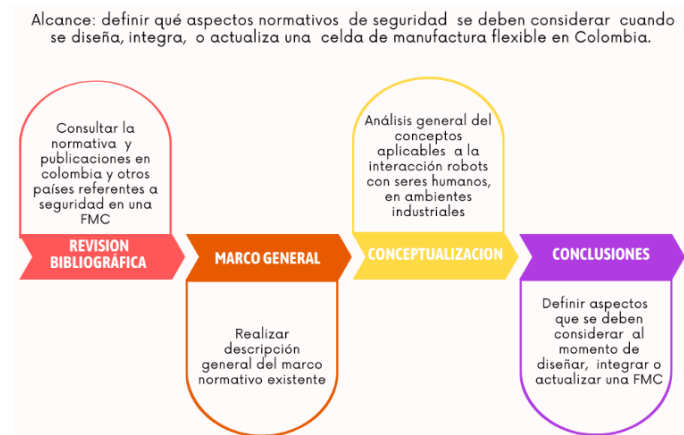


Figura 1 Método utilizado para realizar este artículo.

3. Resultados

Una vez realizada la consulta bibliográfica respecto los aspectos normativos aplicables a una FMC, tanto en Colombia como a nivel latinoamericano; se ha evidenciado la escasa bibliografía sobre el tema. La tabla 1 recopila las referencias cuyas informaciones se consideraron relevantes para propósitos del presente artículo. Considerando las falencias mencionadas en la tabla 1; se deben tomar entonces como punto de partida las normas generales aplicables a seguridad de máquinas en Colombia, las cuales brindan orientación respecto de los aspectos de

seguridad y ergonomía, especialmente para las personas que intervienen en su operación y control. La NTC 6301:2018: Seguridad de las máquinas (Requisitos antropométricos para el diseño de puestos de trabajo asociados a máquinas, equivalente con ISO 14738:2002 *Safety of machinery. Anthropometric requirements for the design of workstations at machinery*), establece unos principios a partir de medidas antropométricas, permitiendo obtener dimensiones que son aplicables al diseño de puestos de trabajo asociados a máquinas no móviles.

Tabla 1 Resultados de la consulta bibliográfica a nivel Colombia y Latinoamérica.

Descripción	País	Referencia
Considera que si las principales estaciones de trabajo en una empresa están organizadas ergonómicamente permitirán entonces una óptima interacción del hombre con su entorno de trabajo. Se hace una pregunta clave “¿Cómo ajustar un FMS al hombre?” y plantea que debemos pensar en cómo diseñar “la ergonomía de las estaciones de trabajo”. Sin embargo, dicho estudio centró su atención en variables ergonómicas del operador de la celda de trabajo, mas no en referencias normativas de seguridad aplicables a una FMC.	Colombia	[Ortega, 2016]
Hace una corta mención del marco legal y normativo considerado en la automatización industrial, pero solo especifica la normativa aplicable a un PLC.	Colombia	[Moreno, 2020]
Trata sobre el desarrollo de la seguridad industrial de una celda flexible automatizada de piezas de aluminio, con posibilidad de realizar control de calidad y discriminar piezas defectuosas. Detalla el paso a paso considerando en primera instancia las normas aplicables en aquel entonces (año 2004), seguido de un análisis y diseño considerando los requisitos de seguridad de la célula de manufactura flexible, y un estudio de riesgos y prevenciones para diseñar un robot, la célula y la instalación del sistema.	España	[Senao, 2004]
Existe una mención sobre una directiva brasilera de máquinas, la NR-12, que logró una integración exitosa de las normas internacionales.	Brasil	[Görnemann, 2013].
Menciona normas de diseño aplicables de forma individual a algunos componentes de la celda. Allí está definida la delimitación de zonas seguras de trabajo del robot que alimenta una maquina inyectora, considerando al menos 4 zonas bien definidas, sin embargo, no menciona estándares de referencia.	México	[Garibay, 2007]

Complementariamente, en la industria colombiana de forma general se suele tomar como referencia la guía técnica colombiana GTC 45 (2010-12-15): Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional. Otras normas de referencia en Colombia son NTC 5655:2008 Principios para el diseño ergonómico de sistemas de trabajo, y NTC 2506:1988 Mecánica, código de guardas de protección de maquinaria. Una vez revisado el

marco normativo en Colombia; se evidenció que dichas normas son muy generales y no son suficientes para ser aplicadas en el contexto del diseño, integración o actualización de una FMC; por lo que se procedió entonces a realizar una revisión a nivel internacional. Se encontró que es a partir del estándar de seguridad de maquinaria (*Directive 2006/42/EC* e *ISO 13849-1:2006. Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design*), de donde se toman los lineamientos para diseñar y operar cualquier tipo de máquina, [Siciliano, 2016]. Esta directiva clasifica los estándares de seguridad en tres categorías, tal como se puede apreciar en la figura 2.

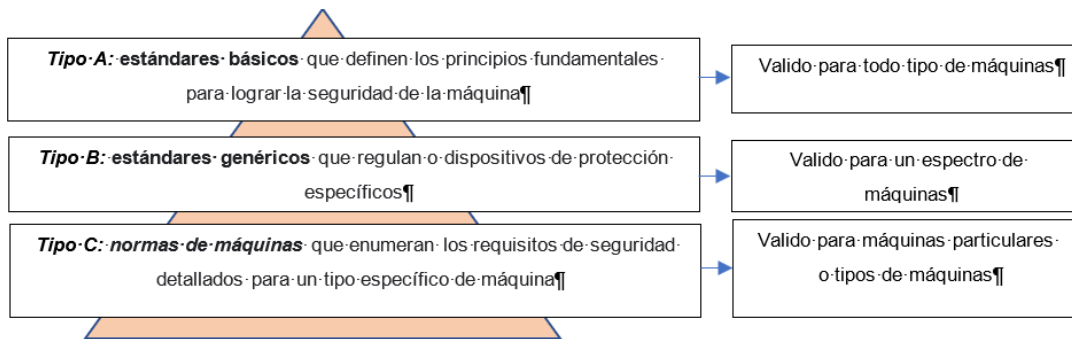


Figura 2 Categorías en los estándares de seguridad, [Siciliano, 2016].

Sin embargo, debido a la gran cantidad de normas internacionales aplicables en seguridad de maquinaria, se hace complejo el proceso de enfoque en la evaluación de riesgos a ciertos peligros, [Görnemann, 2013]; razón por la cual el experto en seguridad *Jean Bataille*, del Instituto francés de Investigación y la seguridad (INRS), realizó en el año 2012 un intento por visualizar la interrelación de estas normas partiendo de la ISO 12100 (tipo A), y cuyo resultado se aprecia en la figura 3.





La complejidad del universo de normas existentes ha llevado a la creación de los denominados “documentos puentes” (*bridging documents*), [Görnemann, 2013], los cuales permiten explicar con detalle la interrelación y el uso de grupo de normas de seguridad; buscando simplificar las normas dividiendo su uso en funciones simplificadas, como se ilustra en la figura 4. Por otro lado, el artículo “*Guide for Safe Machinery: six steps to a safe machine*”, [Sick ag, 2015], es una guía muy completa sobre los antecedentes normativos relacionados con la maquinaria y sobre la

Conceptos técnicos aplicables a la interacción de los robots con los humanos

En la mayoría de las aplicaciones donde se hayan instalado robots industriales, éstos eran utilizados normalmente para tareas específicas, y debido a ello estaban ubicados en áreas restringidas o inclusive, en algún tipo de jaula, para mantener la seguridad del personal. Comúnmente esta generación de robots no era capaz de interactuar e incluso aprender con los humanos; en la actualidad, se ha hecho necesario monitorear el rendimiento del robot y definir precauciones de seguridad más específicas, debido a que las personas pueden estar en contacto directo con este tipo de robots, ya sea con orientación o monitoreo. Por lo anterior existen ahora estándares de seguridad más estrictos que se aplican a su funcionamiento. La colaboración humano-robot HRC (*human-robot collaboration*) se refiere a un tipo especial de interacción, caracterizada por el contacto físico entre un robot y un humano. Según el artículo “*Success factors for introducing industrial human-robot interaction in practice: an empirically driven framework*”, [Kopp, 2021] (autor que se basó en la ISO 8373:2012 Robots y dispositivos robóticos: Vocabulario); los robots colaborativos industriales, denominados *cobots*, suelen ser pequeños, flexibles, fáciles de programar, y debido a sus características de seguridad, capaces de trabajar con humanos en un espacio de trabajo compartido. Por lo anterior, los *cobots* ofrecen a las empresas la oportunidad de implementar la interacción humano-robot HRI (*Human-robot interaction*). Mientras que los enormes robots industriales convencionales se han implementado principalmente en grandes empresas, los *cobots* se consideran una solución adecuada para las pequeñas y medianas empresas (PYME), que suelen producir muchas variantes de productos en lotes pequeños y, por lo tanto, requieren dispositivos flexibles, móviles y fáciles de programar. En el artículo “*Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review*”, [Matheson, 2019], se indica una clasificación de las metodologías de interacción entre robots y humanos como se indica en la tabla 2. Un espacio de trabajo colaborativo no solo involucra al ser humano y al robot, sino también a otros dispositivos auxiliares (por ejemplo, destornilladores eléctricos, dispositivos de sujeción eléctricos), y por ello cada celda presenta riesgos únicos que deben manejarse con seguridad, [Michalos, 2015]. Centrándose en los sistemas

cuyo objetivo principal es permitir la colaboración segura entre humanos y robots; el artículo “*Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments*”, [Robla, 2017]; realiza una síntesis de las consecuencias en el cuerpo humano de las colisiones entre humanos y robots, la cual abordó desde dos puntos de vista: estimar la tolerancia al dolor y cuantificar el nivel de lesión después de una colisión.

Tabla 2 Tipos de interacción y sus características, [Kopp, 2021].

	Automatización total con robots industriales	Interacción Humano-Robot con Cobots (HRI)		
				Colaboración Humano-Robot (HRC)
	CELDA	COEXISTENCIA	COOPERACIÓN	COLABORACIÓN
	El operador humano y el robot industrial convencional requieren separación física por razones de seguridad	El operador humano y el robot están en el mismo entorno, pero por lo general no interactúan	El operador humano y el robot trabajan en el mismo espacio de trabajo al mismo tiempo, aunque cada uno se enfoca en tareas separadas	El operador humano y el robot deben ejecutar juntos una tarea; la acción de uno tiene consecuencias inmediatas sobre el otro, debido a sensores especiales y sistemas de visión
				
Tipo de operaciones	SECUENCIAL			SIMULTANEA
Espacio de trabajo	Espacios separados		Espacios de colaboración compartida	
Tareas	Tareas no vinculadas		Tareas vinculadas	Tareas compartidas
Contacto físico	Imposible		Posible, no necesario	Posible, a menudo deseado
Requisitos de seguridad mínima de acuerdo con DIN EN ISO 10218-1	Operación automática con guardas de seguridad	Seguridad con parada monitoreada	Velocidad y separación monitoreada	
			Limitación de fuerza y potencia	
				Control manual guiado
Velocidad del robot	Máxima velocidad	Limitación de velocidad		

También realiza un estudio detallado sobre los métodos que se han propuesto para reducir los efectos de las colisiones, los cuales pueden clasificarse en sistemas de

conformidad mecánica y estrategias de seguridad que implican la detección de colisiones/contactos. Presenta además la evolución que han tenido los robots industriales desde la década de 1990, cuando surgió una generación de “robots livianos” o “ligeros” LWR (*Light weight robots*), así como de las generaciones siguientes en la década del 2000. Según este autor [Robla, 2017], éstos han sido la base de muchas investigaciones para cuantificar y minimizar las lesiones en colisiones humano-robot, así como en el desarrollo de estrategias de seguridad para la detección de colisiones - contactos, y en el uso de dispositivos para evitar impactos en tareas colaborativas (Tabla 2).

También menciona que los brazos robóticos industriales, se pueden dotar de algunos sistemas de seguridad para hacerlos más adecuados para compartir una tarea o los espacios de trabajo con un operador humano. Sin embargo, para procesos de fabricación más específicos que implican colaboración o interacción humano-robot, los LWR son más adecuados que los industriales, dado que éstos tienen incorporadas la mayoría de las características de seguridad requeridas para una interacción segura. En la tabla 3, se presenta una lista de siete tipos de sistemas de seguridad utilizados actualmente en la industria, los cuales el autor, [Robla, 2017], detalla de forma ampliada.

Tabla 3 Sistemas de seguridad, [Robla, 2017].

1	Estrategias de seguridad pre-colisión
2	Sistemas de captura de movimiento y ambientes simulados
3	Sistemas de captura local de información
4	Sistemas de visión artificial
5	Sistemas que hacen mapeo de rango 3D de objetos en el entorno
6	Combinaciones de sistemas de rango y visión
7	Dispositivos RGB-D

En la tabla 4, se proporciona una clasificación de la seguridad en ambientes de robots colaborativos industriales donde el autor expone de manera práctica como abordar cada uno de estos ítems.

Para ampliar un poco más sobre requisitos de seguridad mínima de acuerdo con ISO 10218-1 (penúltima fila de la tabla 2) y las respectivas acciones a seguir según la última columna de la tabla 4; conviene considerar que, en esta norma, y también

de forma más detallada en la ISO/TS 15066:2016, están definidas cuatro clases de requisitos de seguridad para los robots colaborativos como se ilustra en la tabla 5.

Tabla 4 Seguridad en ambientes de Robots Industriales colaborativos, [Robla, 2017].

Objetivo principal	Objetivo secundario	Sistemas		Dispositivos	Acciones
		Software	Hardware		
Espacios de trabajo entre humanos y robots separados	Acciones humanas restringidas	No algorítmico	Señales de alerta	Señales ópticas, acústicas y luminosas	Sin acciones
			Acceso restringido	Vallas-mamparas, cadenas	
	Modificación del comportamiento del robot	Algoritmos básicos de control	Combinación de sistemas de seguridad pasiva y activa	Dispositivos de enclavamiento. Sensores táctiles y de proximidad	Paro del robot / disminución de velocidad
Espacios de trabajo, trabajo entre humanos y robots compartidos	Cuantificación del nivel de lesión por colisión	No algorítmico	Estimación del nivel de dolor	Sistema que simula el brazo humano	Sin acciones
			Evaluación del nivel de lesión	Pruebas estándares de colisiones de automóviles	
	Minimización de lesiones por colisión (HRC) o contacto deliberado (HRI)	no algorítmico	Combinación de varios sistemas de conformidad mecánica	Cubiertas viscoelásticas	Paro del robot / disminución de velocidad / planificación del movimiento / reducción de fuerzas de impacto
			Estructuras livianas	Sistemas de absorción elástica	
			Cobertura sensorizada	Fibras de carbono ultraliviano, aluminio	
	Estrategias de seguridad para detección de colisiones	Estrategias de seguridad para detección de colisiones	Sensores prioceptivos	Sensores táctiles	
			Combinación de sensores y dispositivos RGB-D	Encoders	
	Evasión de colisiones	Estrategias de seguridad pre-colisiones	Sistemas de captura de movimiento	Sensores de fuerza, dispositivos RGB-D	
			Sensores que capturan información local	Modelos de geometría esférica / SSLs	
			Sistemas de visión artificial	Sensores capacitivos, ultrasónicos, de escáner laser, IR-Led	
Sistemas de rango			Una o varias cámaras estándar, ojo de pez		
Combinación de sistemas de visión artificial y sistemas de rango			Sensor laser ToF		
Dispositivos RGB-D	Dispositivos RGB-D	Una o varias cámaras estándar	Cámaras CCD estándar y cámaras de rango	Uno o varios dispositivos RGB-D	

Teniendo en cuenta estas cuatro clases de requisitos de seguridad (Tabla 5); en el artículo “Un robot de colaboración más amable y gentil, una guía sobre tecnología, casos de uso y validación, normas y directivas”; se plantea que es necesario que las empresas evalúen cuatro aspectos tales como: La integridad eléctrica, la evaluación del espacio de trabajo, la seguridad funcional con la que un sistema de control está destinado a proteger al personal de los riesgos existentes; y la seguridad cibernética, [Tuvrheinlan, 2018].

Tabla 5 Clases de requisitos de seguridad en robots colaborativos, [Robla, 2017].

Clase de requisito	Siglas en inglés	Operación aplicable	Descripción
Parada supervisada con clasificación de seguridad	SMS: Safety-rated monitored stop	Coexistencia	Se usa normalmente cuando el Cobot trabaja principalmente solo, y eventualmente un operador humano pudiese entrar en su espacio de trabajo
Guiado manual	HG: Hand-guiding	Colaboración	Donde el operador humano utiliza un dispositivo manual cerca o dentro del robot para realizar movimientos de éste
Control de velocidad y separación	SSM: Speed and separation monitoring	Cooperación y Colaboración	Donde tanto el operador como el robot se pueden mover simultáneamente dentro del espacio de trabajo
Limitación de potencia y fuerza por diseño o control inherente	PFL: Power and force limiting	Cooperación y Colaboración	Donde el robot está diseñado para no superar límites preestablecidos de fuerzas aplicables por él, en caso de contacto con el operador

La tabla 6 relaciona una compilación de las normas aplicables y referenciadas de acuerdo con la bibliografía consultada, [Blankemeyer, 2018], [Markis, 2019], [Michalos, 2015].

4. Discusión

En el artículo “*Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces*”, se menciona que el diseño de la célula robótica centrada en el ser humano se ve afectado principalmente por factores propiamente humanos, como la carga de trabajo, la vigilancia, la conciencia de la situación, los errores, etc., así como por aspectos relacionados con la ingeniería cognitiva y resalta el aspecto de la ergonomía, [Michalos, 2015]. Además, este último autor, presentó tres casos de estudio sobre la implementación de diferentes requerimientos de seguridad en celdas de manufactura.

Tabla 6 Normas internacionales aplicables a los robots.

DIRECTIVAS EUROPEAS	Directiva de maquinaria 2006/42/EC: Directiva aplicable en Europa a robots como células robóticas. Directiva de maquinaria 2009/104/EC: Directiva de uso de equipos de trabajo. Directiva 2001/95/EC: Seguridad general de productos. Directiva 1989/654/EC: Requisitos mínimos de seguridad y salud en el lugar de trabajo. Directiva 2014/35/EU: Requisitos de seguridad para equipos que operan a Baja tensión. Directiva 2004/108/CE: compatibilidad electromagnética.
ISO STANDARD	Tipo A: EN ISO 12100 Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo [1][2].
	Tipo B: EN ISO 11161 Seguridad de las máquinas. Sistemas de fabricación integrados. Requisitos fundamentales [1]. EN ISO 13849-1:2006 Seguridad de maquinaria [1].
	Tipo C: ISO 10218 Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte I Robots, Parte II Sistemas de robot e integración [1][2][3]. EN 1525: Seguridad de las carretillas de manutención. Carretillas sin operador y sus sistemas [4]. EN ISO 3691-4: Carretillas de manutención. Requisitos de seguridad y verificación.
	USA: ISO TS15066: Robots y equipos robóticos, robots colaborativos [3]. ISO 13855 e ISO 13857: Distancias de seguridad para equipos de seguridad separados y no separados; VDI 2710: Diseño interdisciplinario de sistemas de vehículos de guiado automático VDI 2510: sistemas de vehículos de guiado automático.
IEC STANDARD	EN 61508 Seguridad funcional de los sistemas eléctricos / electrónicos / electrónicos programables relacionados con la seguridad. Parte 1: Requisitos generales. EN 62061: Seguridad de las máquinas. Seguridad funcional de sistemas de mando eléctricos, electrónicos y electrónicos programables relativos a la seguridad. EN 60204-1: Seguridad de las máquinas. Equipo eléctrico de las máquinas [1]. IEC 62443 Industrial communication networks.
ANSI STANDARD	USA: ANRI/RIA R15.06 Robots industriales y sistemas de robots. Adopción de la ISO 10218. [1][2].
NORMAS UL	USA: US - UL 1740 Robots y equipos robóticos.
NORMAS CAN	CANADA: CAN / CSA Z434 Robots industriales y sistemas de robots [2][3]
NORMAS OIT	SUIZA: Seguridad y salud en la utilización de la maquinaria, 2013.
[1] Normas que están armonizadas con la directiva de maquinaria, [2] Normas que aplican a requisitos de seguridad. [3] Normas que aplican a Robots sobre vehículos guiados, [4] Normas que aplican a Robots en general	

También realizó un comparativo de las actividades colaborativas y los requisitos de seguridad para cada caso, considerando las pautas de aplicación según la norma TS 15066 y complementó su estudio con una detallada evaluación de riesgos para cada implementación. También en el artículo “*Design of Human Robot Collaboration workstations: Two automotive case studies*”, se considera que los factores humanos limitan la implementación industrial del HRC, [Andronas, 2020]. El autor menciona que “la coexistencia sin vallas puede generar incomodidad para los operadores, especialmente en niveles más altos de interacción”; además, según los estudios que consultó, se deben tener en cuenta durante la fase de diseño los siguientes factores: “conciencia de la situación”, la “cuantificación del estrés”, la “concentración o

atención sostenida” y el “cambio de tareas”. Además, concluye que, para acelerar la aceptación humana y la confianza en el sistema, enfatiza la necesidad del desarrollo de interfaces hombre-máquina avanzadas, las cuales deben brindar “información en tiempo real a los operadores sobre el estado del sistema y del robot y, en paralelo, monitorear el estado del operador para permitir la afinación del sistema”. Como ejemplos de estas soluciones menciona: aplicaciones de realidad aumentada y relojes inteligentes para ilustrar trayectorias de robots, zonas de seguridad, instrucciones de tareas, y brindar al operador la capacidad de proporcionar retroalimentación al sistema. Complementariamente analiza dos estudios de caso. En el primero centró su atención en maximizar la seguridad y garantizar que se logre el tiempo del ciclo (cuya línea de base fue el despliegue de distintas estaciones de trabajo humanas y robóticas separadas por zonas de seguridad). En el segundo, se enfocó en lograr una alta flexibilidad, mediante la implementación de estaciones de trabajo híbridas, asegurando que las intrusiones humanas dentro de las áreas de trabajo de los robots sean limitadas (cuya línea base fue realizar varios ensamblajes en paralelo). Como conclusión, el segundo enfoque fue el más favorable, puesto que según sus palabras “redujo la repetición de las operaciones manuales y mejoró las métricas, presenta una mayor flexibilidad debido a los tipos compatibles de HRI y tiene un costo de integración aceptable y sostenible. Además, esta estación de trabajo híbrida se centró en lograr la ejecución del proceso de ensamblaje, sin fluctuaciones en los indicadores de desempeño debido a infracciones inesperadas de la zona de seguridad”.

Otro autor, en su artículo “*A Method to Distinguish Potential Workplaces for Human-Robot Collaboration*”, [Blankemeyer, 2018]; presenta un concepto de un enfoque general de diseño simple para la implementación de estaciones de trabajo HRC. Éste se realiza en dos pasos, siendo el primero un examen rápido de los lugares de trabajo para determinar su idoneidad para la aplicación de HRC en función de los criterios establecidos, y el segundo paso examina la idoneidad para la automatización (parcial), siendo evaluados por el usuario en relación con la aplicación respectiva. La implementación del enfoque propuesto por este último autor, entrega los valores de "grado de asignación" y "grado de interacción", los

cuales indican la capacidad de colaboración. Sin embargo, un robot puede diseñarse para una operación colaborativa; pero no significa que se pueda instalar sin más consideraciones y no se debe dar por sentado que ya es intrínsecamente seguro para el funcionamiento en colaboración, [Tuvrheinlan, 2018]. Por lo anterior, en la práctica hay que considerar que no es posible diseñar un robot y su entorno 100% seguros, pero se pueden proporcionar robots que estén equipados con funciones de seguridad para garantizar una operación colaborativa segura, y para proteger la inversión hecha por la empresa. Por otro lado, la reducción del riesgo asociado con el contacto transitorio podría implicar la limitación de la velocidad de las piezas móviles y un diseño apropiado de las características físicas tales como el área superficial de la parte móvil que podría ponerse en contacto con el operador, lo que puede conllevar a modificar la programación (*schedulling*) de la celda, y por ende afectar los tiempos proyectados de los procesos, [Tuvrheinlan, 2018]. En el artículo *“Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing”*, se exploran nuevos conceptos, entre ellos los gemelos digitales DT (*Digital twins*); y menciona que éstos son “una representación digital inteligente de un sistema físico, habilitado por el avance en la virtualización, las tecnologías de detección y el poder de cómputo”, [Ahmad, 2020]. Con el concepto de gemelos digitales, se parte de los modelos virtuales de sistemas físicos basados en computadora, se prueban y se validan estrategias de producción antes de llevarlas a la práctica, y aunque es un enfoque convencional de modelado virtual, reenfoca el “ciclo de vida” hacia el concepto de un DT. Con cada cambio introducido en los parámetros de producción del sistema físico, se simulan nuevas variables para predecir el comportamiento futuro correspondiente y resaltar las optimizaciones requeridas. El comportamiento puede visualizarse y evaluarse sin el riesgo de pérdidas financieras o daños humanos que, de otro modo, podrían estar presentes en la producción real. Paralelamente a los robots industriales, surgieron los vehículos guiados automatizados (AGV). Estos robots móviles se utilizan para mover piezas de trabajo o cargar equipos siguiendo una ruta predeterminada o virtual en entornos industriales, [Tuvrheinland, 2018]. Dentro del concepto de los FMS, los AGV se han convertido en una parte importante

que incrementa su flexibilidad. En el artículo “*Safety of Mobile Robot Systems in Industrial Applications*”, [Markis, 2019], se hace una reseña de los tipos de robots industriales móviles, y la normativa aplicable a estos. Esta autora, realiza una descripción detallada de los tipos de riesgos, así como consideraciones para evaluación. Una versión actualizada de ISO 10218, la cual incluye instrucciones sobre la seguridad de sistemas *cobot* según la ISO/TS 15066, fue lanzada en septiembre de 2021: DIN EN ISO 10218-1:2021-09. En este contexto, el desarrollo progresivo de nuevos estándares en los últimos años ilustra la tendencia creciente hacia la HRI industrial, [Robla, 2017]. Aunque en Colombia y la mayoría de los países latinoamericanos, todavía no se han definido un grupo de normas armonizadas con los estándares internacionales, que permitan enmarcar el desarrollo normativo de la robótica y sus aplicaciones en nuestros países; sí es posible aplicar los referentes mencionados en la tabla 6, para que dicha industria pueda estar al nivel exigido por la normativa internacional actual.

5. Conclusiones

En la tabla 2 “Tipos de interacción y sus características”, se presenta el campo de aplicación de los conceptos HRI (interacción humano - robot con cobots) y HRC (colaboración humano - robot), según los cuatro grupos de interacción (celda, coexistencia, cooperación y colaboración). Considerando lo anterior, para la FMC que se pretenda diseñar, integrar o actualizar; es necesario realizar una descripción detallada de los tipos de riesgos, y consideraciones para evaluación (se recomienda dar una lectura a la referencia, [Sick, 2015]); con el fin de configurar el robot, y desarrollar de forma iterativa la evaluación de riesgos. Esta última comienza con el diseño funcional y geométrico de las operaciones y los límites de este, así como las condiciones de espacio y ambientales; y posteriormente realizar una identificación y evaluación de las tareas con sus riesgos asociados. Luego, es necesario considerar la reducción del riesgo asociado con el contacto transitorio en la interacción hombre-robot, e implicará la limitación de la velocidad de las piezas móviles, y por ende concebir el diseño más adecuado de las características físicas de dicha interacción. El anterior procedimiento, implica analizar los conceptos

expuestos en la tabla 4 “Seguridad en ambientes de robots Industriales colaborativos”, y en la tabla 5 “Clases de requisitos de seguridad en robots colaborativos”. Además, se ha de considerar el alcance normativo que se pretende para la FMC en el contexto industrial de nuestro país, dado que, al no existir referentes nacionales específicos, es necesario tomar uno del panorama de normas indicado en la tabla 6 “Normas internacionales aplicables a los robots”. De acuerdo con lo expuesto en esta última tabla, existen un primer grupo de normas que están armonizadas con la directiva de maquinaria 2006/42/EC; otro grupo de normas que aplican a requisitos de seguridad; otro grupo que aplica a robots montados sobre vehículos guiados, los cuales son comunes dentro aplicaciones de celdas de manufactura flexible; y por último está el grupo de normas que aplican a robots en general. Un detalle muy relevante es considerar que los robots ligeros LWR son más adecuados que los robots industriales, dado que éstos tienen incorporadas la mayoría de las características de seguridad requeridas para una interacción segura. Sin duda cuando se diseña, integra o actualiza una FMC, considerando los criterios de seguridad que deben ser atendidos por la misma, habrá efectos sobre el scheduling y, por lo tanto, sobre los tiempos proyectados de los procesos, así como su flexibilidad. En este ámbito no se debe perder de vista que además de minimizar los riesgos de la FMC, se busca también proteger la inversión de una empresa, lo cual implicará una optimización de los intereses en ambos sentidos. Por último, la introducción de los gemelos digitales ayudará a enfocar la forma de concebir el desarrollo de una celda de manufactura flexible; pues con cada cambio de parámetros de producción del sistema físico, se han de simular nuevas variables que permiten predecir los riesgos asociados, el comportamiento futuro, y por ende optimizar el modelo, visualizando y evaluando sin el riesgo de pérdidas financieras o daños humanos presentes en la producción real.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ahmad, A & Brem, A. Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 68; 2021.

- [2] Andronas, D & Argyrou, A. Design of Human Robot Collaboration workstations: Two automotive case studies. Elsevier. 2020.
- [3] Blankemeyer, S & Recker, T. A Method to Distinguish Potential Workplaces for Human-Robot Collaboration. *Procedia CIRP*, Volume 76. Pages 171-176; 2018.
- [4] Garibay, V. Integración de una celda de manufactura para inyección de plástico, Universidad Autónoma de nuevo León; 2007.
- [5] Görnemann, O. Seguridad intrínseca en máquinas y herramientas. Conference: ORP 2013 - XI International Congress on Occupational Risk Prevention, Chile. 2013.
- [6] Groover, M. Fundamentos de manufactura moderna 3ed, McGraw-Hill. Interamericana Editores, S. A. de C. V. 2007.
- [7] Kopp, T & Kinkel M. Success factors for introducing industrial human-robot interaction in practice: an empirically driven framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; 112:685–704. Springer; 2021.
- [8] Markis, A & Papa, M. Safety of Mobile Robot Systems in Industrial Applications. Conference Paper; <https://www.researchgate.net/publication/337339431>; 2019.
- [9] Matheson E, & Minto R. Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review. *Robotics*; 2019.
- [10] Michalos, G & Makrisa, S. Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces. *Procedia CIRP*, Volume 37. Pages 248-253 Elsevier; 2015.
- [11] Moreno, A y Cardona, A. Implementación de un sistema de automatización y control de calidad para la mejora de la celda de manufactura del laboratorio de ingeniería mecatrónica. Universidad tecnológica de Pereira, Pereira. 2020.
- [12] Robla, S & Becerra, Victor. Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments. *IEEE Access*, vol 5; 2017.
- [13] Senao, V y Fernández, J. Seguridad en una célula flexible de producción de piezas de aluminio. Universidad politécnica de Cataluña. 2004.

- [14] Ortega, J.B. Sistemas flexibles de manufactura para entornos académicos como respuesta al desarrollo tecnológico de las pymes en Colombia, Bogotá. Revista Citas vol. ii numero1, páginas 81 a 88; 2016.
- [15] Siciliano, B & Khatib, O. Springer Handbook of Robotics. 2nd edition. ISBN: 978-3-319-32550-7, Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2016.
- [16] Sick ag, Guide for Safe Machinery – Six steps to a safe machine. Waldkirch, Germany. Art. Nr. 8007988/2015-07-07. 2015.
- [17] Tuvrheinland, Un robot de colaboración más amable y gentil, Una guía sobre tecnología, casos de uso y validación, normas y directivas. <https://www.tuv.com/content-media-files/mexico/pdfs/industrial-services/tuv-rheinland-kindercollaborativerobot-071217.pdf>; 2018.