

Diseño de tareas persona-robot en el ámbito académico

Design of human-robot tasks in academic environment

Bisnu Masó Clota¹

(1) Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España
bisnumaso@gmail.com

Pere Ponsa Asensio^{1,2}

(2) Sistemas Inteligentes de Control, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España
pedro.ponsa@upc.edu

Sebastián Tornil Sin^{1,2,3}

(3) Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España
sebastian.tornil@upc.edu

Recibido: 16.04.2020 | Aceptado: 30.06.2020

Palabras Clave

Diseño de interacción
Diseño del lugar de trabajo
Asignación de tareas
Interacción persona-robot
Métricas de evaluación

Resumen

Este artículo expone la necesidad de adaptación del currículo universitario a las nuevas tecnologías, en concreto en aspectos de robótica colaborativa. Y se incide cómo, a través de la disciplina interacción persona-ordenador, es posible aportar aspectos de diseño de interacción con la finalidad de mejorar el rendimiento de sistemas persona-robot. La principal contribución de este artículo es el contexto interdisciplinar, que transcurre inicialmente desde la ergonomía e interacción para fusionarse con aspectos de ingeniería y tecnología.

Keywords

Interaction design
Workplace design
Task allocation
Human-robot interaction
Assessment metrics

Abstract

This article exposes the need to adapt the University curriculum to new technologies, in particular collaborative robotics. In addition, this article shows how, through the field of human-computer interaction, it is possible to provide interaction design approach with the purpose of improving the performance of human-robot systems. The main contribution of this article is an interdisciplinary context, which initially goes from ergonomics and interaction to merge with engineering and technology aspects.

1. Introducción

La robótica industrial presente en escenarios industriales no facilita la interacción con los humanos ya que se prioriza la seguridad de personas y bienes, por lo que la solución habitual es un espacio cerrado mediante vallado en torno al robot. Así, cuando el humano accede abriendo una puerta del vallado, el robot industrial debe parar (CEA 2008), (Barrientos 2007). La transformación de la robótica industrial hacia escenarios de robótica colaborativa está transformando el modelo de seguridad a aplicar, desapareciendo el vallado y favoreciéndose la compartición del espacio de trabajo para el

desarrollo de tareas cooperativas entre humano y robot. La interacción presente en este caso es física (Medina 2017). Por interacción física se hace referencia a la compartición del espacio entre humano y robot, proximidad entre humano y robot, contacto físico voluntario entre ambos (limitado en el tiempo), contacto físico involuntario (colisión) e intercambio recíproco de fuerzas (Pérvez & Ryu 2008). A nivel mecánico, el robot debe cumplir con especificaciones de limitación de fuerza y velocidad; a nivel humano se debe analizar aspectos de biomecánica, prevención de riesgos y lesiones asociados a contactos físicos involuntarios.

Una de las finalidades de la robótica colaborativa es la de introducir robots en pequeñas y medianas empresas en las que tradicionalmente todas las tareas se realizaban por humanos y ahora conviene planificar una distribución de tareas entre el robot y el operador humano (Yaskawa 2019). Así pues, conviene averiguar el grado de madurez de la robótica actual hacia nuevos modelos de interacción. En estos modelos persona-máquina hay diversas funcionalidades a desarrollar para ambos: planificación, monitorización, intervención, aprendizaje, interacción entre humano y agente artificial (capacitado para tener un diálogo con el humano), valoración de la carga mental, niveles de automatización (control manual, control compartido, control supervisado) (Sheridan 2006). En este camino, la robótica evoluciona hacia la robótica cognitiva, y atendiendo a los avances en inteligencia artificial, próximamente habrá que analizar la integración de humanos con sistemas de ingeniería artificial (Cañas 2004), (Teo *et al.* 2019), (Illankoon *et al.* 2019). En resumen, la interacción entre humano y robot es un área emergente que está evolucionando a medida que la robótica actual también lo hace en el marco del nuevo paradigma industrial denominado fábrica conectada. Esto afecta a la confección de planes de estudio actuales, que deben revisarse para mostrar una flexibilidad acorde a la transformación tecnológica. Así, desde el ámbito de la interacción persona-ordenador, en concreto interacción persona-robot, se abre un camino a recorrer en docencia e investigación para favorecer la sinergia entre profesionales y académicos, ya que se aprecia que el problema no es puramente tecnológico y si se diseñan robots orientados a trabajar con humanos conviene modelar correctamente el tipo de interacción adecuada (Ren *et al.* 2019).

El objetivo de este trabajo es abordar el diseño de tareas cooperativas entre persona y robot atendiendo a la perspectiva técnica y a la vez añadiendo el punto de vista de la ergonomía de los sistemas interactivos. El contexto del trabajo es en el ámbito académico, para contribuir a la formación de estudiantes en el nuevo paradigma industrial (fábrica conectada) y en concreto en tareas semiautomatizadas. Los requisitos más relevantes están asociados a las restricciones impuestas por normativa en seguridad industrial, al diseño de estaciones con robot colaborativo (brazo mecánico sin posibilidad de movimiento de su base) y a la necesidad de formación de estudiantes de ingeniería en el rol de operadores que deben mejorar sus habilidades con las nuevas tecnologías.

El contenido del resto de este trabajo se organiza de acuerdo a las secciones comentadas a continuación. La segunda sección aborda aspectos básicos de inserción de robótica colaborativa en la docencia universitaria. La tercera sección

contempla el problema de definir el diseño de estación robotizada colaborativa en las siguientes dimensiones: diseño del espacio, modos operacionales, disposición de los componentes, diseño y funcionalidad del panel de mando, diseño y uso de componentes auxiliares (baliza, panel). La cuarta sección muestra la estructura de un programa de robot, el robot está supeditado al humano y se declara y concreta la actividad que realiza el humano junto al robot. La quinta sección aporta un caso práctico académico y la discusión cualitativa alrededor de la habilidad de estudiantes de cursos finales del grado de ingeniería, junto a la valoración subjetiva de futuros estudiantes universitarios. La sección sexta profundiza en el marco metodológico que se deriva de las secciones precedentes y aporta pautas para evaluación del rendimiento humano-robot. Finalmente se exponen conclusiones y líneas futuras de desarrollo.

2. Implicaciones en educación superior

En los planes de estudio universitarios de grado y máster que se enmarcan en el ámbito de la ingeniería industrial (como ejemplo más representativo puede considerarse el grado universitario en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática) suelen encontrarse materias y asignaturas relacionadas con la robótica industrial. En robótica industrial, la principal competencia específica es la adquisición de conocimientos y aplicaciones de los sistemas robotizados. En este contexto, el concepto de robot colaborativo está empezando a emerger, pero falta que se consolide como un nuevo tipo de robot con prestaciones singulares.

Es posible encontrar algún ejemplo docente de buenas prácticas en ámbitos pre-universitarios, (Moreno *et al.* 2019) pero es más difícil encontrar estas buenas prácticas a nivel universitario, con el inconveniente de que, por ejemplo, el robot colaborativo que se describe por Djuric y otros autores ya no se fabrica (Djuric *et al.* 2017). Así como es habitual encontrar libros sobre robótica y Lego para niños y adolescentes, no es habitual encontrar libros de referencia sobre robótica colaborativa. Las empresas publican documentos en forma de *e-books* donde sí que se accede a este conocimiento (Bouchard 2019), (Universal Robots 2020).

La robótica colaborativa significa que las tareas de preparación de herramientas y piezas, ensamblado de las piezas en un producto final, almacenado en cajas o stocks, por ejemplo, pueden ser compartidas entre humano y robot. En el humano se requieren habilidades y destrezas manuales, aunque es notorio reconocer que los nuevos robots equipados con elementos terminales sensorizados, y sistemas de control de posición y velocidad robustos, realizan las tareas de forma eficaz. La nueva economía digital está cambiando a

la baja la demanda de habilidades manuales de los humanos y está potenciando las habilidades en ciencia, tecnología, ingeniería artes y matemáticas (STEAM) (Sousa & Pilecki 2018), (Khine 2017). De hecho, se aprecia la tendencia en la necesidad de habilidades sociales como toma de decisiones, trabajo en equipo, solución de problemas, empatía y confianza, consciencia de la seguridad, etc. Así pues, la robótica colaborativa y la robótica cognitiva, plantean una encrucijada ya que las habilidades ordinarias de los humanos tienen una seria competencia con robots y demás artefactos que emergen en la fábrica conectada y por tanto es un reto potenciar las nuevas habilidades especializadas en humanos que demanda este nuevo paradigma (Deloitte 2016). La robótica colaborativa, como interacción física y atendiendo a tareas en la que todavía prevalece la habilidad manual, tiene encaje dentro de asignaturas de robótica en grados universitarios de ingeniería. La tabla 1 muestra la posibilidad de añadir un módulo de teoría sobre Interacción persona-robot (HRI) junto a los temas convencionales en la guía de estudio de una asignatura de grado universitario en robótica industrial. Antes de comentar HRI, se requiere explicar en qué consiste IPO y qué metodologías y técnicas pueden ser útiles en HRI. En cuanto a la robótica cognitiva, esta está aún desarrollándose en centros de investigación, si bien las Universidades están promoviendo masters universitarios en sistemas inteligentes, inteligencia artificial y robótica cognitiva donde se abordan aspectos interdisciplinares en aprendizaje, percepción, planificación, toma de decisiones, interacción, sistemas multiagentes, fábrica inteligente, etc. (UNED 2018), (UC3M 2020), (USAL 2020), (FIB 2020), (EEBE 2020). La tabla 2 muestra la posibilidad de añadir un módulo a los ya existentes que permita entender IPO, así como entender métodos y técnicas de la ergonomía cognitiva útiles en este contexto (Hollnagel & Woods 2005).

Tabla 1: Propuesta de inserción de contenidos IPO en asignatura de grado universitario en robótica industrial

Nombre del módulo: HRI.

Introducción a IPO. Métodos y técnicas.
Diseño del lugar de trabajo.
Diseño de interacción H-R
Diseño de interfaz
Métricas de usabilidad y experiencia de usuario

Tabla 2: Propuesta de inserción de contenidos IPO y ergonomía cognitiva en asignatura de máster universitario en sistemas inteligentes

Nombre del módulo: HRI.

Introducción a IPO. Métodos y técnicas.
Introducción a la ergonomía cognitiva.
Sistema cognitivo conjunto.
Arquitectura cognitiva en robótica
Métricas de usabilidad y experiencia de usuario

De forma genérica es necesario preparar un marco de trabajo que permita el encaje de esta nueva robótica en la adquisición de nuevas competencias, reformulación de planes de estudio, sinergia entre la ingeniería, ergonomía y el diseño de interacción. Potenciar esta nueva robótica en la educación superior no está exento de dificultades, pero presenta oportunidades destacables: área interdisciplinar, diseño de nuevos productos-servicios, adquisición de habilidades de programación y sirve de aliciente para la solución de problemas/proyectos en ingeniería (Montebelli *et al.* 2017).

Respecto aspectos prácticos de robótica colaborativa, poner en marcha un robot colaborativo en el laboratorio implica, a nivel docente, un rediseño de espacios y equipos, ya que las necesidades y requisitos de programación, seguridad e interacción con el usuario (profesor, estudiante, técnico) son distintas del robot industrial convencional. Las secciones tercera y cuarta de este artículo abordan en detalle estos aspectos.

3. Diseño

Esta sección presenta el diseño de célula robotizada colaborativa, atendiendo (en diferentes subsecciones) al diseño del espacio en función de los modos de operación, a la disposición de componentes y al diseño de la interfaz (mando, información).

3.1 Diseño del espacio

En la norma UNE-EN 775 (UNE 1996) se define el espacio controlado dentro de los aspectos relevantes de seguridad en la puesta en marcha de un robot industrial. En esta norma, dentro del espacio controlado, coexisten el espacio máximo (espacio barrido por el movimiento del robot con elemento terminal y pieza) y el espacio restringido (subconjunto de espacio máximo que puede obtenerse mediante la limitación del recorrido de algunas articulaciones del robot).

La normativa actual UNE-EN ISO 1028-1 (UNEB 2016) define el concepto de espacio de trabajo, asociado con esa idea de espacio máximo y restringido, junto a la posibilidad de que robot y humano puedan realizar tareas de forma simultánea en el llamado espacio de trabajo cooperativo. El adjetivo cooperativo es relevante, ya que los fabricantes industriales prefieren denominar a sus nuevos robots como sensitivos, colaborativos, pero no los llaman robots cooperativos. Así pues, atendiendo a esa normativa citada, el trabajo que pueden llevar a cabo humano y robot se denomina trabajo cooperativo. Un fabricante de robot colaborativo sigue las indicaciones de la normativa vigente y por tanto refuerza en

el manual de usuario le evaluación de riesgos, el uso previsto del robot y el uso no permitido. En opinión de los autores, puede añadirse al manual el listado de tareas para las cuales se ha diseñado el robot colaborativo (ensamblaje, inspección de calidad, soldadura, manipulación de material, asistencia a máquinas, entre otras) junto a una recomendación de asignación de tarea al humano o al robot en función de las habilidades, la experiencia, la complejidad de la tarea y el riesgo (véase tabla 3). Si el robot va a trabajar con el humano, es necesario conocer el grado de cooperación que va a prestar el robot para cada una de las tareas mencionadas en función del perfil del usuario.

Tabla 3: Propuesta de inserción de contenidos IPO y ergonomía en el manual de usuario del fabricante.

Nombre del módulo: interacción con el operador.
Lista de tareas y uso recomendado del robot.
Evaluación de riesgos.
Grado de cooperación que ofrece el robot en la tarea.
Recomendación de limitación de velocidad y fuerza en la tarea
Recomendación del uso del espacio de trabajo en función de la tarea

Así pues, en primer lugar, una vez instalado el robot colaborativo y revisado el espacio máximo y la posible limitación de movimiento respecto el volumen total posible, conviene diseñar el espacio. Para ello se consideran diversas posibilidades: que el espacio habilitado para trabajar sea de un solo uso o bien se fragmente el espacio en diversas zonas y que se puedan combinar dichos fragmentos en diversos usos. Para entrar en detalle, a modo de caso concreto el espacio se fragmenta en tres partes (véase figura 1):

- 1 Espacio restringido: es un espacio para las tareas a realizar por el robot
- 2 Espacio de tránsito: el robot y el humano utilizan este espacio para realizar tareas secundarias, pero no a la vez

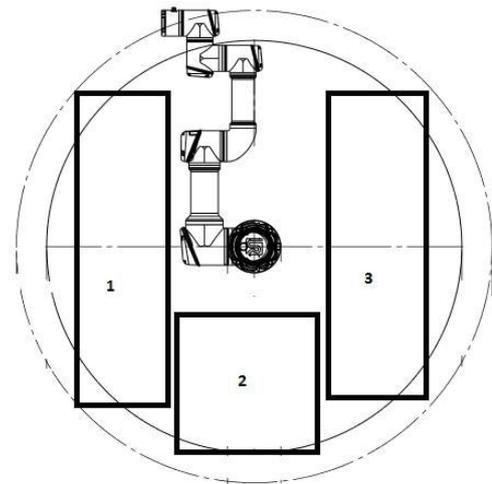


Figura 1: Diseño del espacio.

- 3 Espacio cooperativo: robot y humano pueden realizar tareas de forma simultánea

En el espacio 1, el concepto principal es el rendimiento en la producción, la tarea es 100% automatizada y la velocidad del robot es elevada. En el espacio 2, el concepto relevante es la entrada de materia prima por parte del operador a la estación, o bien la salida de producto: el robot deposita el producto finalizado proveniente del espacio 1.

Tabla 4: Modelos operacionales y uso del espacio

Modo	Uso de espacios	Descripción
AUT	Espacios 1 y 3 para tareas robotizadas Espacio 2 como stock de materia prima; entrega de producto	Estación automatizada
SEM	Espacio 1 para tarea robotizada automatizada Espacio 3 para tarea robotizada colaborativa Espacio 2 como stock de materia prima; entrega de producto	Estación semiautomatizada
COL	Espacios 1, 2 y 3 para diversas tareas colaborativas El operador puede añadir materia prima y retirar producto en cualquiera de los espacios	Estación colaborativa
Manual 0	Espacios 1, 2 y 3 para control de calidad, mantenimiento, puesta en marcha	Estación en mantenimiento

En el espacio 3, robot y humano pueden realizar una tarea de forma conjunta por lo que la velocidad del robot es reducida, es factible el guiado manual del robot, es necesario limitar la fuerza que ejerce el brazo mecánico y si procede hay que realizar una parada monitorizada (ISO 2016).

La configuración que se muestra en la figura 1 es un caso particular de un problema más amplio, a saber, la flexibilización

del uso del espacio. Así, si se definen los modos operacionales (automático, semiautomático, colaborativo, manual) se puede realizar de forma genérica una redistribución del uso de los espacios tal como se muestra en la tabla 4.

Más allá del caso particular de una aplicación robótica concreta, en la que debe abordarse el tipo de elemento terminal y la aplicación, el operador debe reconocer el modo de funcionamiento de la estación que incorpore un robot colaborativo y la segmentación del uso del espacio ayuda a ese reconocimiento. Los fabricantes de robots colaborativos indican en los manuales de usuario el volumen del robot, e indicaciones numéricas de tiempo y distancia de parada, pero sería recomendable incluir en ese volumen aspectos de antropometría y alcance humano (horizontal, vertical) relacionados con las dimensiones del robot.

3.2 Disposición de componentes en estación

En los aspectos previos de la puesta en marcha de una estación robotizada conviene tener en cuenta el acondicionamiento del lugar de trabajo, el tipo de accionamiento (eléctrico, neumático), las posibilidades de conexionado de entradas y salidas, etc.



Figura 2: Diseño de la estación.

En su totalidad, el diseño de la estación comporta facilitar al operador diversos tipos de tareas, de ahí que el acceso cómodo a cada uno de los componentes es uno de los criterios seguidos para el diseño. En un diseño inicial, la figura 2 muestra la disposición de algunos de estos componentes.

El equipo robótico está formado por brazo mecánico, armario de control y la consola de programación dispuestos en dos niveles. Sobre la mesa se dispone una baliza para la visualización del estado de la estación, junto con regleta para facilitar el conexionado del elemento terminal, sensores y otros actuadores al armario de control, en el piso inferior de la mesa. La mesa que se muestra es fija, pero puede añadirse ruedas para su transporte.

La estación se complementa con un panel de mando industrial y un botón de paro de emergencia (paro genérico de la estación que se complementa con el paro de emergencia del robot dispuesto en la consola de programación).

En su conjunto, la funcionalidad permite la entrada de órdenes del operador (pulsadores, selectores, pantalla táctil), la programación de tareas robotizadas, y la recepción de información a través de la pantalla de la consola de programación y la baliza.

El espacio cercano al brazo mecánico se ha dejado, a propósito, vacío para facilitar el uso del espacio explicado en la sección anterior. La disposición del robot conlleva que se pueda completar, de forma opcional, en la parte posterior, una mesa con ordenador de sobremesa. La estación es autosuficiente, añadir una mesa de ordenador puede facilitar tareas de acceso y control remoto, en entorno didáctico de laboratorio docente.

3.3 Diseño de panel de mando

En el diseño del panel de mando se tiene en cuenta la siguiente funcionalidad vertical: puesta en servicio (alimentación eléctrica de la estación) y modos de funcionamiento. La figura 3 muestra, además, detalle con una distribución horizontal: una parte superior de visualización con leds, una parte inferior de control con selectores y pulsadores.

En automatización industrial es habitual un selector de modo manual/automático. En robótica colaborativa, el operador puede cooperar con el robot (etiqueta COL, etiqueta SEM), de ahí que la terminología es distinta a la habitual.

Una vez el operador ha seleccionado el modo operacional de trabajo, lo valida apretando un pulsador (etiqueta Validar).

Esta identificación del modo operacional tiene su repercusión en conocer en todo momento el comportamiento de la estación. Atendiendo al hecho de que pueden existir diversos tipos de estaciones robotizadas y automatizadas en un entorno industrial, es conveniente que el operador reconozca fácilmente dicho comportamiento.

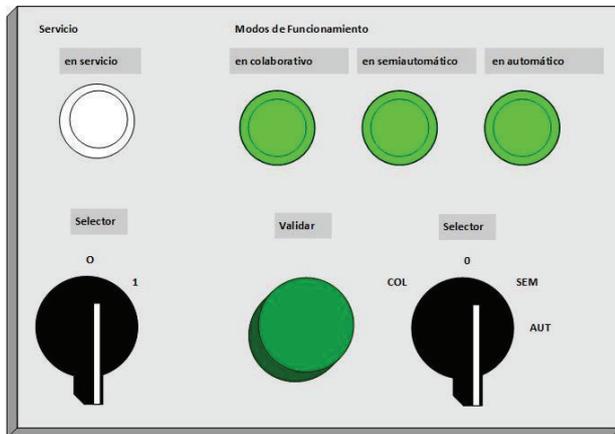


Figura 3: Diseño de panel de mando.

Tanto para estudiantes en últimos años de grados de ingeniería como operadores en planta que tienen el primer contacto con nuevas tecnologías, es relevante facilitar la comprensión y el reconocimiento de la funcionalidad.

La gestión de la transición de un modo operacional a otro, permite al operador adaptar su ritmo de aprendizaje ante la incorporación de nuevos robots en un lugar de trabajo inicialmente no automatizado. Otra finalidad importante del uso de modos operacionales en el panel de mando, es que contribuyen como señales de entradas digitales al programa de robot, por lo que añade flexibilidad en la programación de tareas robóticas, tal como se analizará en la sección 4.

3.4 Diseño de baliza

La baliza puede aportar información complementaria. Una primera propuesta es una baliza vertical con 4 luces que aporten la información presentada en la tabla 5.

Tabla 5: Diseño y uso de la baliza

Color en la baliza	Estado de la estación
Verde	Funcionamiento normal
Ámbar	Alarma (aviso previo de robot finalizando tarea automática)
Rojo	Fallo de dispositivo. Requiere paro de la estación
Azul	Se ha activado el acceso y/o control remoto del robot

La normativa ISO 10218-2-2016 (ISO 20016) define el acceso remoto con intervenciones manuales para el diagnóstico del robot. El fabricante facilita la conectividad del equipo robótico

a una red LAN o red inalámbrica y hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El operador debe poner en modo 0 el selector de la derecha en la figura 2 y validar la selección.
- El operador debe activar el modo remoto en la interfaz de la consola de programación del robot; se activa también un indicador visual en esa pantalla.
- La baliza indica el estado remoto accionando la luz azul.
- El operador local debe estar sincronizado con el operador remoto para supervisar las tareas y minimizar los peligros existentes para personas y equipos.
- El fin de la tarea remota conlleva que el operador restablezca el acceso local de la estación, desactivando esa opción en la consola de programación del robot.

Así pues, los avances tecnológicos en acceso remoto a equipos y máquinas, comportan, en el caso de la robótica colaborativa, la definición de dos perfiles de usuario (operador local, operador remoto). El rol del operador local está bien definido tal como se ilustra en esta sección y en la siguiente, mientras que el rol del operador remoto debería analizarse mediante técnicas de recorrido cognitivo para elicitar de forma clara las posibles tareas útiles para el operador remoto.

3.5 Diseño de panel de mando auxiliar

En las primeras fases de la programación de tareas robotizadas se procede a la programación offline y es habitual que la periferia del robot no esté completamente desarrollada. En este contexto, además del mando de la figura 3, es útil disponer de un panel de mando auxiliar con un conjunto de pulsadores que emulen la activación de un sensor ante la presencia de una pieza; en este momento al cumplirse la activación de una entrada digital, el programa de robot puede continuar. No es esta la única funcionalidad a añadir en un panel de mando auxiliar. Así, se propone un panel de mando auxiliar que tenga en cuenta, además, la gestión del programa de robot por parte del operador (véase figura 4). En este panel de mando, el operador dispone de un interruptor que al ser activado procede como autorización para la ejecución del programa de robot. El selector de tareas pretende reflejar la gestión de tareas por parte del operador, ya que dependiendo de la complejidad de la estación pueden coexistir diversos tipos de tareas. Es habitual que en una estación automatizada el robot realice una sola tarea, pero en una estación colaborativa la flexibilidad en tareas puede permitir que el robot realice la aplicación de paletizado y en otra zona realice tarea de ensamblado de piezas, etc.

De ahí que de forma básica se puede diseñar una estación para una sola tarea, y cuando el operador decide ampliar el número de tareas, conviene conocer el número de tareas, seleccionar el tipo de tarea y validar la decisión (etiqueta Verificar). Se observa en este punto que la habilidad manual del operador deja paso a la flexibilidad cognitiva para que el operador decida adecuadamente. Cuando el operador pulsa sobre una de las entradas sensoriales, activa la señal que el programa de robot está esperando para proseguir, y por tanto es una emulación de un sensor físico que detecta la presencia/proximidad de una pieza, y el robot puede realizar una tarea de pick and place, por ejemplo.

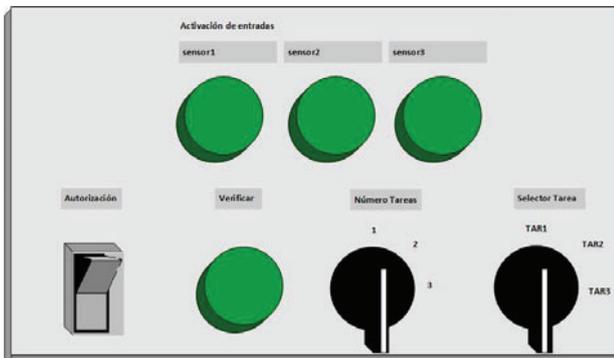


Figura 4: Diseño de panel de mando auxiliar.

4. Programación

En esta sección se describe la estructura genérica de un programa de robot, teniendo en cuenta que las decisiones del operador se transmiten en forma de acciones sobre los paneles de mando y como entradas lógicas en el código.

La estructura del programa según funcionalidad permite acotar el comportamiento del robot, así, por ejemplo, el operador debe adecuar la reducción/aumento de la velocidad y el uso del control de fuerza según el modo operacional. Una plantilla con la estructura de código genérico permite iniciar el entrenamiento del operador/estudiante en el uso de robots colaborativos (véase figura 5).

La plantilla es coherente con la asignación de tareas y el modo operacional. Modelar este código permite facilitar la escalabilidad hacia un diseño estructurado que permita actualizar las prestaciones del robot.

La plantilla está concebida para su uso por el operador local. A su vez, si es necesario el acceso remoto, el operador remoto necesita entender el contexto en el que se ha realizado esta programación, por lo que la plantilla es un punto de encuentro entre operadores que pueden tener distintos enfoques en la programación de tareas, pero que deben

entender cómo diagnosticar correctamente los problemas del uso del robot.

```

----- Inicio código genérico -----
BeforeStart (Antes de iniciar)
    Secuencia que se inicia antes de ejecutar el programa principal (valores variables, estado I/O,
    contadores...).

Robot Program (Programa principal)
    if selector servicio = 1
        if selector = aut and validar=1 // selección modo automático y validar
            if sensor 1 = 1 // activación señal sensorica emulada
                call nombreprograma_aut // llamar un subprograma
            elseif selector = sem and validar=1 // modo semiautomático y validar.
                call nombreprograma_sem // llamar un subprograma
            elseif selector = col and validar=1 // modo colaborativo y validar.
                call nombreprograma_col // llamar un subprograma
            elseif selector = 0 and validar=1 // modo manual y validar.
                Secuencia paro robot.
        else
            Secuencia de programa (Ejemplo: pop up con mensaje).
nombreprograma_aut // subprograma dentro del programa
    Secuencia subprograma tarea automática en espacio13.
nombreprograma_sem // subprograma dentro del programa
    Secuencia subprograma tarea automática en espacio1.
    Secuencia subprograma tarea colaborativa en espacio3.
nombreprograma_col // subprograma dentro del programa
    Secuencia subprograma tarea colaborativa en espacio123.
----- Fin código genérico -----
    
```

Figura 5: Plantilla de código genérico.

5. Caso práctico y discusión

En esta sección se describe un caso práctico desarrollado en laboratorio de Automatización y Robótica Industrial a lo largo de 6 semanas. El objetivo es el desarrollo de las recomendaciones de diseño y programación comentados en las secciones anteriores. En la puesta en marcha del robot se ha procedido a la fragmentación del espacio y asignación de tareas:

- En espacio 1, el robot realiza tarea de pick and place automática, recogiendo una bola metálica del final del recorrido de una pequeña montaña rusa y depositándola nuevamente en el punto más alto de la misma (de forma que la gravedad da lugar a la repetición del proceso).
- En el espacio 2, el robot realiza una tarea de pick and place automático en el apilado vertical de piezas.
- En el espacio 3, el humano verifica la pieza (control de calidad) e inserta una pila en la cola de espera en el espacio 2 (afectando la tarea del robot, que cuando finaliza el apilado de una pieza, procede con la siguiente pieza que le ha dispuesto el humano).

Se ha diseñado y fabricado mediante impresora 3D el complemento en plástico que permite la sujeción del electroimán (elemento terminal) a la muñeca del robot (véase figura 6).

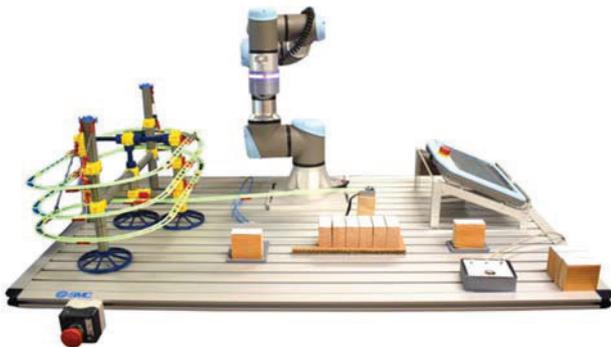


Figura 6: Diseño de la estación expuesta.

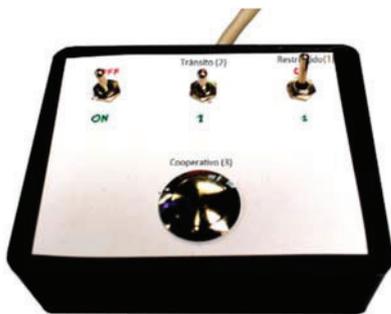


Figura 7: Panel de mando auxiliar.

Se ha procedido a la alimentación eléctrica del elemento terminal conectado al controlador del robot mediante el uso de un relé y alimentación externa y se ha añadido un conjunto de leds que muestran el estado de funcionamiento del electroimán. Junto a la consola de programación original del robot, se ha diseñado e implementado un panel de mando auxiliar (figura 7) para el intercambio de información entre las acciones del humano y del programa del robot. El modo operacional adoptado ha sido el modo semiautomático. Por precaución se ha disminuido el umbral de percepción de fuerza del robot para que, en caso de contacto físico involuntario (colisión entre humano y robot), el impacto sobre el humano esté bajo control y no genere lesión alguna.

El caso práctico se ha desarrollado bajo la metodología de aprendizaje basado en proyectos, abordando todas las fases del proceso con éxito (contexto de uso, requisitos, diseño, prototipado, desarrollo, puesta en marcha, evaluación) (Zapata *et al.* 2016). Para ello es imprescindible que el estudiante de ingeniería (Grado en Electrónica y Automática Industrial) disponga de una base previa de conocimientos, por lo que se recomienda que este tipo de proyectos pueden ser

asumibles en asignaturas de último año de la titulación. En este caso, el estudiante está llevando a cabo el trabajo fin de grado.



Figura 8: Soporte a usuarios en jornada de puertas abiertas.

El estudiante adopta el rol de experto autónomo por lo que no se realiza la tradicional supervisión del profesorado hacia el estudiante realizando una práctica de laboratorio, sino que se conciben las reuniones quincenales como intercambio de logros en los requisitos, progreso en la solución de problemas y avances hacia un proceso eficiente.

Finalmente, el proceso se ha expuesto en el Hall de la Escuela, dentro de las Jornadas de Puertas Abiertas del centro, interactuando con usuarios (futuros estudiantes) y valorando el grado de aceptación (véase figura 8). Para estudiantes de ciclos formativos en robótica y automatización industrial, en concreto tres usuarios, el proceso les ha parecido básico, ya que conocen la robótica colaborativa en su centro, si bien la organización del espacio de trabajo y la funcionalidad les ha parecido interesante. Otro perfil de usuario, con escasa experiencia previa en robótica, en concreto tres usuarios, se han mostrado interesados en el proceso ya que les ha permitido poner en valor el uso de la robótica colaborativa. Ellos han realizado guiado manual sobre el robot, comprobando por sí mismos la facilidad con la que el robot puede moverse, debido al sensor de fuerza que tiene este en su muñeca) y han respondido al cuestionario de satisfacción System Usability Scale, SUS (véase figura 9). El valor medio de la puntuación SUS es de 83,3 y la desviación estándar es de 4,2.

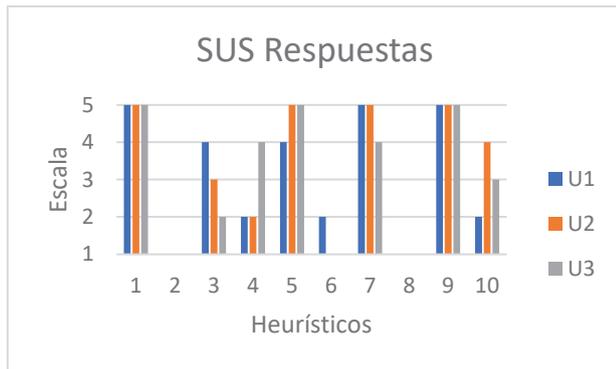


Figura 9: Respuesta a cuestionario SUS.

Las respuestas de estos tres usuarios, reflejadas en la figura 9, muestran unanimidad en la respuesta (totalmente en desacuerdo) con la pregunta 8 del cuestionario SUS (8 *He encontrado el robot bastante incómodo de usar*).

Y también muestran unanimidad en la respuesta (totalmente de acuerdo) con la pregunta 9 del cuestionario SUS (9 *Me he sentido muy seguro haciendo uso del robot*). El cuestionario SUS utilizado es una adaptación del cuestionario original de John Brooke, en el que se ha sustituido la palabra “sistema” por “robot” (Brooke 1996). Atendiendo que la robótica colaborativa pretender ser útil a los humanos, parecen muy oportunas las preguntas 8 y 9 ya que dicha robótica está centrada en la compartición de tareas entre humano y robot, y la confianza del humano con el robot es clave para un buen rendimiento.

Estos resultados preliminares permiten una primera valoración a tener en cuenta para la puesta en marcha definitiva del sistema robótico en laboratorio docente dentro de la asignatura de robótica del grado de ingeniería en electrónica industrial y automática. En este ámbito docente se pretende potenciar la complejidad de tareas y adquirir la valoración de satisfacción del colectivo de estudiantes (en valor medio, 60 estudiantes por semestre). No se ha considerado oportuno diseñar un cuestionario propio centrado en medir la satisfacción/experiencia de usuario, con el uso de un robot colaborativo, ya que los autores entienden que se requiere un estudio científico más profundo, fuera del alcance del presente trabajo (Lasota *et al.* 2014).

Desde el punto de vista del instructor docente conviene destacar la facilidad con la que el diseño, modos operacionales, tareas, uso del espacio y programación pueden ser llevados a cabo. Respecto al panel de mando y panel de mando auxiliar, sería preferible una solución basada en interfaz persona-máquina HMI táctil que permite una entrada de datos cómoda al usuario y una eficiente realimentación visual. Se aprecia una omisión de productos comerciales tipo HMI táctil orientado a la robótica colaborativa, de ahí que se

ha insistido en la necesidad de que son un elemento imprescindible en la entrada de información que hace el humano sobre el programa de robot.

Uno de los elementos a valorar es la realimentación háptica (Shanmuganatha *et al.* 2017), es decir, en una interacción física en la que el humano hace de guía pudiendo sujetar y mover el brazo mecánico del robot, se hace necesario algún elemento que muestre el grado de fuerza que se está aplicando. El humano tan solo percibe esa fuerza cuando tiene contacto físico directo e intenta mover el robot, pero a priori, el humano no sabe exactamente qué grado de fuerza debe ejercer, sobre qué parte del robot en concreto, y cuál será la respuesta del robot (se dejará guiar, o bien se bloqueará cuando por programación uno de los ejes llega a un límite que no queremos sobrepasar). Por tanto, es importante potenciar una realimentación clara en aspectos de fuerza en forma de mensajes de texto en la consola de programación, o en forma de otros tipos de señales que el humano pueda percibir. Un ejemplo sería utilizar un sensor de vibración insertado sobre pulsera en muñeca del humano, que reaccione con diversas señales en función de diversos grados de fuerza aplicados (Morrison *et al.* 2018).

6. Sistema interactivo humano-robot

La robótica colaborativa va más allá del diseño de sistema interactivo centrado en las personas, ya que a medida que el robot disponga de más capacidades, la interacción con un humano podrá ser más completa. En esta sección se analizan conceptos de diseño de sistemas interactivos que pueden ser usadas como metodología efectiva en el contexto de la interacción persona-robot siempre que pasen por un proceso de revisión, ampliación y validación, tal como se está llevando a cabo por organismos internacionales como el NIST en diversos proyectos en robótica (NIST 2018).

Siguiendo el diseño centrado en sistemas interactivos, la figura 10 aporta fases ya conocidas como el contexto de uso, análisis de requisitos, diseño, prototipado, evaluación. Algunas secciones de este trabajo muestran de forma fragmentada algunas de estas fases.

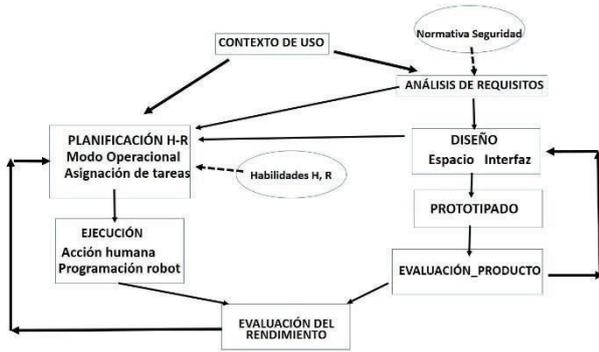


Figura 10: Modelo de Sistema interactivo H-R.

A partir del contexto de uso y el diseño, debe abordarse la planificación de la actividad H-R. En detalle, debe abordarse el modo operacional y la asignación de tareas H-R, atendiendo a los antecedentes de las habilidades del humano y del robot. Esta fase de planificación es relevante ya que se está introduciendo robots en lugares de trabajo en los que inicialmente la actividad era manual, por lo que se hace imprescindible la valoración de adquisición de habilidades, y paso de operadores novatos a operadores expertos (Koch *et al.* 2017).

Tabla 6: Métricas de eficacia y eficiencia

Métrica	Detalle
Eficacia	
te	Tasa de éxito de tarea respecto el total de tareas de la actividad
nc	Fallo de dispositivo. Requiere paro de la estación
Eficiencia	
ta	Tiempo total de la actividad
tac	Tiempo de actividad concurrente (H-R): porcentaje de tiempo durante el cual los dos agentes están activos en el mismo intervalo temporal
tt	Tiempo para completar una tarea (H,R)
ti	Tiempo de inactividad: porcentaje de tiempo durante el cual el agente (H,R) está inactivo
rf	Retraso funcional: porcentaje de tiempo entre la finalización de una tarea por el agente (H,R) y el inicio de la siguiente tarea del otro agente (R,H)

Tabla 7: Adaptación de cuestionarios (*)

Cuestionario	Detalle
TAM fragmento	
1	Usar este robot en mi trabajo me permitiría realizar tareas más rápidamente
2	Usar este robot mejoraría mi desempeño laboral

3	Usar este robot en mi trabajo aumentaría mi productividad
4	Usar este robot mejoraría mi efectividad en el trabajo
5	Usar este robot me facilitaría hacer mi trabajo
7	Aprender a operar este robot sería fácil para mí
8	Me resultaría fácil lograr que este robot haga lo que quiero que haga
9	Mi interacción con este robot sería clara y comprensible
10	Creo que este robot es flexible para interactuar
11	Sería fácil para mí ser hábil al usar este robot
Fluidez fragmento	
1	El equipo H-R trabajó con fluidez juntos
2	Tuve que cargar con el peso para mejorar el equipo H-R
6	El robot no entiende lo que estoy tratando de lograr
7	El robot fue cooperativo
ISO 9241-420 Tabla D.1	
1	La fuerza requerida para la ejecución H fue
4	El esfuerzo físico H para desarrollar la tarea fue
4	La velocidad de la actividad H-R fue

Cuestionario	Detalle
SUS	
1	Creo que usaría este robot frecuentemente
2	Encuentro este robot innecesariamente complejo
3	Pensaba que el robot era fácil de usar
4	Creo que necesitaría ayuda de una persona con conocimientos técnicos para usar este robot
5	Las funciones de este robot están bien integradas
6	Pensaba que había demasiada inconsistencia en este robot
7	Imagino que la mayoría de la gente aprendería a usar este robot en forma muy rápida
8	Encuentro que el robot es muy incómodo de usar
9	Me siento confiado al usar este robot
10	Necesité aprender muchas cosas antes de ser capaz de usar este robot

(*) Cada una de las cuestiones sobre escala Likert con 5 grados de respuesta (completamente en desacuerdo a completamente de acuerdo).

En la fase de ejecución, es preciso valorar que el comportamiento humano no es determinista y en algunos casos la ejecución de una subtarea humana se puede demorar (el humano tiene la atención dividida entre varias tareas,

fatiga, error en la ejecución de las acciones). El robot tampoco se escapa de una ejecución irregular ya que se debe valorar si el programa de robot funciona de forma óptima o bien es mejorable (el robot lleva un tiempo trabajando con una carga en su elemento terminal elevada y los motores se han sobrecalentado, el programa puede optimizarse modificando velocidades, fuerza, puntos de la trayectoria).

Desde el ámbito de la interacción persona-ordenador, el experto en diseño de interacción puede proponer modelos mejorados del que se observa en la Figura 10. Con este modelado se contribuye a que los expertos técnicos dispongan de un contexto que facilite

la comprensión de conceptos que habitualmente no se abordan en planes de estudio en grados de ingeniería industrial (modelo de proceso ingeniería en usabilidad y accesibilidad, diseño de interfaz, ergonomía, experiencia de usuario), (Granollers 2020).

En la fase de evaluación hay que desarrollar métricas humano-robot H-R. Las habituales en interacción consideran efectividad, eficacia y satisfacción, es decir grado de éxito en el cumplimiento de la tarea, tiempo de la tarea, carga física, carga mental y satisfacción del usuario.

A estas hay que añadir métricas asociadas al comportamiento del robot, que en ámbito industrial se conocen como indicador clave de rendimiento: (porcentaje de utilización del robot, tareas completadas con éxito por el robot, tiempo de la tarea).

Estas métricas citadas son parciales ya que una vez se define una tarea H-R la sinergia entre cada uno de los agentes implicados conduce a un modelo más amplio en el que se debe considerar el rendimiento y la fluidez del trabajo en equipo (Hazbar 2019), (Hoffman & Breazeal 2007).

La tabla 6 muestra un esfuerzo inicial para mostrar aquellas métricas de especial interés en la medición de eficacia y eficiencia en este contexto. La notación H, R se refiere a Humano o a Robot, mientras que la notación H-R significa ambos Humano y Robot.

En la aplicación de cuestionarios de satisfacción, debe abordarse la necesidad de adaptar cuestionarios como el que se dispone en el Modelo de Aceptación de la Tecnología (TAM), el cuestionario System Usability Scale (SUS), el cuestionario de Fluidez (Subjective Fluency Metrics) y el cuestionario de la Tabla D.1 sobre confort de la norma ISO 9241-420:2011 (Davis 1989), (Brooke 2013), (UNE 2007),

(Hoffman 2019). La tabla 7 muestra un esfuerzo inicial en el desarrollo de heurísticos útiles para la evaluación subjetiva.

7. Conclusiones

Este trabajo contempla, inicialmente, aspectos de inserción de contenidos teórico/prácticos de robótica colaborativa en asignaturas de robótica industrial de grado universitario, Las nuevas tecnologías disruptivas promueven avances interdisciplinares, de ahí la necesidad de enfoques como el presentado en este trabajo en el que se aprecia la sinergia entre robótica colaborativa y sistemas interactivos. La disciplina IPO puede aportar el contexto necesario para entender la interacción de los usuarios con esta nueva tecnología disruptiva.

La sección tercera del artículo aporta recomendaciones para el diseño del lugar de trabajo H-R en laboratorio docente. A lo largo de 6 semanas se han aplicado estas directrices que concluyen en un caso práctico de funcionamiento. Los aspectos considerados (diseño del espacio, disposición de componentes, diseño de panel de mando) pueden exportarse a profesorado universitario que tenga la necesidad de poner en marcha equipos similares y ampliar contenidos docentes, ya que pueden replicarse con facilidad y son flexibles en cuanto favorecen la creatividad de soluciones mejoradas. Las recomendaciones presentadas son genéricas y no dependen del modelo de robot colaborativo comercial utilizado. Estas recomendaciones, junto al caso práctico de la quinta sección, puedan favorecer el trabajo en equipo interdisciplinar (estudiantes de grado de ingeniería en mecánica, electricidad, diseño industrial, electrónica industrial y automática, informática).

En el aspecto de programación de robots, los sistemas de robótica actuales están evolucionando hacia plataformas de comunicación (comunicación del robot con el entorno industrial local, comunicación remota) y programación avanzada (lenguajes de programación orientada a objetos, interconectividad entre componentes de fabricantes distintos) que van a permitir un incremento de las capacidades del robot. Así, en un entorno de fábrica conectada, mediante la instrumentación y comunicación pertinente, se podrá informar al robot de la localización del humano; mediante sensores de tipo acelerómetro, giroscopio y magnetómetro ubicados en forma de brazaletes en el brazo del humano, el robot podrá conocer la intención de la acción humana y realizar mediante algoritmos una predicción de las mismas; en entornos menos estructurados, el robot podría adaptarse al humano y no a la inversa.

En estos escenarios, será conveniente revisar las métricas del rendimiento del sistema H-R por lo que en la sexta sección de este artículo se plantea la necesidad de reajustar las conocidas métricas de eficacia, eficiencia de sistemas interactivos centrados en usuarios.

Lo mismo sucede con la medida de la satisfacción. En el diseño de sistemas interactivos H-R conviene seleccionar de los cuestionarios clásicos, aquellos heurísticos centrados en la aceptación de la tecnología, facilidad de uso, confianza, etc., a los que debe añadirse aspectos de confort, esfuerzo físico y fluidez del trabajo en equipo.

Sin duda, en el ámbito de la investigación, va a ser necesario abordar la generalización de modelos interactivos H-R a medida que se incrementen las habilidades cognitivas de los robots y estos se incorporen en lugares de trabajo compartidos con los humanos (Kaasiner *et al.* 2019). Así, por

ejemplo, si bien la robótica colaborativa no es tan disruptiva como la robótica cognitiva, los nuevos sistemas basados en brazo mecánico colaborativo sobre plataforma móvil rompen con el layout clásico de estación robotizada fija en un lugar específico de la planta.

La movilidad de estos sistemas robóticos en la planta, puede propiciar nuevas áreas de investigación centradas en diseño de lugar de trabajo interactivo reconfigurable, localización de humanos en interiores, análisis de la marcha humana y del movimiento de sistemas robóticos, seguridad y movilidad, entre otras (UNEa 2016), (Gualtieri *et al.* 2020).

8. Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo ha sido posible con el soporte económico del programa ERDF Operational Program of Catalonia 2014-2020.

Referencias

- Barrientos, A. (2007). Fundamentos de Robótica. Ed. McGraw-Hill, 2007.
- Bouchard, S. (2019). Lean robotics. Robotiq.
- Brooke, J B (1996). SUS - a quick and dirty usability scale. In: 'Usability Evaluation in Industry', Jordan, P., Thomas, B., Weerdmeester, B. & McLelland, I. (eds). Taylor and Francis: London.
- Brooke, J B (2013). SUS – a retrospective. Journal of Usability Studies, Vol. 8, Issue 2, February 2013 pp. 29-40.
- Cañas, J.J. (2004). Personas y máquinas. Ediciones Pirámide.
- CEA-GTRob (2008). Libro Blanco de la Robótica. Comité Español de Robótica CEA, Grupo de Trabajo Robótica.
- Davis, F.D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use and user acceptance of information technology. MIS Quarterly, 13, 3, 319-340.
- Deloitte (2016). Talent for survival: essential skills for humans working in the machine age. Deloitte Touche Tohmatsu Limited.
- Djuric, A., Rickli, J.L., Jovanovic V.M. & Foster, D. (2017). Hands-on learning environment and educational curriculum on collaborative robotics. ASEE Annual Conference Proceedings, 1-15.
- Escola d'Enginyeria Barcelona Est (2020). Master Interdisciplinary and innovative engineering. En URL: <https://eebe.upc.edu/ca/estudis/estudis-de-master/master-interdisciplinari-innovative-engineering>, última visita 21 Marzo 2020.
- Facultat Informàtica Barcelona (2020). Máster en Inteligencia Artificial. En URL: <https://www.fib.upc.edu/es/estudios/masteres/master-en-inteligencia-artificial>, última visita 21 Marzo 2020.
- Granollers, T. (2020). Modelo de proceso de la ingeniería de la usabilidad y la accesibilidad. En URL: <https://mpiua.invid.udl.cat/>, última consulta 2 Abril 2020.
- Gualtieri, L., Palomba, I., Wehrle, E.J. & Vidoni, R. (2020). The opportunities and challenges of SME manufacturing automation: safety and ergonomics in human-robot collaboration. In Industry 4.0 for SMEs Challenges, Opportunities and Requirements, Dominik T. Matt, Vladimír Modrák & Helmut Zsifkovits Editors, Palgrave Macmillan, 105-145.
- Hazbar, T. (2019). Task planning and execution for human robot team performing a shared task in a shared workspace. Rochester Institute of Technology.
- Hoffman, G. & Breazeal, C. (2007). Cost-based anticipatory action selection for human-robot fluency. IEEE Transactions on Robotics, 23, 5, 952-961.
- Hoffman, G. (2019). Evaluating fluency in human-robot collaboration. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 49, 3, 209-218.
- Hollnagel, E. & Woods, D.O. (2005). Joint cognitive systems. CRC Press.
- Illankoon, P., Tretten, P. & Kumar, U. (2019). Modelling human cognition of abnormal machine behavior. Human-Intelligent Systems Integration, 1, 3-26.

- ISO (2011). Ergonomía de la interacción hombre-sistema. Parte 420: Principios y requisitos para los dispositivos físicos de entrada. UNE-EN ISO 9241-420:2011.
- ISO (2016). Robots and robotic devices- collaborative robots. ISO/TS 15066:2016.
- Kaasinen, E., Liinasuo, M., Schmalfuß, F., Koskinen, H., Aromaa, S., Heikkilä, P., Honka, A., Mach, S. & Malm, T. (2019). A worker-centric design and evaluation framework for operator 4.0 solutions that support work well-being. En Barricelli, B. R., Roto, V., Clemmensen, T., Campos, P., Lopes, A., Gonçalves, F., & Abdelnour-Nocera, J. (Eds.). (2019). Human Work Interaction Design. Designing Engaging Automation: 5th IFIP WG 13.6 Working Conference, HWID 2018, Espoo, Finland, Revised Selected Papers (Vol. 544). Springer. 263-282.
- Khine, M.S. (2017). Robotics in STEM education: Redesigning the learning experience. Cham, Switzerland: Springer.
- Koch, P.J., van Amstel, M.K., Dębska, P., Thormann, M.A., Tetzlaff, A.J., Bøgh S. & Chrysostomou, D. (2017). A skill-based robot co-worker for industrial maintenance tasks. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, Modena. Italia.
- Lasota, P.A., Fong, T. & Shah, J.A. (2014). A Survey of Methods for Safe Human-Robot Interaction Foundations and Trends R in Robotics, Vol. 5, No. 4 (2014) 261–349,
- Medina, J. (2017). Avances en la interacción física segura humano-robot y el desarrollo de sistemas elásticos articulares. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III, Madrid. 2017.
- Montebelli, A., Billing, E. & Lindblom, J. (2017). Reframing HRI education: a dialogic reformulation of HRI education to promote diverse thinking and scientific progress. Journal of Human-Robot Interaction, Vol 6, 2, 2017, 3-26.
- Moreno, I., Muñoz, L., Serracín, J.R., Quintero, J. Pittí, K. & Quiel, J. (2012). La robótica educativa, una herramienta para la enseñanza-aprendizaje de las ciencias y las tecnologías. TESI, 13(2), 74-90.
- Morrison, A., Manresa-Yee, C., Knoche, H. & Jensen, W. (2018). Vibrotactile and vibroacoustic communications: pairs in interaction and play- an interactive structure and bodies in an urban environment. Universal Access in the Information Society, 17, 585-605.
- NIST (2018). Performance of collaborative robotic systems. National Institute of Standards and Technology. En URL: <https://www.nist.gov/programs-projects/performance-collaborative-robot-systems>, última consulta 19 Junio 2020.
- Pérvez, A. & Ryu, J. (2008). Safe physical human-robot interaction: past, present and future. Journal of Mechanical Science and Technology, 22(2008), 469-483.
- Ren, X., Silpasuwanchai, C. & Cahill, J. (2019). Guidelines for the design of collaborative human-robot tasks in academic field. CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction, 1, 7–68.
- Shanmuganatha, V., Pratap, L.P. & Shailendrasingh, P.M. (2017). Modeling and Control of Collaborative Robot System using Haptic Feedback. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal Vol. 2, No. 3, 1549-1555.
- Sheridan, T.B. (2006). Supervisory control. Handbook of human factors and ergonomics. Chapter 38, John Wiley and Sons.
- Sousa, D.A. & Pilecki, T. (2018). From STEM to STEAM. Corwin.
- Teo, G., Matthews, G., Lauren Reinerman-Jones, L. & Barber, D. (2019). Adaptive aiding with an individualized workload model based on psychophysiological measures. Human-Intelligent System Integration, 1-15, Springer.
- UNE (1996). Robots manipuladores industriales. Seguridad. UNE-EN 775. 1996.
- UNE (2014). Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 1: Robots. UNE-EN ISO 10218-1. 2014.
- UNEa (2016). Principios ergonómicos para el diseño de sistemas de trabajo. UNE-EN ISO 6385:2016.
- UNEb (2016). Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte II: Sistemas robot e integración. UNE-EN ISO 10218-2. 2016.
- UNED (2018). Memoria de Máster Universitario en Robótica Cognitiva. En URL: https://contenido.uned.es/informatica/memoria_mu_robotica_cognitiva.pdf, última visita 21 Marzo 2020.
- Universal Robots (2020). How robots help you bridge the automation skill gaps. En URL: <http://www.universal-robots.com>, última visita 21 Marzo 2020.
- Universidad Carlos III Madrid (2020). Máster Universitario en Industria conectada 4.0. En URL: <https://www.uc3m.es/master/industria-conectada-4.0>, última visita 21 Marzo 2020.
- Universidad de Salamanca (2020). Máster Universitario en Sistemas Inteligentes. En URL: <https://mastersi.usal.es/>, última visita 21 Marzo 2020.
- Yaskawa (2019). Un robot no siempre tiene que ser colaborativo. Automática e Instrumentación, 513, 8-11.
- Zapata, D.F., Garzón, M.A., Pereira, J.R., & Barrientos, A. (2016). QuadLab : a Project-Based Learning Toolkit for Automation and Robotics Engineering Education. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 81 (1), pp. 97-116.