

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**CARACTERIZACIÓN DEL MERCADO DE LOS COBOTS Y
OPORTUNIDADES PARA LA INDUSTRIA CHILENA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

ALEJANDRO HERNÁN NAVARRETE FUENZALIDA

PROFESOR GUÍA

Dr. RODOLFO IGNACIO SALAZAR ALBORNOZ

PROFESOR CO-RREFERENTE

Dr. BERNARDO EUGENIO PINCHEIRA SARMIENTO

VALPARAÍSO, 23 DE JULIO DE 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: CARACTERIZACIÓN DEL MERCADO DE LOS COBOTS Y OPORTUNIDADES PARA LA INDUSTRIA CHILENA

Nombre del candidato(a): Alejandro Hernán Navarrete Fuenzalida

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Casa Central **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rodolfo Ignacio Salazar Albornoz, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

X El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un período de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 23-07-2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 23-07-2026

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



Índice general

Resumen	11
Abstract	12
1. Introducción	13
2. Problema de la Investigación	15
3. Objetivos de la Investigación	18
3.1. Objetivo General	18
3.2. Objetivos Específicos	18
4. Alcance de la investigación	20
5. Marco Teórico	22
5.1. Automatización industrial, Industria 4.0 e Industria 5.0	22
5.2. Definición conceptual de robot colaborativo	23
5.2.1. Cobótica ampliada	25
5.3. Origen y evolución tecnológica de los cobots	27
5.4. Interacción humano-robot y modalidades de colaboración	28
5.5. Seguridad y marco normativo de la robótica colaborativa	30
5.6. Aplicaciones industriales de los cobots	31
5.7. Mercado global de robots colaborativos	33
5.8. Productividad, transformación digital y pertinencia para Chile	43
5.9. Limitaciones técnicas, económicas y organizacionales de los cobots	44
6. Metodología	45
6.1. Diseño metodológico	45



6.2.	Etapas metodológicas	45
6.2.1.	Etapa 1: Delimitación del problema, objetivos y alcance	45
6.2.2.	Etapa 2: Revisión documental estructurada	45
6.2.3.	Etapa 3: Caracterización del mercado global de cobots	46
6.2.4.	Etapa 4: Diagnóstico del contexto chileno	47
6.2.5.	Etapa 5: Análisis sectorial de oportunidades	47
6.2.6.	Etapa 6: Benchmarking internacional	48
6.2.7.	Etapa 7: Formulación de lineamientos estratégicos	50
6.3.	Criterios e indicadores para la priorización sectorial	51
6.3.1.	Criterios ex-ante de selección sectorial	51
6.3.2.	Indicador de justificación económica	52
6.3.3.	Normalización y ponderación de criterios	53
6.4.	Valor de relevancia para adopción de robótica	54
6.5.	Limitaciones metodológicas	55
7.	Resultados	56
7.1.	Sectores estratégicos para el análisis de oportunidades en Chile	56
7.1.1.	Nivel de manufactura o valor agregado y compatibilidad técnica	56
7.1.2.	Relevancia económica (PIB)	62
7.1.3.	Orientación exportadora	67
7.1.4.	Empleo sectorial	71
7.1.5.	Seguridad laboral	72
7.1.6.	Justificación económica preliminar	78
7.1.7.	Priorización de actividades económicas	129
7.2.	Benchmarking y lineamientos de incorporación en la actividad económica priorizada	131
8.	Conclusiones	154
9.	Discusión	157



10. Limitaciones	160
11. Anexos	162
11.1. Homologación de elementos exportados a actividades económicas del Banco Central de Chile	162
11.2. Homologación de criterios de ocupación laboral del INE a actividades económicas del Banco Central de Chile	165
11.3. Homologación de rubros económicos del SII a actividades económicas del Banco Central de Chile	167
11.4. Capacidad de mejora productiva para manufactura	168
11.5. Capacidad de generar ahorros para manufactura	170
Referencias	173

Índice de tablas

5.1. Aplicaciones potenciales de cobots según sector productivo analizado	34
5.2. Concentración de las instalaciones anuales de robots industriales por principales mercados en 2024	36
5.3. Principales países de origen y fabricantes representativos de cobots	39
6.1. Criterios ex-ante para la selección de sectores estratégicos de análisis	51
6.2. Criterios considerados para la construcción del indicador de justificación económica	53
6.3. Conversión de niveles cualitativos a puntajes normalizados.	54
7.1. Síntesis del ranking de prioridad de adopción cobótica por sector según nivel de manufactura y valor agregado	62
7.2. Participación (%) del PIB por actividad económica y componentes, 2016 a 2025 . .	64
7.3. Exportaciones anuales FOB homologadas según actividades económicas del Banco Central de Chile, 2020 a 2025 (Servicio Nacional de Aduanas, s.f.)	67
7.4. Accidentes del trabajo, accidentes de trayecto y fallecidos a nivel nacional desde 2020 a 2024	74
7.5. Tasa de accidentabilidad del trabajo por actividad económica desde 2020 a 2024 . .	74
7.6. Tasa de mortalidad por accidentes del trabajo según actividad económica desde 2020 a 2024	75
7.7. Número promedio de empresas por actividad económica y tramo de ventas	80
7.8. Distribución porcentual promedio de empresas por tramo de ventas según actividad económica	81
7.9. Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) por actividad económica (2018-2023) . .	83
7.10. Normalización de la intensidad de inversión por actividad económica mediante la razón FBCF/PIB	85



7.11. Normalización de la intensidad de inversión por actividad económica considerando el número de empresas	86
7.12. Ventas promedio anuales en pesos chilenos por actividad económica y tramo empresarial	87
7.13. Rangos y casos económicos de cobótica y co-robótica por actividad económica . .	92
7.14. Proporción de una inversión de USD 200.000 respecto de las ventas anuales promedio por actividad económica y tamaño empresarial	97
7.15. Proporción de una inversión de USD 100.000 respecto de las ventas anuales promedio por actividad económica y tamaño empresarial	98
7.16. Proporción de una inversión de USD 50.000 respecto de las ventas anuales promedio por actividad económica y tamaño empresarial	99
7.17. Porcentaje de empresas abarcables para inversión de USD 100.000 y normalización por sector	100
7.18. Clasificación probable de actividades asociadas a poscosecha, packing y procesamiento agroindustrial	102
7.19. Casos documentados de productividad y ahorro operacional asociados a cobots y co-robots en actividades agropecuarias	103
7.20. Componentes de los bloques de comunicaciones y servicios de información según BCCH (Banco Central de Chile, 2022c)	105
7.21. Evidencia de mejoras productivas asociadas a cobótica o colaboración humano-robot en construcción	106
7.22. Evidencia de ahorros operacionales asociados a cobótica o colaboración humano-robot en construcción	107
7.23. Evidencia de mejoras productivas asociadas a cobots o colaboración humano-robot en electricidad, gas, agua y gestión de desechos	108
7.24. Evidencia de ahorros operacionales asociados a cobots o colaboración humano-robot en electricidad, gas, agua y gestión de desechos	109



7.25. Evidencia de mejoras productivas asociadas a cobótica ampliada y co-robótica en minería	111
7.26. Evidencia de ahorros operacionales asociados a cobótica ampliada y co-robótica en minería	112
7.27. Evidencia de mejoras productivas asociadas a co-robótica y robótica asistida en pesca y acuicultura	114
7.28. Evidencia de ahorros operacionales asociados a co-robótica y robótica asistida en pesca y acuicultura	115
7.29. Evidencia de mejoras productivas asociadas a co-robótica y maquinaria asistida en servicios de vivienda e inmobiliarios	117
7.30. Evidencia de ahorros operacionales asociados a co-robótica y maquinaria asistida en servicios de vivienda e inmobiliarios	118
7.31. Evidencia de mejoras productivas asociadas a co-robótica y robótica asistida en servicios personales	120
7.32. Evidencia de ahorros operacionales asociados a co-robótica y robótica asistida en servicios personales	121
7.33. Evidencia de mejoras productivas asociadas a co-robótica y cobots móviles en transporte y almacenamiento	123
7.34. Evidencia de ahorros operacionales asociados a co-robótica y cobots móviles en transporte y almacenamiento	124
7.35. Síntesis sectorial del potencial productivo y de ahorro asociado a cobots, co-robots y cobótica ampliada	125
7.36. Indicador de justificación económica por actividad económica	129
7.37. Matriz de relevancia sectorial para la adopción de cobots en Chile	130
7.38. Criterios para seleccionar entre operación manual, robot colaborativo y robot industrial convencional	133
7.39. Benchmarking internacional de aplicaciones de cobots en la industria manufacturera	136



7.40. Aplicaciones potenciales de cobots por subsector manufacturero chileno	143
7.41. Hoja de ruta propuesta para la incorporación gradual de cobots en la industria manufacturera chilena	148
7.42. Indicadores propuestos para evaluar pilotos de cobots en la industria manufacturera	150
11.1. Homologación de elementos exportados a actividades económicas del Banco Central de Chile	162
11.2. Homologación de ramas de actividad económica del INE a categorías de actividad económica del Banco Central de Chile	165
11.3. Homologación entre las actividades económicas del SII y las categorías de Cuentas Nacionales del Banco Central de Chile	167
11.4. Casos documentados de impacto productivo asociado a la implementación de cobots en manufactura	169
11.5. Casos documentados de ahorro operacional, retorno económico y reducción de riesgos asociados a la implementación de cobots en manufactura	170



Índice de figuras

5.1. Síntesis conceptual del marco teórico de la investigación.	23
5.2. Beneficios potenciales de la cobótica en sistemas productivos.	24
5.3. Escala conceptual entre la definición fundacional de cobot, la delimitación normativa de ISO/TS 15066 y la categoría metodológica de cobótica ampliada	26
5.4. Modalidades principales de colaboración humano-robot consideradas en robótica colaborativa.	30
5.5. Evolución de las instalaciones anuales de robots industriales a nivel mundial entre 2014 y 2024. Elaboración propia con base en International Federation of Robotics (2025a).	35
5.6. Diez principales mercados por instalaciones anuales de robots industriales en 2024. Elaboración propia con base en International Federation of Robotics (2025a). . . .	36
5.7. Evolución de las instalaciones anuales de robots colaborativos a nivel mundial entre 2017 y 2024. Elaboración propia con base en International Federation of Robotics (2025d).	37
5.8. Distribución de los modelos comerciales de cobots analizados según país o grupo de países. Elaboración propia con base en Taesi et al. (2023).	38
6.1. Secuencia metodológica resumida para el desarrollo de la memoria.	50
7.1. Participación porcentual del PIB por actividad económica agregada en Chile para el año 2025. Elaboración propia con base en Banco Central de Chile (Banco Central de Chile, 2026).	66



7.2. Participación porcentual de actividades económicas agregadas en las exportaciones chilenas durante el período 2020 a 2025. Elaboración propia con base en la homologación entre elementos exportados y actividades económicas del Banco Central de Chile, a partir de datos del Servicio Nacional de Aduanas (Servicio Nacional de Aduanas, s.f.).	68
7.3. Desglose porcentual de la Industria Minera en las exportaciones chilenas durante el período 2020–2025. Elaboración propia a partir de datos del Servicio Nacional de Aduanas.	69
7.4. Desglose porcentual de la Industria Manufacturera en las exportaciones chilenas durante el período 2020–2025. Elaboración propia a partir de datos del Servicio Nacional de Aduanas.	70
7.5. Evolución de la tasa de desocupación nacional en Chile, 2016 a 2025. Elaboración propia con base en datos del INE (Instituto Nacional de Estadísticas, 2026b). . . .	71
7.6. Evolución anual de ocupados por rama de actividad homologada a categorías del Banco Central de Chile. Elaboración propia con base en la serie anual de empleo sectorial homologada a partir de la Encuesta Nacional de Empleo (Instituto Nacional de Estadísticas, 2026a).	73
7.7. Matriz de cuadrantes: tasa de accidentabilidad y tasa de mortalidad por actividad económica para Chile en 2024.	77

Resumen

Esta memoria caracteriza el mercado de los robots colaborativos y analiza sus oportunidades de incorporación en Chile. El estudio combina una revisión documental con información económica, laboral y productiva proveniente de fuentes nacionales, además de un benchmarking de aplicaciones internacionales. Para comparar las actividades económicas se construyó una matriz multicriterio que considera participación en el PIB, orientación exportadora, empleo, seguridad laboral, nivel de manufactura, compatibilidad técnica y una justificación económica preliminar.

Los resultados ubican a la industria manufacturera como la actividad con mayor relevancia para la adopción de cobots, con un puntaje de 0,71, seguida por minería con 0,68 y construcción con 0,57. La manufactura destaca por la presencia de tareas repetitivas y estandarizables, su alta compatibilidad técnica y la existencia de evidencia sobre mejoras productivas, ergonómicas y económicas. El benchmarking identifica oportunidades en ensamblaje, carga y descarga de máquinas, soldadura, inspección, control de calidad, empaque, paletizado y acabado de superficies. Para Chile, los subsectores con mejor ajuste inicial son alimentos, productos metálicos y maquinaria, plásticos, caucho, madera y muebles.

La investigación concluye que la incorporación no debe comenzar con la compra del equipo, sino con la selección de una tarea concreta, la comparación con alternativas manuales y robotizadas, una prueba conceptual y un piloto medible. El escalamiento debe considerar el costo total de integración, la seguridad de la aplicación completa, la participación de los trabajadores y la formación de capacidades internas. Los resultados corresponden a una orientación estratégica y requieren validación mediante casos empresariales y pruebas en condiciones chilenas.

Abstract

This thesis characterizes the market for collaborative robots (cobots) and analyzes the opportunities for their incorporation in Chile. The study combines a literature review with economic, labor, and productive information from national sources, alongside a benchmarking of international applications. To compare economic activities, a multi-criteria matrix was developed, considering GDP share, export orientation, employment, occupational safety, manufacturing level, technical compatibility, and a preliminary economic justification.

The results position the manufacturing industry as the most relevant activity for cobot adoption with a score of 0.71, followed by mining with 0.68 and construction with 0.57. Manufacturing stands out due to the presence of repetitive and standardizable tasks, high technical compatibility, and the existence of evidence regarding productive, ergonomic, and economic improvements. The benchmarking identifies opportunities in assembly, machine tending, welding, inspection, quality control, packaging, palletizing, and surface finishing. For Chile, the subsectors with the best initial fit are food, metal products and machinery, plastics, rubber, wood, and furniture.

The research concludes that the implementation process should not begin with purchasing the equipment, but rather with selecting a specific task, comparing it with manual and automated alternatives, conducting a proof of concept, and running a measurable pilot. Scaling up must consider the total cost of integration, the safety of the complete application, worker participation, and the development of internal capacities. These results provide a strategic orientation and require further validation through experimental cases and testing under Chilean conditions.

1. Introducción

La automatización industrial ha adquirido una importancia creciente en la búsqueda de mejoras de productividad, calidad, seguridad y continuidad operacional. Dentro de este proceso, los robots colaborativos, comúnmente denominados cobots, ofrecen una alternativa a la automatización industrial tradicional, debido a que pueden ser utilizados en procesos donde todavía es necesaria la participación de trabajadores. El principal valor de estos sistemas no se encuentra únicamente en la incorporación de un brazo robótico, sino que su utilidad depende de cómo se distribuyen las tareas entre la persona y la máquina, de la seguridad de la aplicación completa, de las herramientas instaladas y de la capacidad de la empresa para integrar, operar y mantener la solución. Por ello, una tarea robotizable no es necesariamente una aplicación apropiada para un cobot; en procesos de alta velocidad, gran volumen o cargas elevadas, un robot industrial convencional puede ser más adecuado, mientras que en tareas de baja repetición o alta variabilidad puede ser preferible mantener el trabajo manual.

En Chile, el estudio de esta tecnología resulta relevante debido a las brechas de productividad, las diferencias de capacidad tecnológica entre empresas y la diversidad de actividades que componen la estructura productiva nacional. Las aplicaciones observadas en países con mayor desarrollo industrial no pueden trasladarse directamente a la realidad chilena, ya que existen diferencias en escala de producción, costos laborales, acceso a financiamiento, disponibilidad de integradores, formación técnica y capacidad para sostener la operación de los equipos.

A partir de este problema, la memoria busca caracterizar el mercado de los robots colaborativos y analizar cuáles son sus oportunidades potenciales de incorporación en Chile, para lo cual se estudian sus características técnicas, principales aplicaciones, limitaciones, condiciones de seguridad y evolución del mercado internacional. Posteriormente, estos antecedentes se relacionan con información económica, laboral y productiva del país.

La comparación sectorial se desarrolla mediante una matriz multicriterio que considera la participación en el producto interno bruto, la orientación exportadora, el empleo, la seguridad

laboral, el nivel de manufactura, la compatibilidad técnica y una justificación económica preliminar. Esta última considera la capacidad financiera de absorción de la inversión, el potencial de mejora productiva y la posibilidad de generar ahorros operacionales. El análisis no busca establecer que una actividad económica completa deba incorporar cobots. La matriz permite reconocer sectores que reúnen mejores condiciones iniciales, mientras que la decisión empresarial debe realizarse sobre tareas, estaciones y procesos específicos. De la misma manera, los puntajes obtenidos representan una comparación relativa y no una garantía de factibilidad para todas las empresas pertenecientes a una actividad.

Los resultados de la priorización ubican a la industria manufacturera como la actividad con mayor relevancia dentro de los criterios utilizados. Por esta razón, el benchmarking final se concentra en manufactura y revisa aplicaciones internacionales en ensamblaje, carga de máquinas, soldadura, inspección, empaque, paletizado, acabado superficial y manipulación de materiales. A partir de estos casos se identifican oportunidades para subsectores manufactureros chilenos y se plantean lineamientos para realizar diagnósticos, pruebas conceptuales, pilotos y procesos posteriores de escalamiento.

El documento se organiza de la siguiente manera. Al iniciar se presenta el problema de investigación, los objetivos y el alcance. Luego se desarrolla el marco teórico, donde se revisan la evolución de la robótica, las modalidades de colaboración, la seguridad, las aplicaciones y las características del mercado global. Posteriormente se explica la metodología y los criterios utilizados para comparar las actividades económicas. El capítulo de resultados presenta la priorización sectorial, el análisis económico preliminar y el benchmarking de industria manufacturera. Finalmente, se exponen las conclusiones, discusión y limitaciones de la investigación.

2. Problema de la Investigación

La automatización industrial se ha consolidado como una herramienta relevante para mejorar productividad, seguridad, calidad y continuidad operacional en distintos sectores productivos. Dentro de este proceso, los robots colaborativos o *cobots* han adquirido importancia por su potencial para habilitar esquemas de automatización flexible, en los cuales personas y robots pueden interactuar bajo condiciones controladas de seguridad. No obstante, su adopción efectiva depende de factores técnicos, económicos, normativos, organizacionales y sectoriales que deben ser analizados en función del contexto particular de cada país.

A nivel internacional, la robótica industrial ha mostrado un crecimiento sostenido. La International Federation of Robotics reportó aproximadamente 542.000 robots industriales instalados globalmente en 2024, manteniéndose por cuarto año consecutivo sobre las 500.000 instalaciones anuales (International Federation of Robotics, 2025c). Aunque los cobots representan todavía una fracción menor del mercado total de robots industriales, constituyen un segmento relevante por su orientación hacia aplicaciones flexibles, reprogramables y compatibles con entornos donde la intervención humana continúa siendo necesaria (International Federation of Robotics, 2024e).

En Chile, el análisis de esta tecnología adquiere relevancia debido a las brechas persistentes de productividad y modernización industrial. La Comisión Nacional de Evaluación y Productividad estimó que la Productividad Total de Factores del país para 2024 se ubicó en un rango entre -0,2 % y 0,1 %, reflejando un aporte prácticamente nulo de la productividad al crecimiento económico nacional (Comisión Nacional de Evaluación y Productividad, 2025). Esta situación refuerza la necesidad de explorar tecnologías que contribuyan a mejorar eficiencia operacional, seguridad laboral y uso efectivo del capital humano.

Sin embargo, la adopción de cobots en Chile no puede analizarse únicamente a partir de tendencias globales. El país posee una estructura productiva heterogénea, cuyos sectores difieren en intensidad de capital, estandarización de procesos, exposición a riesgos, capacidades tecnológicas, disponibilidad de personal especializado y posibilidades de inversión, presentándose sectores

como minería, construcción, agricultura, pesca, alimentos y manufactura. Por ello, las aplicaciones observadas en economías más robotizadas no son necesariamente transferibles de forma directa al contexto chileno.

El problema central radica en que actualmente no existe una caracterización suficientemente integrada o transversal que permita comprender el mercado de los cobots y sus oportunidades potenciales de adopción para las industrias chilenas debido a que gran parte de la literatura se centra en países externos o enfocados a empresas específicas. Acorde a lo anterior, la información disponible se encuentra dispersa entre literatura técnica, estudios de mercado, estadísticas macroeconómicas, reportes institucionales y casos internacionales de implementación. Esta fragmentación dificulta identificar qué sectores presentan mayor potencial, qué aplicaciones son técnicamente viables, qué barreras podrían limitar su implementación y qué condiciones habilitantes serían necesarias para promover una adopción gradual y segura.

Esta falta de información sistematizada puede afectar la toma de decisiones de empresas, instituciones públicas, centros tecnológicos y entidades formativas. Sin una visión clara del mercado y de sus posibilidades reales de aplicación, las iniciativas de adopción pueden basarse en expectativas sobredimensionadas, comparaciones internacionales poco ajustadas o decisiones de inversión sin suficiente respaldo técnico-económico. Esto aumenta el riesgo de implementar soluciones con baja utilización, problemas de integración, resistencia organizacional o retornos inferiores a los esperados.

En consecuencia, se identifica la necesidad de desarrollar una caracterización del mercado de los robots colaborativos y de analizar sus oportunidades de adopción en sectores estratégicos de la industria chilena. Esta caracterización debe integrar dimensiones técnicas, económicas, sectoriales, normativas y organizacionales, permitiendo distinguir entre aplicaciones potencialmente atractivas y aplicaciones con mayor factibilidad preliminar bajo las condiciones productivas del país.

A partir de lo anterior, la pregunta principal que orienta esta investigación es:

¿Cuáles son las oportunidades potenciales y prioritarias de adopción de robots colaborativos en actividades económicas chilenas, considerando las tendencias del mercado

global, las características técnicas de la tecnología y las condiciones productivas, económicas y laborales del país?

De esta pregunta central se desprenden las siguientes preguntas específicas:

1. ¿Cuáles son las principales tendencias tecnológicas, comerciales y normativas que explican el desarrollo actual del mercado global de robots colaborativos?
2. ¿Qué condiciones del contexto chileno justifican el análisis de cobots como alternativa de automatización flexible?
3. ¿Qué sectores productivos nacionales presentan mayor potencial para la adopción de cobots según criterios económicos, técnicos y operacionales?
4. ¿Qué experiencias internacionales pueden servir como referencia para orientar aplicaciones de robótica adaptables a Chile?
5. ¿Qué barreras, riesgos y condiciones habilitantes deben considerarse para promover una adopción gradual, segura y económicamente pertinente de cobots en la industria chilena?

Por tanto, esta memoria busca contribuir a cerrar una brecha de información estratégica respecto de la robótica en Chile. Su propósito no es diseñar una celda robótica específica ni evaluar financieramente un caso particular de implementación, sino construir una base analítica que permita comprender el estado del mercado, identificar oportunidades sectoriales y orientar futuras decisiones de adopción tecnológica en el país.

3. Objetivos de la Investigación

3.1 Objetivo General

Caracterizar el mercado de los robots colaborativos (cobots) a nivel internacional y las condiciones de adopción en Chile, identificando oportunidades de incorporación en sectores estratégicos de la industria chilena mediante un análisis técnico, laboral, económico y comparativo, con el fin de proponer lineamientos estratégicos que orienten su implementación en Chile.

3.2 Objetivos Específicos

1. Analizar la evolución conceptual, tecnológica y normativa de los robots colaborativos, considerando su definición, características técnicas, aplicaciones, limitaciones y estándares de seguridad asociados a la interacción humano-robot.
2. Caracterizar el mercado global de los robots colaborativos, identificando tendencias de crecimiento, principales actores, actividades adaptables, y factores que explican su expansión en distintos sectores industriales.
3. Diagnosticar las condiciones del contexto chileno para la adopción de cobots, considerando la estructura productiva, relevancia exportadora, empleo sectorial, seguridad laboral, capacidad de inversión y disponibilidad de capacidades tecnológicas.
4. Identificar y justificar los sectores industriales con mayor potencial de adopción de cobots en Chile, mediante criterios de relevancia económica como PIB y exportaciones, condiciones laborales de empleo y seguridad, potencial de mejora productiva, compatibilidad técnica y justificación económica.
5. Analizar experiencias internacionales de implementación de cobots en sectores comparables, utilizando benchmarking para extraer aprendizajes técnicos, económicos y organizacionales adaptables al contexto chileno.



6. Evaluar oportunidades, barreras y riesgos asociados a la adopción de cobots en el sector estratégico de la industria chilena obtenido desde el análisis, considerando factores técnicos, económicos, normativos, laborales y organizacionales en base a la realidad del país.

4. Alcance de la investigación

La presente memoria se orienta a caracterizar el mercado de los robots colaborativos, comúnmente denominados cobots y a identificar oportunidades de adopción para la industria chilena. El estudio considera una revisión de antecedentes técnicos, económicos, normativos e industriales, con el fin de comprender el estado actual de esta tecnología, sus principales aplicaciones, limitaciones y su potencial aporte al desarrollo productivo nacional.

El análisis contempla una revisión del mercado global de cobots, incluyendo tendencias de crecimiento, principales fabricantes, sectores industriales de aplicación, factores de adopción y la evolución tecnológica de los equipos. A partir de dicha caracterización, se realiza un diagnóstico del contexto chileno, considerando la estructura productiva del país, las brechas de productividad, el nivel de automatización industrial, las condiciones de seguridad laboral, la disponibilidad de capacidades tecnológicas y las restricciones propias de una economía en proceso de modernización industrial.

Focalizando el análisis, la investigación considera como universo de comparación las actividades económicas homologadas a las categorías del Banco Central de Chile. La selección final de sectores se obtiene mediante la aplicación del análisis multicriterio, sin establecer de antemano cuáles ocuparán las primeras posiciones con el fin de identificar aquellas áreas donde la adopción de cobots presente mayor pertinencia, impacto potencial y factibilidad de implementación.

La investigación utiliza como base metodológica la revisión documental de fuentes académicas, científicas, técnicas e institucionales, junto con un análisis comparativo mediante benchmarking internacional. Este enfoque permite detectar e identificar aprendizajes desde países y sectores que presentan mayor experiencia en la adopción de cobots, sentando las bases para evaluar su posible adaptación al contexto chileno bajo criterios de realismo técnico, económico, normativo y organizacional.

El resultado esperado de la memoria corresponde a la elaboración de un diagnóstico estructurado y una propuesta estratégica que permita orientar futuras decisiones de adopción de cobots en



Chile. En este sentido, el estudio busca entregar lineamientos generales para empresas asociadas al rubro prioritario que se hallará en el desarrollo del mismo.

5. Marco Teórico

5.1 Automatización industrial, Industria 4.0 e Industria 5.0

La automatización industrial constituye uno de los pilares fundamentales de la modernización productiva, al permitir que determinadas tareas operacionales sean ejecutadas mediante sistemas mecánicos, eléctricos, digitales o robóticos con menor intervención humana directa. En este marco, la robótica industrial ha sido utilizada para aumentar productividad, repetibilidad, precisión y continuidad operacional en procesos tales como fabricación, ensamblaje, manipulación de materiales y control de calidad.

La incorporación de robots colaborativos en los sistemas productivos se presenta dentro de una transformación industrial asociada a la digitalización, la automatización flexible y la integración de tecnologías avanzadas en los procesos de producción. En este contexto, la Industria 4.0 ha sido entendida en base a la interconexión de sistemas ciberfísicos (CPS), internet de las cosas (IoT), análisis de datos y automatización inteligente, con el propósito de mejorar la eficiencia, trazabilidad, flexibilidad y capacidad de respuesta de las organizaciones productivas principalmente mediante comunicación y operación entre máquinas (M2M) (Hermann et al., 2015).

Sin embargo, la evolución reciente de la automatización industrial ha comenzado a desplazar el foco desde una visión puramente tecnológica hacia una perspectiva más centrada en la interacción entre personas, tecnología y sostenibilidad. En este sentido, la Industria 5.0 plantea una aproximación complementaria, donde la tecnología no solo busca aumentar productividad, sino también fortalecer la sostenibilidad y el carácter humano-céntrico de los sistemas industriales y cadena de valor (Brequé et al., 2021; Xu et al., 2021). Bajo esta perspectiva, los robots colaborativos adquieren especial relevancia debido a que permiten combinar tanto la precisión como la repetibilidad y continuidad operacional que ofrece la robótica en conjunto con la capacidad humana de la adaptación, juicio, supervisión y toma de decisiones con criterio. Es por ello que la cobótica puede entenderse como una tecnología habilitante para avanzar hacia modelos de automatización más flexibles, adaptables y sostenibles que la robótica industrial convencional.

Lo anterior es relevante para una economía como la chilena, caracterizada por brechas de productividad y sectores productivos con distintos niveles de madurez tecnológica, puesto que la cobótica representa una alternativa intermedia entre la automatización manual convencional y la robotización industrial altamente intensiva en capital. Su importancia no radica solo en la incorporación de un brazo robótico, sino en su potencial para habilitar procesos productivos más flexibles, seguros y escalables.

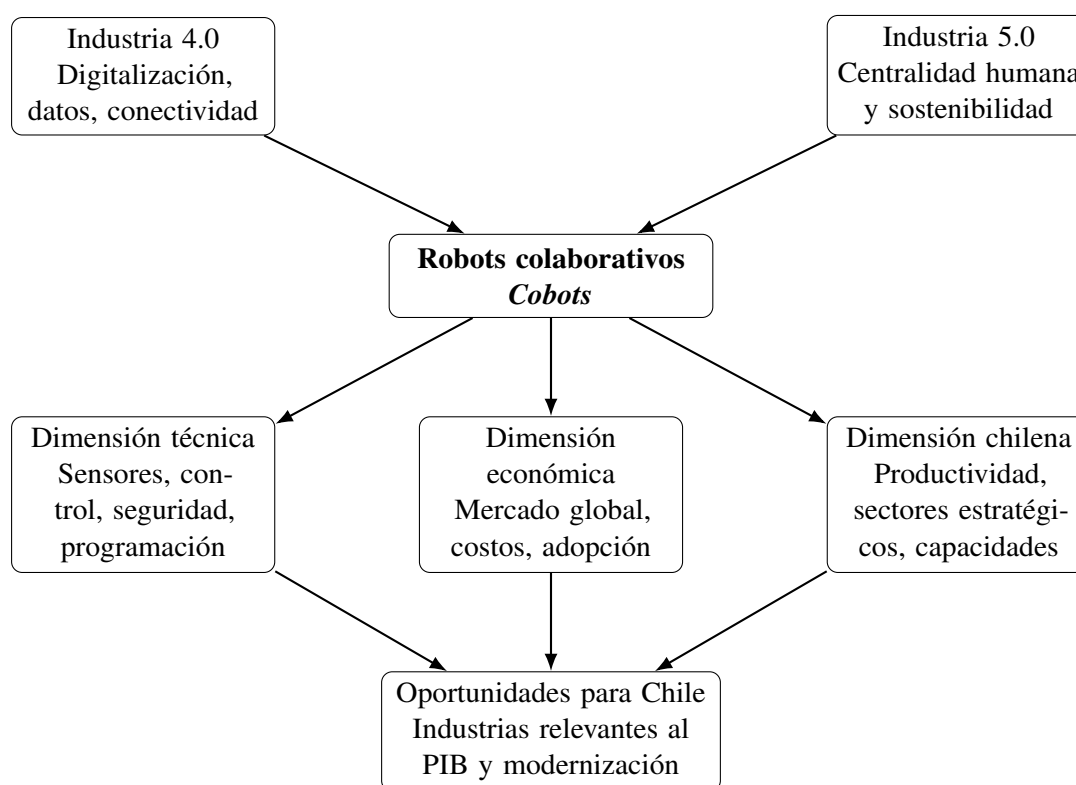


Figura 5.1: Síntesis conceptual del marco teórico de la investigación.

5.2 Definición conceptual de robot colaborativo

El término *cobot*, acrónimo de *collaborative robot*, corresponde a una categoría técnica de robot diseñada para interactuar física y funcionalmente con operadores humanos dentro de un espacio de trabajo compartido. Desde su origen académico, el concepto se asocia a manipuladores capaces de asistir al trabajador humano en tareas industriales, cumpliendo un rol de extensión de

capacidades y no necesariamente como un reemplazo directo de la mano de obra (Peshkin, 1999).

A diferencia del robot industrial tradicional que suele operar en celdas cerradas, aisladas o fuertemente resguardadas del trabajador, el robot colaborativo destaca por estar diseñado para operar bajo condiciones controladas que permiten la proximidad humano-robot de forma segura. Esta diferencia no implica que todo cobot pueda trabajar automáticamente junto a una persona sin medidas adicionales de seguridad, al contrario, la colaboración segura depende de la aplicación completa, del diseño de la celda, análisis de riesgos, herramientas instaladas, velocidades de operación, de las cargas manipuladas y de las condiciones específicas del proceso.

En términos funcionales, un cobot se puede definir como un sistema robótico flexible, reprogramable y adaptable, el cual está orientado a apoyar tareas repetitivas, ergonómicamente exigentes, peligrosas o de alta necesidad de precisión. Su valor radica en permitir modelos de trabajo híbridos donde el operador humano conserva funciones de supervisión, preparación, ajuste, control de calidad o intervención en situaciones variables, mientras el robot ejecuta tareas de mayor repetitividad, esfuerzo o exposición al riesgo.

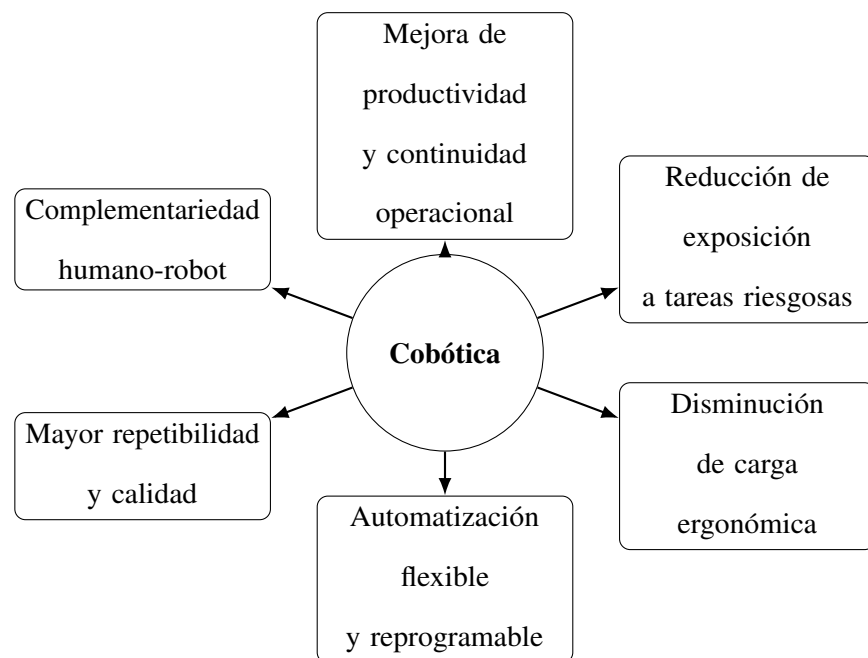
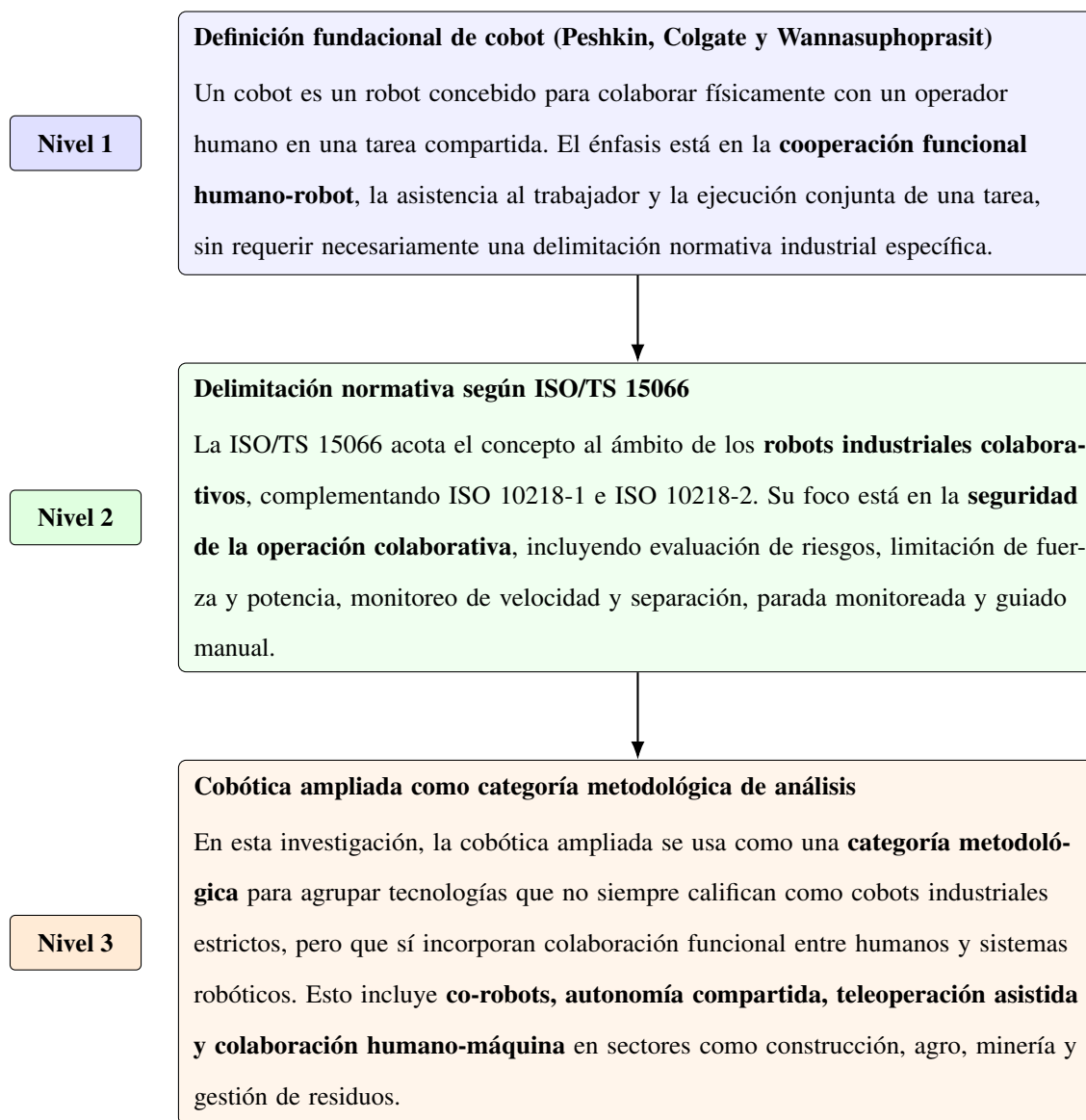


Figura 5.2: Beneficios potenciales de la cobótica en sistemas productivos.

5.2.1 Cobótica ampliada

Si bien ISO/TS 15066 delimita los cobots al ámbito de los sistemas de robots industriales colaborativos, diversas actividades económicas incorporan tecnologías robóticas que no califican estrictamente como cobots industriales, pero que sí operan bajo esquemas de colaboración humano-robot o humano-máquina. En este trabajo se denomina «cobótica ampliada» a este conjunto de soluciones, que incluye co-robots, autonomía compartida, teleoperación asistida, supervisión humana y reparto de tareas entre personas y sistemas robóticos. Esta categoría no reemplaza la definición normativa de cobot, sino que permite analizar aplicaciones cercanas a la cobótica en sectores no manufactureros, tales como agricultura, construcción o minería (International Federation of Robotics, s.f.-a; International Organization for Standardization, 2016; Liang et al., 2021; Matheson et al., 2019; Ruiz-del-Solar, 2025; Vasconez et al., 2019).

Figura 5.3: Escala conceptual entre la definición fundacional de cobot, la delimitación normativa de ISO/TS 15066 y la categoría metodológica de cobótica ampliada



Nota. La figura presenta tres niveles de análisis. El primero corresponde a la definición fundacional de cobot, centrada en la colaboración funcional entre humano y robot. El segundo muestra la delimitación normativa de ISO/TS 15066, restringida a sistemas de robots industriales colaborativos y sus requisitos de seguridad. El tercero corresponde a la noción de cobótica ampliada, utilizada en esta investigación como categoría metodológica para agrupar aplicaciones de colaboración humano-robot, co-robots, autonomía compartida y teleoperación asistida en sectores no manufactureros. Elaboración propia a partir de International Federation of Robotics (s.f.-a), International Organization for Standardization (2016), Liang et al. (2021), Matheson et al. (2019), Ruiz-del-Solar (2025) y Vasconez et al. (2019).

5.3 Origen y evolución tecnológica de los cobots

La génesis de los robots colaborativos se produce en 1996 en la Universidad de Northwestern, donde Colgate y Peshkin desarrollaron los primeros conceptos asociados a dispositivos de asistencia inteligente (IADs) y fueron formalizados en 1997 bajo la denominación de *cobots* (Colgate, 1999; Peshkin, 1999). En sus primeras etapas, estos sistemas se concibieron como dispositivos capaces de guiar o asistir el movimiento humano en tareas específicas, incorporando restricciones físicas o virtuales que permitían mejorar la seguridad y precisión en la interacción.

La construcción y arquitectura inicial de los cobots estaba fuertemente condicionada por las limitaciones tecnológicas de la época. Los primeros diseños tendían a ser específicos para determinadas tareas, con menor flexibilidad y mayores costos de implementación siendo no escalables para todas las industrias. Posteriormente, el desarrollo de sensores, actuadores, sistemas de control, interfaces de programación y algoritmos de seguridad permitió avanzar hacia configuraciones más versátiles, capaces de operar en múltiples aplicaciones industriales según necesidades variables.

Un hito relevante en la comercialización de esta tecnología fue la introducción de brazos robóticos colaborativos multipropósito, como el modelo UR5 de Universal Robots, el cual se posiciona como el primer modelo comercial de cobótica. Este producto ayudó a consolidar una visión de cobot como brazo robótico flexible, programable y adaptable a diferentes entornos productivos. Desde entonces, el mercado ha evolucionado hacia soluciones más modulares, con herramientas intercambiables, mayor facilidad de programación, integración con visión artificial, sensores de fuerza, sistemas de monitoreo y conectividad industrial.

Desde el punto de vista mecánico, los robots colaborativos suelen clasificarse según su configuración cinemática y sus grados de libertad. En robótica industrial, los grados de libertad (GDL) permiten describir la cantidad de movimientos independientes que un robot puede ejecutar. Las configuraciones más generales incluyen robots cartesianos, polares, cilíndricos y antropomórficos. En el caso de los cobots, el estándar comercial más común corresponde a brazos articulados de seis grados de libertad, debido a que esta configuración permite una alta versatilidad espacial y una

mayor capacidad de adaptación a tareas industriales diversas.

La evolución tecnológica de los cobots también se relaciona con su construcción a nivel estructural y digital, en base a esto un sistema de cobótica puede entenderse como la integración de tres componentes principales:

1. **Hardware:** corresponde al conjunto físico y tangible del sistema, incluyendo brazo robótico, controlador, sensores, actuadores, herramientas de fin de brazo como pinzas y ventosas, sistemas de visión, estructuras auxiliares y dispositivos de seguridad.
2. **Software:** corresponde a la lógica de control, programación, planificación de trayectorias, monitoreo de condiciones, interfaces hombre-máquina (HRI), integración con sistemas externos y, en las versiones más actuales, herramientas de inteligencia artificial, visión computacional y gemelos digitales.
3. **Servicios e integración:** comprende actividades necesarias para su implementación efectiva, tales como ingeniería de aplicación, instalación, capacitación, certificación, mantenimiento, soporte técnico, evaluación de riesgos y modelos de negocios *as-a-service*.

Esta visión sistémica es relevante porque permite comprender que el valor de un cobot no depende únicamente del brazo robótico, sino de su correcta integración al proceso productivo. Es por ello que una implementación exitosa requiere analizar el proceso, las tareas, los flujos de materiales, las capacidades del personal, las condiciones de seguridad, los costos de integración y la escalabilidad de la solución.

5.4 Interacción humano-robot y modalidades de colaboración

La interacción humano-robot, conocida como HRI por sus siglas en inglés, constituye uno de los elementos centrales de la cobótica. En entornos industriales, esta interacción no se limita al contacto físico entre una persona y un robot, sino que incluye formas de cooperación espacial, temporal, funcional y cognitiva. La literatura especializada reconoce que los sistemas

colaborativos pueden adoptar distintas configuraciones según el grado de proximidad, dependencia y simultaneidad entre humano y robot (Hentout et al., 2019; Javaid et al., 2022).

Desde una perspectiva operacional, la colaboración puede entenderse en función de la manera en que se distribuyen las tareas entre el trabajador y el robot. En algunos casos, ambos trabajan de forma secuencial, donde el robot realiza una operación y luego el humano ejecuta la siguiente. En otros casos, pueden trabajar simultáneamente en un mismo proceso, aunque no necesariamente sobre el mismo componente. También existen configuraciones cooperativas donde ambos intervienen de manera coordinada sobre una misma tarea, por ejemplo, en manipulación asistida, guiado manual o posicionamiento de piezas.

Las modalidades de colaboración más reconocidas en robótica industrial colaborativa son las siguientes:

1. **Parada monitoreada de seguridad:** el robot detiene su operación cuando una persona ingresa a una zona de riesgo definida. Esta modalidad permite compartir espacios de trabajo, pero no necesariamente implica contacto físico durante la operación.
2. **Guiado manual:** el operador humano guía directamente el movimiento del robot, usualmente para programación, posicionamiento o asistencia en tareas específicas.
3. **Monitoreo de velocidad y separación:** el sistema ajusta dinámicamente la velocidad del robot en función de la distancia respecto del operador humano, permitiendo reducir riesgos cuando existe proximidad.
4. **Limitación de potencia y fuerza:** el robot opera bajo límites de fuerza, torque, presión y velocidad diseñados para reducir el riesgo de daño ante eventuales contactos con el trabajador (International Federation of Robotics, 2024a).

Estas modalidades permiten distinguir entre colaboración aparente y colaboración efectiva. Un robot puede estar instalado cerca de personas, pero ello no garantiza que la aplicación sea colaborativa desde el punto de vista técnico o normativo. Para que exista colaboración segura, la

aplicación completa debe cumplir criterios de diseño, control, validación y evaluación de riesgos. Por esta razón, la seguridad en cobótica no debe atribuirse exclusivamente al robot, sino al sistema completo compuesto por robot, herramienta, pieza, entorno, trabajador y procedimiento operacional.

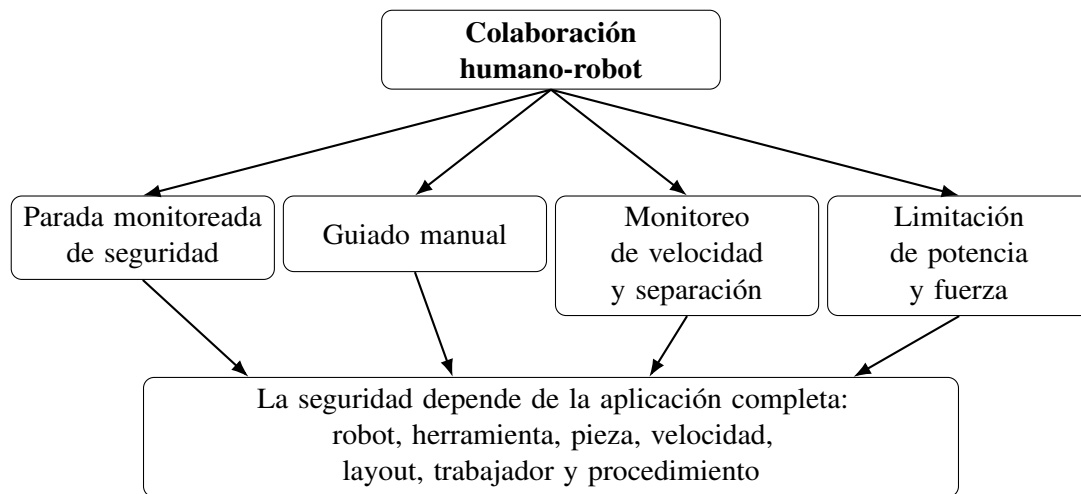


Figura 5.4: Modalidades principales de colaboración humano-robot consideradas en robótica colaborativa.

5.5 Seguridad y marco normativo de la robótica colaborativa

La seguridad es una condición crítica para la adopción de cobots. En la robótica industrial convencional, la mitigación de riesgos suele basarse en la separación física entre robot y trabajador mediante áreas de operación delimitadas por jaulas o barreras físicas. En cambio, la robótica colaborativa busca permitir distintos grados de proximidad, lo que exige criterios de seguridad más específicos y una evaluación detallada de cada aplicación.

A nivel internacional, las referencias normativas más relevantes corresponden a ISO 10218 e ISO/TS 15066. La norma ISO 10218 establece requisitos de seguridad para robots industriales y sistemas robóticos, considerando aspectos de diseño, integración, funciones de seguridad y responsabilidades del fabricante e integrador (International Organization for Standardization, 2025). Por su parte, ISO/TS 15066 aborda específicamente la operación colaborativa, incorporando criterios biomecánicos asociados a límites de fuerza y presión admisibles para distintas zonas del cuerpo

humano (International Organization for Standardization, 2016).

Un principio central de estas normas es que la seguridad no puede evaluarse únicamente a partir del robot. La herramienta de fin de brazo, la pieza manipulada, la velocidad de operación, la masa desplazada, los puntos de atrapamiento, el entorno de trabajo y la capacitación del operador pueden modificar sustancialmente el nivel de riesgo. Por tanto, una aplicación colaborativa requiere una evaluación de riesgos específica y documentada.

En Chile, no existe una normativa nacional específica para robots colaborativos. Sin embargo, su implementación queda comprendida dentro del marco general de seguridad y salud en el trabajo. El artículo 184 del Código del Trabajo establece la obligación del empleador de adoptar todas las medidas necesarias para proteger eficazmente la vida y salud de los trabajadores (Superintendencia de Seguridad Social, s.f.). Paralelamente, la Ley N° 16.744 regula los accidentes del trabajo y enfermedades profesionales, estableciendo responsabilidades preventivas para los empleadores (Ministerio del Trabajo y Previsión Social, 1968). Complementariamente, el Decreto Supremo N° 594 establece condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo, incluyendo exigencias vinculadas a la protección frente a riesgos físicos y maquinaria (Ministerio de Salud, 2000).

Esta situación genera una condición particular para la industria chilena: la adopción de cobots debe apoyarse en estándares internacionales, aunque estos no constituyan por sí mismos una regulación nacional específica. Ello implica que las empresas deben desarrollar capacidades internas o recurrir a integradores especializados para interpretar, aplicar y validar dichos criterios de seguridad.

5.6 Aplicaciones industriales de los cobots

Los cobots se pueden implementar principalmente en tareas donde existe repetitividad, necesidad de precisión, riesgo ergonómico, exposición a condiciones peligrosas o requerimientos de flexibilidad. La literatura identifica aplicaciones relevantes en manufactura, automoción, electrónica, alimentos, logística, salud, empaquetado, inspección, soldadura y manipulación de materiales

(Javaid et al., 2022; Montini et al., 2024; Taesi et al., 2023).

En cuanto a manufactura, los cobots pueden ser utilizados en actividades como ensamble, atornillado, soldadura, lijado, pulido, carga y descarga de máquinas, inspección visual, empaque y paletizado. Estas tareas comparten características que favorecen la automatización colaborativa: secuencias repetitivas, ciclos relativamente estructurados, posibilidad de estandarizar movimientos y necesidad de mantener diferentes grados de intervención humana en preparación, control o supervisión.

Una de las aplicaciones más relevantes es el *machine tending* que consiste en cargar y descargar máquinas-herramienta, centros CNC u otros equipos productivos. Esta tarea suele ser repetitiva y de bajo valor agregado para el operador, por lo que el uso de cobots puede aumentar la utilización de equipos, reducir tiempos muertos y liberar trabajadores hacia funciones de mayor complejidad.

Otra aplicación importante corresponde al empaque y paletizado. Estas actividades pueden generar fatiga física, posturas forzadas y movimientos repetitivos, especialmente cuando se realizan durante jornadas prolongadas. En estos casos, la robótica puede contribuir a reducir riesgos ergonómicos y mejorar la continuidad operacional.

En operaciones de soldadura, lijado y pulido, los cobots pueden aportar repetibilidad y estabilidad de trayectoria minimizando la variabilidad entre trabajos. Sin embargo, estas aplicaciones requieren especial atención a la herramienta utilizada, generación de calor, chispas, polvo, fuerza de contacto, calidad superficial y medidas adicionales de protección. Por ello, aunque el robot sea colaborativo, la aplicación puede requerir resguardos complementarios como cabinas de soldadura, uso de EPP, entre otras.

En control de calidad, los cobots pueden operar como plataformas de inspección al integrar cámaras, sensores, sistemas de visión artificial o instrumentos de medición. Esta aplicación resulta relevante cuando se requiere estandarizar posiciones, reducir variabilidad humana o inspeccionar piezas de forma repetitiva. Adicionalmente la versatilidad de herramientas disponibles puede aportar mayores índices de calidad al revisar parámetros que un humano no podría con facilidad como

temperaturas, infrarrojos, entre otros.

En la industria de alimentos, los cobots pueden apoyar tareas de manipulación, clasificación, empaque, etiquetado y paletizado. No obstante, su uso debe considerar requisitos de higiene, inocuidad, limpieza, resistencia a ambientes húmedos, compatibilidad de materiales y facilidad de sanitización.

En minería, las aplicaciones potenciales se concentran menos en la operación extractiva directa y más en actividades de soporte, mantenimiento, laboratorios, manipulación de muestras, bodegas, talleres e inspección. Esto se debe a que las condiciones de faena, presencia de polvo, vibración, distancia geográfica y exigencias de continuidad operacional demandan soluciones robustas y altamente validadas. Se debe añadir que la mayoría de las maquinarias colaborativas actuales poseen límites de cargas que quedan muy por debajo de las necesidades de faena.

En construcción, la adopción de cobots enfrenta mayores dificultades debido a la variabilidad del entorno, la movilidad de las faenas y la menor estructuración de los procesos. Sin embargo, existen oportunidades en tareas parcialmente estandarizadas, tales como corte, perforación, medición, manipulación asistida, prefabricación, montaje modular y terminaciones.

Es posible encontrar aplicaciones en entornos médicos mediante la asistencia en cirugías de alta precisión y manejo a distancia de herramientas.

Existe poca evidencia en la literatura de otras actividades económicas o productivas donde se respalde que el uso de cobots es relevante y útil.

5.7 Mercado global de robots colaborativos

El mercado de los cobots ha experimentado una expansión significativa durante los últimos años. Según la International Federation of Robotics (2024e), los cobots representaron el 10,5 % de las instalaciones globales de robots industriales en 2023, dentro de un total de 541.302 robots industriales instalados ese año. Posteriormente, el reporte World Robotics 2025 mostró que las instalaciones globales de robots industriales alcanzaron aproximadamente 542.000 unidades en 2024, manteniéndose por cuarto año consecutivo sobre las 500.000 instalaciones anuales (International

Tabla 5.1: Aplicaciones potenciales de cobots según sector productivo analizado

Sector	Aplicaciones potenciales mencionadas	Condiciones o restricciones principales
Minería	Manipulación de muestras, laboratorios, bodegas, talleres, mantenimiento, inspección y apoyo a tareas repetitivas.	Ambientes severos, polvo, vibraciones, continuidad operacional, seguridad y soporte técnico en faena.
Construcción	Prefabricación, corte, perforación, medición, asistencia en montaje, manipulación liviana y terminaciones.	Alta variabilidad de obras, menor estandarización, movilidad de faenas y condiciones cambiantes del entorno.
Industria de alimentos	Clasificación, empaque, etiquetado, inspección, paletizado y manipulación secundaria.	Inocuidad, limpieza, sanitización, humedad, trazabilidad y compatibilidad con materiales alimentarios.
Manufactura	Ensamble, soldadura, atornillado, carga y descarga de máquinas, inspección, pulido, lijado y manipulación de piezas.	Costos de integración, capacitación, retorno de inversión, layout y madurez tecnológica de la empresa.

Federation of Robotics, 2025c).

Así mismo esta fuente indica que Asia concentró cerca del 74 % de las nuevas instalaciones industriales en 2024, seguida por Europa y América (International Federation of Robotics, 2025c). Esta distribución refleja la importancia de las economías manufactureras asiáticas en la adopción de automatización, especialmente China, Japón y Corea del Sur. Para una investigación orientada a Chile, este antecedente es relevante porque muestra que la adopción robótica está estrechamente vinculada con la estructura productiva, la política industrial, la disponibilidad de proveedores tecnológicos y las capacidades de integración.

Si bien los cobots continúan representando una fracción menor del mercado total de robots industriales, constituyen uno de los segmentos de crecimiento más dinámico. La International Federation of Robotics reporta un crecimiento superior al 10 % en las instalaciones de cobots dentro de las estadísticas de World Robotics 2025 (International Federation of Robotics, 2025d). Esta tendencia se explica por factores como la búsqueda de automatización flexible, facilidad relativa

de programación, menor requerimiento de espacio, posibilidad de despliegue gradual y creciente disponibilidad de herramientas periféricas.

A pesar del crecimiento del mercado reflejado en las instalaciones de estos equipos (Figura 5.5), y los beneficios que aportan estos modelos colaborativos, no se debe interpretar como una sustitución directa de la robótica industrial tradicional. Los robots industriales convencionales continúan siendo superiores en aplicaciones de alta velocidad, gran carga útil, ciclos extremadamente repetitivos y producción masiva. En cambio, los cobots presentan mayor pertinencia en procesos donde la flexibilidad, la interacción humana, la facilidad de programación y el bajo espacio disponible son factores críticos, ambas tecnologías poseen su propio mercado objetivo.

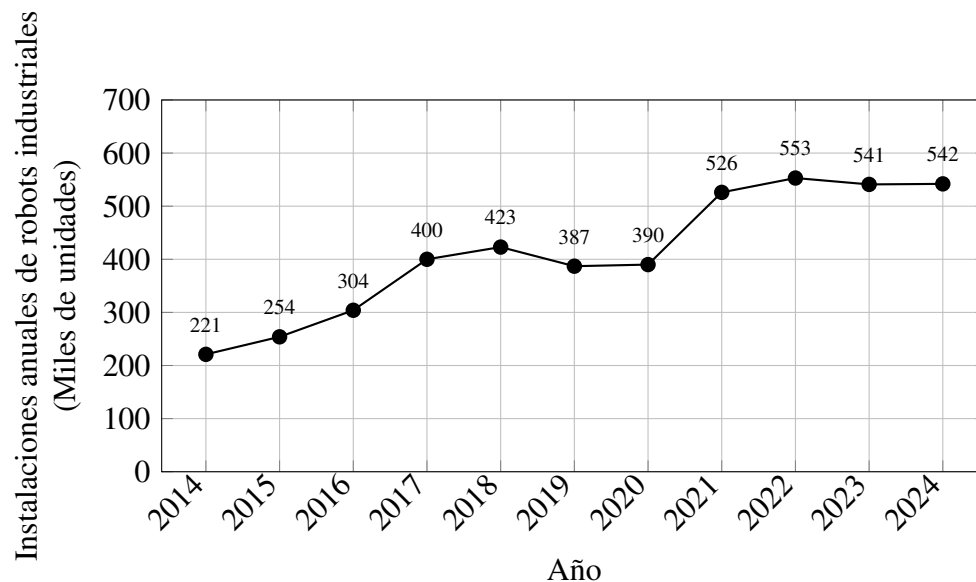


Figura 5.5: Evolución de las instalaciones anuales de robots industriales a nivel mundial entre 2014 y 2024. Elaboración propia con base en International Federation of Robotics (2025a).

Acorde a la Figura 5.6, China lidera la adquisición e instalación de robots industriales concentrando 295.000 unidades instaladas en 2024, seguido por solo 4 países con capacidades instaladas altas correspondientes a Japón, Estados Unidos, Corea del Sur y Alemania. Estos cinco países abarcan aproximadamente el 80 % del mercado global y permiten reconocer que la implementación de estas tecnologías está fuertemente ligada a economías con altas capacidades manufactureras, ecosistemas tecnológicos desarrollados además de existir políticas industriales activas.

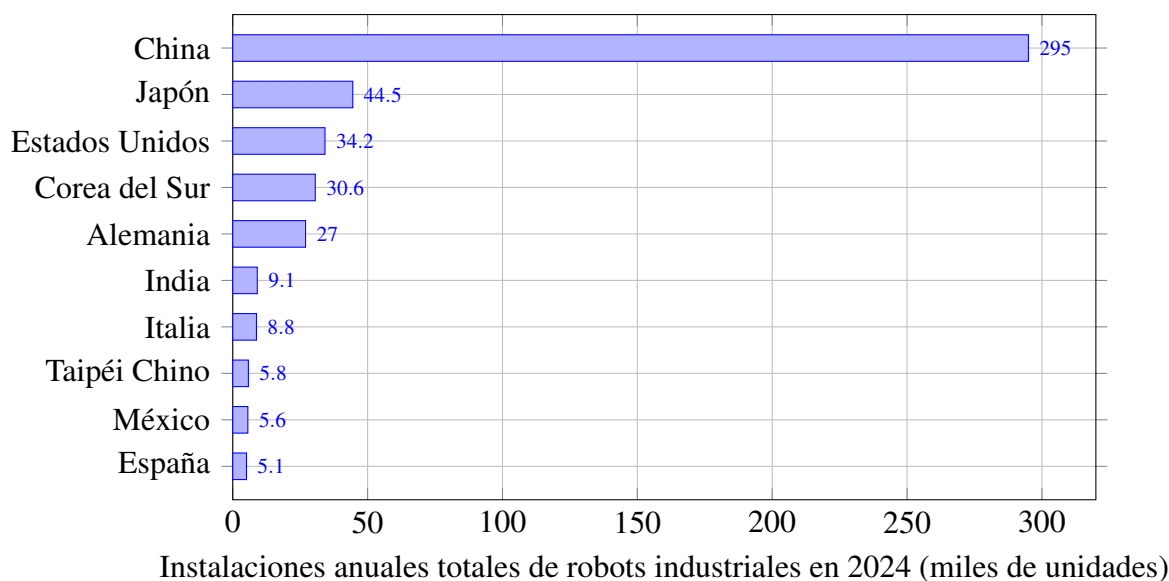


Figura 5.6: Diez principales mercados por instalaciones anuales de robots industriales en 2024. Elaboración propia con base en International Federation of Robotics (2025a).

Tabla 5.2: Concentración de las instalaciones anuales de robots industriales por principales mercados en 2024

Mercado	Instalaciones (miles)	Participación aprox. (%)	Participación acumulada (%)	Observación
China	295.0	54.4	54.4	Principal mercado mundial
Japón	44.5	8.2	62.6	Segundo mercado mundial
Estados Unidos	34.2	6.3	68.9	Principal mercado de América
Corea del Sur	30.6	5.6	74.5	Mercado asiático avanzado
Alemania	27.0	5.0	79.5	Principal mercado europeo
India	9.1	1.7	81.2	Mercado emergente de rápido crecimiento
Italia	8.8	1.6	82.8	
Taipéi Chino	5.8	1.1	83.9	
México	5.6	1.0	84.9	Mercado latinoamericano destacado
España	5.1	0.9	85.8	Tercer mercado europeo en 2024
Resto del mundo	76.3	14.1	100.0	No desagregado en la fuente pública IFR
Total mundial	542.0	100.0	100.0	

Nota. Los porcentajes fueron calculados sobre un total aproximado de 542 mil instalaciones globales. Elaboración propia con base en International Federation of Robotics (2025a).

Así mismo la serie más reciente de la IFR muestra que las nuevas instalaciones mundiales de cobots aumentaron desde 11.107 unidades en 2017 hasta 64.542 unidades en 2024. Durante el mismo período, su participación dentro de las instalaciones totales de robots industriales creció desde 2,8 % hasta 11,9 % (International Federation of Robotics, 2025d). Esta suma representa el flujo acumulado de equipos instalados y no el stock operativo actual, debido a que no descuenta retiros, reemplazos ni equipos fuera de servicio.

La Figura 5.7 presenta la serie completa publicada por la IFR.

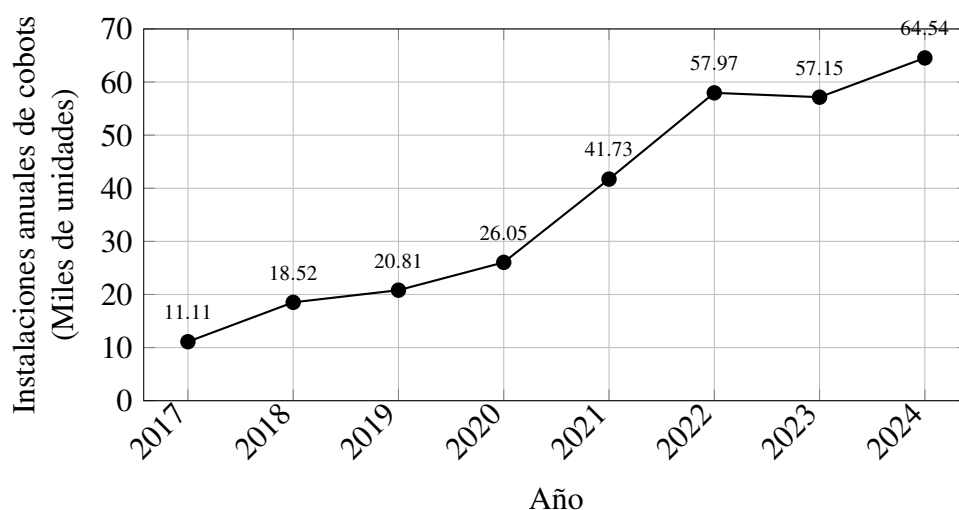


Figura 5.7: Evolución de las instalaciones anuales de robots colaborativos a nivel mundial entre 2017 y 2024. Elaboración propia con base en International Federation of Robotics (2025d).

Ambos elementos permiten visualizar que la evolución no fue completamente constante, por un lado el mayor crecimiento ocurrió entre 2020 y 2022, período en que las instalaciones aumentaron desde 26.045 hasta 57.966 unidades y luego en 2023 se registró una disminución leve de 1,4 %, seguida por una recuperación de 12,9 % durante 2024. Estos resultados muestran que los cobots continúan siendo una categoría minoritaria dentro de la robótica industrial, pero que su participación ha aumentado de manera sostenida: en 2017 representaban menos de tres de cada cien robots industriales instalados mientras que en 2024 se aproximaron a doce de cada cien.

Principales países de origen de la oferta de cobots. No existe una estadística pública y homogénea que informe cuántos cobots produce cada país por lo que para obtener una aproximación académica se puede analizar el país de origen de los modelos comerciales disponibles. Taesi et al.

estudiaron 195 modelos de cobots y encontraron que China concentraba 52 modelos, equivalentes al 26,4% de la muestra, Corea del Sur representaba el 14,7% y Japón el 11,2%, estos tres países en conjunto concentraban el 52,3% de los modelos considerados (Taesi et al., 2023). Adicionalmente Estados Unidos, Alemania, Suiza y Dinamarca reunían conjuntamente un 29,5%, mientras que Italia, Reino Unido, Francia, Canadá e India representaban el 17,5% restante. Estos resultados no corresponden a participación de mercado ni cantidad de robots fabricados pero si reflejan una tendencia en la amplitud de la oferta comercial identificada en el estudio.

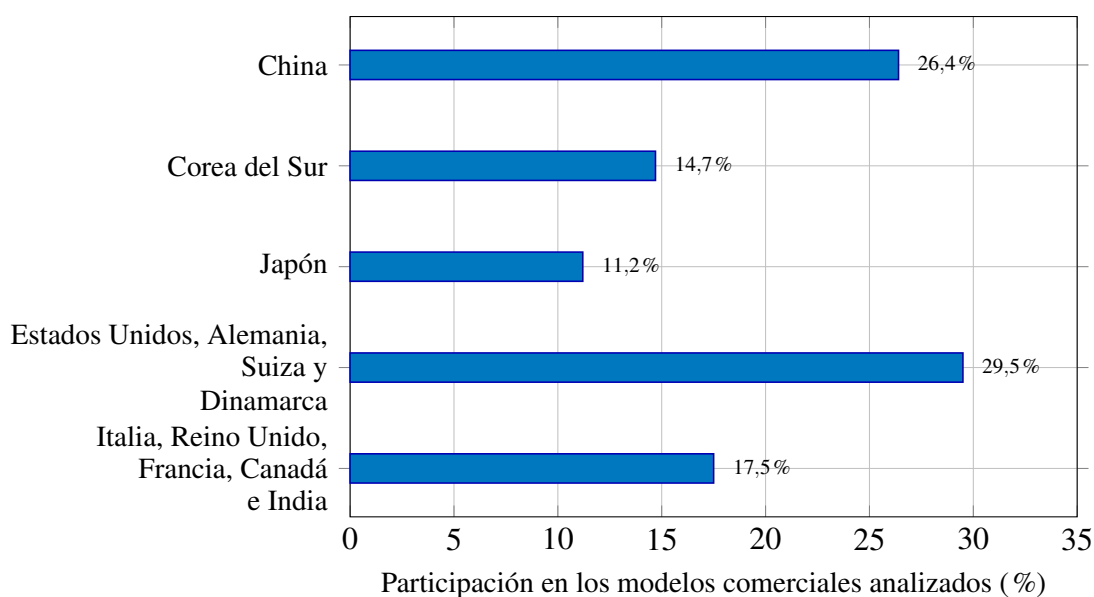


Figura 5.8: Distribución de los modelos comerciales de cobots analizados según país o grupo de países. Elaboración propia con base en Taesi et al. (2023).

Nota. La figura representa la distribución geográfica de una muestra de 195 modelos comerciales de cobots.

Los valores no corresponden a unidades producidas, ventas ni instalaciones. Estados Unidos, Alemania, Suiza y Dinamarca se presentan agrupados en la fuente, al igual que Italia, Reino Unido, Francia, Canadá e India.

Los porcentajes publicados suman 99,3% debido al redondeo de los valores informados por los autores.

La Tabla 5.3 complementa esta información con algunos fabricantes representativos.

Tabla 5.3: Principales países de origen y fabricantes representativos de cobots

País o territorio	Fabricantes representativos	Evidencia disponible	Interpretación
China	AUBO Robotics, JAKA Robotics, DOBOT, SIA-SUN y otros proveedores nacionales.	China concentró 52 de los 195 modelos analizados por Taesi et al., equivalentes al 26,4% de la muestra (Taesi et al., 2023).	Presenta la mayor amplitud de modelos dentro de la revisión académica. Este resultado no permite conocer cuántas unidades fueron producidas o instaladas.
Corea del Sur	Doosan Robotics y otros fabricantes nacionales.	Los fabricantes surcoreanos representaron el 14,7% de los modelos estudiados (Taesi et al., 2023). Doosan reportó liderazgo doméstico y una posición relevante fuera de China (Doosan Robotics, 2023).	Es uno de los principales polos de oferta. La cuota de 72% reportada por Doosan corresponde solamente al segmento de carga útil igual o superior a 20 kg y no al mercado completo.

Continúa en la página siguiente.

Tabla 5.3: Principales países de origen y fabricantes representativos de cobots (continuación)

País o territorio	Fabricantes representativos	Evidencia disponible	Interpretación
Japón	FANUC, Yaskawa, Kawasaki y Yamaha.	Japón representó el 11,2% de los modelos incluidos en la revisión de mercado. La literatura académica identifica diversas familias colaborativas de estos fabricantes (Matheson et al., 2019; Taesi et al., 2023).	Combina fabricantes históricos de robótica industrial con líneas específicas de robots colaborativos.
Dinamarca	Universal Robots.	Universal Robots fue pionera en la comercialización moderna de cobots. Al cierre de 2025, Teradyne informó más de 110.000 cobots vendidos de manera acumulada (Teradyne, Inc., 2026).	Es el fabricante individual con la evidencia pública más sólida de despliegue global acumulado. La empresa es de origen danés, aunque pertenece al grupo estadounidense Teradyne.

Continúa en la página siguiente.

Tabla 5.3: Principales países de origen y fabricantes representativos de cobots (continuación)

País o territorio	Fabricantes representativos	Evidencia disponible	Interpretación
Taiwán	Techman Robot.	Techman aparece dentro de los fabricantes comerciales revisados en la literatura académica y se caracteriza por integrar visión artificial en distintos modelos (Matheson et al., 2019; Taesi et al., 2023).	Es un proveedor relevante, aunque no existe una cuota mundial reciente y pública que permita establecer su posición actual.
Alemania	KUKA y fabricantes derivados del desarrollo tecnológico del DLR.	La literatura identifica a la familia LBR iiwa como una de las plataformas relevantes en colaboración humano-robot (Matheson et al., 2019).	Alemania mantiene un papel importante en robots sensibles al torque y sistemas colaborativos avanzados, pero no publica un volumen nacional comparable.



Suiza y Suecia	ABB, junto con otros proveedores europeos como Stäubli.	Las familias YuMi y otros sistemas colaborativos aparecen ampliamente documentadas en revisiones académicas (Matheson et al., 2019; Taesi et al., 2023).	Representan una oferta consolidada de cobots industriales, aunadas sin cifras públicas desagregadas de producción o instalaciones.
-----------------------	---	--	--

Nota. La tabla identifica países de origen y fabricantes representativos. No constituye un ranking de producción ni de instalaciones. Las cifras corporativas corresponden a información autorreportada.

5.8 Productividad, transformación digital y pertinencia para Chile

La adopción de cobots en Chile debe analizarse en relación con las brechas productivas del país. La Comisión Nacional de Evaluación y Productividad ha señalado que la productividad total de factores presenta una contribución limitada al crecimiento económico nacional durante los últimos años (Comisión Nacional de Evaluación y Productividad, 2025). Esta situación refuerza la necesidad de explorar tecnologías capaces de mejorar eficiencia operacional, seguridad, continuidad productiva y uso del capital humano. Complementariamente, la OCDE sostiene que la transformación digital puede contribuir a mejorar productividad y bienestar, aunque sus efectos dependen de la capacidad de difusión tecnológica entre empresas y trabajadores (Garda, 2021). Esta advertencia es especialmente importante para Chile, donde la adopción tecnológica puede ser desigual entre grandes empresas, pymes, sectores exportadores y actividades de menor sofisticación digital.

Desde una perspectiva industrial, el potencial de los cobots no debe evaluarse únicamente por la disponibilidad de la tecnología, sino por su ajuste con problemas productivos concretos. En Chile, sectores como minería, construcción, manufactura e industria de alimentos presentan relevancia económica y desafíos operacionales que podrían justificar la exploración de soluciones a través de estas tecnologías. Antes de priorizar sectores específicos, se define una matriz de criterios ex-ante que permite justificar la selección desde una perspectiva técnico-económica. Esta matriz permite evitar la selección de industrias por intuición o casos internacionales o especiales, incorporando variables de relevancia en temas como participación en el PIB, generación de empleos, mano de obra especializada, seguridad laboral, nivel de manufactura, compatibilidad técnica, intensidad operacional, repetitividad de tareas, brechas de productividad y factibilidad de implementación además de una justificación económica preliminar. Así mismo se confecciona la Tabla 6.1 mostrando los 7 criterios que compondrán el análisis para hallar aquellos sectores de las industrias chilenas donde la implementación de estas tecnologías puede ser un beneficio real.

5.9 Limitaciones técnicas, económicas y organizacionales de los cobots

Si bien los cobots poseen múltiples ventajas estos no constituyen una solución universal, sus limitaciones técnicas incluyen menor velocidad relativa frente a robots industriales tradicionales, cargas útiles moderadas, restricciones de fuerza, necesidad de análisis de seguridad y dependencia de herramientas periféricas adecuadas. En aplicaciones de alto volumen, alta velocidad o gran carga, un robot industrial convencional puede ser más eficiente y económicamente conveniente.

A través del foco económico, la inversión en robótica no se limita al costo de adquirir la maquinaria sino que deben considerarse a su vez herramientas y procesos tales como fin de brazo, sensores, bases, protecciones, ingeniería de integración, capacitación, mantenimiento, validación de seguridad, rediseño de procesos y soporte técnico. Por esta razón, el retorno de inversión puede variar significativamente entre empresas y aplicaciones además de ser una adquisición riesgosa al no poseerse garantía de retornos positivos.

Desde el punto de vista organizacional, la adopción de cobots puede generar resistencia si se percibe como una amenaza laboral o si no se comunica adecuadamente su propósito. La literatura clásica sobre automatización advierte que estos sistemas pueden generar efectos no deseados cuando se subestima el rol del trabajador en supervisión, intervención y toma de decisiones (Bainbridge, 1983). Por tanto, la implementación debe acompañarse de gestión del cambio, capacitación y rediseño de funciones.

Finalmente, la adopción de cobots en Chile debe considerar la disponibilidad de integradores, soporte técnico, formación de capital humano, condiciones normativas y capacidad financiera de las empresas. Estos factores pueden ser tan determinantes como las características técnicas del robot. Por ello, esta memoria aborda la robótica no solo como una tecnología emergente, sino como una oportunidad estratégica cuya viabilidad depende de la articulación entre mercado, capacidades productivas, seguridad, formación y política industrial.

6. Metodología

6.1 Diseño metodológico

La investigación adopta un diseño de tipo no experimental mediante la documentación descriptiva-comparativa de las diversas fuentes consultadas a través de un enfoque mixto, integrando análisis cuantitativo de estadísticas secundarias junto con evaluación cualitativa de compatibilidad técnica, evidencia sectorial y condiciones de adopción para la industria chilena sin desarrollar simulaciones operacionales ni evaluar financieramente un caso empresarial específico.

6.2 Etapas metodológicas

La metodología se organiza en siete etapas secuenciales, diseñadas para asegurar coherencia entre problema de investigación, objetivos, análisis y propuesta estratégica.

6.2.1 Etapa 1: Delimitación del problema, objetivos y alcance

La primera etapa consiste en delimitar el problema de investigación, formular el objetivo general, definir los objetivos específicos y establecer el alcance del estudio. Esta etapa permite precisar que la memoria se orienta a caracterizar el mercado de los robots colaborativos y analizar oportunidades para la industria chilena, sin desarrollar simulaciones operacionales ni evaluaciones financieras detalladas para una empresa específica.

En esta etapa se definen además los sectores preliminares de análisis, considerando su relevancia económica para Chile y su potencial relación con aplicaciones de robótica. Inicialmente, se consideran minería, construcción, industria de alimentos y manufactura, sin perjuicio de que la priorización final dependa del análisis técnico y económico desarrollado en etapas posteriores.

6.2.2 Etapa 2: Revisión documental estructurada

La segunda etapa corresponde a una revisión documental estructurada sobre robots colaborativos, automatización flexible, Industria 4.0, Industria 5.0, seguridad en interacción humano-robot,

aplicaciones industriales, mercado global de cobots y adopción tecnológica. Esta revisión tiene por objetivo construir el marco teórico y establecer una base conceptual sólida para el análisis posterior.

La búsqueda de información se realiza en bases académicas, repositorios universitarios, revistas científicas, organismos internacionales, instituciones públicas, asociaciones industriales y fuentes estadísticas oficiales. Se priorizan fuentes publicadas en revistas indexadas, reportes de organismos reconocidos, normas técnicas, estudios sectoriales y documentos institucionales actualizados.

Los criterios de inclusión considerados son los siguientes:

1. Fuentes directamente relacionadas con robots colaborativos, robótica industrial, automatización avanzada, interacción humano-robot, seguridad robótica, productividad, transformación digital o adopción tecnológica.
2. Documentos publicados preferentemente en los últimos diez años, salvo fuentes clásicas o fundacionales necesarias para explicar el origen conceptual de los cobots o marcos teóricos relevantes.
3. Estudios con trazabilidad clara de autoría, institución, fecha de publicación, metodología y datos utilizados.
4. Fuentes académicas, científicas, normativas, institucionales o estadísticas de reconocido valor técnico.
5. Documentos con aplicabilidad directa o indirecta al análisis de oportunidades para sectores productivos chilenos.

6.2.3 Etapa 3: Caracterización del mercado global de cobots

La tercera etapa consiste en caracterizar el mercado global de robots colaborativos. Para ello se analizan tendencias de crecimiento, participación relativa dentro de la robótica industrial, principales fabricantes, aplicaciones predominantes, sectores usuarios, evolución tecnológica, modelos de integración y factores que explican su adopción.

Esta caracterización permite establecer el estado actual de la tecnología y distinguir entre expectativas de mercado, aplicaciones consolidadas y tendencias emergentes. Además, permite identificar qué elementos del mercado internacional pueden servir como referencia para Chile y cuáles deben ser tratados con cautela por diferencias de escala, costos, capacidades tecnológicas o estructura productiva.

6.2.4 Etapa 4: Diagnóstico del contexto chileno

La cuarta etapa corresponde al diagnóstico del contexto chileno para la adopción de cobots. En esta etapa se revisan antecedentes sobre estructura productiva, compatibilidad operacional, participación sectorial en el PIB, relevancia exportadora, capacidad de empleos, seguridad laboral, capacidad de valor agregado y la justificación económica preliminar.

El propósito de esta etapa es determinar bajo qué condiciones la robótica podría ser pertinente para Chile. Para ello, no basta con identificar sectores económicamente relevantes; también se requiere evaluar si dichos sectores presentan tareas compatibles con robots colaborativos, problemas operacionales susceptibles de mejora, barreras de adopción y condiciones habilitantes para su implementación.

6.2.5 Etapa 5: Análisis sectorial de oportunidades

La quinta etapa consiste en evaluar oportunidades de adopción de cobots en sectores estratégicos de la industria chilena. Para ello se utiliza una matriz de análisis multicriterio de enfoque mixto, orientada a comparar sectores según su pertinencia técnica, económica y organizacional.

Los criterios propuestos para la evaluación sectorial son:

1. PIB
2. Exportaciones
3. Empleo
4. Seguridad laboral

5. Nivel de manufactura
6. Compatibilidad técnica
7. Justificación económica

Cada sector se analiza de forma cualitativa o cuantitativa dependiendo de la disponibilidad de información primaria, identificando aplicaciones potenciales, condiciones habilitantes, riesgos y limitaciones. El resultado no busca entregar una priorización definitiva aplicable a todas las empresas, sino una orientación estratégica sobre dónde la adopción de cobots podría presentar mayor pertinencia inicial en empresas promedio de cada actividad económica de Chile reportada por el BCCh.

6.2.6 Etapa 6: Benchmarking internacional

La sexta etapa consiste en desarrollar un benchmarking internacional de experiencias de adopción de cobots en países y sectores comparables o referenciales para Chile. El benchmarking se utiliza como una herramienta de aprendizaje estratégico, no como un mecanismo de copia directa. Su propósito es identificar prácticas, aplicaciones, condiciones habilitantes y barreras observadas en otros contextos, para luego analizar su posible adaptación al entorno chileno.

La selección de países o casos de referencia se realiza considerando criterios como:

1. Nivel de adopción robótica o cobótica.
2. Existencia de aplicaciones documentadas en sectores relevantes para Chile.
3. Similitud técnica o productiva con actividades nacionales.
4. Disponibilidad de información confiable y verificable.

El análisis de benchmarking considera tres preguntas orientadoras:

1. ¿Qué problema productivo u operacional resolvió la implementación de cobots?



2. ¿Qué condiciones permiten o dificultan su adopción?
3. ¿Qué elementos podrían adaptarse de forma realista a Chile y bajo qué supuestos?

6.2.7 Etapa 7: Formulación de lineamientos estratégicos

Finalmente, la séptima etapa consiste en comentar puntos estratégicos para la adopción gradual de cobots en Chile dentro de las actividades económicas de interés. Estos lineamientos se construyen a partir de la integración de los resultados obtenidos en la revisión documental, caracterización de mercado, diagnóstico nacional, benchmarking internacional y análisis sectorial.

Se resume así la secuencialidad de etapas en el gráfico:



Figura 6.1: Secuencia metodológica resumida para el desarrollo de la memoria.

6.3 Criterios e indicadores para la priorización sectorial

Esta sección detalla los criterios, fórmulas y escalas de puntaje empleados en la Etapa 5 (Análisis sectorial de oportunidades) para construir la matriz de relevancia sectorial cuyos resultados se presentan en el capítulo de Resultados.

6.3.1 Criterios *ex-ante* de selección sectorial

La matriz de criterios *ex-ante* utilizada para justificar la selección de sectores estratégicos corresponde a la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Criterios *ex-ante* para la selección de sectores estratégicos de análisis

Criterio	Impacto	Indicador
Compatibilidad técnica con cobots	Permite evaluar si existen tareas repetitivas, estandarizables o ergonómicamente exigentes.	Presencia de tareas de manipulación, inspección, empaque, soldadura, paletizado, carga de máquinas, entre otras.
Relevancia económica	Permite identificar sectores con mayor aporte a la economía nacional y mayor impacto potencial de adopción tecnológica.	Participación en el PIB por actividad económica.
Orientación exportadora	Permite evaluar sectores con exposición internacional, presión competitiva y capacidad de capturar beneficios por productividad.	Valor FOB (<i>Free on Board</i>) exportado por sector o producto.
Empleo sectorial	Permite analizar impacto laboral, necesidad de reconversión y potencial de complementariedad humano-robot.	Ocupados por rama de actividad económica.
Seguridad laboral	Permite identificar sectores donde la robótica puede reducir exposición a riesgos, fatiga o accidentes.	Tasa de accidentabilidad y días perdidos por sector.
Nivel de manufactura o valor agregado	Permite distinguir sectores donde la adopción de tecnología puede generar mayor valor productivo y encadenamientos.	Producción, ventas, valor agregado o estructura industrial.
Justificación económica preliminar	Permite evaluar si el nivel de inversión puede justificarse frente a beneficios esperados.	Inversión total (CAPEX, OPEX), capacidad relativa de inversión y evidencia preliminar de productividad y ahorro.

6.3.2 Indicador de justificación económica

Este criterio busca evaluar si la incorporación de los cobots dentro de una de las actividades económicas es razonable en función de los beneficios esperados y los desembolsos asociados a la implementación de estos. La relación costo-beneficio se basa en cuantificar la capacidad de cada sector analizado de transformar la adopción tecnológica en aportes económicos brutos. Estos aportes pueden estar dados por aumentos de productividad, reducción de egresos, disminución de errores, disminución de riesgos laborales, escalabilidad o diversificación de usos.

El análisis de costos debe incluir no solo la adquisición de la maquinaria sino que debe contemplar además los gastos de tipo preparativo como la instalación de equipos o capacitaciones, por ello, se busca realizar una estimación inicial de CAPEX y gastos recurrentes de tipo OPEX frente a los beneficios esperados basándose en 3 dimensiones:

- Capacidad de absorción económica: evalúa si el sector de interés posee las condiciones para financiar y sostener la inversión asociada al CAPEX inicial y el OPEX de mantención.
- Potencial de productividad: evalúa la contribución a la producción que puede generar el cobot. Considera la reducción de tiempos ociosos o preparativos y aumento directo en volumen producido.
- Ahorro operacional: evalúa la posibilidad de reducir egresos relacionados con la operación del sistema. Considera la disminución de errores, retrabajos, desperdicios, fallas, entre otras.

Estos criterios que compondrán la Justificación Económica (JE_i) poseen una ponderación explicada por la Ecuación 6.1, donde los principales factores corresponden a los ahorros directos de capitales con menor peso al riesgo, mientras que si el sector no posee la capacidad de absorción al no justificarse la implementación el indicador toma el valor de cero.

$$JE_i = \begin{cases} 0, & \text{si } Abs_i = 0 \\ 0,3Abs_i + 0,35Prod_i + 0,35Ah_i, & eoc \end{cases} \quad (6.1)$$

Por la naturaleza del cálculo se ha de iniciar por obtener el valor de *Abs* para cada factor económico *i* optimizando el flujo de trabajo al evitar continuar el análisis para aquellos sectores sin capacidad de absorción.

Símbolo	Criterio	Qué permite medir
<i>Abs</i>	Capacidad de absorción económica	Capacidad del sector para financiar CAPEX/OPEX y sostener gastos recurrentes como mantenimiento, soporte y capacitación.
<i>Prod</i>	Potencial de productividad	Capacidad del cobot para reducir tiempos, aumentar producción o mejorar la utilización de recursos.
<i>Ah</i>	Potencial de ahorro operacional	Reducción de errores, retrabajos, accidentes, desperdicios, detenciones o costos laborales indirectos.

Tabla 6.2: Criterios considerados para la construcción del indicador de justificación económica

6.3.3 Normalización y ponderación de criterios

Finalmente, para concluir con la selección de las actividades económicas de interés es necesario medir el peso de cada criterio para cada elemento trabajado, para esto se realiza una normalización de puntaje en escala numérica acorde a los siguientes parámetros:

- Para los criterios «Relevancia económica», «Orientación exportadora», «Empleo sectorial» y «Seguridad laboral» se ha realizado la normalización bajo el concepto matemático Ecuación 6.2 la cual permite asignar los puntajes dentro de la escala 0 a 1 de acuerdo al valor numérico entregado por cada actividad en el último año disponible respecto a la categoría analizada, siendo estas:
 - «Relevancia económica»: A mayor PIB mayor puntaje en la escala.
 - «Orientación exportadora»: A mayor FOB exportado mayor puntaje en la escala.
 - «Empleo sectorial»: A mayor cantidad de empleo mayor puntaje en la escala.
 - «Seguridad laboral»: A mayor riesgo mortal y mayor frecuencia de ocurrencia, mayor puntaje en la escala. Este en específico se desarrolla sobre el módulo del vector acorde a la Figura 7.7

$$X_{ij}^* = \frac{X_{ij} - X_{j,\text{mín}}}{X_{j,\text{máx}} - X_{j,\text{mín}}} \quad (6.2)$$

X_{ij}^* : puntaje normalizado entre 0 y 1 del sector i en el criterio j ,

X_{ij} : valor original observado del sector i en el criterio j ,

$X_{j,\text{mín}}$: valor mínimo observado en el criterio j ,

$X_{j,\text{máx}}$: valor máximo observado en el criterio j .

- Por otro lado los criterios «Nivel de manufactura», «Compatibilidad técnica» y los subcriterios « $Prod_i$ » y « Ah_i » de la «Justificación económica», por su carácter cualitativo más que cuantitativo, han sido sometido a una normalización según los resultados de la investigación realizada y resumida en la Tabla 7.1 acorde a las siguientes valorizaciones:

Tabla 6.3: Conversión de niveles cualitativos a puntajes normalizados.

Nivel cualitativo	Puntaje normalizado
No aplica	0,00
Muy bajo	0,10
Bajo	0,25
Medio-bajo	0,45
Medio	0,55
Medio-alto	0,75
Alto	0,90
Muy alto	1,00

Nota. La escala permite transformar criterios cualitativos en puntajes normalizados entre 0 y 1 para su incorporación en la matriz de evaluación, los puntajes asignados permiten premiar a aquellos con alta correspondencia y penalizar fuertemente a los que no mientras mantiene un comportamiento más equitativo con valores medios. Elaboración propia.

6.4 Valor de relevancia para adopción de cobótica

La relevancia de cada actividad económica se obtiene mediante la Ecuación 6.3 la cual premia aquellas que posean gran compatibilidad, procesos estandarizables y las empresas puedan acceder a la inversión. Como segundo grupo relevante concentra el 25 % del factor asociado a las

ventas de la actividad reflejadas en su aporte al PIB y capacidad exportadora, se le otorga un menor peso a este último debido a que algunas actividades no están centradas o no disponen de elementos acordes a exportaciones, lo cual indiscriminadamente beneficiaría a los que si participan en ello. Finalmente el promedio entre los puntajes de empleos y seguridad laboral otorga el fragmento restante del indicador.

$$\begin{aligned} \text{Puntaje}_i = & 0,25 \cdot (0,75 \cdot \text{PIB}_i + 0,25 \cdot \text{Exportaciones}_i) \\ & + 0,20 \cdot \left(\frac{\text{Empleo}_i + \text{Seguridad laboral}_i}{2} \right) \\ & + 0,55 \cdot \left(\frac{\text{Nivel de manufactura}_i + \text{Compatibilidad técnica}_i + \text{Justificación económica}_i}{3} \right) \end{aligned} \quad (6.3)$$

6.5 Limitaciones metodológicas

La metodología propuesta presenta limitaciones que deben ser reconocidas explícitamente

- Al tratarse de una investigación basada principalmente en fuentes secundarias, los resultados dependen de la disponibilidad, actualidad y comparabilidad de la información existente.
- El análisis no considera levantamiento primario mediante encuestas, entrevistas o mediciones en terreno, por lo que las conclusiones deben interpretarse como lineamientos estratégicos y no como validaciones empíricas directas.
- El benchmarking internacional permite identificar aprendizajes relevantes, pero no garantiza transferibilidad automática al contexto chileno, debido a diferencias en estructura productiva, costos, regulación, cultura organizacional y capacidades tecnológicas.

7. Resultados

7.1 Sectores estratégicos para el análisis de oportunidades en Chile

Acorde a los criterios mencionados y siguiendo el orden de estructuración de la Tabla 6.1, se presentan a continuación los datos y consideraciones que respaldan los requisitos exigidos para la selección de sectores clave para la incorporación de cobótica en Chile.

7.1.1 Nivel de manufactura o valor agregado y compatibilidad técnica

Esta sección trabaja conjuntamente dos criterios permitiendo analizar la capacidad de generación de valor que puede traer consigo la adopción de tecnologías colaborativas, justificando así su inversión, mediante el impacto en operatividad, escalamiento en el crecimiento y adaptabilidad a la actividad económica analizada. Se estructura a continuación el análisis que permite mostrar aquellos sectores que podrían beneficiarse con mayor intensidad de la incorporación de cobots. El criterio empleado es el nivel de manufactura o valor agregado del sector, entendido como la capacidad de transformar insumos en productos o servicios de mayor valor, generar encadenamientos productivos y sostener ganancias de productividad medibles en conjunto con la capacidad de sincronizar la naturaleza de las tareas con las capacidades de la tecnología.

La pertinencia de este criterio se fundamenta en que la densidad robótica de un sector se correlaciona positivamente con su productividad total de factores y con el crecimiento del PIB per cápita (Acemoglu & Restrepo, 2022). La International Federation of Robotics (2025b) documenta que los sectores con mayor base manufacturera (automotriz, electrónica, alimentos y bebidas) son los primeros adoptantes de cobots, acumulando el 68 % de las instalaciones mundiales en 2024. A nivel de política industrial, la OCDE establece que los sectores con mayor valor agregado por trabajador presentan mayor propensión a la sustitución de tareas rutinarias peligrosas por automatización colaborativa (OCDE, 2019). Adicionalmente, como ya se mencionó, a diferencia de la robótica industrial tradicional los cobots destacan en entornos donde la tarea combina precisión repetitiva con necesidad de supervisión humana (Rahman, 2024).

El siguiente listado corresponde a las actividades con alta prioridad para la adopción de robótica, caracterizadas por su elevado nivel de manufactura, valor agregado y fuerte encadenamiento productivo:

- **Industria manufacturera:** presenta un nivel de manufactura y valor agregado muy alto. El núcleo de la transformación productiva incluye alimentos, metalmecánica, química y bienes de capital abarcando grandes sectores económicos. Dentro de los procesos con mayor potencial para el cobot se encuentra: ensamblaje, soldadura, control de calidad, carga/descarga de máquinas, paletizado, inspección óptica. Lo anterior se justifica en base a diversas fuentes: Keshvarparast et al. (2023): revisión de 182 estudios confirma mayor ROI en manufactura. International Federation of Robotics (2025b): manufactura concentra el mayor stock global de cobots; automotriz y electrónica suman 48 % de instalaciones 2024. Rahman (2024): cobots reducen ciclos hasta 30 % y errores hasta 30 %.
- **Agropecuaria-silvícola:** presenta un nivel de manufactura y valor agregado alto. Se caracteriza por ser una agroindustria de exportación con cadenas de valor formalizadas y una alta intensidad de mano de obra estacional. Dentro de los procesos con mayor potencial para el cobot se encuentra: cosecha, clasificación y empaque de frutas/hortalizas, poda asistida y fumigación de precisión. Esto se respalda en: Pietrantoni et al. (2024) señalan que los cobots en agricultura mejoran la precisión y reducen la accidentabilidad. Además, Barbosa Júnior et al. (2024) identifican un ROI positivo en robótica para cultivos de especialidad de alto valor exportable.
- **Construcción:** posee un nivel de manufactura y valor agregado alto, siendo un sector intensivo en mano de obra con un déficit estructural de productividad y alta siniestralidad. Dentro de los procesos con mayor potencial para el cobot se encuentra: instalación de placas y revestimientos, perforación, soldadura estructural, traslado de materiales y prefabricación modular. Lo anterior se justifica en base a diversas fuentes: Burden et al. (2022) proyectan una penetración de cobots en la construcción que alcanzará al 60 % de las empresas para 2033.

Asimismo, Chauhan et al. (2024) afirman que los cobots reducen el tiempo de instalación y mejoran la seguridad en faenas de alto riesgo, en un mercado que proyecta un CAGR («Compound Annual Growth Rate») de 16,5 % hasta 2033.

- **Transporte (logística y bodegas):** cuenta con un nivel de manufactura y valor agregado medio-alto. Actúa como un sector habilitante con una alta intensidad de operaciones repetitivas en bodega, carga y despacho. Dentro de los procesos con mayor potencial para el cobot se encuentra: picking y paletizado en centros de distribución, carga/descarga de camiones, gestión de inventario y logística inversa, aunque esta actividad abarca también otro tipo de transportes que no clasifican en cobótica. La evidencia que sustenta lo anterior proviene de: Rainer et al. (2025) determinan que los cobots en logística reducen errores y optimizan la cadena de suministro, mientras que Pietrantoni et al. (2024) destacan que el manejo de materiales en bodegas es una de las tres áreas de mayor adopción de cobots a nivel global.
- **Minería:** presenta un nivel de manufactura y valor agregado alto debido a su valor unitario muy elevado. Es un sector con operaciones repetitivas y peligrosas, poseyendo la segunda mortalidad relativa más alta de las actividades analizadas. Dentro de los procesos con mayor potencial para el cobot se encuentra: perforación, anclaje de techo (roof bolting), muestreo en laboratorio, teleoperación en zonas de riesgo y mantenimiento de equipos. Lo anterior se justifica en base a diversas fuentes: Agioutantis et al. (2025) indican que los cobots en anclaje de techo eliminan la exposición humana en zonas de derrumbe subterráneo. Por su parte, Ruiz-del-Solar (2025) validan el paradigma de la minería colaborativa autónoma en faenas de cobre en Chile, y International Federation of Robotics (2025b) reportan que la robotización minera reduce hasta en un 25 % los costos de mantención. Adicionalmente la alta relevancia sectorial de minería no implica que los cobots sean aplicables a la totalidad de las operaciones mineras. La oportunidad inicialmente identificada se concentra en procesos auxiliares, analíticos y de soporte, mientras que las operaciones extractivas principales se relacionan más con autonomía compartida y teleoperación.

A continuación, se presentan los sectores con prioridad media, los cuales poseen un potencial de adopción moderado o acotado a subsectores específicos y operaciones particulares:

- **Electricidad, gas, agua y gestión de desechos:** presenta un nivel de manufactura y valor agregado medio-alto, al tratarse de infraestructura crítica con operaciones especializadas y reguladas, incluyendo tareas de mantención con un riesgo eléctrico elevado. Dentro de los procesos con mayor potencial para el cobot se encuentra: inspección y mantención de redes eléctricas, manejo de residuos peligrosos, monitoreo de plantas de tratamiento y operaciones en espacios confinados. Las siguientes fuentes forman el respaldo de lo anterior: la OCDE (2019) cataloga a esta infraestructura con un potencial medio debido a la baja escala de tareas repetitivas. Sin embargo, la alta severidad de los accidentes encubre un riesgo que justifica la sustitución por cobots en labores de mantención de alta peligrosidad.
- **Servicios personales (salud):** cuenta con un nivel de manufactura y valor agregado medio. Incluye salud, educación y cuidado personal, concentrando su mayor potencial en hospitales debido al volumen físico de sus operaciones. Dentro de los procesos con mayor potencial para el cobot se encuentra: entrega de medicamentos e insumos, asistencia en rehabilitación, logística interna hospitalaria y apoyo en cirugía de precisión. Lo anterior se justifica en base a diversas fuentes: Pittman et al. (2024) documentan el uso de cobots hospitalarios para la entrega de medicamentos e insumos, y Rahman (2024) resalta la asistencia quirúrgica, el cuidado de pacientes y la dispensación farmacéutica como áreas emergentes.
- **Comercio, restaurantes y hoteles:** posee un nivel de manufactura y valor agregado medio-bajo. Es un sector heterogéneo donde el mayor potencial radica en cadenas industrializadas de alimentos y logística de bodega, encontrándose ya agrupado en la categoría de transporte. Dentro de los procesos con mayor potencial para el cobot se encuentra: gestión de inventario en bodega y preparación estandarizada de alimentos. Lo anterior se justifica en base a diversas fuentes: International Federation of Robotics (2025b) señala que el sector de alimentos creció un 42 % en instalaciones robóticas (cobótica ampliada) durante 2024. Además, Rahman

(2024) menciona que los segmentos de alimentos, bebidas y retail emergen como nuevas áreas para cobots, aunque la alta variabilidad de procesos limita la estandarización.

Finalmente, el siguiente listado detalla los sectores de prioridad baja o aquellos que no aplican para este análisis, caracterizados por una nula manufactura física, altas barreras normativas o por ser meramente categorías contables:

- **Servicios financieros y empresariales:** posee un nivel de manufactura y valor agregado bajo. El valor se genera a través de la información y gestión, con nula manufactura física y un potencial acotado en el back-office. Dentro de los procesos con mayor potencial para el cobot se encuentra: gestión de archivos físicos, logística documental y recepción y despacho en instalaciones corporativas de gran escala. Lo anterior se justifica en base a diversas fuentes: la OCDE (2019) concluye que este sector muestra una alta automatizabilidad mediante software (RPA), pero el potencial de la robótica física es marginal y se restringe a centros de procesamiento de gran volumen físico.
- **Servicios de vivienda e inmobiliarios:** presenta un nivel de manufactura y valor agregado bajo, siendo un sector de gestión patrimonial sin manufactura física donde el valor se genera vía transacciones y administración. Dentro de los procesos con mayor potencial para el cobot se encuentra: mantención de edificios mediante cobots de limpieza y supervisión, así como el monitoreo de instalaciones. Lo anterior se justifica en base a diversas fuentes: la OCDE (2019) proyecta una baja densidad robótica para el sector inmobiliario, dado que sus procesos se cubren mejor con RPA que con cobots físicos, existiendo escasez de estudios específicos sobre adopción robótica en esta área.
- **Comunicaciones y servicios de información:** posee un nivel de manufactura y valor agregado muy bajo. Es un sector intangible sin manufactura física, donde el valor se genera en datos, conectividad y software. Dentro de los procesos con mayor potencial para el cobot se encuentra: logística de centros de datos (mantención física de hardware) y gestión de cableado

estructurado. Lo anterior se justifica en base a diversas fuentes: International Federation of Robotics (2025b) no incluyen a las comunicaciones entre los segmentos de adopción cobótica. El potencial de automatización radica en la IA y el software, actuando este sector como un habilitante tecnológico para que otras industrias adopten cobots.

- **Impuestos sobre los productos:** no aplica un nivel de manufactura ni valor agregado, ya que es una categoría contable del SCN-ONU y no una industria o sector productivo real. Por lo tanto, no existen procesos con potencial para la integración de cobots. Lo anterior se justifica en base a diversas fuentes: según el Sistema de Cuentas Nacionales (Naciones Unidas et al., 2008), los impuestos sobre los productos representan un componente de ajuste del PIB y no constituyen una actividad productiva susceptible de análisis tecnológico de esta índole.

La clasificación enlistada sigue la CIIU Rev. 4 utilizada por el Banco Central de Chile buscando adaptar el marco de la IFR (International Federation of Robotics, 2025b) y la OCDE (OCDE, 2019). La priorización es relativa al criterio de manufactura y valor agregado; otros criterios pueden modificar el ordenamiento. Así mismo se presenta la Tabla 7.1 a modo de resumen del apartado.

Tabla 7.1: Síntesis del ranking de prioridad de adopción cobótica por sector según nivel de manufactura y valor agregado

Sector	Argumento central	Fuente primaria de respaldo
Industria manufacturera	Núcleo de la adopción mundial; ROI documentado en manufactura de alimentos, metalmecánica y electrónica; mayor evidencia empírica.	Keshvarparast et al. (2023); International Federation of Robotics (2025b)
Agropecuaria-silvícola	Alta intensidad laboral + cadenas de exportación formalizadas; reducción de accidentabilidad y mejora ergonómica documentadas; brecha de mecanización estacional.	Pietrantoni et al. (2024); Barbosa Júnior et al. (2024)
Construcción	Déficit histórico de productividad; tareas repetitivas de alta peligrosidad; mercado cobot en construcción con CAGR 16,5 % hasta 2033.	Burden et al. (2022); Chauhan et al. (2024)
Transporte (logística)	Warehousing intensivo en operaciones repetitivas; mayor despliegue global de cobots de picking post-2020; encadenamiento con manufactura y retail.	Rainer et al. (2025); Pietrantoni et al. (2024)
Minería	Valor unitario de extracción muy alto; alta tasa de mortalidad relativa del país; tareas repetitivas subterráneas ideales para cobot.	Agioutantis et al. (2025); Ruiz-del-Solar (2025)
Servicios personales (salud)	Cobots hospitalarios documentados; impacto acotado a logística interna y asistencia clínica no quirúrgica.	Pittman et al. (2024)
EGA (electricidad, gas y agua)	Alta peligrosidad, baja repetitividad; cobots relevantes en mantención especializada de alto riesgo.	OCDE (2019)
Servicios financieros y empresariales	Automatización del sector vía RPA (software), no cobótica física; potencial cobot marginal.	OCDE (2019)
Comercio, restaurantes y hoteles	Potencial acotado al subsector de alimentos industrializados y bodegas; alta variabilidad limita generalización.	International Federation of Robotics (2025b)
Servicios de vivienda e inmobiliarios	Sin manufactura física; cobots útiles solo en mantención de edificios.	OCDE (2019)
Administración pública	Restricciones normativas; sin incentivo de rentabilidad; cobots con aplicaciones muy acotadas.	OCDE (2019)
Comunicaciones y servicios de información	Sector intangible sin manufactura física; rol habilitante para otros sectores.	International Federation of Robotics (2025b)
Impuestos sobre los productos	Categoría contable del SCN-ONU, no es una industria ni sector productivo.	Naciones Unidas et al. (2008)

Nota. El ranking se basa exclusivamente en el criterio de nivel de manufactura y valor agregado como predictor de impacto de la adopción cobótica. Elaboración propia con base en las fuentes citadas.

7.1.2 Relevancia económica (PIB)

Para abordar este criterio se utiliza la base de datos del Banco Central de Chile que está disponible a todo público con la información de la participación porcentual del PIB para cada actividad económica del país viéndose reflejada en la Tabla 7.2 y visualmente resumida para 2025 en la Figura 7.1. Se considera utilizar únicamente el dato porcentual ya que se busca comparar



entre los distintos componentes del indicador, así mismo, se selecciona un periodo de 10 años considerándose suficiente para caracterizar el comportamiento de los parámetros teniendo siempre mayor peso los años más recientes.

Tabla 7.2: Participación (%) del PIB por actividad económica y componentes, 2016 a 2025

Actividad económica / componente	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Agropecuario-silvícola	3,60	3,43	3,19	3,18	3,58	3,03	2,64	2,95	3,35	2,92
Pesca	0,60	0,85	0,73	0,80	0,47	0,47	0,60	0,45	0,48	0,53
Minería	7,40	8,98	8,88	8,17	11,58	14,09	13,31	10,33	11,89	13,07
Minería del cobre	6,45	8,05	7,90	7,26	10,44	12,74	9,61	7,91	10,50	11,43
Otras actividades mineras	0,95	0,93	0,98	0,91	1,14	1,34	3,71	2,43	1,39	1,63
Industria Manufacturera	9,71	9,16	9,60	8,98	9,02	8,56	9,50	9,58	9,37	8,95
Alimentos, bebidas y tabaco	3,55	3,44	3,73	3,61	3,68	3,18	3,49	3,89	3,79	3,56
Alimentos	2,73	2,74	2,79	2,70	2,78	2,36	2,79	3,07	3,06	2,95
Bebidas y tabaco	0,82	0,70	0,94	0,92	0,90	0,82	0,70	0,83	0,73	0,62
Textil, prendas de vestir, cuero y calzado	0,20	0,19	0,15	0,12	0,09	0,09	0,07	0,09	0,09	0,08
Maderas y muebles	0,73	0,67	0,64	0,57	0,58	0,65	0,70	0,42	0,45	0,40
Celulosa, papel e imprentas	0,79	0,83	1,01	0,68	0,58	0,70	0,72	0,49	0,63	0,48
Química, petróleo, caucho y plástico	2,05	1,80	1,80	1,73	1,82	1,73	2,19	2,14	1,97	1,99
Minerales no metálicos y metálica básica	0,55	0,46	0,54	0,54	0,55	0,65	0,58	0,58	0,53	0,48
Productos metálicos, maquinaria, equipos y otros	1,83	1,76	1,72	1,72	1,71	1,56	1,76	1,96	1,92	1,95
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	3,14	3,10	2,91	3,19	3,27	2,50	2,32	3,03	3,21	3,42
Construcción	6,53	6,14	6,47	6,79	5,97	5,76	5,87	6,06	5,99	5,98
Comercio, restaurantes y hoteles	11,62	11,59	11,37	11,13	10,21	11,30	10,83	11,15	10,29	9,88
Comercio	9,69	9,56	9,23	8,95	9,01	9,87	9,13	9,17	8,27	7,79
Restaurantes y hoteles	1,93	2,03	2,13	2,17	1,20	1,43	1,71	1,98	2,01	2,08
Transporte	6,42	6,10	5,68	5,73	4,80	4,88	4,75	5,29	5,29	5,54
Comunicaciones y servicios de información	3,05	2,94	2,78	2,79	2,68	2,54	2,60	2,60	2,50	2,50
Servicios financieros y empresariales	13,78	13,16	13,47	13,69	13,56	12,20	12,84	13,19	13,05	13,12
Servicios financieros	4,28	4,20	4,42	4,17	4,67	3,49	3,30	3,39	3,25	3,13
Servicios empresariales	9,50	8,96	9,05	9,52	8,89	8,71	9,53	9,79	9,80	9,99
Servicios de vivienda e inmobiliarios	7,53	7,81	7,72	7,94	8,05	7,64	7,89	7,93	7,65	7,52
Servicios personales	11,76	11,86	12,17	12,67	12,07	11,86	12,06	12,70	12,46	12,55
Administración pública	4,82	4,82	4,80	4,93	4,96	4,54	4,43	4,61	4,53	4,40
Impuestos sobre los productos	10,04	10,06	10,21	10,01	9,78	10,63	10,36	10,14	9,94	9,61

Nota. Los valores corresponden a porcentajes sobre el PIB. Las filas en negrita representan agregados de actividad económica; las filas indentadas corresponden a componentes o subcomponentes publicados por el Banco Central de Chile. Elaboración propia con base en Banco Central de Chile (Banco Central de Chile, 2026).

Desde los valores recopilados de participación del PIB, se destaca que los sectores económicos más influyentes en el indicador a lo largo del lapso y con mayor énfasis en 2025 son los enlistados a continuación, representando el 80 % de las entradas:

- Servicios financieros y empresariales (13,12 %)
- Minería (13,07 %)
- Servicios personales (12,55 %)
- Comercio, restaurantes y hoteles (9,88 %)
- Impuestos sobre los productos (9,61 %)
- Industria Manufacturera (8,95 %)
- Servicios de vivienda e inmobiliarios (7,52 %)
- Construcción (5,98 %)

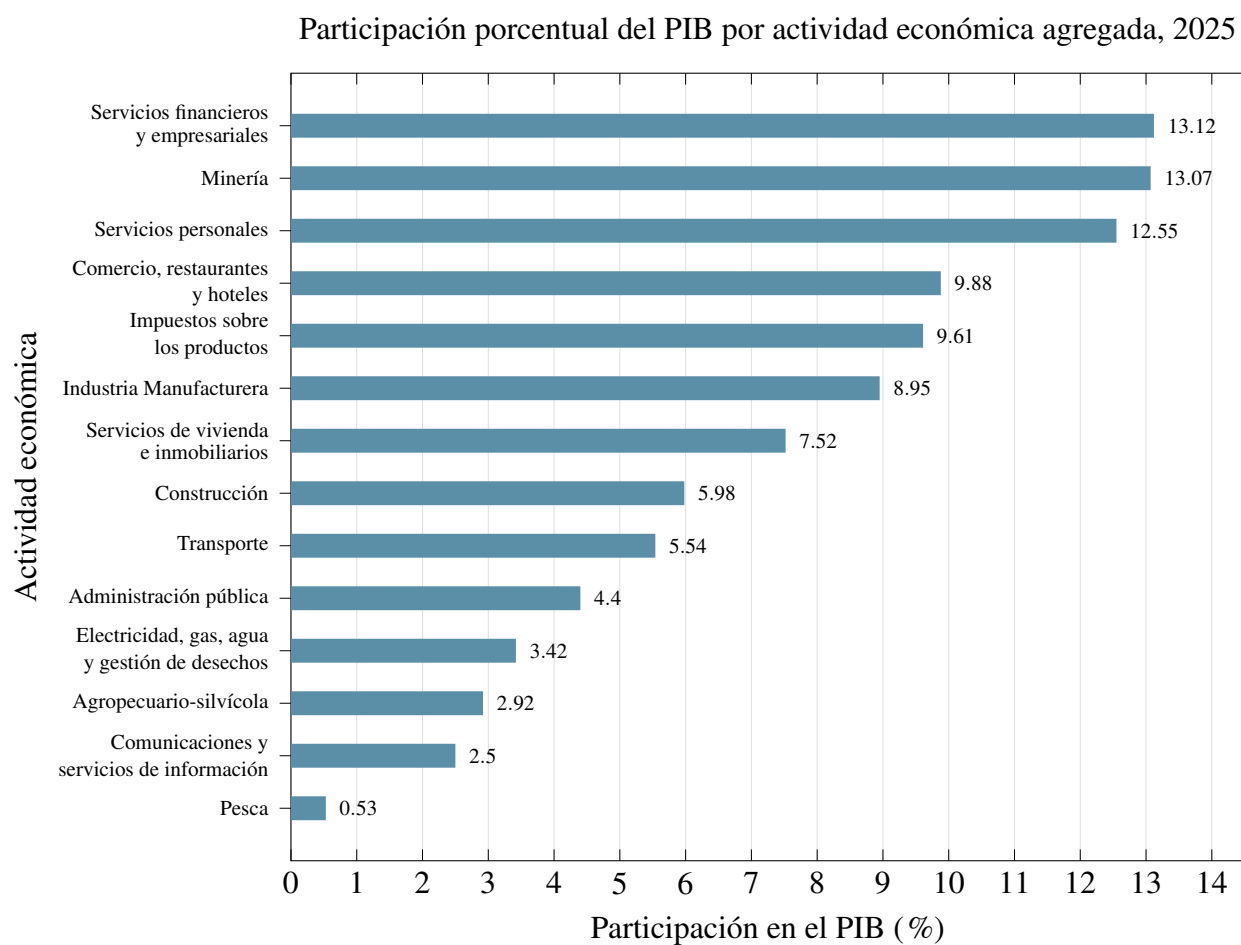


Figura 7.1: Participación porcentual del PIB por actividad económica agregada en Chile para el año 2025. Elaboración propia con base en Banco Central de Chile (Banco Central de Chile, 2026).

7.1.3 Orientación exportadora

Seguidamente se ha de explicitar el impacto de cada sector económico en el ámbito exportador del país a través de los reportes disponibles en la web de Aduanas de Chile. Previo al análisis es necesario establecer criterios de comparación directa con las categorías presentadas por el Banco Central de Chile para así estar normalizadas con el factor de PIB mostrado previamente. Esta homologación de datos puede verse en la sección de anexos específicamente en la Tabla 11.1 y corresponde a una interpretación y caracterización propia según la naturaleza del elemento exportado, no es una pauta 1:1 o factor de conversión directo oficial. Bajo esta comparativa se obtienen los valores anualizados por actividad económica para las exportaciones desde 2020 hasta 2025 reflejados en valores monetarios FOB (dólares) en la Tabla 7.3 y su participación porcentual en la Figura 7.2.

Tabla 7.3: Exportaciones anuales FOB homologadas según actividades económicas del Banco Central de Chile, 2020 a 2025 (Servicio Nacional de Aduanas, s.f.)

Actividad económica BCCH / componente homologado	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Agropecuario-silvícola	7.009,7	7.331,4	7.499,8	8.254,9	9.984,0	10.130,9
Industria manufacturera	12.112,2	14.677,2	16.773,8	14.266,2	15.134,9	14.485,4
Alimentos, bebidas y tabaco	5.534,7	5.766,0	6.269,5	5.821,9	5.865,4	5.994,5
Celulosa, papel e imprentas	2.597,6	3.464,2	3.786,1	3.352,4	4.084,7	3.746,4
Maderas y muebles	2.263,8	2.704,4	3.175,3	2.271,7	2.375,8	2.156,2
Productos metálicos, maquinaria, equipos y otros	132,0	335,4	366,7	396,4	522,9	413,4
Productos minerales no metálicos y metálica básica	104,4	321,3	324,5	321,1	280,8	197,5
Química, petróleo, caucho y plástico	1.479,7	2.086,0	2.851,6	2.102,7	2.005,3	1.977,3
Minería	41.025,3	58.825,6	58.645,2	55.719,3	59.764,8	68.308,3
Minería del cobre	35.334,9	51.257,0	42.745,9	43.352,1	50.316,2	56.476,0
Otras actividades mineras	5.690,4	7.568,6	15.899,2	12.367,2	9.448,5	11.832,3
No homologable / no asignado	5.032,9	5.298,1	7.045,8	7.421,8	6.212,6	6.434,9
Rancho de naves	552,0	300,2	698,8	647,4	564,6	580,2
Resto No minería	4.480,9	4.998,0	6.347,0	6.774,4	5.648,1	5.854,7
Pesca	5.053,4	5.947,4	7.651,2	7.449,7	7.436,9	7.805,1
Servicios financieros y empresariales / servicios no desagregados	1.051,8	1.374,0	1.608,0	2.430,6	2.817,1	3.328,1
Exportación de servicios calificados por Aduanas	1.051,8	1.374,0	1.608,0	2.430,6	2.817,1	3.328,1
Total general	71.285,3	93.453,8	99.223,8	95.542,5	101.350,2	110.492,7

Nota. Los valores se expresan en millones de dólares estadounidenses FOB y fueron redondeados a un decimal. Las filas en negrita corresponden a categorías agregadas homologadas a actividades económicas del Banco Central de Chile o agrupaciones metodológicas necesarias para el análisis. Las filas indentadas corresponden a componentes internos de cada categoría.

Participación (%) de actividades económicas agregadas en las exportaciones chilenas, 2020 a 2025

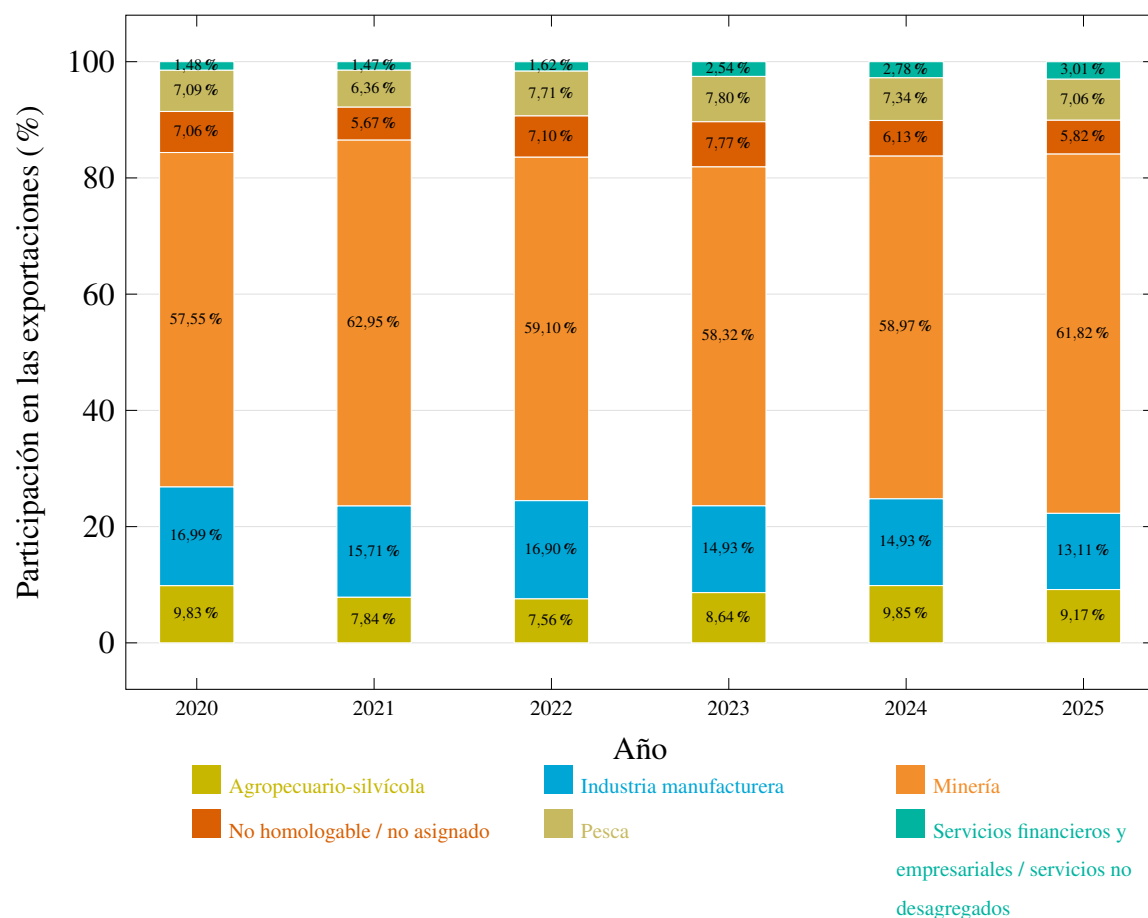


Figura 7.2: Participación porcentual de actividades económicas agregadas en las exportaciones chilenas durante el período 2020 a 2025. Elaboración propia con base en la homologación entre elementos exportados y actividades económicas del Banco Central de Chile, a partir de datos del Servicio Nacional de Aduanas (Servicio Nacional de Aduanas, s.f.).

Desde la participación porcentual de cada actividad económica se desprende que aquellas 3 más relevantes son minería, la industria manufacturera y agropecuario-silvícola y pesca no desagregados abarcando conjuntamente un 85 % del total y un 75 % solo con minería y manufactura, debido a la alta participación de estos dos, es interesante desagregarlos para conocer que los componen, por ello, se grafican ambas actividades desagregadas porcentualmente en la Figura 7.3 y Figura 7.4 respectivamente.

Desglose de la participación de la Industria Minera en las exportaciones, 2020–2025

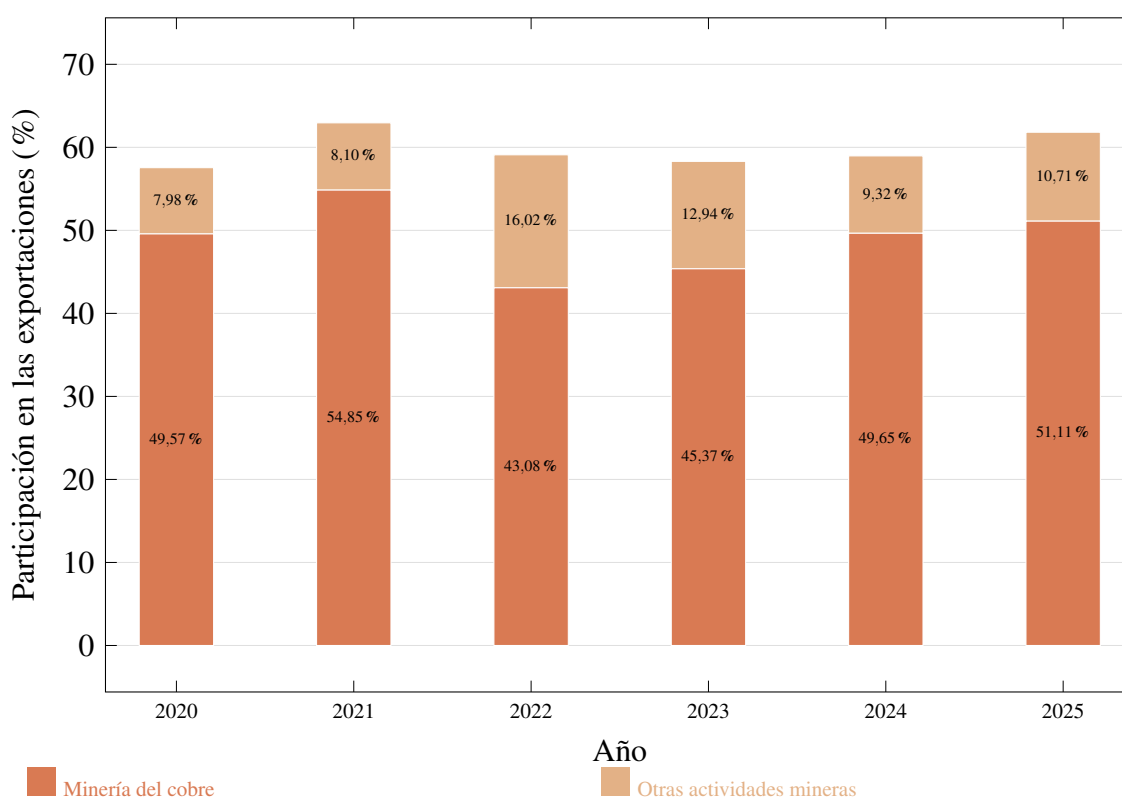


Figura 7.3: Desglose porcentual de la Industria Minera en las exportaciones chilenas durante el período 2020–2025. Elaboración propia a partir de datos del Servicio Nacional de Aduanas.

Desde la actividad minera se observa que solo se compone de 2 criterios, la actividad minera del cobre y todas las demás actividades mineras no ligadas al cobre, siendo esta última considerablemente menor, sin embargo, no significa que se pueda desacreditar su impacto en la actividad total.

Por su parte, la industria manufacturera se divide en varias categorías de las cuales aquellas

con más contribución al factor son alimentos, bebidas y tabaco, celulosa, papel e imprentas, y maderas y muebles, representando conjuntamente un 80 % del total de la industria.

Desglose de la participación de la Industria Manufacturera en las exportaciones, 2020–2025

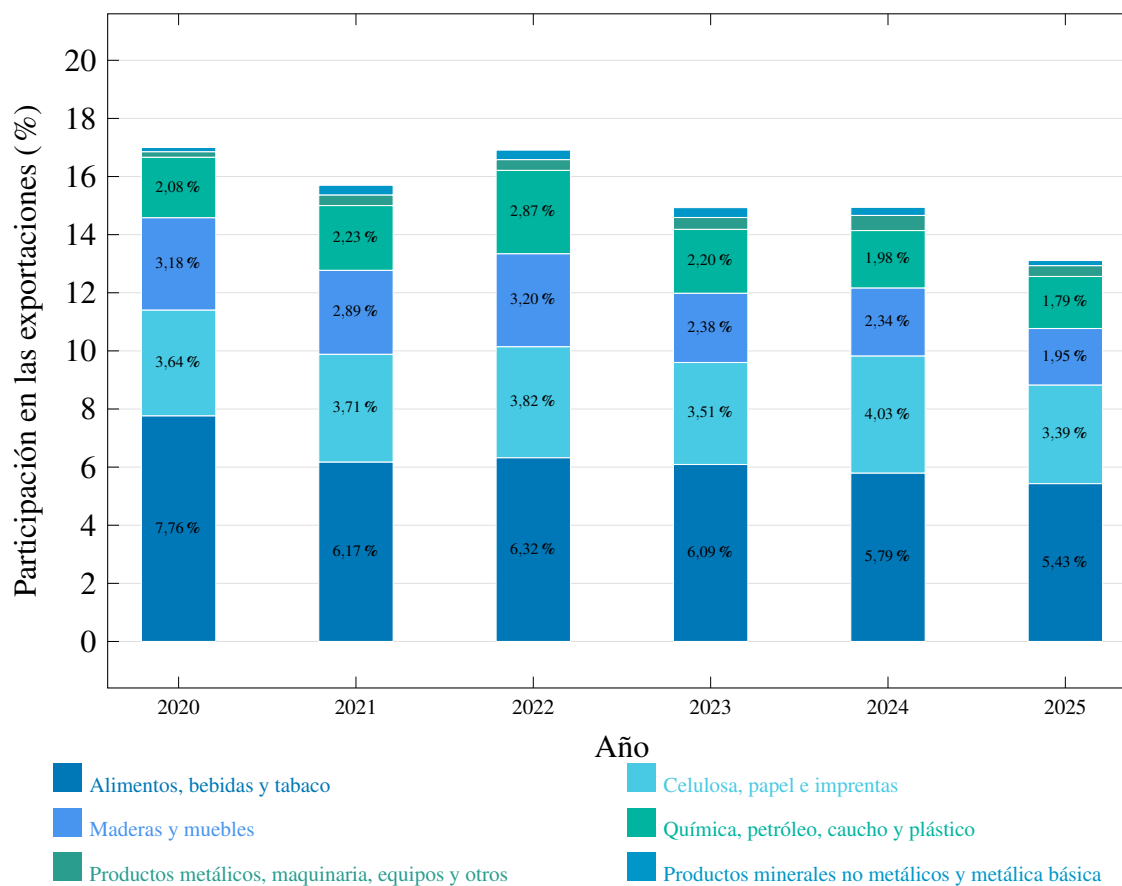


Figura 7.4: Desglose porcentual de la Industria Manufacturera en las exportaciones chilenas durante el período 2020–2025. Elaboración propia a partir de datos del Servicio Nacional de Aduanas.

7.1.4 Empleo sectorial

Como tercer criterio de selección de industrias llamativas a la incorporación de cobots se encuentra el impacto de estas en el nivel de desempleo del país puesto que, al ser tecnologías complementables con mano de obra humana, el impacto de la implementación puede ser absorbida más eficazmente por aquellas industrias generadoras de empleos. Conjuntamente estas máquinas pueden aportar a dinamizar la cantidad de personal especializado requerida por industrias a la vez de impulsar la generación de nuevos puestos convergiendo así impactos sociales y económicos a nivel macroeconómico y país.

Primeramente es necesario comprender el estado actual de los factores de empleabilidad a nivel país para luego desagregar la relevancia y comportamiento por industria. En la Figura 7.5 se presenta la tasa de desempleo en Chile dentro del lapso de tiempo de 10 años previos completos, del gráfico es posible visualizar una tendencia al alza posicionándose en torno al 9.0 % aún tras una baja considerable al normalizar el impacto negativo de la pandemia COVID-19. Este indicador sugiere que aproximadamente en la actualidad el 9 % de la fuerza laboral total está desempleada pero buscando empleo.

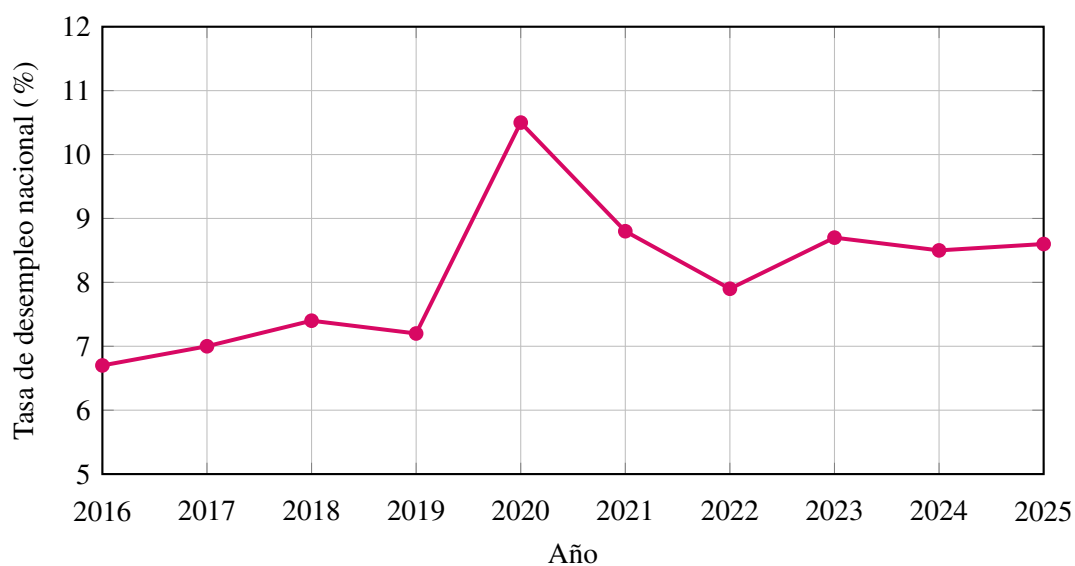


Figura 7.5: Evolución de la tasa de desocupación nacional en Chile, 2016 a 2025. Elaboración propia con base en datos del INE (Instituto Nacional de Estadísticas, 2026b).

Por otro lado es relevante conocer la distribución de las personas ocupadas dentro de las industrias para así visualizar directamente el impacto en volumen que posee cada una al aporte de actividad laboral. Los datos de fuerza laboral y volumen de ocupación presentados por el INE están en categorías funcionales de las empresas a las que pertenece el público encuestado, es por ello que se ha de homologar estas bases respecto de las actividades económicas presentadas por el Banco Central de Chile para mantener hegemonía en los datos y análisis posteriores, los criterios utilizados pueden verse en la sección de anexos, específicamente en la Tabla 11.2. Posterior al trabajo de estos datos se genera la Figura 7.6 presentando el volumen de personas empleadas por actividad económica. Para este análisis se excluye aquellas personas con empleos informales puesto la dificultad del seguimiento de participación por industria y rubros.

De la Figura 7.6 se puede destacar que el comercio, restaurantes y hoteles junto a los servicios personales poseen un alto porcentaje de la gente ocupada. Dentro de las categorías siguientes con mayor impacto se encuentran la industria manufacturera, servicios financieros y empresariales, construcción, transporte, y agropecuario, silvícola y pesca.

7.1.5 Seguridad laboral

Este cuarto criterio permite aproximar el impacto social y de calidad de vida que pueden generar los robots colaborativos al reducir dificultades y consecuencias negativas generadas directamente por el desarrollo de actividades laborales, esto también reduce la cantidad de desembolso económico de las empresas por indemnizaciones o incumplimientos a los que puedan verse sujetas. Al igual que la sección anterior, se omite el uso de datos pertenecientes a público con trabajos informales por la dificultad de seguimiento de accidentes laborales. Adicionalmente es relevante mencionar que la ley 16.744 (Ministerio del Trabajo y Previsión Social, 1968) establece que todo empleador debe estar afiliado a un organismo administrador del seguro laboral, ahora en adelante mencionados como mutualidades.

Desde la Tabla 7.4 se puede dimensionar que en 2024 se registraron 199.874 accidentes de trabajo y trayecto, de los cuales 72 % correspondieron a accidentes de la actividad laboral y 28 %

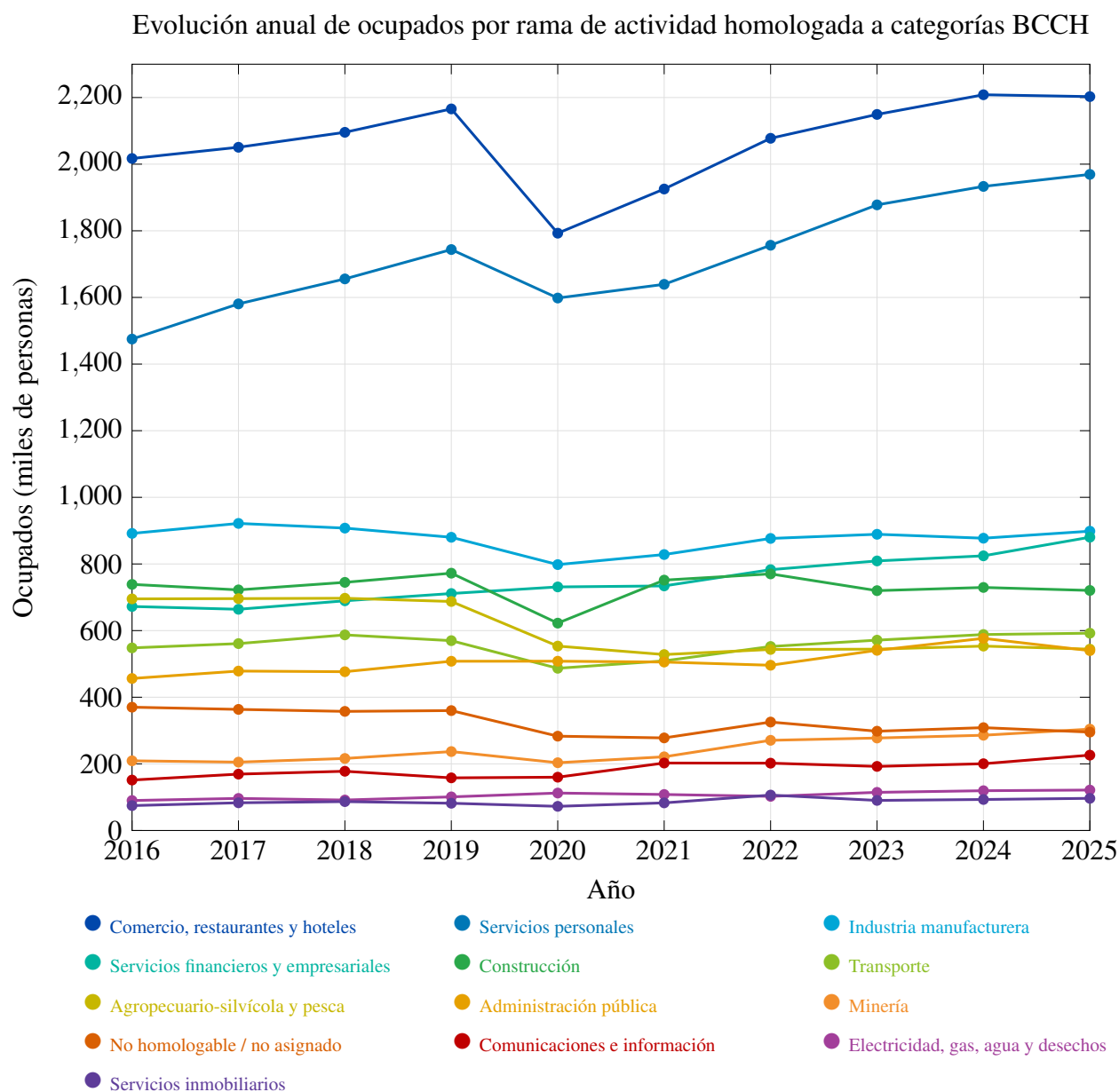


Figura 7.6: Evolución anual de ocupados por rama de actividad homologada a categorías del Banco Central de Chile. Elaboración propia con base en la serie anual de empleo sectorial homologada a partir de la Encuesta Nacional de Empleo (Instituto Nacional de Estadísticas, 2026a).

Tabla 7.4: Accidentes del trabajo, accidentes de trayecto y fallecidos a nivel nacional desde 2020 a 2024

Indicador	2020	2021	2022	2023	2024
Accidentes del trabajo con días perdidos	113.209	135.715	155.823	149.854	143.199
Accidentes de trayecto con días perdidos	39.620	47.184	58.706	57.623	56.675
Total accidentes trabajo y trayecto	152.829	182.899	214.529	207.477	199.874
Tasa nacional de accidentabilidad del trabajo (%)	2,2	2,6	2,8	2,6	2,5
Fallecidos por accidentes del trabajo	173	199	196	184	154
Fallecidos por accidentes de trayecto	131	140	138	129	133
Total fallecidos trabajo y trayecto	304	339	334	313	287
Trabajadores protegidos (millones)	6,56	6,83	7,18	7,21	7,25

Nota. Los accidentes del trabajo y de trayecto consideran casos con días perdidos en mutualidades. La tasa nacional de accidentabilidad corresponde a accidentes del trabajo por cada 100 personas trabajadoras protegidas. Los trabajadores protegidos se expresan en millones y fueron redondeados a dos decimales. Elaboración propia con base en SUSESO, Observatorio SST-SUSESO, actualizado al 14/03/2025 (Superintendencia de Seguridad Social, 2025b).

incurridos en el trayecto, demostrando que los accidentes a trabajadores se generan mayoritariamente durante sus actividades. Además, del total de accidentes del trabajo solo un 0,108 % corresponden a accidentes mortales, concluyéndose que la mayoría de accidentes de esta categoría afectan de forma temporal o crónica sin ser mortales.

Para efectos del criterio de selección es necesario conocer en qué áreas del mercado laboral del país se concentra la mayor cantidad de accidentes, por ello se confecciona la Tabla 7.5 de la cual se destaca que aquellas con mayor accidentabilidad son la manufactura, agricultura y pesca, transporte y comunicaciones, y construcción, todas estas por sobre la tasa promedio de su respectivo año, siendo un patrón consistente.

Tabla 7.5: Tasa de accidentabilidad del trabajo por actividad económica desde 2020 a 2024

Actividad económica	2020	2021	2022	2023	2024	Prom. 2020-2024
Industria manufacturera	3,5	4,1	4,0	3,8	3,5	3,78
Agricultura y pesca	3,7	4,0	3,7	3,5	3,3	3,64
Transporte y comunicaciones	3,3	3,5	3,5	3,3	3,1	3,34
Construcción	3,2	3,9	3,6	3,1	2,8	3,32
Comercio	2,4	2,8	3,1	2,9	2,8	2,8
Servicios	1,3	1,6	2,0	2,1	2,0	1,8
EGA (electricidad, gas y agua)	1,3	1,5	1,3	1,4	1,1	1,32
Minería	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,96
Promedio nacional	2,2	2,6	2,8	2,6	2,5	

Nota. La tasa de accidentabilidad corresponde a accidentes del trabajo en mutualidades por cada 100 personas trabajadoras protegidas y no incluye accidentes de trayecto. EGA corresponde a electricidad, gas y agua. Elaboración propia con base en SUSESO, Observatorio SST-SUSESO, actualizado al 14/03/2025 (Superintendencia de Seguridad Social, 2025b).

Finalmente, para concluir con la construcción de este indicador es necesario establecer la tasa de mortalidad de estos accidentes para concentrarse con mayor énfasis en aquellas actividades que permitan salvar vidas y reducir consecuencias de alta gravedad. Acorde a lo anterior se confecciona la Tabla 7.6 la cual muestra un índice que permite evaluar únicamente la distribución de accidentes mortales de trabajo omitiendo aquellos incurridos en trayecto. Esta tabla permite concluir que transporte y comunicaciones posee la tasa más alta de accidentes fatales seguido por minería, agricultura y pesca, y construcción.

Conectando ambas tablas de accidentes, se presentan algunos comportamientos destacables como la gran mortalidad de accidentes asociados a la minería, puesto que sus accidentes son pocos en magnitud pero con alta tasa de fatalidad mientras que, por otro lado, la industria manufacturera presenta un gran volumen de siniestros aunque pocos de estos son mortales. Transporte y comunicaciones posee alta tasa de accidentes y mortalidad aunque es relevante destacar que la cifra puede ser elevada debido a accidentes de tránsito y no necesariamente causado en operaciones de transporte dentro de bodegas o logística interna.

Tabla 7.6: Tasa de mortalidad por accidentes del trabajo según actividad económica desde 2020 a 2024

Actividad económica	2020	2021	2022	2023	2024	Prom. 2020–2024
Transporte y comunicaciones	9,5	13,4	13,2	11,0	8,8	11,2
Minería	10,4	4,5	8,5	7,4	6,3	7,4
Agricultura y pesca	8,3	5,5	9,4	7,2	5,7	7,2
Construcción	5,4	6,3	4,9	5,3	5,0	5,4
EGA (electricidad, gas y agua)	0,0	8,6	5,5	5,3	2,6	4,4
Industria manufacturera	4,0	3,9	2,7	4,3	2,1	3,4
Comercio	1,2	2,3	1,2	1,4	1,3	1,5
Servicios	0,8	0,9	0,8	0,9	0,6	0,8
Promedio nacional	2,7	3,1	2,8	2,8	2,1	

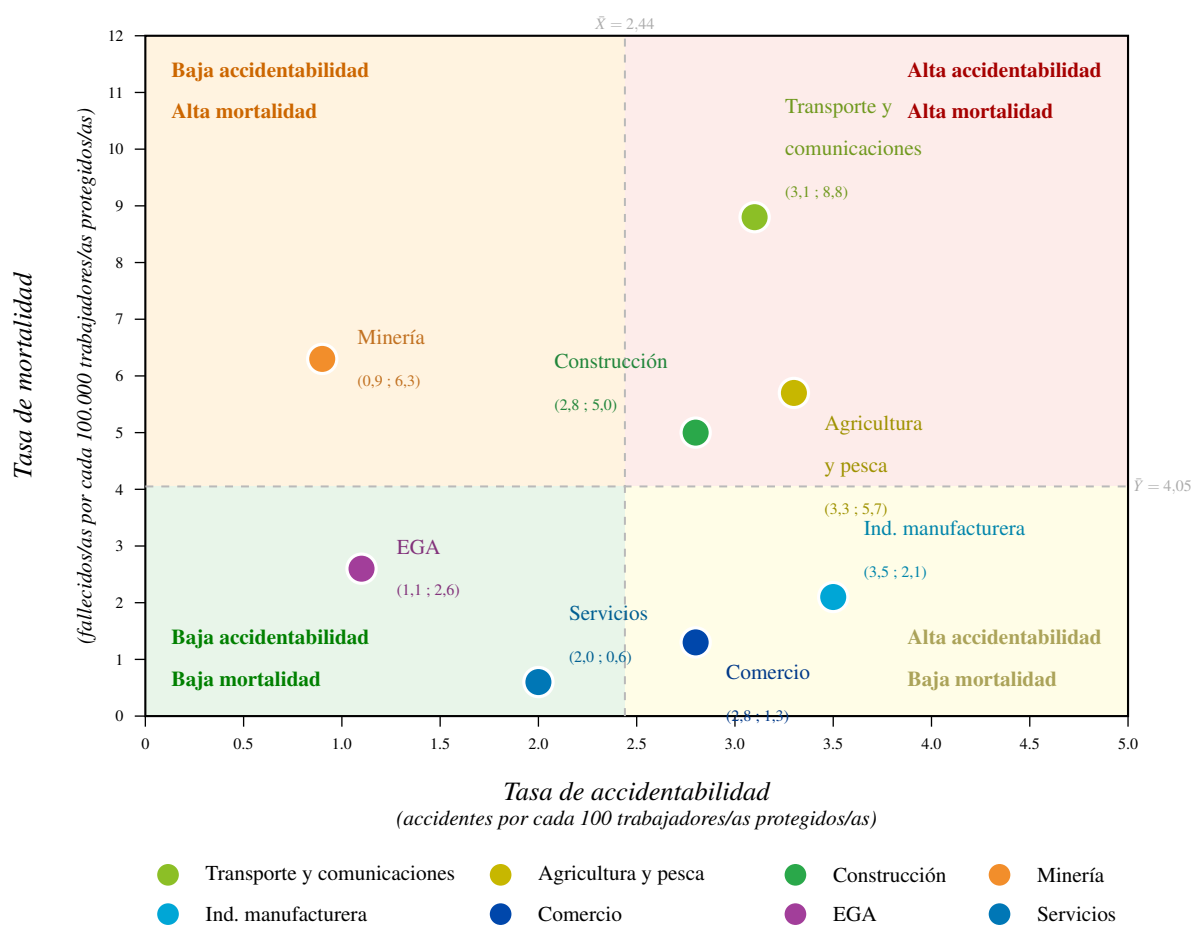
Nota. La tasa de mortalidad corresponde al número de personas fallecidas por accidentes del trabajo dividido por el promedio de personas trabajadoras protegidas, multiplicado por 100.000. No incluye accidentes de trayecto. En 2020 no se registraron accidentes fatales en EGA. Las cifras de minería pueden diferir de las de SERNAGEOMIN, ya que SUSESO clasifica según la actividad económica de la entidad empleadora bajo la Ley N.º 16.744. Elaboración propia con base en SUSESO (Superintendencia de Seguridad Social, 2025a).

A modo de resumen se genera la matriz de accidentabilidad y riesgo de mortalidad por cada actividad revisada en el apartado, esta tabla se confecciona utilizando el valor reportado en 2024 de cada indicador en función de las categorías revisadas, permitiendo así, visualizar más rápidamente

como se concentran los accidentes de cada clase. Resulta necesario mencionar que aquellos puntos más críticos corresponden los de mayor mortalidad. Gracias a la naturaleza de los valores y datos, se puede establecer una jerarquía de importancia o gravedad con el módulo del vector de cada punto, quedando enlistado de mayor a menor:

- **Transporte y comunicaciones:** Módulo $\approx 9,33$
- **Agricultura y pesca:** Módulo $\approx 6,59$
- **Minería:** Módulo $\approx 6,36$
- **Construcción:** Módulo $\approx 5,73$
- **Industria manufacturera:** Módulo $\approx 4,08$
- **Comercio:** Módulo $\approx 3,09$
- **EGA (Electricidad, gas y agua):** Módulo $\approx 2,82$
- **Servicios:** Módulo $\approx 2,09$

Figura 7.7: Matriz de cuadrantes: tasa de accidentabilidad y tasa de mortalidad por actividad económica para Chile en 2024.



Nota. Los ejes corresponden a la tasa de accidentabilidad (accidentes del trabajo por cada 100 trabajadores/as protegidos/as) y a la tasa de mortalidad (fallecidos/as por accidentes del trabajo por cada 100.000 trabajadores/as protegidos/as), ambas referidas al año 2024. Los puntos de corte que delimitan los cuadrantes se calcularon como la media aritmética de los ocho sectores económicos analizados: $\bar{X}_{acc.} = 2,44$ y $\bar{Y}_{mort.} = 4,05$. Elaboración propia.

7.1.6 Justificación económica preliminar

Capacidad de absorción económica. La evaluación económica de la implementación de robótica en el contexto empresarial chileno posee una dificultad metodológica concreta: la matriz de actividades económicas del Banco Central de Chile utilizada como marco de referencia agrupa trece categorías sectoriales, haciendo que la caracterización individual exceda el alcance temporal de esta investigación. Para resolver esta limitación sin evadir el rigor del análisis, se recurre al concepto de «capacidad de absorción», desarrollado originalmente por W. M. Cohen y Levinthal (1990) para explicar la habilidad de una firma para reconocer el valor de conocimiento externo, asimilarlo y aplicarlo con fines comerciales. Los autores sostienen que esta capacidad depende principalmente de inversiones previas de la propia empresa, más que de características intrínsecas del rubro en que opera, lo que permite trabajar el concepto mediante variables transversales en lugar de descripciones sectoriales exhaustivas. Existe una clara diferencia entre el concepto presentado por los autores y el efectivamente utilizado en esta investigación, la terminología propia puede considerarse más como la «capacidad financiera de absorción de la inversión» que se confecciona primordialmente con la información financiera de cuanto invierte cada firma por tamaño considerando cada una como factor promedio de su grupo.

Esta forma de trabajar la capacidad de absorción fue posteriormente ampliada por Zahra y George (2002), quienes reconceptualizan el término como un conjunto de rutinas y procesos organizativos: adquisición, asimilación, transformación y explotación del conocimiento, que pueden medirse a través de indicadores financieros y organizacionales estandarizados, sin que sea necesario un estudio de caso por industria. Sobre esta base teórica, se adoptan tres decisiones metodológicas que permiten estimar la capacidad de absorción de inversión en robótica de forma transversal a las trece categorías de la matriz del Banco Central.

En primer lugar, se sustituye la caracterización por sector económico por una segmentación según tamaño de empresa, tomando como referencia los tramos de ventas que utiliza el Servicio de Impuestos Internos para clasificar a las empresas en micro, pequeña, mediana y gran empresa (Servicio de Impuestos Internos, 2025b), de acuerdo con la clasificación por tramos de ventas

utilizada por el SII, las empresas se distribuyen en trece categorías según el monto estimado de sus ventas anuales expresadas en unidades de fomento (UF) (Servicio de Impuestos Internos, 2025c):

1. «**Sin ventas**»: corresponde a contribuyentes cuya información tributaria declarada no permite determinar un monto estimado de ventas.
2. «**Micro 1**»: ventas anuales desde 0,01 UF hasta 200 UF.
3. «**Micro 2**»: ventas anuales desde 200,01 UF hasta 600 UF.
4. «**Micro 3**»: ventas anuales desde 600,01 UF hasta 2.400 UF.
5. «**Pequeña 1**»: ventas anuales desde 2.400,01 UF hasta 5.000 UF.
6. «**Pequeña 2**»: ventas anuales desde 5.000,01 UF hasta 10.000 UF.
7. «**Pequeña 3**»: ventas anuales desde 10.000,01 UF hasta 25.000 UF.
8. «**Mediana 1**»: ventas anuales desde 25.000,01 UF hasta 50.000 UF.
9. «**Mediana 2**»: ventas anuales desde 50.000,01 UF hasta 100.000 UF.
10. «**Grande 1**»: ventas anuales desde 100.000,01 UF hasta 200.000 UF.
11. «**Grande 2**»: ventas anuales desde 200.000,01 UF hasta 600.000 UF.
12. «**Grande 3**»: ventas anuales desde 600.000,01 UF hasta 1.000.000 UF.
13. «**Grande 4**»: ventas anuales superiores a 1.000.000 UF.

Este paso consiste en agrupar a las empresas de los trece sectores en los cuatro arquetipos de tamaño y subgrupo, bajo el supuesto de que la capacidad financiera para absorber una inversión en tecnología está más determinada por la escala de la firma que por el rubro en que factura, dado que el acceso a crédito y las condiciones de financiamiento varían principalmente en función del tamaño y no de la actividad económica declarada (CORFO, 2017). Esta distribución de cantidad de

empresas por volumen de ventas estimado con el promedio de firmas disponibles entre los años 2018-2023, se muestra así en la Tabla 7.7 la clara existencia de pocas firmas de gran tamaño y una alta concentración de firmas micro, adicionalmente se presenta un valor considerable de empresas que no reportaron ventas o no existió suficiente información para la trazabilidad anual. Para una visualización más limpia se elabora la Tabla 7.8 omitiendo los valores de empresas sin información ni administración pública.

Tabla 7.7: Número promedio de empresas por actividad económica y tramo de ventas

Actividad económica	Micro 1	Micro 2	Micro 3	Pequeña 1	Pequeña 2	Pequeña 3
Administración pública	107	45	65	31	31	34
Agropecuaria-silvícola y pesca	20.110	14.538	18.037	7.586	5.821	3.933
Comercio, restaurantes y hoteles	76.876	41.258	49.472	18.736	12.088	9.237
Comunicaciones y servicios de información	7.181	4.152	5.135	2.000	1.352	1.181
Construcción	20.051	14.329	21.410	9.102	6.046	4.671
EGA y gestión de desechos	929	700	980	364	256	244
Industria manufacturera	28.072	14.619	18.523	7.469	5.060	4.122
Minería	714	486	798	421	359	357
Servicios de vivienda e inmobiliarios	7.310	6.779	10.762	4.552	3.117	2.625
Servicios financieros y empresariales	13.209	8.861	13.008	5.769	3.984	3.329
Servicios personales	7.607	3.839	4.788	2.217	1.388	758
Sin información	925	100	75	19	16	24
Transporte	24.615	22.884	30.978	10.482	5.389	3.808

Tabla 7.7: Número promedio de empresas por actividad económica y tramo de ventas (continuación)

Actividad económica	Mediana 1	Mediana 2	Grande 1	Grande 2	Grande 3	Grande 4	Sin ventas/ sin información
Administración pública	15	9	4	4	1	7	516
Agropecuaria-silvícola y pesca	1.680	917	456	295	50	80	22.937
Comercio, restaurantes y hoteles	3.686	2.038	1.130	867	174	318	37.261

Continúa en la página siguiente

Tabla 7.7: Número promedio de empresas por actividad económica y tramo de ventas (continuación)

Actividad económica	Mediana 1	Mediana 2	Grande 1	Grande 2	Grande 3	Grande 4	Sin ventas/ sin información
Comunicaciones y servicios de información	568	348	191	144	27	66	6.101
Construcción	1.767	926	505	413	105	159	23.410
EGA y gestión de desechos	118	74	47	59	23	50	866
Industria manufacturera	1.647	964	618	527	162	340	16.552
Minería	185	123	75	67	18	73	1.727
Servicios de vivienda e inmobiliarios	1.160	732	496	497	84	81	14.148
Servicios financieros y empresariales	1.453	896	513	420	106	211	18.182
Servicios personales	287	170	96	66	15	25	7.109
Sin información	5	2	1	3	1	1	4.700
Transporte	1.456	805	439	343	78	137	35.683

Nota. Elaboración propia con datos del Servicio de Impuestos Internos (SII) por tramo de ventas y rubro económico (Servicio de Impuestos Internos, 2025c). Los valores corresponden al número promedio de empresas de cada actividad económica clasificadas según los trece tramos de ventas utilizados por el SII. La categoría «Sin ventas/Sin información» corresponde a contribuyentes cuya información tributaria declarada no permite determinar un monto estimado de ventas.

Tabla 7.8: Distribución porcentual promedio de empresas por tramo de ventas según actividad económica

Actividad económica	Micro 1	Micro 2	Micro 3	Pequeña 1	Pequeña 2	Pequeña 3
Agropecuario-silvícola y pesca	27,36 %	19,78 %	24,54 %	10,32 %	7,92 %	5,35 %
Comercio, restaurantes y hoteles	35,61 %	19,11 %	22,92 %	8,68 %	5,60 %	4,28 %
Comunicaciones y servicios de información	32,14 %	18,58 %	22,98 %	8,95 %	6,05 %	5,29 %
Construcción	25,23 %	18,03 %	26,94 %	11,45 %	7,61 %	5,88 %
EGA y gestión de desechos	24,17 %	18,21 %	25,49 %	9,47 %	6,65 %	6,34 %
Industria manufacturera	34,18 %	17,80 %	22,56 %	9,10 %	6,16 %	5,02 %
Minería	19,41 %	13,23 %	21,71 %	11,46 %	9,77 %	9,72 %
Servicios de vivienda e inmobiliarios	19,14 %	17,75 %	28,18 %	11,92 %	8,16 %	6,87 %
Servicios financieros y empresariales	25,52 %	17,12 %	25,13 %	11,15 %	7,70 %	6,43 %

Continúa en la página siguiente

Tabla 7.8: Distribución porcentual promedio de empresas por tramo de ventas según actividad económica (continuación)

Actividad económica	Micro	Micro	Micro	Pequeña	Pequeña	Pequeña
	1	2	3	1	2	3
Servicios personales	35,79 %	18,06 %	22,53 %	10,43 %	6,53 %	3,56 %
Transporte	24,27 %	22,57 %	30,55 %	10,34 %	5,31 %	3,75 %

Tabla 7.8: Distribución porcentual promedio de empresas por tramo de ventas según actividad económica (continuación)

Actividad económica	Mediana	Mediana	Grande	Grande	Grande	Grande	Total
	1	2	1	2	3	4	
Agropecuaria-silvícola y pesca	2,29 %	1,25 %	0,62 %	0,40 %	0,07 %	0,11 %	100,00 %
Comercio, restaurantes y hoteles	1,71 %	0,94 %	0,52 %	0,40 %	0,08 %	0,15 %	100,00 %
Comunicaciones y servicios de información	2,54 %	1,56 %	0,85 %	0,64 %	0,12 %	0,29 %	100,00 %
Construcción	2,22 %	1,16 %	0,63 %	0,52 %	0,13 %	0,20 %	100,00 %
EGA y gestión de desechos	3,08 %	1,94 %	1,21 %	1,54 %	0,60 %	1,30 %	100,00 %
Industria manufacturera	2,01 %	1,17 %	0,75 %	0,64 %	0,20 %	0,41 %	100,00 %
Minería	5,04 %	3,34 %	2,03 %	1,82 %	0,49 %	1,98 %	100,00 %
Servicios de vivienda e inmobiliarios	3,04 %	1,92 %	1,30 %	1,30 %	0,22 %	0,21 %	100,00 %
Servicios financieros y empresariales	2,81 %	1,73 %	0,99 %	0,81 %	0,20 %	0,41 %	100,00 %
Servicios personales	1,35 %	0,80 %	0,45 %	0,31 %	0,07 %	0,12 %	100,00 %
Transporte	1,44 %	0,79 %	0,43 %	0,34 %	0,08 %	0,14 %	100,00 %

Nota. Elaboración propia con datos del Servicio de Impuestos Internos (SII) por tramo de ventas y rubro económico (Servicio de Impuestos Internos, 2025c). Los porcentajes representan la distribución promedio de las empresas de cada actividad económica entre los doce tramos de ventas considerados. La categoría «Sin ventas/Sin información» fue excluida del cálculo, por lo que los porcentajes de cada actividad económica suman 100 %.

En segundo lugar, y con el propósito de conservar la trazabilidad con la matriz de actividades económicas original, se construye un indicador cuantitativo replicable a partir de las Cuentas Nacionales del Banco Central de Chile, definido como el cociente entre la Formación Bruta de Capital Fijo, explícitamente la suma de «Maquinaria y equipo excepto transporte» y «Programas de

informática», y el Valor Agregado Bruto de cada sector representado por su PIB a valor corriente (Banco Central de Chile, 2024). Este paso consiste en calcular, para cada una de las trece categorías, qué proporción del valor que genera destina habitualmente a inversión de capital, utilizando datos ya publicados y de acceso público, evitando así levantar información propia sector por sector. Se obtiene así la Tabla 7.10 desde donde se destaca un comportamiento inicial que contrasta con todo lo anterior explicitado: minería posee baja intensidad de inversión. Lo anterior se presenta debido a que el PIB de minería es extremadamente alto en función de su inversión, que es de las mayores a comparación de los demás sectores, esto sugiere la necesidad de incorporar un tercer factor al análisis que compense el tamaño de la inversión respecto de la cantidad de empresas disponibles. Acorde a esto último la fórmula cambia desde la Ecuación 7.1 a Ecuación 7.2, obteniendo así la Tabla 7.11 donde se logra visualizar cambios en las posiciones de la escala. Es necesario aclarar que «Administración pública» ha sido omitida en este último análisis debido a su comportamiento público-estatal que le permite acceder a métodos de financiamiento diferentes a las empresas privadas.

$$I_i = \frac{1}{6} \sum_{t=2018}^{2023} \frac{FBCF_{i,t}}{PIB_{i,t}}, \quad \forall i \in \{\text{Actividades económicas}\} \quad (7.1)$$

$$I_i^{\text{emp}} = \frac{1}{6} \sum_{t=2018}^{2023} \frac{FBCF_{i,t}}{PIB_{i,t} N_{i,t}}, \quad \forall i \in \{\text{Actividades económicas}\} \quad (7.2)$$

Tabla 7.9: Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) por actividad económica (2018-2023)

Actividad económica	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Administración pública	368,012	429,178	424,292	422,206	428,100	582,203
Agropecuario-silvícola y pesca	533,402	459,281	499,674	600,986	727,786	691,097
Comercio, restaurantes y hoteles	1120,173	1319,161	1638,940	1887,149	2117,592	2248,879
Comunicaciones y servicios de información	2112,459	1989,616	2310,055	2984,637	3423,934	3007,094
Construcción	772,996	1060,767	705,704	804,534	977,727	1199,047
EGA y gestión de desechos	1389,677	1374,335	2911,731	2991,546	3381,317	3022,564

Continúa en la página siguiente

Tabla 7.9: Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) por actividad económica (2018-2023) (continuación)

Actividad económica	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Industria manufacturera	2212,919	2081,112	2542,453	2727,708	3100,799	2799,098
Minería	2712,927	3639,752	3110,873	3957,851	5355,322	6341,954
Servicios de vivienda e inmobiliarios	135,495	127,992	136,781	173,333	176,900	152,612
Servicios financieros y empresariales	1904,071	2195,309	1618,192	2222,989	2776,627	2824,430
Servicios personales	755,733	833,182	888,254	1086,942	1358,574	1280,383
Transporte	597,159	560,657	609,176	857,511	1054,917	997,791

Nota. Elaboración propia. Los valores corresponden a la Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) para cada actividad económica indicada durante el período 2018-2023.

Tabla 7.10: Normalización de la intensidad de inversión por actividad económica mediante la razón FBCF/PIB

Actividad económica	Promedio	Normalización
Comunicaciones y servicios de información	0,432	1,000
EGA y gestión de desechos	0,387	0,893
Minería	0,168	0,377
Industria manufacturera	0,123	0,271
Servicios financieros y empresariales	0,075	0,157
Agropecuario-silvícola y pesca	0,070	0,146
Comercio, restaurantes y hoteles	0,068	0,140
Construcción	0,066	0,135
Transporte	0,066	0,135
Administración pública	0,041	0,077
Servicios personales	0,037	0,066
Servicios de vivienda e inmobiliarios	0,008	0,000

Nota. Elaboración propia a partir de los datos de Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) correspondientes a las categorías «Maquinarias y equipo excepto transporte» y «Programas de informática», junto con el Producto Interno Bruto (PIB) por actividad económica publicados por el Banco Central de Chile para el período 2018 a 2023. La columna *Promedio* corresponde al promedio de la razón FBCF/PIB calculada para cada actividad económica durante dicho período. La columna «Normalización» se obtuvo mediante la aplicación de la ecuación 6.2.

Tabla 7.11: Normalización de la intensidad de inversión por actividad económica considerando el número de empresas

Actividad económica	Promedio	Normalización
EGA y gestión de desechos	4,053E-05	1,000
Minería	3,133E-05	0,772
Comunicaciones y servicios de información	1,531E-05	0,376
Industria manufacturera	1,281E-06	0,028
Agropecuaria-silvícola y pesca	7,270E-07	0,015
Construcción	6,448E-07	0,013
Transporte	4,757E-07	0,008
Servicios financieros y empresariales	3,583E-07	0,006
Servicios personales	2,711E-07	0,003
Servicios de vivienda e inmobiliarios	1,630E-07	0,001
Comercio, restaurantes y hoteles	1,342E-07	0,000
Administración Pública	-	-

Nota. Elaboración propia a partir de los datos de Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) correspondientes a las categorías «Maquinarias y equipo excepto transporte» y «Programas de informática», junto con el Producto Interno Bruto (PIB) y el «Número de empresas» por actividad económica publicados por el Banco Central de Chile y el Servicio de Impuestos Internos para el período 2018 a 2023. La columna *Promedio* corresponde al promedio de la razón $FBCF / (PIB \times \text{Número de empresas})$ calculada para cada actividad económica durante dicho período. La columna *Normalización* se obtuvo mediante la aplicación de la ecuación 6.2. Para efectos del cálculo la categoría «Administración pública» ha sido descartada ya que su naturaleza es de tipo pública-estatal teniendo sistemas de financiamiento diferentes a las entidades privadas.

Seguidamente, se estima el valor de ingresos por ventas totales de cada sector económico y tamaño con el objetivo de estimar la capacidad de inversión de una empresa promedio, el cálculo obtenido de manera anual se ve representado en la Tabla 7.12.

$$\bar{V}_{i,s}^{CLP} = \bar{V}_{i,s}^{UF} \times 40.823,03, \quad (7.3)$$

donde $\bar{V}_{i,s}^{CLP}$ representa las ventas promedio anuales expresadas en pesos chilenos de la actividad económica i y el tramo empresarial s , mientras que $\bar{V}_{i,s}^{UF}$ corresponde al valor promedio originalmente expresado en unidades de fomento.

Tabla 7.12: Ventas promedio anuales en pesos chilenos por actividad económica y tramo empresarial

Actividad económica	Micro	Micro	Micro	Pequeña	Pequeña	Pequeña
	1	2	3	1	2	3
Administración pública	\$2.362.972	\$15.281.519	\$54.809.835	\$144.838.500	\$287.013.448	\$666.916.294
Agropecuario-silvícola y pesca	\$3.069.099	\$15.097.709	\$51.637.970	\$142.968.620	\$289.835.454	\$635.383.293
Comercio, restaurantes y hoteles	\$2.701.841	\$15.032.441	\$51.311.475	\$141.352.896	\$286.867.299	\$628.580.116
Comunicaciones y servicios de información	\$2.711.730	\$15.096.601	\$51.593.280	\$141.568.665	\$289.203.624	\$642.729.027
Construcción	\$2.803.377	\$15.377.367	\$52.456.970	\$142.154.316	\$287.828.784	\$631.953.957
EGA y gestión de desechos	\$2.716.172	\$15.181.744	\$52.215.363	\$141.439.101	\$293.179.857	\$627.135.146
Industria manufacturera	\$2.629.500	\$15.083.135	\$51.596.833	\$142.003.827	\$288.585.392	\$635.537.779
Minería	\$2.685.986	\$15.342.127	\$53.811.760	\$143.258.090	\$292.811.937	\$653.441.253
Servicios de vivienda e inmobiliarios	\$3.018.454	\$15.480.644	\$52.761.746	\$141.916.443	\$288.895.338	\$636.953.415
Servicios financieros y empresariales	\$2.717.528	\$15.291.562	\$52.773.548	\$142.618.614	\$288.899.366	\$640.422.100
Servicios personales	\$2.757.225	\$15.083.638	\$51.467.606	\$141.139.138	\$284.331.972	\$626.534.595
Sin información	\$1.392.626	\$13.925.746	\$51.460.399	\$140.979.854	\$285.374.019	\$656.338.425
Transporte	\$3.025.969	\$15.552.415	\$50.794.548	\$141.198.316	\$285.149.291	\$633.107.985

Tabla 7.12: Ventas promedio anuales en pesos chilenos por actividad económica y tramo empresarial (continuación)

Actividad económica	Mediana	Mediana	Grande	Grande	Grande	Grande
	1	2	1	2	3	4
Administración pública	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Agropecuario-silvícola y pesca	\$1.433.728.883	\$2.832.347.745	\$5.637.837.966	\$13.022.117.974	\$31.310.330.673	\$412.817.460.482
Comercio, restaurantes y hoteles	\$1.411.414.016	\$2.829.477.110	\$5.676.112.492	\$13.573.260.891	\$30.994.173.265	\$256.676.844.118
Comunicaciones y servicios de información	\$1.433.312.148	\$2.860.649.056	\$5.662.865.409	\$13.286.781.078	\$31.560.083.365	\$276.066.379.457
Construcción	\$1.417.785.039	\$2.846.323.841	\$5.654.622.131	\$13.714.583.455	\$31.602.652.902	\$116.579.162.331
EGA y gestión de desechos	\$1.441.616.437	\$2.817.951.558	\$5.847.383.521	\$14.500.464.341	\$31.618.943.372	\$343.766.352.651
Industria manufacturera	\$1.424.896.569	\$2.869.495.744	\$5.724.340.670	\$14.112.251.832	\$31.730.199.309	\$342.415.489.917
Minería	\$1.428.120.987	\$2.805.556.432	\$5.787.981.250	\$14.075.896.984	\$31.166.745.931	\$1.581.492.497.784
Servicios de vivienda e inmobiliarios	\$1.426.507.963	\$2.888.067.234	\$5.808.838.389	\$13.746.423.852	\$30.564.749.489	\$134.049.463.892
Servicios financieros y empresariales	\$1.431.521.876	\$2.850.540.686	\$5.676.064.103	\$13.612.701.912	\$31.642.170.850	\$290.019.674.726
Servicios personales	\$1.439.240.586	\$2.851.576.408	\$5.694.168.982	\$13.535.145.359	\$31.456.506.925	\$138.421.855.599

Continúa en la página siguiente

Tabla 7.12: Ventas promedio anuales en pesos chilenos por actividad económica y tramo empresarial (continuación)

Actividad económica	Mediana 1	Mediana 2	Grande 1	Grande 2	Grande 3	Grande 4
Sin información	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Transporte	\$1.419.641.436	\$2.846.744.596	\$5.695.783.275	\$13.569.074.176	\$31.314.625.362	\$172.322.504.551

Nota. Elaboración propia con datos del Servicio de Impuestos Internos sobre ventas promedio por actividad económica y tramo empresarial (Servicio de Impuestos Internos, 2025c). Los valores originalmente expresados en unidades de fomento fueron convertidos a pesos chilenos utilizando una UF de \$40.823,03, correspondiente al 1 de julio de 2026 (Servicio de Impuestos Internos, 2026). Los resultados fueron redondeados al peso más cercano. La abreviatura «N/D» indica que no se dispone de un valor promedio para la combinación de actividad económica y tramo empresarial. Debido a que se utiliza un único valor de la UF, las cifras representan equivalencias monetarias bajo una fecha común de conversión y no necesariamente los ingresos nominales históricos obtenidos en cada período.

Finalmente, al tener una gran variabilidad de datos, recursos, métodos de producción y maquinarias requeridas, se busca cuantificar una inversión aproximada para cada actividad económica en base a la literatura como investigaciones, reportes de implementaciones y estudios de factibilidad a modo de proxy entre el costo real de adquirir e implementar las tecnologías asumiendo condiciones operacionales similares al contexto nacional. Adicionalmente es relevante destacar que debido a la heterogeneidad de las aplicaciones robóticas, la determinación de un costo representativo no debe basarse exclusivamente en el precio del robot. Para fortalecer la estimación se recopilamos casos académicos, implementaciones industriales, evaluaciones tecnoeconómicas y referencias de mercado que informan el costo de adquisición, la inversión instalada, los costos recurrentes o los indicadores de retorno.

La estimación de los costos asociados a la incorporación de cobots y sistemas co-robóticos requiere distinguir estas tecnologías de la automatización robótica convencional. Para efectos de esta investigación, se consideraron como evidencia directa los sistemas en los que el trabajador conserva una participación funcional en la ejecución, supervisión, programación, abastecimiento, control o toma de decisiones del proceso. En consecuencia, se incluyeron cobots industriales, sistemas de cooperación humano-robot y aplicaciones de co-robótica ampliada con supervisión o teleoperación

humana. Por el contrario, se excluyeron de la estimación económica principal los vehículos guiados automáticamente, robots móviles autónomos, robots agrícolas completamente autónomos y líneas robotizadas que sustituyen íntegramente el trabajo humano.

Esta delimitación es relevante debido a que el costo de una aplicación cobótica no depende únicamente del precio del manipulador. La implementación puede requerir efectores finales, sistemas de visión, dispositivos de seguridad, soportes, software, programación, capacitación y modificaciones en el puesto de trabajo. Por ello, la variable utilizada en el análisis corresponde a la «inversión total instalada», definida como:

$$\begin{aligned} I_i^{\text{tot}} = & C_i^{\text{robot}} + C_i^{\text{efector}} + C_i^{\text{sensores}} + C_i^{\text{seguridad}} \\ & + C_i^{\text{hardware}} + C_i^{\text{software}} + C_i^{\text{integración}} \\ & + C_i^{\text{capacitación}} + C_i^{\text{puesta en marcha}} + C_i^{\text{contingencia}}, \end{aligned} \quad (7.4)$$

donde I_i^{tot} representa la inversión total instalada de la solución aplicable a la actividad económica i . Los demás términos corresponden al costo del robot o plataforma, efector final, sensores, dispositivos de seguridad, hardware, software, integración, capacitación, puesta en marcha y contingencias.

Esta formulación permite evitar la subestimación del CAPEX, puesto que los estudios de implementación muestran que el precio del robot constituye solo una parte del proyecto. Por ejemplo, Giberti et al. (2022) desagregan una inversión de aproximadamente EUR 50.000 en EUR 40.000 para el cobot, EUR 2.000 para la estación móvil y hardware, EUR 3.000 para software, EUR 3.000 para capacitación y EUR 2.000 para implementación. De forma similar, Țițu et al. (2024) incorporan robots, soportes, pinzas, seguridad, programación, personal técnico y consumo energético dentro del costo total del proyecto. Asimismo, Calvo y Gil (2022) muestran que la viabilidad económica depende de los equipos auxiliares, dispositivos de alimentación, herramientas y características específicas del proceso.

Para evaluar la calidad de la información económica recopilada se establecieron tres niveles de evidencia:

- **Nivel A:** implementación real que informa costos efectivamente incurridos, contratos o desembolsos observados.
- **Nivel B:** caso industrial o evaluación tecnoeconómica que estima la inversión mediante cotizaciones, costos explícitos y supuestos documentados.
- **Nivel C:** aplicación cobótica o co-robótica que demuestra beneficios técnicos, productivos o ergonómicos, pero no informa un costo comparable de implementación.

En industria manufacturera se identificaron tres casos económicos directamente utilizables. En primer lugar, Polonara et al. (2024) evaluaron una celda colaborativa con un cobot UR5e destinado a cargar y descargar una estación de soldadura de componentes plásticos automotrices. El operador conserva la responsabilidad de abastecer los depósitos y realizar el control de calidad, mientras el cobot ejecuta el ciclo repetitivo. El costo total instalado se estimó en aproximadamente EUR 45.000, incluyendo componentes, mantenimiento y consumo energético. La aplicación redujo en un 86 % el tiempo de intervención del operario. El punto de equilibrio durante el primer año se alcanzó con una producción aproximada de 123.000 unidades, mientras que una producción de 180.000 unidades generó un retorno anual estimado de EUR 65.812.

En segundo lugar, Giberti et al. (2022) desarrollaron una metodología flexible para implementar un cobot YuMi como recurso compartido entre diferentes procesos de ensamblaje. El caso fue validado en una instalación de ABB y consideró una inversión aproximada de EUR 50.000. Los ahorros fueron estimados en 656 horas de trabajo anuales, equivalentes a EUR 19.688 por año. Con estos valores, el período de recuperación fue cercano a 2,5 años, con una variación de aproximadamente 0,5 años según los escenarios de producción considerados.

En tercer lugar, Țîțu et al. (2024) calcularon una inversión de EUR 85.594 para un proyecto compuesto por dos cobots, herramientas, componentes auxiliares, seguridad, integración y personal especializado. Al incorporar una contingencia de 15 %, el presupuesto aumentó a EUR 98.434. El consumo eléctrico anual de ambos cobots fue estimado en EUR 1.546. Este antecedente resulta útil para representar una aplicación de mayor complejidad o capacidad que los dos casos anteriores,

aunque sus beneficios anuales dependen de supuestos de reducción de mano de obra y disminución de productos defectuosos.

Los tres casos permiten establecer un rango referencial de EUR 45.000-EUR 100.000 para una celda cobótica manufacturera simple o de complejidad moderada. El límite inferior corresponde a una aplicación de carga y descarga con un cobot, mientras que el límite superior representa un proyecto con dos cobots, elementos auxiliares, integración y contingencias. Este intervalo no debe extenderse automáticamente a sistemas colaborativos especializados. Por ejemplo, Terreran et al. (2026) reportan una reducción cercana al 50 % en el tiempo de procesamiento y al 40 % en la carga de trabajo del operario mediante un sistema colaborativo para manipular materiales compuestos, pero no publican un costo suficientemente comparable para incorporarlo al rango económico.

En el sector agropecuario, Tziolas et al. (2023) desarrollaron una evaluación económica de co-robots multipropósito aplicados a viñedos. Los sistemas considerados presentaron precios de adquisición de EUR 80.000 y EUR 150.000. Los resultados muestran que su utilización puede reducir hasta en un 11,53 % los costos anuales equivalentes en determinadas labores, como control de malezas, poda, aplicación de herbicidas y despunte. Sin embargo, otras operaciones, como defoliación y amarre, no resultaron económicamente favorables. Estos sistemas se incorporan como «co-robótica ampliada», debido a que combinan autonomía operacional con coordinación humana dentro del sistema productivo, y no como cobots industriales estrictos. Por consiguiente, para el sector agropecuario se adopta un rango referencial de EUR 80.000-EUR 150.000. Este intervalo se limita a aplicaciones vitivinícolas comparables y no se extrapola directamente a ganadería, silvicultura, pesca o acuicultura, debido a que la literatura revisada no proporciona costos co-robóticos suficientemente homogéneos para dichas actividades.

En comercio, restaurantes y hoteles, los trabajos de Accorsi et al. (2019) y Ronzoni et al. (2021) demuestran la factibilidad técnica, económica y ergonómica de incorporar robots cooperativos en procesos de catering y producción de alimentos. No obstante, sus resultados no proporcionan un costo de implementación que pueda compararse directamente con los casos manufactureros. Por esta razón, estas fuentes se utilizan para justificar el potencial de la tecnología, pero no para definir

un rango sectorial de inversión.

En servicios personales, la cirugía asistida por robot se considera una forma de co-robótica ampliada, ya que el cirujano permanece dentro del circuito de decisión y controla continuamente el sistema. McBride et al. (2021) documentaron una inversión real de AUD 4.433.186, compuesta por AUD 3,9 millones para el sistema quirúrgico, AUD 150.000 para esterilización y AUD 383.186 para adecuar el pabellón. El contrato de mantenimiento alcanzó AUD 621.245 por tres años y los consumibles presentaron un costo mediano de AUD 1.848 por procedimiento. Este caso no se utiliza para construir un rango general de inversión aplicable a los servicios personales. Su evaluación depende del volumen de procedimientos, la utilización del pabellón, la especialidad clínica y los resultados sanitarios. La revisión de Lai et al. (2025) y la revisión sistemática de Sadri et al. (2023) señalan que las evaluaciones económicas de cirugía robotizada deben considerar la curva de aprendizaje, la utilización compartida, el impacto organizacional y el costo por procedimiento. Por ello, esta tecnología debe estudiarse mediante análisis de costo-efectividad y no mediante una comparación directa con una celda cobótica industrial.

La Tabla 7.13 resume los valores de los antecedentes reportados. Todos aquellos sectores económicos no mencionados corresponden a actividades con bajo respaldo literario del uso de tecnologías de cobótica y co-robótica, en consecuencia, no existe respaldo ni estudios suficientes para caracterizar un nivel de inversión y gastos asociados al rubro.

Tabla 7.13: Rangos y casos económicos de cobótica y co-robótica por actividad económica

Actividad económica	Aplicación considerada	Inversión o rango	Resultado y uso de la evidencia	Fuente y nivel
Industria manufacturera	Carga y descarga colaborativa de una estación de soldadura	EUR 45.000	Reducción de 86 % en el tiempo de intervención del operario. Punto de equilibrio durante el primer año con aproximadamente 123.000 unidades.	(Polonara et al., 2024). Nivel B.
Industria manufacturera	Cobot YuMi utilizado como recurso flexible entre procesos de ensamblaje	EUR 50.000	Ahorro estimado de 656 horas y EUR 19.688 anuales. Payback aproximado de $2,5 \pm 0,5$ años.	(Giberti et al., 2022). Nivel B.

Continúa en la página siguiente

Tabla 7.13: Rangos y casos económicos de cobótica y co-robótica por actividad económica (continuación)

Actividad económica	Aplicación considerada	Inversión o rango	Resultado y uso de la evidencia	Fuente y nivel
Industria manufacturera	Proyecto compuesto por dos cobots	EUR 85.594; EUR 98.434 con contingencia de 15 %	Incluye herramientas, seguridad, integración y personal técnico. Electricidad estimada en EUR 1.546 anuales.	(Țițu et al., 2024). Nivel B.
Industria manufacturera	Colaboración humano-robot para manipulación de materiales compuestos	Sin costo comparable publicado	Reducción cercana al 50 % del tiempo de proceso y al 40 % de la carga del operario. Se utiliza como evidencia técnica, no para definir el rango de inversión.	(Terreran et al., 2026). Nivel C.
Agropecuario-silvícola y pesca	Co-robots multipropósito para labores vitivinícolas	EUR 80.000-EUR 150.000	Reducción de hasta 11,53 % en los costos anuales equivalentes para algunas labores. El rango solo se aplica a escenarios agrícolas comparables.	(Tziolas et al., 2023). Nivel B.
Comercio, restaurantes y hoteles	Cooperación humano-robot en procesos de catering y producción de alimentos	Sin rango respaldado	La evidencia demuestra factibilidad técnica, económica y ergonómica, pero no entrega un CAPEX suficientemente comparable.	(Accorsi et al., 2019; Ronzoni et al., 2021). Nivel C.
Servicios personales	Cirugía asistida por robot con control humano continuo	AUD 4.433.186 en el caso analizado	Mantenimiento de AUD 621.245 por tres años y consumibles de AUD 1.848 por procedimiento. Debe evaluarse por volumen y costo-efectividad.	(Lai et al., 2025; McBride et al., 2021; Sadri et al., 2023). Nivel A.
Minería	Teleoperación, autonomía compartida e inspección colaborativa	Sin rango respaldado	La literatura revisada no evidencia pruebas económicas suficientes para estimar una inversión sectorial comparable.	Evidencia insuficiente.
Construcción	Fabricación, montaje o perforación con colaboración humano-robot	Sin rango respaldado	Los casos económicos previamente identificados corresponden principalmente a automatización integral y no cumplen el criterio de colaboración adoptado.	Evidencia insuficiente.

Continúa en la página siguiente

Tabla 7.13: Rangos y casos económicos de cobótica y co-robótica por actividad económica (continuación)

Actividad económica	Aplicación considerada	Inversión o rango	Resultado y uso de la evidencia	Fuente y nivel
Transporte	Picking colaborativo, abastecimiento asistido y transporte interno con participación humana	Sin rango respaldado	Los costos identificados para AGV y AMR corresponden principalmente a operación autónoma, por lo que fueron excluidos del rango co-robótico.	Evidencia insuficiente.
EGA y gestión de desechos	Clasificación, inspección o mantenimiento colaborativo	Sin rango respaldado	Existe evidencia técnica sobre robótica, pero no suficientes casos económicos donde se verifique cooperación funcional humano-robot.	Evidencia insuficiente.
Comunicaciones y servicios de información	Asistencia física en centros de datos e infraestructura	Sin rango respaldado	La automatización predominante es digital y no se identificaron casos económicos suficientes de cobótica física.	Evidencia insuficiente.
Servicios financieros y empresariales	Robots físicos de apoyo y gestión de instalaciones	Sin rango respaldado	No se identificaron inversiones co-robóticas comparables. La mayor parte de la automatización sectorial corresponde a software.	Evidencia insuficiente.
Servicios de vivienda e inmobiliarios	Inspección, limpieza y mantenimiento asistido	Sin rango respaldado	Los casos revisados corresponden mayoritariamente a robots autónomos de inspección o limpieza y no permiten establecer un rango co-robótico.	Evidencia insuficiente.
Administración pública	Robots físicos de apoyo y atención	Sin rango respaldado	La literatura revisada no evidencia pruebas económicas suficientes para estimar una inversión sectorial en cobótica física.	Evidencia insuficiente.

Nota. Elaboración propia con base en las fuentes señaladas. Los valores se mantienen en la moneda original de cada estudio y corresponden a casos particulares, no a precios promedio de las actividades económicas. El nivel A representa costos observados en implementaciones reales; el nivel B corresponde a estimaciones tecnoeconómicas, cotizaciones o casos industriales con supuestos explícitos; y el nivel C corresponde a evidencia técnica sin costos comparables. Se excluyeron de la estimación principal los robots agrícolas plenamente autónomos, los AGV y AMR sin colaboración humana y las líneas de automatización integral. La expresión «Sin rango respaldado» indica que la literatura revisada no evidencia pruebas suficientes para estimar una inversión sectorial en cobótica o co-robótica.

A partir de los casos con información económica comparable, se proponen escenarios de sensibilidad para cada actividad i , el valor del escenario (e) se define como:

$$I_i^{(e)} = \begin{cases} I_{i,\text{mín}}, & e = \text{optimista}, \\ \frac{I_{i,\text{mín}} + I_{i,\text{máx}}}{2}, & e = \text{promedio}, \\ I_{i,\text{máx}}, & e = \text{pesimista}. \end{cases} \quad (7.5)$$

En industria manufacturera, los escenarios corresponden a EUR 45.000, EUR 72.500 y EUR 100.000. El escenario inferior representa una celda colaborativa simple; el escenario superior incorpora dos cobots, elementos auxiliares, integración y contingencias; y el escenario base corresponde al punto medio del intervalo. Este último es un supuesto de modelación y no un costo observado directamente.

En co-robótica vitivinícola, los escenarios corresponden a EUR 80.000, EUR 115.000 y EUR 150.000. Los extremos proceden de los dos sistemas evaluados por Tziolas et al. (2023), mientras que el valor central corresponde al punto medio del rango. Si bien estos valores no deben extrapolarse a todas las actividades agropecuarias, funcionan como una base de cálculo pertinente para las estimaciones del indicador.

Para servicios personales, la cirugía asistida por robot debe analizarse como un caso independiente. Para las restantes actividades económicas no se asigna un valor bajo, base o alto, ya que hacerlo requeriría utilizar costos de automatización plena o precios comerciales no respaldados por aplicaciones colaborativas comparables.

Al no existir información relevante para aproximar costos de manera general se utilizará como base de cálculo una inversión de USD100.000 al ser un monto representativo de los costos informados a lo largo del escrito, junto con una sensibilización del -50% , $+100\%$ correspondiente a USD50.000 y USD200.000 permitiendo evaluar casos con inversiones mínimas reportadas y considerablemente altas. Finalmente, los escenarios pueden compararse con las ventas anuales promedio de las empresas mediante:

$$C_{i,s}^{\text{CAPEX},(e)} = \frac{I_i^{(e)}}{\bar{V}_{i,s}}, \quad (7.6)$$

donde $C_{i,s}^{\text{CAPEX},(e)}$ representa la carga relativa del CAPEX para la actividad económica i , el tamaño empresarial s y el escenario de inversión e , mientras que $\bar{V}_{i,s}$ corresponde a las ventas anuales promedio del grupo. Este indicador permite comparar la magnitud de la inversión con la escala económica de las empresas, pero no debe interpretarse como una medida directa de liquidez o capacidad efectiva de pago. Las ventas no descuentan costos operacionales, impuestos, obligaciones financieras ni requerimientos de capital de trabajo. Por ello, la carga relativa de la inversión debe concentrarse en valores bajos para asegurar que la empresa pueda cumplir con sus obligaciones económicas a la vez de abarcar los gastos nuevos.

Manteniendo una base de cálculo promedio, se generan 3 casos para conocer la capacidad de realizar una inversión de 200.000, 100.000 y 50.000 USD para cada sector económico efectuando la conversión a pesos chilenos con el valor a tasa de cambio reportada para el 01 de Julio de 2026 correspondiente a $922.21 \frac{\text{CLP}}{\text{USD}}$. Esta inversión será contrastada con los ingresos promedios anuales para actividad y tamaño de empresa, asignando como valores permisibles que la inversión no supere el 10 %, 15 % o 20 % del monto ya que valores mayores podrían reflejar infactibilidad de inversión debido a la solvencia y liquidez puesto que la magnitud de ventas no ha considerado el descuento de ningún flujo negativo como son los propios costos de operación. Se confecciona así un resumen del factor $C_{i,s}^{\text{CAPEX},(e)}$ para cada caso e , destacando aquellos segmentos en que la inversión no supera el 15 % de las ventas anuales.

Tabla 7.14: Proporción de una inversión de USD 200.000 respecto de las ventas anuales promedio por actividad económica y tamaño empresarial

Actividad económica	Micro	Micro	Micro	Pequeña	Pequeña	Pequeña	Mediana	Mediana	Grande	Grande	Grande	Grande
	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	3	4
Agropecuario-silvícola y pesca	6.009,65 %	1.221,66 %	357,18 %	129,01 %	63,64 %	29,03 %	12,86 %	6,51 %	3,27 %	1,42 %	0,59 %	0,04 %
Comercio, restaurantes y hoteles	6.826,53 %	1.226,96 %	359,46 %	130,48 %	64,30 %	29,34 %	13,07 %	6,52 %	3,25 %	1,36 %	0,60 %	0,07 %
Comunicaciones y servicios de información	6.801,64 %	1.221,75 %	357,49 %	130,28 %	63,78 %	28,70 %	12,87 %	6,45 %	3,26 %	1,39 %	0,58 %	0,07 %
Construcción	6.579,28 %	1.199,44 %	351,61 %	129,75 %	64,08 %	29,19 %	13,01 %	6,48 %	3,26 %	1,34 %	0,58 %	0,16 %
EGA y gestión de desechos	6.790,51 %	1.214,89 %	353,23 %	130,40 %	62,91 %	29,41 %	12,79 %	6,55 %	3,15 %	1,27 %	0,58 %	0,05 %
Industria manufacturera	7.014,34 %	1.222,84 %	357,47 %	129,89 %	63,91 %	29,02 %	12,94 %	6,43 %	3,22 %	1,31 %	0,58 %	0,05 %
Minería	6.866,83 %	1.202,19 %	342,75 %	128,75 %	62,99 %	28,23 %	12,92 %	6,57 %	3,19 %	1,31 %	0,59 %	0,01 %
Servicios de vivienda e inmobiliarios	6.110,48 %	1.191,44 %	349,58 %	129,97 %	63,84 %	28,96 %	12,93 %	6,39 %	3,18 %	1,34 %	0,60 %	0,14 %
Servicios financieros y empresariales	6.787,12 %	1.206,17 %	349,50 %	129,33 %	63,84 %	28,80 %	12,88 %	6,47 %	3,25 %	1,35 %	0,58 %	0,06 %
Servicios personales	6.689,41 %	1.222,80 %	358,37 %	130,68 %	64,87 %	29,44 %	12,82 %	6,47 %	3,24 %	1,36 %	0,59 %	0,13 %
Transporte	6.095,30 %	1.185,94 %	363,11 %	130,63 %	64,68 %	29,13 %	12,99 %	6,48 %	3,24 %	1,36 %	0,59 %	0,11 %

Nota. Elaboración propia a partir de las ventas anuales promedio por actividad económica y tramo empresarial. La inversión considerada corresponde a USD 200.000, convertidos a \$184.442.000 utilizando un tipo de cambio de 1 USD = 922,21 CLP, registrado el 1 de julio de 2026 (Xe Corporation, 2026). Los porcentajes representan la relación entre el monto total de la inversión y las ventas anuales promedio; no corresponden a ganancias netas ni constituyen una medida directa de liquidez o capacidad de pago. Las celdas sombreadas y destacadas en negrita corresponden a valores iguales o inferiores al 15 %.

Tabla 7.15: Proporción de una inversión de USD 100.000 respecto de las ventas anuales promedio por actividad económica y tamaño empresarial

Actividad económica	Micro	Micro	Micro	Pequeña	Pequeña	Pequeña	Mediana	Mediana	Grande	Grande	Grande	Grande
	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	3	4
Agropecuario-silvícola y pesca	3.004,82 %	610,83 %	178,59 %	64,50 %	31,82 %	14,51 %	6,43 %	3,26 %	1,64 %	0,71 %	0,29 %	0,02 %
Comercio, restaurantes y hoteles	3.413,27 %	613,48 %	179,73 %	65,24 %	32,15 %	14,67 %	6,53 %	3,26 %	1,62 %	0,68 %	0,30 %	0,04 %
Comunicaciones y servicios de información	3.400,82 %	610,87 %	178,75 %	65,14 %	31,89 %	14,35 %	6,43 %	3,22 %	1,63 %	0,69 %	0,29 %	0,03 %
Construcción	3.289,64 %	599,72 %	175,80 %	64,87 %	32,04 %	14,59 %	6,50 %	3,24 %	1,63 %	0,67 %	0,29 %	0,08 %
EGA y gestión de desechos	3.395,26 %	607,45 %	176,62 %	65,20 %	31,46 %	14,71 %	6,40 %	3,27 %	1,58 %	0,64 %	0,29 %	0,03 %
Industria manufacturera	3.507,17 %	611,42 %	178,73 %	64,94 %	31,96 %	14,51 %	6,47 %	3,21 %	1,61 %	0,65 %	0,29 %	0,03 %
Minería	3.433,41 %	601,10 %	171,38 %	64,37 %	31,49 %	14,11 %	6,46 %	3,29 %	1,59 %	0,66 %	0,30 %	0,01 %
Servicios de vivienda e inmobiliarios	3.055,24 %	595,72 %	174,79 %	64,98 %	31,92 %	14,48 %	6,46 %	3,19 %	1,59 %	0,67 %	0,30 %	0,07 %
Servicios financieros y empresariales	3.393,56 %	603,08 %	174,75 %	64,66 %	31,92 %	14,40 %	6,44 %	3,24 %	1,62 %	0,68 %	0,29 %	0,03 %
Servicios personales	3.344,70 %	611,40 %	179,18 %	65,34 %	32,43 %	14,72 %	6,41 %	3,23 %	1,62 %	0,68 %	0,29 %	0,07 %
Transporte	3.047,65 %	592,97 %	181,56 %	65,31 %	32,34 %	14,57 %	6,50 %	3,24 %	1,62 %	0,68 %	0,29 %	0,05 %

Nota. Elaboración propia a partir de las ventas anuales promedio por actividad económica y tramo empresarial.

La inversión considerada corresponde a USD 100.000, convertidos a \$92.221.000 utilizando un tipo de cambio de 1 USD = 922,21 CLP, registrado el 1 de julio de 2026 (Xe Corporation, 2026). Los porcentajes representan la relación entre el monto total de la inversión y las ventas anuales promedio; no corresponden a ganancias netas ni constituyen una medida directa de liquidez o capacidad de pago. Las celdas sombreadas y destacadas en negrita corresponden a valores iguales o inferiores al 15 %.

Tabla 7.16: Proporción de una inversión de USD 50.000 respecto de las ventas anuales promedio por actividad económica y tamaño empresarial

Actividad económica	Micro	Micro	Micro	Pequeña	Pequeña	Pequeña	Mediana	Mediana	Grande	Grande	Grande	Grande
	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	3	4
Agropecuaria-silvícola y pesca	1.502,41 %	305,41 %	89,30 %	32,25 %	15,91 %	7,26 %	3,22 %	1,63 %	0,82 %	0,35 %	0,15 %	0,01 %
Comercio, restaurantes y hoteles	1.706,63 %	306,74 %	89,86 %	32,62 %	16,07 %	7,34 %	3,27 %	1,63 %	0,81 %	0,34 %	0,15 %	0,02 %
Comunicaciones y servicios de información	1.700,41 %	305,44 %	89,37 %	32,57 %	15,94 %	7,17 %	3,22 %	1,61 %	0,81 %	0,35 %	0,15 %	0,02 %
Construcción	1.644,82 %	299,86 %	87,90 %	32,44 %	16,02 %	7,30 %	3,25 %	1,62 %	0,82 %	0,34 %	0,15 %	0,04 %
EGA y gestión de desechos	1.697,63 %	303,72 %	88,31 %	32,60 %	15,73 %	7,35 %	3,20 %	1,64 %	0,79 %	0,32 %	0,15 %	0,01 %
Industria manufacturera	1.753,58 %	305,71 %	89,37 %	32,47 %	15,98 %	7,26 %	3,24 %	1,61 %	0,81 %	0,33 %	0,15 %	0,01 %
Minería	1.716,71 %	300,55 %	85,69 %	32,19 %	15,75 %	7,06 %	3,23 %	1,64 %	0,80 %	0,33 %	0,15 %	0,00 %
Servicios de vivienda e inmobiliarios	1.527,62 %	297,86 %	87,39 %	32,49 %	15,96 %	7,24 %	3,23 %	1,60 %	0,79 %	0,34 %	0,15 %	0,03 %
Servicios financieros y empresariales	1.696,78 %	301,54 %	87,37 %	32,33 %	15,96 %	7,20 %	3,22 %	1,62 %	0,81 %	0,34 %	0,15 %	0,02 %
Servicios personales	1.672,35 %	305,70 %	89,59 %	32,67 %	16,22 %	7,36 %	3,20 %	1,62 %	0,81 %	0,34 %	0,15 %	0,03 %
Transporte	1.523,83 %	296,48 %	90,78 %	32,66 %	16,17 %	7,28 %	3,25 %	1,62 %	0,81 %	0,34 %	0,15 %	0,03 %

Nota. Elaboración propia a partir de las ventas anuales promedio por actividad económica y tramo empresarial.

La inversión considerada corresponde a USD 50.000, convertidos a \$46.110.500 utilizando un tipo de cambio de 1 USD = 922,21 CLP, registrado el 1 de julio de 2026 (Xe Corporation, 2026). Los porcentajes representan la relación entre el monto total de la inversión y las ventas anuales promedio; no corresponden a ganancias netas ni constituyen una medida directa de liquidez o capacidad de pago. Las celdas sombreadas y destacadas en negrita corresponden a valores iguales o inferiores al 15 %.

En las Tablas 7.14, 7.15 y 7.16 se presentan los distintos escenarios de inversión destacándose que los resultados evidencian una marcada asimetría en la viabilidad de adopción según el tamaño empresarial. Por un lado, las grandes empresas en todas las actividades económicas registran una carga relativa inferior al 10 % de sus ventas promedio, lo que sugiere que podrían absorber inversiones incluso por US\$200.000. En contraste, las micro y pequeñas empresas enfrentan restricciones significativas. Considerando un escenario de costo mínimo de US\$50.000, únicamente las pequeñas empresas del tramo 3 lograrían mantener esta relación por debajo del umbral del 10 %. Por su parte, las pequeñas empresas del tramo 2 solo podrían acceder a estas tecnologías si asumen un compromiso de inversión que represente entre el 15 % y el 20 % de sus ventas. En cualquier caso, es fundamental precisar que, si bien la inversión puede representar una proporción relativamente baja de las ventas anuales promedio del tramo, ello no permite concluir automáticamente la existencia de capacidad efectiva de pago, liquidez ni solvencia económica.

En base al caso promedio con inversión estimada de USD100.000 se calcula el porcen-

taje por actividad económica de empresas de la misma que si podrían acceder a la tecnología ($\%Empresas_{(15\%)}$), para luego normalizar la escala de resultados (EA_{i-norm}) mediante la Ecuación 6.2. Se obtiene así la Tabla 7.17.

Tabla 7.17: Porcentaje de empresas abarcables para inversión de USD 100.000 y normalización por sector

Sector económico	Empresas abarcables (%)	Valor normalizado
Minería	24,42 %	1,0000
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	16,01 %	0,5264
Servicios de vivienda e inmobiliarios	14,86 %	0,4615
Servicios financieros y empresariales	13,38 %	0,3785
Comunicaciones y servicios de información	11,29 %	0,2609
Construcción	10,75 %	0,2303
Industria manufacturera	10,20 %	0,1994
Agropecuaria-silvícola y pesca	10,08 %	0,1926
Comercio, restaurantes y hoteles	8,08 %	0,0801
Transporte	6,97 %	0,0173
Servicios personales	6,66 %	0,0000

Finalmente el valor de Abs_i Se calcula mediante la Ecuación 7.7, otorgando mayor peso ponderado a la cantidad de empresas que si pueden acceder a la inversión en comparación a la cantidad de inversión en capital fijo de la empresa promedio.

$$Abs_i = 0.75EA_{i-norm} + 0.25I_i^{emp} \quad (7.7)$$

Potencial de productividad y ahorros. Estos criterios son muy variables entre las diversas actividades económicas analizadas por la propia naturaleza de sus ciclos productivos y margen de ganancias, por tanto, su caracterización será mayormente cualitativa respecto a la cantidad y calidad de potenciales cambios positivos reportados por la literatura y entes de gran relevancia académica. Se caracterizan así para cada sector:

- Administración pública: Esta actividad económica no posee funciones que puedan ser abarcadas potencialmente y con impactos considerables por los cobots puesto que la naturaleza de la misma se centra principalmente en el manejo de archivos y documentación digital.

Debido a lo anterior, la literatura sitúa la automatización digital (RPA) como principal punto de enfoque en la búsqueda de mejora productiva centrada en eficiencia mediante uso de IA, «bots» y «machine learning» (Bonomi Savignon et al., 2024; Vollenberg et al., 2024). Finalmente, se concluye que esta actividad no posee capacidad de mejora productiva y ahorros evidenciados mediante el uso de cobots físicos, sino que, es un sector que se concentra más en la transformación digital.

- Agropecuario-silvícola: Esta actividad requiere separar primeramente dos criterios según el tipo de maquinaria a la cual está enfocado el análisis, por un lado, existe gran variedad de robots agrónomos los cuales si bien operan junto a humanos no cumplen todos los criterios de la ISO 15066 (International Organization for Standardization, 2016) para ser considerados como robots colaborativos sino que más bien calzan en la categoría de robots agrícolas omitiendo sus impactos de este apartado. Por otro lado, aquellas maquinarias que si cumplen el criterio de cobot son principalmente los brazos robóticos en actividades de paletizado, «packing», selección, clasificación y manipulación de los productos. Otras maquinarias que se no permiten caracterizarse como cobots son: ordeñadoras automáticas, comederos automáticos, rociadores inteligentes, entre otros.

Seguidamente se debe prestar atención al grado de transformación del producto puesto que el INE caracteriza de forma puntual qué actividades de manipulación pertenecen al sector agropecuario-silvícola y cuales al rubro manufacturero, se resume en la Tabla 7.18.

Tabla 7.18: Clasificación probable de actividades asociadas a poscosecha, packing y procesamiento agroindustrial

Actividad	Clasificación más probable	Razón
Limpieza, selección, clasificación, desinfección, encerado o secado al sol de frutas para venta primaria	Agropecuario-silvícola y pesca	Son actividades poscosecha, asociadas a la preparación de la cosecha para su comercialización en mercados primarios (Instituto Nacional de Estadísticas, 2014).
Packing de fruta fresca dentro del proceso poscosecha	Agropecuario-silvícola y pesca , si es preparación para mercado primario	Si el packing no transforma el producto, sino que lo prepara, clasifica mejor como actividad poscosecha. El SII también reconoce las actividades poscosecha dentro del grupo de apoyo a la agricultura y ganadería (Instituto Nacional de Estadísticas, 2014; Servicio de Impuestos Internos, 2025a).
Congelado, deshidratado artificial, enlatado, jugos, mermeladas, compotas, hortalizas cortadas o productos alimenticios elaborados	Industria manufacturera	La elaboración y conservación de frutas, legumbres y hortalizas se clasifica como actividad manufacturera, incluyendo procesos como congelación, desecación, enlatado, jugos, mermeladas y otros productos alimenticios elaborados (Instituto Nacional de Estadísticas, 2014).
Envasado y empaquetado como servicio para terceros	Servicios de apoyo a empresas , no necesariamente manufactura	Cuando el envasado o empaquetado se presta como servicio independiente para terceros, el SII lo identifica dentro de actividades de apoyo a empresas, mediante el código 829200 (Servicio de Impuestos Internos, 2025a).
Paletizado, etiquetado o embalaje dentro de una planta agroindustrial que procesa alimentos	Industria manufacturera , si la actividad principal de la planta es elaboración o conservación	El paletizado, etiquetado o embalaje sería una actividad auxiliar dentro de una unidad productiva cuya actividad principal corresponde a elaboración o conservación de alimentos (Instituto Nacional de Estadísticas, 2014).
Paletizado de fruta fresca en un packing poscosecha	Agropecuario-silvícola y pesca , si está asociado a preparación de cosecha fresca	Al no existir transformación industrial del producto, corresponde tratarlo como parte de la preparación poscosecha para comercialización primaria (Instituto Nacional de Estadísticas, 2014; Servicio de Impuestos Internos, 2025a).

Nota. Elaboración propia con base en el Clasificador Chileno de Actividades Económicas CIIU4.CL 2012 del Instituto Nacional de Estadísticas y en los códigos de actividad económica del Servicio de Impuestos Internos.

Finalmente, al intentar hallar el impacto de la cobótica en la producción y ahorros se presenta un problema en la calidad de los datos y la densidad de estos mismos puesto que las maquinarias clasificadas netamente como cobots y los estudios son reducidos. A lo anterior se le puede añadir la variabilidad y poca estandarización de los procesos de cultivo, cosecha y cuidados que requiere cada tipo de producto y animal. La literatura consultada presenta impactos positivos en acciones que podrían clasificarse como parte de la industria manufacturera más

que la agropecuaria-silvícola, tales como paletizado, embalaje y transporte. Sin embargo, al flexibilizar mínimamente el criterio de «cobot» impuesto por la ISO se puede obtener un análisis un poco más extenso, este suavizado en el criterio es útil y significativo puesto que la ISO se concentra únicamente en maquinaria industrial lo cual genera un sesgo que deja fuera la «co-robótica» agroindustrial que cumple con múltiples de los criterios ISO 15066.

Tabla 7.19: Casos documentados de productividad y ahorro operacional asociados a cobots y co-robots en actividades agropecuarias

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Cosecha asistida y transporte colaborativo de bandejas en frutillas	Eficiencia media de cosecha	Aumento cercano al 10 % en la eficiencia media de cosecha mediante co-robots de transporte de cultivo, con una relación robot-cosechador de 1:3.	Peng et al., 2022
Cosecha asistida y transporte colaborativo de bandejas en frutillas	Tiempo no productivo durante la cosecha	Reducción cercana al 60 % del tiempo medio no productivo, al disminuir traslados manuales y permitir que el trabajador dedique mayor proporción del tiempo a cosechar.	Peng et al., 2022
Cosecha asistida y transporte colaborativo de bandejas en frutillas	Eficiencia de cosecha en días específicos de evaluación	En ensayos de campo se reportaron aumentos de eficiencia de 12 y 8,8 puntos porcentuales, junto con reducciones relevantes del tiempo no productivo.	Peng et al., 2022
Pulverización colaborativa sitio-específica	Material pulverizado	Reducción de 50 % del material pulverizado mediante un sistema de pulverización colaborativa humano-robot orientado a aplicación sitio-específica.	Berenstein y Edan, 2017
Pulverización colaborativa sitio-específica	Ahorro de insumos	Disminución del uso de insumos de pulverización, lo que permite interpretar un ahorro operacional asociado a menor consumo de material aplicado.	Berenstein y Edan, 2017
Cosecha y pulverización agrícola con colaboración humano-robot	Aplicaciones agrícolas colaborativas	La revisión identifica que la colaboración humano-robot en agricultura se concentra principalmente en cosecha y pulverización, con potencial para mejorar productividad, seguridad, ergonomía y eficiencia operacional.	Adamides y Edan, 2023
Interacción humano-robot en agricultura	Productividad, eficiencia y rentabilidad	La revisión plantea que los sistemas de interacción humano-robot pueden complementar el trabajo humano y contribuir a mejoras de eficiencia, productividad, seguridad y rentabilidad en tareas agrícolas.	Vasconez et al., 2019

Continúa en la siguiente página...

Tabla 7.19: Casos documentados de productividad y ahorro operacional asociados a cobots y co-robots en actividades agropecuarias (continuación)

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Trasplante y cosecha en agricultura vertical	Factibilidad técnica de uso de cobots	Se demuestra la viabilidad técnica del uso de cobots en agricultura vertical en contenedores, particularmente en tareas de trasplante y cosecha de hojas verdes, aunque sin reportar un porcentaje directo de ahorro o productividad.	Mahalingam et al., 2024

A modo de cierre, se caracteriza que la actividad económica agro-silvícola posee mejoras considerables mediante el uso de tecnologías centradas principalmente en la generación de ahorros por disminución de tiempos ociosos y eficiencia de procesos, mas no hay suficiente información cuantitativa para dar robustez matemática.

- Comercio, restaurantes y hoteles: Esta actividad no posee la capacidad de instalar los elementos necesarios para optimizar procesos debido a la naturaleza de los mismos, esto es en cuestión, que su principal foco de valor se centra en la entrega de servicios al consumidor y la gestión de espacios reducidos como habitaciones, cocinas, bodegas menores. entre otras. La literatura sitúa como principal fuente de robótica aquellos de carácter de servicio como despachadores automáticos, limpiadores e IA, todos estos no pertenecientes a la categorización de «cobots», y a diferencia de la actividad agro-silvícola, no se puede permitir describirlos como robots colaborativos. Finalmente, no es posible reportar el impacto productivo y de ahorro de este sector.
- Comunicaciones y servicios de información: Esta actividad posee dos componentes los cuales están enfocados en servicios digitales como manejo de software, información y datos. Lo anterior, y de igual forma que en administración pública, actualmente no hay evidencia suficiente lo cual no permite incorporar la cobótica como herramienta de mejora en producción y efectividad de estos en busca de ahorros.

Tabla 7.20: Componentes de los bloques de comunicaciones y servicios de información según BCCH (Banco Central de Chile, 2022c)

Bloque	Qué incluye
Comunicaciones	Telefonía móvil, telefonía fija, larga distancia, servicios de voz y datos, servicios de red prestados a otras compañías, televisión de pago, servicios de internet, servicios intermedios de telecomunicaciones, transmisión de datos y radiocomunicaciones móviles.
Servicios de información	Actividades de edición, producción, distribución y exhibición de contenidos audiovisuales, programación y transmisión de radio y televisión, tecnologías de la información, procesamiento de datos y otras actividades de servicios de información.

- **Construcción:** Esta actividad presenta una alta relevancia en el uso de herramientas tecnológicas y robóticas, por ello es necesario esclarecer que al igual que en agro-silvícola se considerarán parte del análisis aquellos co-robots al operar de forma similar a un cobot además de cumplir con la mayor parte de las características que los definen, principalmente el uso humano-robot bajo medidas de seguridad. Dentro de esta categoría se encuentran fuentes que permiten discernir por la existencia de mejoras productivas mas no cuantificarla como tal, los cambios vienen presentados por el uso de tecnologías BIM (Building Information Modeling) y HRC (Human-robot Collaboration). Por otro lado los ahorros si son más cuantificables y presentados por disminución de tiempos de obras y ejecución, mejora de seguridad laboral y retrabajos.

Tabla 7.21: Evidencia de mejoras productivas asociadas a cobótica o colaboración humano-robot en construcción

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Modelación de colaboración humano-robot en procesos constructivos	Productividad del sistema humano-robot	La interacción proactiva entre robot y trabajador puede aumentar la productividad hasta en 22 %, dependiendo de la estrategia de suministro, la proporción humano-robot y la coordinación del proceso.	(Wu et al., 2022)
Fabricación digital colaborativa con concreto	Productividad laboral	El proceso humano-robot colaborativo alcanza una productividad laboral aproximadamente 1,8 veces mayor que el proceso convencional de hormigón moldeado. En escenarios con menor dotación humana o mayor automatización, la productividad puede aumentar hasta 2,7 veces o más de 5 veces, respectivamente.	(Sawicki et al., 2026)
Flujo BIM, gemelo digital y colaboración humano-robot	Robustez y continuidad del proceso constructivo	El sistema permite que el robot ejecute tareas guiadas por BIM y ajuste su plan ante desviaciones entre diseño y obra real, mientras el trabajador supervisa e interviene cuando es necesario. Se valida en instalación de drywall y colocación de bloques.	(Wang et al., 2024)
Perforación asistida en hormigón para instalación de colgadores	Tiempo de ejecución	En comparación con la perforación manual, el uso del robot redujo el tiempo de ejecución en 10 %.	(Brosque & Fischer, 2021)
Clasificación de colaboración humano-robot en construcción	Potencial de mejora en eficiencia y productividad	La revisión clasifica distintos niveles de colaboración humano-robot en construcción y sostiene que estos sistemas se despliegan para asistir al trabajador y mejorar seguridad, eficiencia y productividad.	(Liang et al., 2021)
Revisión bibliométrica y sistemática de HRC en Construcción 5.0	Potencial de eficiencia operacional	La revisión identifica la colaboración humano-robot como una alternativa para mejorar eficiencia, adaptabilidad y seguridad en ambientes constructivos dinámicos y no estructurados.	(Garcés, 2025)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre colaboración humano-robot, robots asistivos y flujos constructivos con intervención humana en actividades asociadas a construcción.

Tabla 7.22: Evidencia de ahorros operacionales asociados a cobótica o colaboración humano-robot en construcción

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Fabricación digital colaborativa con concreto	Tiempo de producción y esfuerzo humano	El proceso humano-robot colaborativo reduce el tiempo de producción hasta en 63 % frente al proceso manual y reporta niveles similares o menores de carga psicofisiológica en los trabajadores.	(Sawicki et al., 2026)
Fabricación digital colaborativa con concreto	Carga física del trabajador	En el proceso colaborativo, la carga transportada por los trabajadores disminuye a 44 % respecto del proceso manual convencional, lo que representa un ahorro indirecto por menor esfuerzo físico y menor exposición ergonómica.	(Sawicki et al., 2026)
Perforación asistida en hormigón para instalación de colgadores	Horas de trabajo con esfuerzo muscular	El uso del robot redujo en 98 % las horas de trabajo asociadas a esfuerzo muscular, disminuyendo la exposición del trabajador a tareas físicamente exigentes.	(Brosque & Fischer, 2021)
Perforación asistida en hormigón para instalación de colgadores	Retrabajo	El retrabajo disminuyó desde 5 % a 3 %, lo que implica un ahorro operacional indirecto por menor corrección de errores.	(Brosque & Fischer, 2021)
Flujo BIM, gemelo digital y colaboración humano-robot	Reducción de incertidumbre y errores de ejecución	El flujo colaborativo permite ajustar el plan de trabajo ante desviaciones entre diseño y construcción real, reduciendo el riesgo de interrupciones, errores y retrabajo durante la ejecución.	(Wang et al., 2024)
Revisión bibliométrica y sistemática de HRC en Construcción 5.0	Costos, eficiencia y seguridad operacional	La revisión identifica que la colaboración humano-robot tiene potencial para optimizar la relación costo-beneficio, mejorar eficiencia y aumentar seguridad en procesos constructivos, aunque advierte que aún se requiere mayor validación empírica.	(Garcés, 2025)
Revisión de clasificación HRC en construcción	Asistencia al trabajador y reducción de exposición	La literatura revisada plantea que los robots colaborativos o asistivos pueden asumir tareas repetitivas, físicamente exigentes o riesgosas, manteniendo al trabajador en funciones de supervisión, adaptación y toma de decisiones.	(Liang et al., 2021)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre colaboración humano-robot, robots asistivos y flujos constructivos con intervención humana en actividades asociadas a construcción.

- Electricidad, gas, agua y gestión de desechos: Esta actividad económica debe entenderse como la generación, transmisión y distribución eléctrica; fabricación y distribución de gas; captación, depuración, producción de agua y tratamiento de aguas residuales; además de recolección, tratamiento y reciclaje de desechos domiciliarios e industriales (Banco Central de

Chile, 2022d). Bajo esta definición se tiene que aquel sector con mayor impacto o capacidad de abarcar cobótica con beneficios esperables es la gestión de residuos y reciclaje, seguido levemente de la gestión de electricidad y gas bajo HRC en el mantenimiento de túneles y servicios del sistema físico, sin embargo este último no es cobótica pura. La literatura sugiere que existe un impacto positivo destacable en la clasificación de desechos electrónicos «e-waste» donde tanto la mejora productiva y de ahorros viene dada por aumento de precisión en la administración de residuos y mejoras de condiciones laborales.

Tabla 7.23: Evidencia de mejoras productivas asociadas a cobots o colaboración humano-robot en electricidad, gas, agua y gestión de desechos

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Clasificación colaborativa de residuos de construcción mediante realidad aumentada y HRC	Precisión de clasificación	La colaboración humano-robot mejora la precisión de clasificación en 10 % para residuos aislados y 15 % para residuos obstruidos, frente al método sin intervención humana.	(J. Chen et al., 2023)
Clasificación colaborativa de residuos reciclables con brazo robótico	Precisión del robot	La precisión media del robot aumenta desde 33,3 % con asistencia mínima, a 69 % con espaciado óptimo y 100 % con asistencia humana en agarre óptimo.	(Ramadurai & Jeong, 2022)
Reciclaje y desensamble de residuos eléctricos y electrónicos	Productividad del proceso de recuperación	El modelo de colaboración humano-robot asigna tareas según el estado del dispositivo, destinando tareas tediosas o peligrosas al robot y tareas de mayor valor al humano. Los resultados iniciales indican mejor desempeño económico que procesos manuales.	(Renteria & Alvarez-de los-Mozos, 2020)
Desensamble colaborativo de residuos electrónicos con cobot	Tiempo de ejecución	El uso del cobot aumentó el tiempo medio de ejecución desde 105,35 s a 159,05 s. Por tanto, no se observa mejora productiva directa en tiempo, sino un intercambio entre eficiencia, ergonomía y carga de trabajo.	(Y. Chen et al., 2022)
Mantenimiento de túneles de servicios con HRC	Predicción de intención humana	El modelo de predicción de intención para colaboración humano-robot alcanza 91,52 % de precisión y 91,20 % de recall, mejorando la coordinación entre trabajador y robot en tareas de mantenimiento de infraestructura.	(Su et al., 2026)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre cobots, colaboración humano-robot y sistemas asistivos aplicados principalmente a gestión de residuos, reciclaje, residuos electrónicos y mantenimiento de infraestructura.

Tabla 7.24: Evidencia de ahorros operacionales asociados a cobots o colaboración humano-robot en electricidad, gas, agua y gestión de desechos

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Clasificación colaborativa de residuos de construcción mediante realidad aumentada y HRC	Seguridad y exposición ocupacional	La colaboración humano-robot permite alejar al trabajador de la clasificación manual directa, reduciendo exposición a contaminantes, maquinaria y posturas riesgosas.	(J. Chen et al., 2023)
Clasificación colaborativa de residuos reciclables con brazo robótico	Ahorro indirecto por mayor precisión	La asistencia humana mejora la precisión del robot hasta 100 % en el escenario de agarre óptimo, lo que puede reducir errores de clasificación y reprocesos en tareas de reciclaje.	(Ramadurai & Jeong, 2022)
Reciclaje y desensamble de residuos eléctricos y electrónicos	Asignación de tareas peligrosas y repetitivas	Las tareas peligrosas y tediosas se asignan al robot, mientras que las tareas de mayor valor quedan a cargo del humano, preservando empleo y mejorando la satisfacción laboral.	(Renteria & Alvarez-de-los-Mozos, 2020)
Desensamble colaborativo de residuos electrónicos con cobot	Carga de trabajo percibida	El puntaje NASA-TLX disminuye significativamente al trabajar con el cobot, desde 165,60 a 96,75 puntos, lo que evidencia menor carga de trabajo percibida.	(Y. Chen et al., 2022)
Desensamble colaborativo de residuos electrónicos con cobot	Riesgo ergonómico	El uso del cobot reduce significativamente la flexión lumbar L5/S1 y la flexión de hombros en ambos lados, disminuyendo la carga física asociada al desensamble manual.	(Y. Chen et al., 2022)
Mantenimiento de túneles de servicios con HRC	Exposición a entornos peligrosos	La predicción de intención humana busca reducir la exposición del trabajador a ambientes confinados y peligrosos, mejorando la seguridad y eficiencia en tareas de mantenimiento de infraestructura crítica.	(Su et al., 2026)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre cobots, colaboración humano-robot y sistemas asistivos aplicados principalmente a gestión de residuos, reciclaje, residuos electrónicos y mantenimiento de infraestructura.

- **Impuestos sobre los productos:** Esta actividad está centrada en acciones no tangibles mediante sistemas digitales por lo que la implementación de cobots está fuera de la naturaleza de la misma, no permitiendo actualmente considerar la existencia de ahorros ni mejoras en la producción de esta categoría.
- **Industria manufacturera:** Esta actividad económica está fuertemente respaldada tanto por la literatura como casos prácticos estudiados en empresas que ya han adoptado diversas maquinarias para todo tipo de procesos como lo son ensamblajes, soldadura, pintura, entre

otros. Desde la investigación se ha logrado recopilar suficiente información de calidad y veracidad para concluir que sí existen beneficios claros y objetivos en producción y ahorros, ambos son dados principalmente por aumentos directos en el volumen productivo y reducción de mermas o retrabajos por mala calidad y manipulación. La cantidad de información utilizada de base se puede encontrar en las tablas anexadas Tabla 11.4 y Tabla 11.5.

- Minería: La minería se destaca por poseer maquinaria de gran tamaño y fuerza lo cual no se puede clasificar como cobots dejando fuera gran parte de los vehículos motorizados semiautónomos como camiones o perforadoras. A pesar de esto, si se flexibiliza el criterio de la ISO 15066 respecto a pertenecer a un entorno industrial, surgen algunas tecnologías de co-robótica y gestión asistida que si podrían representar ayudas productivas y generación de ahorros, es importante destacar que el principal enfoque de estas tecnologías no va centrada explícitamente a la actividad extractora sino más bien a actividades de laboratorio, limpieza y seguridad.

Tabla 7.25: Evidencia de mejoras productivas asociadas a cobótica ampliada y co-robótica en minería

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Minería colaborativa autónoma con equipos semiautónomos y supervisión humana	Eficiencia y seguridad operacional	Se propone un paradigma de minería colaborativa autónoma donde humanos y máquinas autónomas trabajan de forma coordinada para aumentar la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras.	(Ruiz-del-Solar, 2025)
Operación semiautónoma de equipos LHD en block/panel caving	Producción bajo políticas de confinamiento dinámico	Las políticas de confinamiento dinámico moderada e intensiva pueden aumentar la producción en 35 % y 45 %, respectivamente, frente a una política de confinamiento estático.	(Espinoza et al., 2022)
Carga de mineral con LHD bajo autonomía compartida	Factor de llenado del balde	El sistema de carga autónoma con asistencia humana bajo demanda alcanzó un factor promedio de llenado de 90 % en un entorno real de minería subterránea, utilizando entre tres y cuatro intentos de carga.	(Tampier et al., 2021)
Carga de mineral con LHD bajo autonomía compartida	Continuidad de operación	El sistema permite que el equipo solicite asistencia humana cuando no logra completar la carga de forma autónoma, evitando depender permanentemente de teleoperación y favoreciendo continuidad operacional.	(Ruiz-del-Solar, 2025; Tampier et al., 2021)
Teleoperación háptica de martillos de impacto en minería subterránea	Tasa de éxito y tiempo de alcance en tarea experimental 1	Con control de efector final, reconstrucción 3D y retroalimentación háptica se alcanza 100 % de éxito y un tiempo promedio de 10,70 s. Frente a la configuración con reconstrucción 3D sin háptica, el tiempo baja de 20,07 s a 10,70 s, equivalente a una reducción aproximada de 46,7 %.	(Correa et al., 2022)
Teleoperación háptica de martillos de impacto en minería subterránea	Tasa de éxito y tiempo de alcance en tarea experimental 2	Con retroalimentación háptica se alcanza 100 % de éxito y un tiempo promedio de 24,71 s. Frente a la configuración con reconstrucción 3D sin háptica, el tiempo baja de 34,45 s a 24,71 s, equivalente a una reducción aproximada de 28,3 %.	(Correa et al., 2022)
Integración de brazo robótico en máquina de soporte de techo subterránea	Factibilidad de integración operativa	El estudio demuestra la integración de un brazo robótico de seis ejes en una máquina de soporte de techo, con el objetivo de automatizar tareas humanas asociadas a fortificación subterránea.	(Kolapo et al., 2024)
Colaboración humano-máquina en el ciclo de vida minero	Eficiencia operacional	La revisión identifica que la automatización, robótica y sistemas inteligentes desplazan al operador hacia funciones remotas, de supervisión y decisión, generando oportunidades de mejora en seguridad, salud y eficiencia.	(Osei et al., 2025)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre cobótica ampliada, co-robótica, autonomía compartida, teleoperación asistida y colaboración humano-máquina en minería. No se clasifican estas tecnologías como cobots industriales estrictos bajo ISO/TS 15066, sino como sistemas cercanos a la cobótica cuando existe supervisión humana, asistencia bajo demanda, teleoperación o tareas humano-máquina.

Tabla 7.26: Evidencia de ahorros operacionales asociados a cobótica ampliada y co-robótica en minería

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Minería colaborativa autónoma con equipos semiautónomos y supervisión humana	Seguridad y eficiencia operacional	El paradigma de minería colaborativa autónoma busca integrar a los operadores en los ciclos de decisión de los equipos autónomos, reduciendo exposición directa a riesgos y mejorando la eficiencia operacional.	(Ruiz-del-Solar, 2025)
Operación semiautónoma de equipos LHD en block/panel caving	Pérdidas operacionales por interferencia	La lógica de confinamiento dinámico reduce pérdidas de tiempo asociadas a interferencias entre personas y equipos semiautónomos, convirtiendo tiempo detenido en tiempo efectivo de operación.	(Espinoza et al., 2022; Ruiz-del-Solar, 2025)
Carga de mineral con LHD bajo autonomía compartida	Dependencia de teleoperación permanente	El sistema solicita asistencia humana solo cuando la carga no puede completarse autónomamente. Esto permite reducir la dependencia de teleoperación constante, disminuir tiempos improductivos y mejorar la utilización del equipo.	(Tampier et al., 2021)
Teleoperación háptica de martillos de impacto en minería subterránea	Riesgo de colisión y operación no óptima	La teleoperación háptica usa un modelo 3D del entorno para transferir fuerzas de repulsión al operador, ayudando a evitar colisiones con infraestructura minera y reduciendo movimientos no óptimos.	(Correa et al., 2022)
Teleoperación háptica de martillos de impacto en minería subterránea	Longitud de trayectoria del efector	En la tarea experimental 1, la longitud promedio de trayectoria baja desde 1,005 m con reconstrucción 3D sin háptica a 0,633 m con retroalimentación háptica, equivalente a una reducción aproximada de 37,0%.	(Correa et al., 2022)
Teleoperación háptica de martillos de impacto en minería subterránea	Exigencia del operador	El sistema mejora la experiencia de teleoperación al compensar baja visibilidad, latencia y limitaciones de interfaces 2D, factores que normalmente exigen operadores altamente entrenados.	(Correa et al., 2022)
Integración de brazo robótico en fortificación subterránea	Exposición a riesgos operacionales	La fortificación manual de techo es intensiva en trabajo y expone a operadores a riesgos del frente subterráneo; la integración robótica busca desplazar al trabajador hacia una posición más segura de control y supervisión.	(Kolapo et al., 2024)
Colaboración humano-máquina en minería inteligente	Seguridad, salud y eficiencia	La revisión sostiene que la automatización y los sistemas inteligentes favorecen operaciones remotas con mejoras en seguridad, salud y eficiencia, aunque su adopción requiere gestionar barreras tecnológicas, organizacionales y humanas.	(Osei et al., 2025)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre cobótica ampliada, co-robótica, autonomía compartida, teleoperación asistida y colaboración humano-máquina en minería. Los ahorros se interpretan principalmente como reducción de tiempos improductivos, menor exposición a riesgos, menor dependencia de operación manual directa y mejor utilización de equipos.

- Pesca: Para esta actividad hay que especificar que solo incluye pesca extractiva, recolección/secado de algas y acuicultura hasta la fase de cosecha; además, excluye la transformación industrial de las especies cultivadas o cosechadas, porque eso pasa a Industria manufacturera (Banco Central de Chile, s.f.-c). Adicionalmente, gran parte de los usos de robots no es considerada cobótica como tal, por tanto, el análisis se realiza bajo el concepto de cobótica ampliada donde se pueden encontrar diversas fuentes que apoyan la generación de aumentos productivos y ahorros mediante la implementación de las tecnologías, mas no con el impacto de la industria. Los beneficios reportados se centran en la acuicultura por el uso eficiente de recursos, reducción de riesgos y tiempos de ejecución.

Tabla 7.27: Evidencia de mejoras productivas asociadas a co-robótica y robótica asistida en pesca y acuicultura

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Alimentación acuícola mediante bote robótico solar supervisado	Tiempo de distribución de alimento	El bote robótico distribuyó alimento en un área de 4.000 m ² en 9 minutos, frente a 32 minutos del método manual. Esto equivale a una reducción aproximada de 71,9 % en el tiempo de alimentación.	(Al-Rajhi et al., 2023)
Alimentación acuícola mediante bote robótico	Crecimiento de peces	Los peces alimentados con bote robótico presentaron una ganancia de peso 18,71 % mayor que los alimentados manualmente.	(Al-Rajhi et al., 2023)
Alimentación acuícola mediante bote robótico	Conversión alimenticia	La razón de conversión alimenticia mejoró desde 2,49 en alimentación manual a 1,51 con bote robótico, lo que indica mayor eficiencia en el uso del alimento.	(Al-Rajhi et al., 2023)
Inspección robótica de jaulas acuícolas mediante vehículo de superficie y ROV	Robustez de inspección y detección de daños	El sistema integra vehículo de superficie, estación de control, BlueROV2, visión computacional y control de trayectoria para inspección de redes y detección de agujeros en jaulas acuícolas.	(López-Barajas et al., 2024)
Inspección y limpieza robótica de redes en centros de cultivo	Eficiencia operacional y monitoreo	La revisión identifica que los robots de limpieza de redes se aplican en limpieza, inspección submarina y monitoreo de jaulas acuícolas, contribuyendo a mejorar eficiencia operacional y gestión del cultivo.	(Liu et al., 2024)
Inspección y limpieza autónoma de redes en acuicultura marina	Continuidad del mantenimiento	La revisión sobre inspección y limpieza autónoma en centros de cultivo marinos identifica a los vehículos submarinos no tripulados como tecnologías relevantes para monitorear biofouling, daños de redes y condiciones estructurales de las jaulas.	(Fu et al., 2024)
Estimación automática de biomasa de peces mediante visión estéreo y red neuronal	Error de estimación de biomasa	El sistema automático de estimación de biomasa obtuvo un error relativo medio de 2,87 %, permitiendo apoyar decisiones de crecimiento, alimentación y cosecha.	(T. Zhang et al., 2024)
Estimación de biomasa de algas cultivadas con mini-ROV y visión computacional	Relación entre imagen y biomasa	Las estimaciones mediante imágenes RGB subacuáticas capturadas con mini-ROV mostraron una relación fuerte con biomasa húmeda, con $r^2 = 0,887$ y hasta $r^2 = 0,976$ al excluir condiciones de baja visibilidad.	(Overrein et al., 2024)
Brazo robótico subacuático montado en UUV para acuicultura	Factibilidad de intervención subacuática	El sistema MURA demuestra factibilidad para retiro de mortalidades, remoción de objetos y reparación de roturas en redes, ampliando las tareas que pueden ser asistidas por robots submarinos en centros de cultivo.	(Vasileiou et al., 2023)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre co-robótica, ROV/UUV supervisados, alimentación robótica, inspección asistida, limpieza de redes y visión computacional aplicada a pesca y acuicultura. Se excluyen tareas de procesamiento industrial posterior, tales como fileteo, congelado o empaque, por corresponder principalmente a industria manufacturera según la delimitación sectorial del Banco Central de Chile.

Tabla 7.28: Evidencia de ahorros operacionales asociados a co-robótica y robótica asistida en pesca y acuicultura

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Alimentación acuícola mediante bote robótico solar supervisado	Reducción global de costos	El estudio reporta una reducción global de costos de 46,13 %, atribuida principalmente a la disminución de horas laborales asociadas a la alimentación manual.	(Al-Rajhi et al., 2023)
Alimentación acuícola mediante bote robótico	Ahorro indirecto por eficiencia alimenticia	La mejora de la conversión alimenticia desde 2,49 a 1,51 sugiere menor consumo relativo de alimento por unidad de biomasa producida, reduciendo desperdicio y costos de alimentación.	(Al-Rajhi et al., 2023)
Inspección robótica de redes en jaulas acuícolas	Reducción de exposición de buzos	La inspección de redes es una tarea diaria, costosa y riesgosa para buzos; además, puede involucrar superficies superiores a 1.500 m ² por jaula, por lo que la inspección robótica representa un área clara de reducción de riesgo y tiempo operativo.	(López-Barajas et al., 2024)
Limpieza robótica de redes en acuicultura marina	Menor dependencia de trabajo manual	La revisión indica que los métodos manuales de limpieza son ineficientes, demandan mucha mano de obra y tienen costos sustanciales; los robots de limpieza buscan reducir intervención manual, costos y riesgos operacionales.	(Liu et al., 2024)
Inspección y limpieza autónoma de redes	Reducción de riesgos productivos	La inspección y limpieza robótica ayuda a gestionar biofouling y daños en redes, factores que pueden afectar circulación de agua, oxigenación, integridad estructural, salud de peces y riesgo de escapes.	(Fu et al., 2024; Liu et al., 2024)
Brazo robótico subacuático montado en UUV para retiro de mortalidades y reparación de redes	Costos y riesgos de buceo	Si toda la tarea fuera reemplazada por el vehículo, el ahorro estimado sería de 16,27 %; si se reemplaza un tercio de la tarea, el ahorro potencial sería de 5,42 %, junto con menor riesgo sanitario y de buceo.	(Vasileiou et al., 2023)
Estimación automática de biomasa de peces mediante visión estéreo y red neuronal	Ahorro indirecto por mejor decisión productiva	La estimación automática y no invasiva de biomasa permite apoyar decisiones de alimentación, crecimiento y cosecha, reduciendo dependencia de mediciones manuales y mejorando el control del proceso productivo.	(T. Zhang et al., 2024)
Estimación de biomasa de algas cultivadas con mini-ROV y visión computacional	Escalabilidad del monitoreo	El uso de mini-ROV e imágenes subacuáticas permite monitorear biomasa en cultivo de algas de manera menos destructiva y potencialmente más escalable que el muestreo manual frecuente.	(Overrein et al., 2024)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre co-robótica, ROV/UUV supervisados, alimentación robótica, inspección asistida, limpieza de redes y visión computacional aplicada a pesca y acuicultura. Los ahorros se interpretan principalmente como reducción de horas laborales, menor consumo relativo de alimento, menor exposición de buzos, menor riesgo operacional y mejor control de biomasa.

- Servicios de vivienda e inmobiliarios: Esta actividad económica presenta dos grandes ejes, por un lado Servicios de vivienda se vincula a los servicios que prestan las viviendas, arriendos efectivos/imputados y costos asociados como reparaciones, seguros y servicios financieros; mientras que Actividades inmobiliarias incluye arriendo de inmuebles no habitacionales, corretaje, administración y tasación de bienes inmuebles. Por tanto, la robótica no impacta tanto en «generar arriendos» como producto económico, sino la operación, inspección, limpieza, mantenimiento y administración física del activo inmobiliario (Banco Central de Chile, 2022a, 2022b). Dentro de la literatura se pueden encontrar estudios y casos que permiten visualizar posibles ahorros mediante la implementación de tecnologías cobóticas ampliadas centradas en reducir el uso de recursos, optimizar tiempos y aumentar la seguridad del personal, al no contar de un ciclo productivo no es posible detectar beneficios en la cantidad de arriendos pero si se puede mejorar la calidad de revisiones en edificaciones.

Tabla 7.29: Evidencia de mejoras productivas asociadas a co-robótica y maquinaria asistida en servicios de vivienda e inmobiliarios

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Inspección colaborativa de edificios mediante BIM, realidad mixta y robot	Eficiencia y precisión de inspección	El marco de colaboración humano-robot permite que el operador visualice datos de inspección, controle robots y monitoree el proceso en tiempo real. La validación en un entorno interior de oficina muestra potencial para mejorar la eficiencia y precisión de inspecciones de edificios.	(Tandon et al., 2025)
Inspección y monitoreo con robot cuadrúpedo asistente	Organización del proceso de inspección	El robot cuadrúpedo se plantea como asistente del inspector, manteniendo una lógica de equipo humano-robot. El estudio desarrolla mapas de proceso para representar cómo pueden distribuirse tareas entre inspectores humanos y el robot.	(Halder et al., 2023)
Inspección robótica de edificios e infraestructura	Cobertura de dominios de inspección	La revisión identifica cinco dominios de aplicación para robots en inspección del entorno construido: mantenimiento post-construcción, inspección de calidad, monitoreo de avance, modelación as-built e inspección de seguridad.	(Halder & Afsari, 2023)
Inspección exterior de grietas mediante UAV/cámara y verificación humana	Precisión de detección de grietas	El sistema ABECIS mejora sus resultados cuando un operador humano elimina falsos positivos. En ensayos reportados, la verificación humana permite elevar el desempeño de detección a valores de IoU superiores a 0,8.	(Ko et al., 2022)
Robots móviles autónomos en facility management con supervisión humana	Aplicaciones operativas en edificios	La revisión PRISMA identifica aplicaciones de robots móviles en facility management, especialmente en limpieza, mantenimiento y seguridad, aunque destaca que su integración requiere adaptar procesos, espacios y funciones humanas de supervisión.	(Lim et al., 2024)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre maquinaria semiautomática, robots asistivos, inspección colaborativa, UAV con validación humana y sistemas de facility management. La tabla se enfoca en aplicaciones donde existe participación humana mediante supervisión, control, validación, inspección asistida o toma de decisiones. No se incluyen sistemas puramente autónomos ni domésticos sin intervención robótica física.

Tabla 7.30: Evidencia de ahorros operacionales asociados a co-robótica y maquinaria asistida en servicios de vivienda e inmobiliarios

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Limpieza robotizada de fachadas en edificios de altura	Reducción anual de costos de limpieza	El análisis de costo de ciclo de vida reporta una razón beneficio/costo de 1,97, una tasa de retorno de 7,19 % y una reducción anual de costos de limpieza de fachada de 49,21 %.	(Yeom et al., 2022)
Inspección colaborativa de edificios mediante BIM, realidad mixta y robot	Carga de trabajo e inspección manual	La colaboración humano-robot permite delegar tareas repetitivas o físicamente demandantes al robot, manteniendo al operador humano en funciones de control, supervisión e interpretación de la información.	(Tandon et al., 2025)
Inspección y monitoreo con robot cuadrúpedo asistente	Limitaciones del proceso convencional de inspección	El robot se propone como asistente del inspector para superar limitaciones del proceso convencional de inspección y monitoreo, manteniendo una lógica de asociación humano-tecnología.	(Halder et al., 2023)
Inspección robótica de edificios e infraestructura	Costos de ciclo de vida y visitas manuales	La revisión señala que los métodos tradicionales de inspección visual requieren visitas físicas, son demandantes en tiempo y aumentan costos durante el ciclo de vida del activo; los robots permiten apoyar inspecciones regulares del entorno construido.	(Halder & Afsari, 2023)
Inspección exterior de grietas mediante UAV/cámara y verificación humana	Seguridad y reducción de errores	La inspección manual de grietas en edificios altos es descrita como lenta, inconsistente y peligrosa. El uso de UAV/cámara junto con verificación humana mejora la detección y reduce la exposición directa del inspector.	(Ko et al., 2022)
Robots móviles autónomos en facility management con supervisión humana	Reasignación de trabajo operativo	La integración de robots móviles en facility management permite desplazar parte de las tareas repetitivas de limpieza, mantenimiento y seguridad hacia sistemas robóticos, manteniendo al personal en funciones de supervisión, coordinación y resolución de incidencias.	(Lim et al., 2024)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre maquinaria semiautomática, robots asistivos, inspección colaborativa, UAV con validación humana y sistemas de facility management. Los ahorros se interpretan principalmente como reducción de costos de limpieza, menor exposición a trabajo en altura, menor carga de inspección manual, menor tiempo de revisión y mejor control del mantenimiento físico de activos inmobiliarios.

- **Servicios financieros y empresariales:** Esta actividad está compuesta por dos grandes grupos donde las Actividades financieras comprenden intermediación financiera, seguros y auxiliares financieros, incluyendo bancos, cooperativas, leasing, factoring, securitizadoras, compañías de seguros, AFP, administradoras de fondos, corredores y otros auxiliares financieros mientras

que los Servicios empresariales incluyen actividades profesionales, científicas y técnicas, además de servicios administrativos y de apoyo (Banco Central de Chile, s.f.-a, s.f.-b). La parte financiera de la actividad presenta mayor potencial en automatización digital que en robótica física, por lo que no debe considerarse un sector prioritario para cobots industriales. Sin embargo, dentro de Servicios empresariales existen aplicaciones de cobótica ampliada y robots asistivos en limpieza de edificios, seguridad, facility management, apoyo de oficinas y atención presencial los cuales no presentan información suficiente para ser caracterizados.

- Servicios personales: Esta actividad se compone de múltiples sub actividades como Educación, Salud y actividades de asistencia social y Otros servicios personales. Educación comprende enseñanza desde pre-básica hasta superior y otros servicios educativos; Salud comprende atenciones ambulatorias, hospitalarias y asistencia social; y Otros servicios personales incluye asociaciones, actividades artísticas, entretenimiento, recreación, lavandería, peluquería, funerarias, reparación de computadores y enseres, además de servicios domésticos (Banco Central de Chile, 2022d). La literatura sugiere que Servicios personales sí presenta oportunidades para cobótica ampliada, especialmente en salud, rehabilitación, asistencia social y educación. Sin embargo, no debe tratarse como un sector homogéneo: la evidencia más sólida está en cirugía asistida, rehabilitación robótica y apoyo físico al personal de salud, mientras que educación y cuidado de personas mayores muestran potencial, pero con resultados más variables.

Tabla 7.31: Evidencia de mejoras productivas asociadas a co-robótica y robótica asistida en servicios personales

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Cirugía robótica asistida por cirujano en operaciones abdominales	Estadía hospitalaria y complicaciones	Frente a cirugía laparoscópica, la cirugía robótica se asoció con una reducción de 2,2 puntos porcentuales en complicaciones y una disminución de 0,7 días en la estadía hospitalaria. No obstante, presentó mayores costos hospitalarios.	(Ng et al., 2023)
Rehabilitación de marcha con dispositivos electromecánicos o robóticos más fisioterapia	Recuperación de marcha independiente	La revisión Cochrane reporta que los dispositivos electrónicos o robóticos combinados con fisioterapia probablemente ayudan a más personas a caminar de forma independiente después de un accidente cerebrovascular. Por cada nueve personas tratadas, una persona adicional logra caminar independientemente al final del tratamiento.	(Cochrane, 2025)
Manipulación y reposicionamiento colaborativo de pacientes	Factibilidad de asistencia física al personal de salud	El sistema robótico teleoperado permite asistir colaborativamente al personal de enfermería durante tareas de movilización de pacientes, manteniendo participación humana mediante control remoto e interacción con el entorno de cuidado.	(Brinkmann et al., 2022)
Anclaje lateral de pacientes mediante sistema robótico controlado por enfermería	Postura de trabajo durante cuidado personal	El sistema permitió anclar a un paciente en posición lateral mediante telemanipulación, siendo operable por enfermeras. La postura del trabajador mejoró en promedio 11,93 %, con una mejora máxima de 26,13 %.	(Hinrichs et al., 2023)
Logística hospitalaria interna con cobots semiautónomos	Entregas internas de medicamentos, insumos y equipos	En un hospital de 900 camas se observaron 89 entregas completas durante siete semanas. Los cobots funcionaron como transportadores semiautónomos, aunque requirieron apoyo humano frecuente en ascensores, puertas, obstáculos y descarga de contenido.	(Birkhoff et al., 2024)
Cobots hospitalarios orientados a apoyo de enfermería	Aplicaciones en tareas clínicas y logísticas	Una revisión sistemática identificó 28 artículos sobre tecnologías cobóticas para enfermería en contextos simulados o reales, incluyendo entrega de medicamentos, monitoreo de signos vitales, interacción social y apoyo logístico.	(Babalola et al., 2024)
Robots sociales en aulas reales	Factibilidad de uso en entornos educativos	Una revisión de 23 estudios de campo muestra que los robots sociales son factibles en aulas reales, aunque la evidencia no demuestra que sean más efectivos que profesores humanos u otras tecnologías educativas.	(Woo et al., 2021)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre robótica asistida, cobots hospitalarios, rehabilitación robótica, cirugía asistida, robots sociales y sistemas con participación humana en salud, asistencia social y educación. No se incluyen soluciones puramente digitales, RPA, chatbots sin cuerpo físico ni automatización administrativa sin maquinaria robótica.

Tabla 7.32: Evidencia de ahorros operacionales asociados a co-robótica y robótica asistida en servicios personales

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Cirugía robótica asistida por cirujano en operaciones abdominales	Uso de camas y eventos adversos	La menor estadía hospitalaria y la reducción de complicaciones sugieren ahorro indirecto por menor uso de recursos clínicos. Sin embargo, el costo hospitalario promedio fue mayor en cirugía robótica, por lo que no debe interpretarse como ahorro monetario automático.	(Ng et al., 2023)
Rehabilitación de marcha con dispositivos electromecánicos o robóticos más fisioterapia	Intensidad y repetición terapéutica	Los dispositivos permiten práctica repetitiva de marcha combinada con fisioterapia, lo que puede apoyar la recuperación funcional y mejorar la eficiencia terapéutica. La evidencia no entrega ahorro monetario directo.	(Cochrane, 2025)
Manipulación y reposicionamiento colaborativo de pacientes	Carga física del personal de enfermería	El uso de robótica colaborativa redujo la fuerza máxima ejercida hasta en 51 %, la flexión lateral hasta en 54 %, la torsión del tronco hasta en 87 % y la actividad muscular media de la columna hasta en 55 %.	(Brinkmann et al., 2022)
Anclaje lateral de pacientes mediante sistema robótico controlado por enfermería	Riesgo postural durante tareas de cuidado	El sistema permitió mejorar la postura del trabajador durante el lavado de espalda de un paciente en posición lateral, desplazando parte del esfuerzo físico hacia un manipulador robótico controlado por enfermería.	(Hinrichs et al., 2023)
Logística hospitalaria interna con cobots semiautónomos	Reasignación de tareas no clínicas	Los cobots permitieron transportar medicamentos, insumos y equipos, lo que podría liberar tiempo del personal clínico. No obstante, durante 89 entregas se registraron 107 intervenciones humanas, por lo que el ahorro depende de la madurez tecnológica y del entorno hospitalario.	(Birkhoff et al., 2024)
Cobots hospitalarios orientados a apoyo de enfermería	Carga de trabajo y apoyo operativo	La revisión evidencia oportunidades en tareas logísticas, monitoreo e interacción, pero señala que pocos estudios están diseñados específicamente para medir reducción de carga de trabajo de enfermería. Por ello, el ahorro debe considerarse potencial y no concluyente.	(Babalola et al., 2024)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre robótica asistida, cobots hospitalarios, rehabilitación robótica, cirugía asistida, robots sociales y sistemas con participación humana en salud, asistencia social y educación. Los ahorros se interpretan principalmente como menor uso de recursos clínicos, menor carga física, reducción de tareas no clínicas y apoyo a cuidadores o docentes, pero no necesariamente como reducción monetaria directa.

- **Transporte:** Esta actividad realmente corresponde a Transporte y almacenamiento, e incluye traslado regular y no regular de pasajeros y carga, servicios de apoyo al transporte y servicios



de almacenamiento. Por ello, las aplicaciones más defendibles no están principalmente en «mover pasajeros», sino en contextos de bodegas, centros de distribución, preparación de pedidos, terminales portuarios, carga aérea, patios logísticos y manipulación de carga (Banco Central de Chile, s.f.-d).

Tabla 7.33: Evidencia de mejoras productivas asociadas a co-robótica y cobots móviles en transporte y almacenamiento

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Picking colaborativo en bodegas retail con cobots móviles	Tiempo requerido para preparación de pedidos	En un estudio empírico con más de dos millones de visitas a ubicaciones de almacenamiento, los sistemas cobóticos redujeron el tiempo requerido para tareas de picking hasta en 33,57%.	(Koreis et al., 2025)
Picking colaborativo humano-robot con múltiples preparadores y AMR	Tardanza total de pedidos	El sistema asigna a los humanos la recuperación de ítems y a los AMR el transporte hacia el depósito. El modelo integrado de batching, secuenciación y ruteo busca minimizar la tardanza total de pedidos.	(Srinivas & Yu, 2022)
Picking colaborativo en bodega con roles humano-líder y robot-líder	Productividad y precisión del picking	El esquema en que el humano lidera al robot se asocia con mayor productividad colaborativa, mientras que el esquema en que el humano sigue al robot favorece mayor precisión.	(Pasparakis et al., 2026)
Desplazamiento asistido con cobot móvil en sistemas picker-to-parts	Umbral de eficiencia entre caminar y desplazarse sobre el cobot	En sistemas de preparación de pedidos con cobots de traslado, se identifica un umbral de 6,4 metros, a partir del cual desplazarse sobre el cobot resulta más eficiente que caminar.	(Koreis & Klumpp, 2025)
Planificación y control de AMR en intralogística	Flexibilidad y capacidad de respuesta del sistema	La revisión muestra que los AMR permiten decisiones descentralizadas de planificación, ruteo y control, facilitando la adaptación a cambios en el estado del sistema y del entorno logístico.	(Fragapane et al., 2021)
Operación remota de grúas en terminales portuarios	Coordinación operador-máquina	La teleoperación mantiene al operador humano en el ciclo de decisión mediante interfaces hombre-máquina, cámaras, sensores y sistemas de control remoto, permitiendo operar maquinaria pesada desde una sala de control.	(Sitompul, 2022a)
Grúas portuarias remotas con control semiautónomo	Continuidad de operación en terminales	El estudio en terminal de contenedores analiza operadores que trabajaban tanto con grúas manuales como con grúas remotas semiautónomas, mostrando que la automatización parcial modifica la experiencia de trabajo sin eliminar la participación humana.	(Sitompul, 2022b)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre cobots móviles, robots móviles autónomos, picking colaborativo, intralogística y operación remota de maquinaria en servicios de apoyo al transporte. Se excluyen exoesqueletos, vehículos completamente autónomos de ruta, software puro de ruteo y automatización logística sin participación humana directa.

Tabla 7.34: Evidencia de ahorros operacionales asociados a co-robótica y cobots móviles en transporte y almacenamiento

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Picking colaborativo en bodegas retail con cobots móviles	Reducción de tiempo operativo	La reducción de hasta 33,57 % en el tiempo de picking implica ahorro operacional por menor tiempo improductivo, menor desplazamiento manual y mejor utilización de la jornada del preparador.	(Koreis et al., 2025)
Picking colaborativo humano-robot con AMR	Distribución de tareas entre trabajador y robot	El sistema asigna al humano la recuperación de productos y al AMR el transporte interno, reduciendo la carga de traslado manual y permitiendo que el trabajador concentre mayor proporción del tiempo en tareas de selección.	(Srinivas & Yu, 2022)
Picking colaborativo con roles humano-líder y robot-líder	Errores y eficiencia del proceso	La configuración humano-líder puede favorecer velocidad, mientras que la configuración robot-líder puede favorecer precisión. Esto permite ajustar el sistema según si el costo dominante proviene del tiempo de preparación o de errores de picking.	(Pasparakis et al., 2026)
Desplazamiento asistido con cobot móvil en bodega	Reducción de desplazamiento ineficiente	El umbral de 6,4 metros permite definir cuándo conviene caminar y cuándo desplazarse sobre el cobot, evitando pérdidas de tiempo en recorridos largos dentro de sistemas picker-to-parts.	(Koreis & Klumpp, 2025)
Sistemas AMR en intralogística	Planificación, ruteo y control operacional	La literatura identifica que la planificación y control de AMR permite mejorar la coordinación de recursos, la flexibilidad y la capacidad de respuesta ante cambios en demanda, layout o disponibilidad de equipos.	(Azadeh et al., 2019; Fragapane et al., 2021)
Operación remota de grúas portuarias	Seguridad y exposición del operador	La operación remota desplaza al operador desde la cabina o zona de riesgo hacia una sala de control, reduciendo exposición a maquinaria pesada, condiciones exteriores y riesgos propios del entorno portuario.	(Sitompul, 2022a)
Grúas portuarias remotas con control semiautónomo	Seguridad laboral y experiencia del operador	El estudio reporta que el cambio hacia grúas remotas semiautónomas puede generar experiencias positivas asociadas a mayor seguridad y flexibilidad, aunque también introduce dificultades por dependencia de cámaras y comunicación con trabajadores en terreno.	(Sitompul, 2022b)

Nota. Elaboración propia con base en evidencia académica sobre cobots móviles, robots móviles autónomos, picking colaborativo, intralogística y operación remota de maquinaria en servicios de apoyo al transporte. Los ahorros se interpretan principalmente como reducción de tiempos de picking, menor traslado manual, menor exposición a riesgos, mayor precisión operacional y mejor utilización de equipos y trabajadores.

A modo de resumen de este apartado, se confecciona la Tabla 7.35 indicando claramente cuales son los sectores de cada actividad económica analizada que presentan impactos relevantes en

su capacidad de generación de ahorros y mejoras productivas junto a su puntuación en escala 0 a 1 en función de la Tabla 6.3.

Tabla 7.35: Síntesis sectorial del potencial productivo y de ahorro asociado a cobots, co-robots y robótica ampliada

Actividad económica Impacto esperado	Sectores o procesos que reciben mejor la robótica	Justificación, alcance e impacto económico
Industria manufacturera Producción: Muy alto (1,00) Ahorros: Muy alto (1,00)	Ensamble, inspección, control de calidad, carga y descarga de máquinas, torque, manipulación de piezas, soldadura, empaque y paletizado.	Es la actividad con mayor ajuste técnico, ya que posee tareas repetitivas, estandarizables, medibles y con interacción directa entre operario y robot. La evidencia documenta aumentos de productividad, reducción de ciclos, mejoras de calidad, reducción de riesgo ergonómico y retornos económicos en aplicaciones manufactureras (Calvo & Gil, 2022; da Silva Martin et al., 2025; Puttero et al., 2026).
Agropecuaria-silvícola Producción: Medio (0,55) Ahorros: Medio (0,55)	Poscosecha, packing primario, selección, clasificación, manipulación de productos, cosecha asistida, transporte colaborativo de bandejas y pulverización colaborativa sitio-específica.	El potencial se concentra en tareas agrícolas o poscosecha donde existe interacción humano-robot o co-robots. No deben incluirse robots agrícolas plenamente autónomos, ordeñadoras automáticas o comederos automáticos como cobots estrictos. La evidencia es positiva, pero más acotada que en manufactura (Adamides & Edan, 2023; Berenstein & Edan, 2017; Peng et al., 2022; Vasconez et al., 2019).
Pesca Producción: Medio (0,55) Ahorros: Medio (0,55)	Acuicultura, alimentación supervisada, inspección de jaulas, limpieza de redes, estimación de biomasa, monitoreo subacuático y brazos robóticos subacuáticos para retiro de mortalidades o apoyo a redes.	El ajuste se concentra en acuicultura, no en pesca extractiva tradicional ni en procesamiento industrial posterior, porque este último corresponde a manufactura. La evidencia se basa principalmente en co-robótica, ROV/UUV supervisados y robótica asistida, no en cobots industriales estrictos (Al-Rajhi et al., 2023; Fu et al., 2024; Liu et al., 2024; López-Barajas et al., 2024; Vasileiou et al., 2023).
Minería Producción: Medio (0,55) Ahorros: Medio (0,55)	Laboratorios mineros, manipulación de muestras, inspección, fortificación subterránea asistida, teleoperación háptica, autonomía compartida y equipos con asistencia humana bajo demanda.	No conviene clasificar camiones, perforadoras o LHD como cobots estrictos, porque son maquinaria pesada y normalmente requieren segregación física. El potencial aparece al flexibilizar el análisis hacia co-robótica, autonomía compartida y teleoperación asistida, especialmente en seguridad, continuidad operacional y apoyo a tareas subterráneas (Correa et al., 2022; Espinoza et al., 2022; Kolapo et al., 2024; Ruiz-del-Solar, 2025; Tampier et al., 2021).

Continúa en la siguiente página...

Tabla 7.35: Síntesis sectorial del potencial productivo y de ahorro asociado a cobots, co-robots y cobótica ampliada (continuación)

Actividad económica Impacto esperado	Sectores o procesos que reciben mejor la cobótica	Justificación, alcance e impacto económico
Construcción Producción: Medio-alto (0,75) Ahorros: Medio-alto (0,75)	Prefabricación, fabricación digital con concreto, perforación asistida, drywall, colocación de bloques, montaje modular, BIM-HRC, gemelos digitales y tareas de terminación con supervisión humana.	La evidencia es más cercana a HRC y robots asistivos que a cobots industriales puros. Aun así, el sector muestra potencial por su baja productividad histórica, alta variabilidad y exposición a riesgos. Las aplicaciones más defendibles son aquellas donde el humano supervisa, corrige o interviene en el proceso (Brosque & Fischer, 2021; Liang et al., 2021; Sawicki et al., 2026; Wang et al., 2024; Wu et al., 2022).
Transporte Producción: Medio-alto (0,75) Ahorros: Medio (0,55)	Almacenamiento, centros de distribución, preparación de pedidos, picking colaborativo con cobots móviles, AMR con intervención humana, intralogística y operación remota o semiautónoma de maquinaria en terminales.	El potencial no está en transporte de pasajeros ni vehículos autónomos de ruta, sino en almacenamiento y servicios de apoyo al transporte. Se excluyen exoesqueletos y software puro de ruteo, porque desbordan el foco cobótico. La evidencia más sólida corresponde a picking colaborativo y cobots móviles en bodegas (Fragapane et al., 2021; Koreis & Klumpp, 2025; Koreis et al., 2025; Pasparakis et al., 2026; Sitompul, 2022a, 2022b; Srinivas & Yu, 2022).
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos Producción: Medio-bajo (0,45) Ahorros: Medio (0,55)	Gestión de residuos, reciclaje, clasificación de residuos de construcción, desensamble de residuos electrónicos y mantenimiento asistido de infraestructura crítica.	El mejor ajuste está en gestión de desechos y reciclaje, no en suministro eléctrico, gasífero o sanitario como conjunto. En electricidad, gas y agua la evidencia cobótica directa es menor y se vincula más con inspección, mantenimiento y seguridad en infraestructura (J. Chen et al., 2023; Y. Chen et al., 2022; Ramadurai & Jeong, 2022; Renteria & Alvarez-de-los-Mozos, 2020; Su et al., 2026).
Servicios personales Producción: Medio (0,55) Ahorros: Medio-bajo (0,45)	Salud, rehabilitación, apoyo físico a enfermería, cirugía asistida, logística hospitalaria, cuidado de personas mayores y educación asistida por robots sociales.	El potencial es heterogéneo. La evidencia más fuerte está en salud y rehabilitación, donde existe participación de profesionales. Educación y cuidado social muestran potencial, pero con resultados más variables. No se deben incluir chatbots, RPA ni plataformas digitales sin cuerpo físico (Babalola et al., 2024; Birkhoff et al., 2024; Brinkmann et al., 2022; Cochrane, 2025; Hinrichs et al., 2023; Ng et al., 2023).

Continúa en la siguiente página...

Tabla 7.35: Síntesis sectorial del potencial productivo y de ahorro asociado a cobots, co-robots y cobótica ampliada (continuación)

Actividad económica Impacto esperado	Sectores o procesos que reciben mejor la cobótica	Justificación, alcance e impacto económico
Servicios de vivienda e inmobiliarios Producción: Muy bajo (0,10) Ahorros: Medio-bajo (0,45)	Operación física de inmuebles, inspección de edificios, limpieza de fachadas, monitoreo de instalaciones, facility management y mantenimiento asistido.	La robótica no aumenta directamente el servicio de arriendo o la intermediación inmobiliaria. Su aporte se ubica en mantenimiento, inspección, limpieza y gestión física de activos. Por ello, la producción sectorial mejora poco, pero sí pueden existir ahorros en operación y seguridad (Halder & Afsari, 2023; Halder et al., 2023; Ko et al., 2022; Lim et al., 2024; Tandon et al., 2025; Yeom et al., 2022).
Servicios financieros y empresariales Producción: Bajo (0,25) Ahorros: Bajo (0,25)	Servicios empresariales de apoyo, facility management corporativo, seguridad, limpieza, recepción, logística documental y apoyo físico en oficinas de gran escala.	La parte financiera pura genera valor mediante información, transacciones y software, por lo que su automatización relevante es RPA, IA o sistemas digitales. La cobótica física solo tiene sentido en servicios empresariales de apoyo o instalaciones corporativas con operación física recurrente.
Comercio, restaurantes y hoteles Producción: Bajo (0,25) Ahorros: Bajo (0,25)	Bodegas, inventario, logística interna, preparación estandarizada de alimentos y operaciones de apoyo en cadenas de mayor escala.	El sector es muy heterogéneo y gran parte del valor proviene del servicio al consumidor, atención presencial y gestión de espacios pequeños. Los robots de servicio, reparto o atención no califican necesariamente como cobots. La evidencia cobótica física es más defendible solo en bodegas o procesos estandarizados de back-office.
Comunicaciones y servicios de información Producción: Muy bajo (0,10) Ahorros: Muy bajo (0,10)	Mantenimiento físico de data centers, manipulación de hardware, cableado estructurado y tareas físicas auxiliares muy puntuales.	La actividad es principalmente digital, basada en datos, software, telecomunicaciones y servicios de información. La mejora productiva relevante proviene de automatización digital, IA, software y gestión de infraestructura, no de cobots físicos. La cobótica tendría un rol marginal y auxiliar.
Administración pública Producción: No aplica (0,00) Ahorros: No aplica (0,00)	No se identifican sectores físicos con adaptación relevante a cobots.	La actividad se concentra en gestión documental, procesos administrativos, atención pública, normativa y transformación digital. La literatura revisada apunta a RPA, IA y automatización de procesos, no a cobots físicos (Bonomi Savignon et al., 2024; Vollenberg et al., 2024).



Impuestos sobre los productos	No aplica.	Corresponde a una categoría contable del sistema de cuentas nacionales, no a una actividad productiva con procesos físicos propios. Por tanto, no existe base operacional para evaluar cobots, co-robots o cobótica ampliada.
Producción: No aplica (0,00)		
Ahorros: No aplica (0,00)		

Nota. Elaboración propia con base en la revisión sectorial de productividad y ahorros desarrollada en el apartado 7.1.6. La clasificación cualitativa distingue entre cobots industriales estrictos y cobótica ampliada. Los niveles asignados representan una evaluación comparativa preliminar de la justificación económica por productividad y por ahorro operacional (escala 0,00 a 1,00), no un cálculo financiero definitivo. En Transporte se excluyen exoesqueletos, vehículos autónomos de ruta y software puro de ruteo, manteniendo el análisis en cobots móviles, AMR con participación humana, picking colaborativo y operación remota o semiautónoma de maquinaria.

Cerrando este criterio de puntuación, se tiene que la «Justificación Económica» para cada sector viene dada por Tabla 7.36:

Tabla 7.36: Indicador de justificación económica por actividad económica

Actividad económica	Absorción	Producción	Ahorros	JE_i
Industria manufacturera	0,1566	1	1	0,7470
Minería	0,9430	0,55	0,55	0,6679
Construcción	0,1758	0,75	0,75	0,5778
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	0,6448	0,45	0,55	0,5434
Transporte	0,0151	0,75	0,55	0,4595
Agropecuario-silvícola	0,1481	0,55	0,55	0,4294
Pesca	0,1481	0,55	0,55	0,4294
Servicios personales	0,0008	0,55	0,45	0,3503
Servicios de vivienda e inmobiliarios	0,3463	0,1	0,45	0,2964
Servicios financieros y empresariales	0,2853	0,25	0,25	0,2606
Comercio, restaurantes y hoteles	0,0601	0,25	0,25	0,1930
Comunicaciones y servicios de información	0,2896	0,1	0,1	0,1569

Nota. Elaboración propia. Los valores de absorción, producción y ahorros corresponden a puntajes normalizados entre 0 y 1. El indicador de justificación económica JE_i fue obtenido mediante el cálculo presentado en la Ecuación 6.1. Las actividades económicas se presentan ordenadas de mayor a menor según el valor obtenido para dicho indicador.

7.1.7 Priorización de actividades económicas

A partir de los criterios normalizados y ponderados definidos en la Metodología, se obtiene la siguiente matriz de relevancia sectorial.

Con estas bases sentadas se obtiene finalmente, a través de la Ecuación 6.3 que las tres industrias más relevantes para la implementación de las tecnologías son la industria manufacturera, minería y construcción. El resultado de manufactura se explica principalmente por su nivel de transformación productiva, su alta compatibilidad técnica con aplicaciones cobóticas y la evidencia económica disponible. Si bien minería presenta una mayor participación en el PIB y las expor-

taciones, sus oportunidades de aplicación estrictamente cobótica se concentran en un conjunto más acotado de procesos. De manera similar a la manufactura, construcción destaca por la alta compatibilidad técnica de cobots y una creciente tendencia en la literatura de los mismos. Los resultados son presentados en la Tabla 7.37.

Tabla 7.37: Matriz de relevancia sectorial para la adopción de cobots en Chile

Actividad económica	PIB	Exportaciones	Empleo	Seguridad laboral	Nivel de manufactura	Compatibilidad técnica	Justificación económica	Relevancia
Industria manufacturera	0,67	0,21	0,38	0,27	1,00	1,00	0,75	0,71
Minería	1,00	1,00	0,10	0,59	0,75	0,55	0,67	0,68
Construcción	0,43	0,00	0,30	0,50	0,75	0,90	0,58	0,57
Transporte	0,40	0,00	0,24	1,00	0,75	0,75	0,46	0,56
Servicios personales	0,95	0,00	0,89	0,00	0,55	0,55	0,35	0,53
Agropecuaria-silvícola	0,19	0,15	0,21	0,62	0,90	0,75	0,43	0,51
Comercio, restaurantes y hoteles	0,74	0,00	1,00	0,14	0,45	0,55	0,19	0,47
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	0,23	0,00	0,01	0,10	0,75	0,55	0,54	0,39
Servicios financieros y empresariales	1,00	0,05	0,37	0,00	0,25	0,10	0,26	0,34
Servicios de vivienda e inmobiliarios	0,56	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,30	0,25
Comunicaciones y servicios de información	0,16	0,00	0,06	1,00	0,10	0,10	0,16	0,20
Pesca	0,00	0,11	0,21	0,62	0,00	0,00	0,43	0,17

Nota. Los valores corresponden a puntajes normalizados en una escala de 0,00 a 1,00. La relevancia sectorial representa el resultado agregado de los criterios de producto interno bruto, exportaciones, empleo, seguridad laboral, nivel de manufactura, compatibilidad técnica y justificación económica. Elaboración propia.

Es importante destacar que la escala de relevancia es meramente interpretativa y no implica que, por ejemplo, un puntaje de 0.50 en comparación a 0.25 sea doblemente mejor para la adopción de cobots. De igual forma, que dentro de las 3 actividades económicas una se encuentre por sobre la otra no es implicancia directa de que la cobótica tiene un mayor impacto neto sobre este, al incluir variables propias del país como lo es PIB, FOB, empleos y riesgos, el contexto nacional también afecta a la posición de los mismos. Se omiten las categorías de «Administración Pública» e «Impuestos sobre los productos» debido a que durante el análisis se ha encontrado evidencia suficiente para categorizarlos como no relevantes para la implementación de cobótica o

cobótica ampliada debido a su propia naturaleza, si bien poseen análisis en algunas de las secciones analizadas, estas se realizaron exclusivamente para apoyar la idea de su baja relevancia. Estas categorías han sido excluidas de los cálculos de normalización por lo que no afectan o alteran los resultados finales.

7.2 Benchmarking y lineamientos de incorporación en la actividad económica priorizada

La industria manufacturera es la principal actividad económica priorizada para incorporar robots colaborativos en Chile. Esto se explica por su peso en la economía, la cantidad de empleo que genera y, sobre todo, porque sus procesos calzan muy bien con las aplicaciones de cobótica además de ser la actividad económica con mayor respaldo en la literatura, esto se debe a que a diferencia de otras industrias revisadas en este estudio, la manufactura es el escenario natural para los cobots principalmente por la abundancia de tareas repetitivas, estaciones de trabajo que suelen estar bien organizadas y, pese a la automatización, casi siempre sigue siendo relevante la presencia de personas. Por lo anterior, existen experiencias tan variadas como ensamblaje, carga y descarga de máquinas, soldadura, atornillado, inspección, empaque, paletizado y pulido de piezas, entre otras (Y. Cohen et al., 2022; Javaid et al., 2022; Matheson et al., 2019; Montini et al., 2024).

Analizar esta actividad también tiene sentido por su papel estratégico en el desarrollo productivo del país. El Ministerio de Economía, Fomento y Turismo ha reconocido que la manufactura puede volverse un polo de innovación y empleos de mejor calidad, además de generar vínculos con otras actividades económicas (Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, 2025b). Si bien el hecho de que el sector en su conjunto sea compatible con esta tecnología no significa que todo deba automatizarse con cobots, en líneas de gran volumen, ciclos muy rápidos o cargas pesadas, un robot industrial tradicional suele rendir mejor, por otro lado, cuando una tarea cambia mucho, se repite poco o no presenta el volumen para justificar la inversión, seguir trabajando de forma manual puede ser lo más conveniente, tanto técnica como económicamente. Por eso, la idea de este análisis no es promover el uso de cobots en cualquier escenario, sino mostrar en qué condiciones su flexibilidad y su capacidad de coordinarse con las personas representan una ventaja real frente al trabajo manual o

a la automatización industrial convencional.

Delimitación de las oportunidades y niveles de evidencia. Primeramente es necesario establecer que el término «cobótica» no corresponde a cualquier forma de automatización manufacturera, se distinguen tres niveles de evidencia:

1. **Aplicaciones cobóticas documentadas:** casos en que las fuentes mencionan de forma explícita el uso de robots colaborativos o de sistemas donde personas y robots trabajan juntos.
2. **Aplicaciones potencialmente colaborativas:** tareas como el paletizado, la soldadura, la inspección o la carga de máquinas, que pueden hacerse con un cobot, pero también con un robot industrial tradicional aislado. La relevancia en la investigación depende exclusivamente del diseño completo de la aplicación.
3. **Condiciones habilitantes para Chile:** infraestructura de manufactura avanzada, programas de pilotaje, capacitación y otras iniciativas de transferencia tecnológica. Estas capacidades pueden facilitar una futura adopción de cobots, pero no son individualmente, evidencia de que ya se estén usando.

Entre las oportunidades más directamente ligadas a la cobótica manufacturera acorde a lo investigado para la estructuración de la relevancia de las actividades económicas destacan:

- ensamblaje y montaje de piezas, atornillado, fijación y aplicación de adhesivos;
- carga y descarga de máquinas; empaque, etiquetado y paletizado.
- soldadura colaborativa;
- lijado, pulido y acabado de superficies;
- inspección y control de calidad;

A lo anterior se suman procesos de fabricación flexible, lotes pequeños o cambios frecuentes de producto, donde el cobot también puede servir de apoyo en tareas de mantenimiento y verificación.

Se debe destacar que ninguna de estas tareas es colaborativa por definición: el paletizado, la soldadura o la carga de una máquina puede resolverse con un cobot cerca de los trabajadores disponiéndolo con una celda parcialmente protegida o con un robot industrial completamente aislado, lo que define cada caso es el tipo de interacción, los riesgos evaluados y cómo se armó el sistema completo. A su vez, no basta con comprar un equipo que el fabricante llame «cobot» para asegurar que la aplicación sea colaborativa, la implementación será lo que defina aquello. Adicionalmente, la herramienta instalada, piezas manipuladas, la velocidad de trabajo o el diseño de la estación pueden obligar a instalar resguardos físicos e impedir que una persona esté cerca mientras el robot se mueve.

Por todo lo anterior, antes de elegir una tecnología conviene comparar al menos tres alternativas: la operación completamente manual, el uso de robot colaborativo y el robot industrial convencional. La Tabla 7.38 resume algunos criterios generales para hacer esa comparación.

Tabla 7.38: Criterios para seleccionar entre operación manual, robot colaborativo y robot industrial convencional

Criterio	Operación manual	Robot colaborativo	Robot industrial convencional
Volumen de producción	Bajo o variable.	Bajo, medio o variable.	Alto y sostenido.
Variedad de productos	Muy alta.	Media o alta, con cambios frecuentes.	Baja o estable.
Velocidad requerida	Depende de la capacidad del trabajador.	Moderada, y condicionada por la seguridad de la aplicación.	Alta.

Continúa en la página siguiente.

Tabla 7.38: Criterios orientativos para seleccionar entre operación manual, robot colaborativo y robot industrial convencional (continuación)

Criterio	Operación manual	Robot colaborativo	Robot industrial convencional
Carga útil	Limitada por la fuerza y la ergonomía de la persona.	Generalmente baja o moderada.	Moderada o alta.
Participación humana	Necesaria durante todo el proceso.	Necesaria para abastecer, supervisar o resolver imprevistos.	Reducida o innecesaria durante el ciclo automático.
Frecuencia de cambios	Muy flexible, aunque depende de la experiencia del trabajador.	Muy flexible: se puede reprogramar o reasignar con facilidad.	Cambia con menos frecuencia y suele ser más complejo de modificar.
Espacio disponible	Estación convencional.	Puede instalarse en espacios más reducidos, aunque a veces necesita protecciones.	Suele necesitar una celda más grande y separada del resto.
Riesgo de la herramienta	La persona lo asume directamente.	Debe ser seguro trabajar cerca de ella, o llevar protecciones extra.	Se puede aislar por completo dentro de una celda.

Justificación principal	Alta variabilidad, baja Flexibilidad, ergono- Velocidad, volumen, repetición o inversión mía, cooperación y precisión y continuidad no justificable. fabricación de varias de producción masiva. referencias.
-------------------------	---

Nota. Elaboración propia a partir de Matheson et al. (2019), Cohen et al. (2022) y Montini et al. (2024).

La decisión final siempre depende de las características y los riesgos de cada aplicación en particular.

Benchmarking internacional de aplicaciones manufactureras. En manufactura existe mucha evidencia académica y empresarial, los casos revisados cubren ensamblaje, soldadura, carga de máquinas, control de calidad, manejo de materiales, acabado de superficies, paletizado y procesamiento de alimentos. Los casos de la Tabla 7.39 corresponden a aplicaciones que las propias fuentes describen explícitamente como cobots o como sistemas donde personas y robots colaboran. Aun así, estos resultados no deben tomarse como cifras universales: el desempeño real depende del volumen de producción, el uso efectivo del equipo, el costo laboral, la complejidad de la integración, las herramientas empleadas y la estabilidad del proceso, por tanto, este benchmarking sirve para reconocer patrones y condiciones de adopción.

Tabla 7.39: Benchmarking internacional de aplicaciones de cobots en la industria manufacturera

Caso y aplicación	Modalidad de colaboración	Resultado o aprendizaje documentado	Posible aplicación para Chile
Componentes plásticos automotrices. Carga y descarga de una estación de soldadura con un robot UR5e.	El trabajador abastece los materiales y revisa la calidad, mientras el cobot repite el ciclo de carga y descarga.	La inversión total fue de cerca de EUR 45.000, con una baja inversión en el tiempo que el operador dedicaba a la tarea. Que sea rentable depende del volumen de producción anual (Polonara et al., 2024).	Puede servir en plantas chilenas de plástico, envases y metalme-cánica con estaciones estables y volumen suficiente, revisando qué tareas de abastecimiento e inspección seguirían siendo manuales.
Cobot como recurso flexible compar-tido. Ensamblaje y prueba de componentes electrónicos con un ABB YuMi.	El mismo cobot se puede mover entre distintos procesos, y configurarlo no requiere ser un especialista.	La inversión fue de unos EUR 50.000, con un ahorro estimado de 656 horas de trabajo al año y un retorno cercano a 2,5 años (Giberti et al., 2022).	Útil para empresas con lotes variables o varias líneas que no justifican un robot dedicado a una sola tarea, siempre que se estandaricen las herramientas y la programación.
Evaluación del costo total de una celda con dos cobots.	Sistema colaborativo con herramientas, soportes, dispositivos de seguridad, programación y personal técnico.	El análisis muestra que el precio del brazo robótico es solo una parte de la inversión total: también hay que sumar ingeniería, integración, capacitación y seguridad (Tîtu et al., 2024).	Sirve para que las empresas chilenas no presupuesten solo el robot, sino el costo completo de la solución.

Continúa en la página siguiente.

Tabla 7.39: Benchmarking internacional de aplicaciones de cobots en la industria manufacturera (continuación)

Caso y aplicación	Modalidad de colaboración	Resultado o aprendizaje documentado	Posible aplicación para Chile
Arneses eléctricos. Aplicación de cinta sobre mazos de cables.	El trabajador prepara o posiciona los cables y el robot ejecuta los movimientos repetitivos.	El caso muestra que sí es posible usar cobots en procesos manuales intensivos con materiales flexibles, aunque manipular cables sigue siendo complejo (Román Ibáñez et al., 2021).	Puede evaluarse en ensamblaje eléctrico, tableros y cableado, aunque requiere visión, control de fuerza y herramientas especializadas.
Ensamblaje de tuercas en cubos de rueda.	El cobot hace el montaje repetitivo, mientras la persona se encarga de preparar y supervisar.	El caso documenta cómo se integró un cobot en una estación de ensamblaje automatizada, coordinado con el resto de la línea (Salunkhe et al., 2019).	Puede aplicarse en fabricación de componentes metálicos, reparación de subconjuntos y montaje de equipos, siempre que las piezas estén bien estandarizadas.
Manipulación colaborativa de materiales compuestos.	Se combina la adaptabilidad de la persona con la precisión del robot al posicionar y dar forma al material.	El caso muestra que trabajar en conjunto puede reducir los tiempos de proceso y la carga física en materiales que requieren manipulación coordinada (Terreran et al., 2026).	Aplicable en manufactura de mayor valor agregado, aunque en Chile depende de contar con diseño especializado, control de fuerza y visión artificial.
Conversión de una operación manual en ensamblaje colaborativo.	Se reparten las actividades entre operador y robot pensando a la vez en productividad y ergonomía.	El estudio muestra que una celda no debería evaluarse solo por el tiempo de ciclo, sino también por la postura y la carga física del trabajador (Y. J. Zhang et al., 2021).	Sirve como guía para elegir tareas en empresas chilenas, evitando automatizar un movimiento aislado sin mirar el equilibrio de carga de todo el sistema.

Continúa en la página siguiente.

Tabla 7.39: Benchmarking internacional de aplicaciones de cobots en la industria manufacturera (continuación)

Caso y aplicación	Modalidad de colaboración	Resultado o aprendizaje documentado	Posible aplicación para Chile
Introducción de un cobot en una empresa manufacturera.	El cobot asume los movimientos repetitivos dentro de una estación compartida.	El estudio analiza en conjunto la baja de riesgos laborales y el aumento de eficiencia, mostrando que ambos beneficios pueden medirse de forma integral (Realyvásquez-Vargas et al., 2019).	Pertinente para empresas con manipulación repetitiva o posturas forzadas, siempre que se le ante una línea base productiva y ergonómica.
Control de calidad e inspección.	El robot posiciona cámaras o sensores, mientras el trabajador supervisa, valida resultados o resuelve excepciones.	La literatura muestra un aumento del uso de cobots en inspección visual y de medición, gracias a su repetibilidad y a su integración con visión artificial (International Federation of Robotics, s.f.-b; Puttero et al., 2026).	Tiene potencial en alimentos, plásticos, madera y piezas metálicas, siempre que se definan bien los defectos a buscar, la iluminación y las tasas de error aceptables.
Producción de alimentos.	Cooperación entre personas y robots en tareas de manipulación, preparación, abastecimiento y empaque.	Los estudios muestran que es técnica y ergonómicamente viable, y destacan la importancia de diseñar junto a los propios operadores cómo se reparten las tareas (Accorsi et al., 2019; Ronzoni et al., 2021).	Relevante para la industria chilena de alimentos, sobre todo en manipulación secundaria, clasificación y empaque, cuidando la inocuidad, la sanitización y los materiales aptos para contacto alimentario.

Continúa en la página siguiente.

Tabla 7.39: Benchmarking internacional de aplicaciones de cobots en la industria manufacturera (continuación)

Caso y aplicación	Modalidad de colaboración	Resultado o aprendizaje documentado	Posible aplicación para Chile
Soldadura y carga de máquinas.	El operador prepara, programa o supervisa, mientras el cobot repite las trayectorias de trabajo.	Estos casos empresariales reportan tan aumentos relevantes de producción, aunque bajo las condiciones particulares de cada planta (International Federation of Robotics, 2024b, 2024c).	Tiene alta pertinencia para la metalmeccánica chilena, aunque las cifras reportadas no deben extrapolarse sin más: hay que revisar la fijación de piezas, la repetibilidad y la seguridad de cada caso.
Lijado y pulido.	El trabajador prepara e inspecciona, mientras el cobot mantiene la trayectoria y la fuerza de contacto.	Los casos muestran mejoras en la capacidad productiva y menor carga física en tareas repetitivas de acabado (FANUC, s.f.; Universal Robots, s.f.).	Aplicable en madera, muebles y piezas metálicas, cuidando el polvo, la extracción de aire y el desgaste de las herramientas.
Paletizado y manipulación final.	El cobot levanta y aplica, mientras los trabajadores abastecen, supervisan o cambian el formato.	Los casos muestran que el paletizado con cobots puede reducir el esfuerzo físico y usar menos espacio que algunas celdas convencionales (International Federation of Robotics, 2024d).	Aplicable en alimentos, bebidas, químicos, plásticos y otros bienes de consumo, revisando siempre la altura, el peso y la estabilidad de la carga.

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas. Estos resultados corresponden a casos puntuales y no garantizan lo mismo en otra planta. Los casos de empresas se basan en información entregada por ellas mismas y no corresponden a evaluaciones independientes.

Interpretación comparada de los casos. Se destacan tendencias útiles desde la Tabla 7.39: **Compatibilidad técnica y estandarización.** Las aplicaciones más maduras corresponden a tareas donde las piezas, herramientas y secuencias tienen una variabilidad manejable y estandariza-

ble, esto se presenta en actividades como en carga y descarga de máquinas, soldadura, atornillado paletizado e inspecciones, todas estas suelen tener posiciones y recorridos bastante definidos. Se debe destacar que la existencia de variabilidad no impide usar cobots puesto que su flexibilidad es una de sus mayores ventajas frente a la automatización rígida convencional. Lo verdaderamente relevante es que esa variabilidad se pueda detectar y manejar a tiempo con herramientas como visión artificial, sensores, cambios de herramienta, programación o directamente intervención humana.

En cambio, cuando el proceso depende todo el tiempo de decisiones difíciles de formalizar, de materiales que se deforman o de una manipulación muy delicada, integrar un cobot puede requerir bastante más desarrollo técnico (Cherubini et al., 2016; Y. Cohen et al., 2022; Montini et al., 2024).

Productividad y continuidad operacional. Los casos revisados muestran que los cobots pueden reducir tiempos de intervención, aumentar el uso de las máquinas y mantener una ejecución estable en tareas repetitivas. Sin embargo, la mejora en productividad no depende solo de qué tan rápido se mueva el brazo robótico sino que el beneficio suele venir de otros factores: menos tiempo ocioso de la máquina, menos movimientos innecesarios del trabajador, trayectorias más repetibles, menos interrupciones por fatiga, la posibilidad de que el operador haga otra cosa en paralelo, o el uso de un mismo cobot en distintas líneas o estaciones, un cobot puede moverse más lento que un robot industrial o que un trabajador experimentado y aun así mejorar el resultado global, simplemente porque libera a la persona para otra tarea o porque reduce los tiempos muertos del proceso. Esto es una de las mayores ventajas respecto de operar procesos completamente con mano de obra humana al poder requerir menor cantidad de personal paraa operar mayor cantidad de horas sin incumplir leyes laborales.

Para que los beneficios mencionados sean efectivamente realizados es necesario establecer planes de contingencia y mantenciones asegurando así que no existiran tiempos ociosos debido al mal funcionamiento de las maquinarias.

Calidad y repetibilidad. La inspección y el control de calidad son aplicaciones cada vez más frecuentes puesto que los cobots pueden posicionar cámaras, sensores o instrumentos de forma repetible, lo que reduce la variabilidad que se produce cuando esa medición se hace a mano (Puttero

et al., 2026). El uso de sensores varios que pueden ir desde infrarrojos, cámaras convencionales, detectores de voltaje, entre otros, permite aumentar la confiabilidad de la revisión reduciendo los falsos negativos evitando así retrabajos o la detección temprana de fallas importantes. Se establece además que estos sensores no sufren fatiga a lo largo de las jornadas laborales como si podrían presentar la mano de obra humana y muchas veces poseen las capacidades de detectar elementos imperceptibles al humano promedio. Otro factor relevante que permite contrastar al cobot frente al robot industrial, es su capacidad de poseer mayor delicadeza al interactuar con los productos o elementos asignados, permitiendo manipulaciones seguras sin arriesgar calidad del producto ni cumplimiento de las tareas.

Sin embargo, automatizar la inspección no garantiza por sí solo una mejor calidad. Puesto que, al requerir programar la maquinaria se debe tener claro qué defectos se busca detectar, con qué precisión, bajo qué condiciones de luz, qué tolerancias se van a aceptar y qué se hace con las piezas rechazadas o con los casos que igual requieren revisión humana. Lo anterior corresponde a un problema netamente técnico donde el resultado está fuertemente influenciado por la capacidad del HMI y el uso efectivo de las herramientas disponibles. En Chile, esta aplicación puede ser especialmente útil para productos que exigen consistencia o cumplimiento de normas de exportación, como alimentos, envases, madera y piezas metálicas.

Ergonomía y seguridad laboral. La robótica puede reducir la exposición a levantamientos repetitivos, posturas forzadas, vibraciones y movimientos de alta frecuencia, para que esto funcione, hay que pensar en toda la distribución de tareas de la estación, puesto que si no se rediseña bien el ambiente de trabajo, automatizar una operación puede simplemente trasladar la carga física hacia otra sección como el abastecimiento o la corrección de fallas, generando nuevos riesgos en otro punto del proceso (Dimitrokalli et al., 2020; Realyv'asquez-Vargas et al., 2019; Y. J. Zhang et al., 2021). Tampoco la seguridad depende solo de que el robot limite su fuerza: una herramienta caliente, cortante o punzante puede convertir una aplicación en principio colaborativa en una que necesita resguardos especiales, como suele ocurrir en soldadura, corte, lijado, pulido o manejo de piezas con bordes filosos.

Desempeño económico. Los casos revisados muestran inversiones que, para celdas manufactureras simples, rondan entre EUR 45.000 y EUR 100.000. Esta cifra no debe tomarse como un precio de mercado general ni aplicarse sin más a cualquier proceso ya que la conveniencia económica depende de varios factores en conjunto: el volumen anual de producción, cuánto se usa realmente el equipo, la cantidad de turnos, el costo de integrarlo, el ahorro de tiempo logrado, la reducción de errores, el mantenimiento y la posibilidad de reasignarlo a otra tarea más adelante. En el caso chileno, donde muchas empresas manufactureras producen lotes variables sin volumen suficiente para dedicar un robot a una sola tarea, la posibilidad de mover el cobot entre estaciones puede ser especialmente relevante.

Organización, aceptación y competencias. Incorporar un cobot cambia la forma de trabajar, aunque no se reduzca personal, sino por el hecho de que los operadores deben aprender a abastecerlo, supervisarlos, programar tareas básicas y resolver fallas simples. Los mantenedores, por su parte, deben familiarizarse con sensores, software y dispositivos de seguridad. Distintos estudios muestran que cuando los propios trabajadores participan desde el diseño del sistema, es más fácil detectar excepciones, problemas ergonómicos y conocimientos prácticos que normalmente no aparecen en los procedimientos formales (da Silva Martin et al., 2025; Montini et al., 2024; Pietrantoni et al., 2024).

Extrapolación a la industria manufacturera chilena. Para trasladar los casos internacionales a la realidad chilena conviene mirar tres cosas: si existen aplicaciones cobóticas ya documentadas en el mundo, si en Chile hay procesos productivos parecidos y si el país cuenta con condiciones que faciliten evaluar, adaptar y probar esa tecnología. La industria manufacturera chilena reúne actividades bastante distintas entre sí, como alimentos, bebidas, productos químicos, caucho, plástico, madera, celulosa, papel, minerales no metálicos, metalmecánica, maquinaria y equipos (Banco Central de Chile, 2022e).

La política productiva más reciente a la fecha de confección (2025) también aporta antecedentes útiles. El documento «Futuro de la manufactura en Chile» identifica desafíos relacionados con la sofisticación, la diversificación y la productividad del sector, además de instrumentos de apoyo a la industria (Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, 2025b). La Tabla 7.40 presenta

aplicaciones que podrían transferirse a distintos subsectores sin asumir que todas las empresas posean la misma factibilidad.

Tabla 7.40: Aplicaciones potenciales de cobots por subsector manufacturero chileno

Subsector	Aplicaciones potenciales	Justificación para Chile	Condiciones o restricciones
Alimentos, bebidas y tabaco	Clasificación, manipulación secundaria, empaque, etiquetado, inspección y paletizado.	Es uno de los principales rubros manufactureros del país, con procesos repetitivos y volúmenes importantes.	Inocuidad, sanitización, humedad y velocidad de línea.
Productos metálicos, maquinaria y equipos	Soldadura, carga de máquinas CNC, atornillado, ensamblaje, inspección y pulido.	Tiene alta correspondencia con las aplicaciones internacionales y puede beneficiar a proveedores de minería, construcción y transporte.	Variabilidad de piezas, fijación, chispas y peso de los componentes.
Química, caucho y plástico	Carga y descarga de máquinas, manipulación, inspección, soldadura de plásticos y paletizado.	Las plantas de envases y plásticos suelen tener estaciones repetitivas y productos bastante estandarizados.	Compatibilidad química, temperatura, vapores y seguridad del proceso.
Madera y muebles	Lijado, pulido, aplicación de adhesivos, ensamblaje, inspección y paletizado.	Existe una base productiva y exportadora con tareas manuales repetitivas y exposición a polvo y posturas forzadas.	Polvo combustible, extracción de aire y variabilidad natural de la madera.
Celulosa, papel e imprentas	Manipulación, alimentación de equipos, inspección, empaque y paletizado.	Tiene procesos estructurados, volúmenes importantes y productos bastante homogéneos.	En líneas de alta velocidad puede convenir más un robot convencional.

Continúa en la página siguiente.

Tabla 7.40: Aplicaciones potenciales de cobots por subsector manufacturero chileno (continuación)

Subsector	Aplicaciones potenciales	Justificación para Chile	Condiciones o restricciones
Minerales no metálicos y metálica básica	Carga de máquinas, inspección, manipulación, pulido y apoyo en laboratorio.	Existen tareas repetitivas y físicamente exigentes con productos de peso o superficie variable.	Altas temperaturas, polvo y piezas pesadas pueden superar la capacidad de un cobot convencional.
Textil, vestuario, cuero y calzado	Inspección, etiquetado, manipulación de componentes rígidos y carga de máquinas.	Puede apoyar operaciones puntuales de bajo volumen o alta variabilidad.	Las telas y materiales flexibles son difíciles de manipular y requieren visión y herramientas especiales.

Nota. Elaboración propia a partir de la estructura manufacturera chilena y el benchmarking internacional revisado en esta investigación. Estas tareas son potencialmente cobóticas: si terminan siéndolo depende del diseño de la celda, la participación humana y los riesgos evaluados en cada caso.

A partir de esta comparación, las oportunidades iniciales más defendibles para Chile se concentran en los siguientes grupos.

- **Alta prioridad: metalmecánica, maquinaria y equipos.** Este grupo tiene una alta correspondencia con los casos internacionales de soldadura, carga de máquinas, ensamblaje, atornillado e inspección, y además puede generar encadenamientos con minería, construcción, energía y transporte. Una estrategia inicial podría enfocarse en talleres y plantas que tengan máquinas CNC con tiempos ociosos, soldaduras repetitivas de piezas pequeñas o medianas, ensamblajes con varias referencias, o procesos suficientemente estables como para sostener un piloto.
- **Alta prioridad: alimentos, bebidas y manufactura agroindustrial.** Este grupo combina relevancia económica y exportadora con aplicaciones ya maduras de manipulación, empaque, inspección y paletizado. Las primeras implementaciones deberían concentrarse en etapas donde el producto ya está envasado o protegido.

Las tareas con contacto directo con el alimento exigen equipos y herramientas compatibles con la limpieza y sanitización dificultando la implementación al requerir de nuevas variables. En líneas muy rápidas también hay que evaluar si un cobot da el ritmo necesario, o si conviene más una celda industrial tradicional.

- **Prioridad media-alta: plástico, caucho, madera y muebles.** Estos subsectores presentan tareas repetitivas de carga de máquinas, inspección, acabado y manipulación, la oportunidad principal está en empresas que producen lotes variables y necesitan reprogramar seguido sus equipos. En cuanto a madera hay que cuidar el polvo combustible y la extracción de aire para asegurar la correcta operación de sensores y reducir el desgaste o fallas de articulaciones. En plásticos y productos químicos hay que revisar la compatibilidad de materiales, la temperatura y la presencia de vapores o sustancias peligrosas.

Capacidades nacionales de las tecnologías.

Antecedentes directamente relacionados con robótica. En el ámbito de la formación técnica, INACAP documentó la incorporación de 21 robots colaborativos y la capacitación de sus docentes en robótica avanzada. Esto muestra que existe equipamiento y competencias en desarrollo, aunque todavía no corresponde a una implementación productiva industrial (INACAP, 2024).

Otro antecedente relevante es el Centro Tecnológico de Manufactura Avanzada e Industria 4.0 del Biobío, que contempla infraestructura en manufactura aditiva, mecanizado de precisión, sensores, robótica colaborativa, sistemas inteligentes y transformación digital (Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, 2025a; Universidad de Concepción, 2025). El proyecto considera una inversión cercana a los CLP 15.000 millones, de los cuales cerca de CLP 8.630 millones son aporte de Corfo, y operará en el Hub de Innovación Industrial de Huachipato, con alrededor de 2.500 m² destinados a pilotaje y escalamiento (Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, 2025a; Universidad de Concepción, 2025). Este antecedente todavía no demuestra una adopción industrial generalizada, pero sí representa una infraestructura pensada específicamente para probar e integrar soluciones de robótica colaborativa más adelante.

Condiciones habilitantes de manufactura avanzada. El documento «Futuro de la manufactura en Chile» describe instrumentos orientados a fortalecer infraestructura, capital humano, asesorías, pruebas piloto e integración de soluciones para empresas manufactureras (Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, 2025b). Aunque su alcance es más amplio que la cobótica, estas medidas también pueden reducir barreras que afectan su adopción, como la falta de espacios para experimentar o de personal especializado. Adicionalmente, el Centro para la Industria 4.0 de la Universidad de Concepción, con más de ocho años de trayectoria, desarrolla proyectos de automatización, digitalización, visión computacional y capacitación junto a empresas (Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, 2026).

En conjunto, todos estos antecedentes nacionales permiten visualizar tres cosas:

- Existe disponibilidad de robots colaborativos en el ámbito formativo
- Hay infraestructura proyectada para probar estas tecnologías
- Se presenta experiencia institucional en transferencia tecnológica hacia empresas y pymes, con especial cuidado en estas últimas debido a los tamaños de inversión.

Condiciones habilitantes y barreras de adopción.

Selección y estabilidad del proceso.. Una empresa debe elegir el proceso a adaptar por la forma en que este combina repetitividad, volumen, ergonomía y factibilidad técnica. Antes de comprar un cobot conviene levantar información básica, iniciando con el tiempo de ciclo y el volumen anual, siguiendo con la cantidad de referencias, los errores y retrabajos, los tiempos ociosos, e información más técnica como el peso de las piezas, insumos o productos y qué tanto depende el proceso del conocimiento del operador.

Integración y herramientas periféricas.. La aplicación de ciertas maquinarias requiere inversión en periféricos o herramientas como pinzas o ventosas, piezas adaptadas a actividades de soldadura o atornillado, visión artificial, sensores de fuerza, fijaciones, dispositivos de seguridad y software que lo conecte con el resto de la línea de producción. La carencia de estas piezas

adicionales, un brazo preciso y con buena capacidad de carga puede terminar siendo poco confiable, replicable y eficiente en la práctica.

Seguridad de la aplicación completa. La implementación debe evaluarse según la norma ISO 10218 y, cuando corresponda, la ISO/TS 15066 (International Organization for Standardization, 2016, 2025). No todas las aplicaciones pueden operar todo el tiempo cerca de los trabajadores, algunas de estas como la soldadura puede exigir protección frente a radiación, gases y calor; el lijado, extracción de polvo, el mecanizado, sugiere resguardos frente a herramientas cortantes y proyección de virutas. En estos casos el cobot puede seguir siendo útil por su flexibilidad, aunque trabaje dentro de una celda parcial o totalmente cerrada ya que usar un cobot dentro de una celda cerrada no lo convierte automáticamente en una aplicación colaborativa en el sentido estricto.

Capacidad económica y utilización.. La inversión debe evaluarse en función del uso real que se le dará al equipo: una celda que se ve muy atractiva funcionando a dos turnos puede no ser rentable si en la práctica se usa pocas horas a la semana. La evaluación debería considerar, entre otros elementos, el robot y su controlador, la ingeniería de integración, las herramientas y sensores, la capacitación, el mantenimiento, la pérdida de producción durante la puesta en marcha y la posibilidad de reasignar el equipo más adelante.

Datos, conectividad y ciberseguridad.. Cuando el cobot se conecta con sistemas de visión, máquinas CNC u otras plataformas, aumenta también la dependencia de las comunicaciones y los datos, por ello la empresa debe definir quién tiene acceso a qué, cómo se respaldan los programas, cómo se actualiza el software y cómo se recupera el sistema ante una falla, sobre todo si esa conexión puede modificar parámetros de equipos productivos. Esto sugiere que la inversión puede ser ajena al proceso productivo como tal donde la dificultad radica directamente en la capacidad de seguridad y conexión interna previa de la empresa.

Lineamientos de incorporación gradual. La madurez de la cobótica manufacturera permite proponer una ruta de incorporación relativamente estructurada, aunque el escalamiento siempre debe depender de los resultados técnicos, productivos, ergonómicos y económicos obtenidos en condiciones reales. La Tabla 7.41 presenta una ruta de ejecución preliminar, estándar y simple de

aplicar a empresas manufactureras.

Tabla 7.41: Hoja de ruta propuesta para la incorporación gradual de cobots en la industria manufacturera chilena

Etapas	Propósito	Acciones y condiciones requeridas	Criterio para avanzar
1. Diagnóstico de tareas	Detectar oportunidades de mejora en productividad, calidad, ergonomía o continuidad.	Medir tiempos, volúmenes, defectos, posturas y niveles de uso del equipo actual. Comparar el trabajo manual, el cobot y el robot convencional.	Que exista una tarea estable, medible y con un problema claro.
2. Prueba conceptual	Comprobar que la pieza y la tarea se pueden robotizar.	Usar simulación, laboratorio o un integrador externo para revisar el agarre, la visión, la precisión y la seguridad básica.	Que se demuestre técnicamente que el sistema puede hacer la tarea con la calidad necesaria.
3. Factibilidad técnica y económica	Diseñar la solución en detalle y estimar su costo total.	Definir herramientas, sensores, seguridad, programación e integración, y estimar distintos escenarios de uso.	Que la factibilidad técnica esté demostrada y el costo sea coherente con el volumen de la empresa.
4. Piloto productivo	Validar la solución en una tarea acotada.	Montar una estación piloto, capacitar a los operadores y medir productividad, calidad, ergonomía y seguridad frente a una línea base.	Que exista una mejora comprobable, sin bajar la calidad ni generar riesgos nuevos.
5. Estabilización	Consolidar la operación y corregir fallas iniciales.	Estandarizar procedimientos de cambio de formato, mantenimiento y manejo de alarmas.	Un desempeño estable durante un período representativo.

-
6. **Repl-** Extender la solución a Evaluar si el equipo se puede mover, Que el caso económico sea favo-
cación y otras líneas, productos o reutilizar programas y formar perso- rable y que exista capacidad real
escalamiento plantas. nal interno. de soporte.
-

Nota. Elaboración propia. Las etapas siguen un orden lógico, pero pueden adaptarse al tamaño y las capacidades de cada empresa.

A partir de esta hoja de ruta se proponen los siguientes lineamientos:

1. **Elegir tareas y no tecnologías.** Conviene partir identificando un problema productivo, ergonómico o de calidad, y solo después decidir si un cobot es la mejor solución frente a otras alternativas.
2. **Priorizar aplicaciones manufactureras ya maduras,** como la carga de máquinas, el paletizado, el ensamblaje, la soldadura repetitiva y la inspección, donde ya existe más evidencia, herramientas e integradores disponibles.
3. **Verificar que la colaboración sea realmente necesaria.** Si la persona no necesita estar cerca del robot mientras trabaja, probablemente una celda convencional segregada sea más apropiada.
4. **Partir con una estación acotada y medible,** con una línea base clara y bajo impacto sobre el resto de la planta si algo llega a fallar. Se sugiere utilizar los pasos desarrollados en la Tabla 7.42
5. **Aprovechar la infraestructura nacional de pilotaje.** Antes de comprar definitivamente, sobre todo en el caso de las pymes, conviene recurrir a centros tecnológicos y programas de pilotaje, aunque estos todavía no reflejen una adopción industrial masiva (Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, 2025a; Universidad de Concepción, 2025).
6. **Adaptar los mecanismos de transferencia tecnológica ya existentes** hacia la cobótica, aprovechando la experiencia nacional en capacitación, sensorización y apoyo a pymes (Facultad

de Ingeniería, Universidad de Concepción, 2022, 2023, 2026).

7. **Pensar modelos distintos para las pymes**, que pueden necesitar cofinanciamiento, acceso compartido a infraestructura o equipos reasignables, en lugar de una compra directa sin pruebas previas.
8. **Evaluar juntas la productividad, la calidad y la ergonomía**. Un menor tiempo de ciclo no es un éxito si trae más defectos, sobrecarga al trabajador o genera nuevas detenciones.
9. **Incluir todos los costos de integración** en el presupuesto: efectores, sensores, seguridad, software, capacitación y mantenimiento, y no solo el precio del brazo robótico.
10. **Formar capacidades internas** para operar, reprogramar y mantener el equipo, de modo que la empresa no dependa completamente del integrador externo.
11. **Diseñar la colaboración junto a los trabajadores**, incluyéndolos en la selección de tareas, la evaluación de riesgos y la validación del piloto.
12. **Escalar solo después de estabilizar la aplicación**, comprobando que la disponibilidad, la calidad, la seguridad y la economía del proyecto se sostengan en condiciones normales de operación.

Tabla 7.42: Indicadores propuestos para evaluar pilotos de cobots en la industria manufacturera

Dimensión	Indicadores principales	Interpretación para el escalamien- to
Productividad	Tiempo de ciclo, unidades por hora, uso del equipo, tiempo ocioso y tiempo de cambio de referencia.	La mejora debe mantenerse en la producción real, y no solo en pruebas controladas.

Continúa en la página siguiente.

Tabla 7.42: Indicadores propuestos para evaluar pilotos de cobots en la industria manufacturera (continuación)

Dimensión	Indicadores principales	Interpretación para el escalamien- to
Calidad	Defectos por unidad, tasa de re-proceso, desperdicio y cumplimiento de tolerancias.	El escalamiento requiere que la productividad no se logre a costa de más errores.
Ergonomía	Posturas forzadas, levantamientos, movimientos repetitivos y percepción de esfuerzo.	Hay que comprobar que la carga física baje en total, y no que solo se traslade a otra parte del proceso.
Seguridad	Incidentes, cuasi accidentes, paradas de emergencia y cumplimiento de procedimientos.	Cualquier riesgo detectado debe resolverse antes de aumentar velocidad o autonomía.
Confiabilidad	Disponibilidad del equipo, tiempo entre fallas, tiempo de reparación y fallas de agarre.	Una mejora en el tiempo de ciclo no sirve de mucho si el equipo falla seguido o necesita intervención constante.
Economía	Inversión total, costo por unidad, ahorro anual, mantenimiento y período de recuperación.	La evaluación debe usar costos reales y escenarios realistas, no solo el precio del robot.
Flexibilidad	Cantidad de referencias, tiempo de reprogramación y frecuencia de reasignación del equipo.	La flexibilidad agrega valor cuando permite compartir el mismo equipo entre productos o estaciones.

Continúa en la página siguiente.

Tabla 7.42: Indicadores propuestos para evaluar pilotos de cobots en la industria manufacturera (continuación)

Dimensión	Indicadores principales	Interpretación para el escalamien- to
Organización	Horas de capacitación, aceptación de los trabajadores y dependencia del integrador externo.	El escalamiento requiere que la empresa tenga capacidad interna para operar y mantener el sistema.
Transferencia tecnológica	Pruebas previas realizadas, personal capacitado y dependencia de soporte externo.	La empresa debería avanzar desde depender totalmente del proveedor hacia tener capacidad propia.
Sostenibilidad	Consumo energético, desperdicio de materiales y vida útil de las herramientas.	Los beneficios ambientales deben medirse, y no darse por hecho solo porque se automatizó (Calvo & Gil, 2022; Țițu et al., 2024).

Nota. Elaboración propia. Estos indicadores deben compararse con una línea base y observarse durante un tiempo que incluya cambios de producto, mantenimiento y condiciones normales de operación.

Síntesis de los lineamientos para manufactura. A modo de resumen, la manufactura es dentro de las actividades revisadas en este estudio aquella que cuenta con más evidencia técnica y económica para aplicar robots colaborativos a nivel global. El benchmarking muestra implementaciones cobóticas concretas en ensamblaje, carga de máquinas, soldadura, inspección, paletizado, procesamiento de alimentos y manejo de materiales estas oportunidades se concentran directamente en procesos productivos centrales aportando a la cadena de valor. Sin embargo, que una tarea sea compatible con la robótica no la convierte automáticamente en una tarea colaborativa: eso depende de si realmente se necesita participación humana, de cómo se diseñe la celda y de la evaluación de

riesgos.

Para Chile, las oportunidades iniciales más defendibles están en alimentos, metalmecánica, maquinaria, plásticos, caucho, madera y muebles. Dentro de estos subsectores conviene priorizar tareas repetitivas, exigentes para el trabajador, suficientemente estandarizadas y con un uso capaz de justificar la inversión. Así mismo, los porcentajes de productividad y los plazos de recuperación observados en otros países no pueden aplicarse tal cual a una empresa chilena. Cada implementación necesita su propia línea base, su prueba conceptual, su piloto y su evaluación de costo total para conocer de manera más realista los efectos de la implementación. Positivamente en Chile ya existen algunos antecedentes directamente ligados a la cobótica, como la incorporación de equipos colaborativos en instituciones de formación técnica y la creación de infraestructura que contempla robótica colaborativa. También hay iniciativas de manufactura avanzada y uso de sensores que pueden funcionar como condiciones habilitantes para su futura llegada.

Finalmente, no puede decirse que Chile tenga hoy una adopción manufacturera generalizada de cobots, más bien existe una base inicial de formación, que puede traducirse en infraestructura de pilotaje y mecanismos de transferencia tecnológica desde donde pueden construirse implementaciones graduales. El lineamiento estratégico que se propone para esto es simple: comenzar con aplicaciones maduras y medibles, comprobar que la colaboración humana realmente aporte valor, usar la infraestructura de pilotaje disponible, involucrar a los trabajadores, comparar el cobot con otras alternativas, fortalecer capacidades internas y escalar solo después de estabilizar el desempeño. En el fondo, la principal oportunidad de la cobótica manufacturera en Chile no está solo en reemplazar tareas manuales, sino en construir sistemas productivos flexibles donde la repetibilidad del robot se combine con la capacidad humana de adaptarse, supervisar y resolver problemas.

8. Conclusiones

La investigación permitió caracterizar el mercado de los robots colaborativos y relacionar su desarrollo internacional con las condiciones productivas, económicas y laborales de Chile. A partir de los antecedentes revisados, se concluye que los cobots corresponden a una alternativa de automatización flexible que puede complementar el trabajo humano en tareas repetitivas, ergonómicamente exigentes, peligrosas o con alta necesidad de precisión. Sin embargo, su conveniencia depende de la aplicación y no solamente de las características del robot.

El mercado internacional muestra un crecimiento de la robótica industrial y una mayor presencia de aplicaciones colaborativas, aun así, los cobots continúan representando una parte menor del mercado total y no sustituyen a los robots industriales convencionales puesto que ambas tecnologías responden a necesidades distintas, por un lado los cobots muestran una mejor adaptación a procesos con cambios de producto, lotes variables, espacios reducidos y participación humana, mientras que los robots industriales mantienen ventajas en velocidad, carga y producción masiva.

Para el contexto chileno se construyó una matriz que integra criterios económicos, laborales y técnicos mediante una puntuación ponderada que premia aquellas actividades con alta compatibilidad técnica, una gran participación económica relevante y con condiciones laborales mejorables. El resultado ubica a la industria manufacturera en el primer lugar de relevancia, con un puntaje de 0,71, seguida por minería con 0,68 y construcción con 0,57. La posición dominante de manufactura se explica por su nivel de transformación productiva, la elevada compatibilidad entre sus tareas y las capacidades de los cobots, y la existencia de amplia evidencia sobre impactos en productividad, calidad, ergonomía y desempeño económico. Esta priorización no significa que minería, construcción, transporte u otras actividades carezcan completamente de oportunidades, sino que el enfoque de estas presentan aplicaciones potenciales, pero parte de estas corresponden a teleoperación, autonomía compartida, robótica móvil o automatización convencional estando más enfocado en cobótica ampliada o inclusive en robótica industrial saliendo de los criterios base de la investigación. En manufactura, en cambio, existe una relación más directa entre la definición de

cobot y las tareas productivas estudiadas, lo que permite formular lineamientos con mayor respaldo.

El benchmarking muestra aplicaciones en ensamblaje, carga y descarga de máquinas, soldadura, atornillado, inspección, control de calidad, procesamiento de alimentos, empaque, paletizado, lijado y pulido. Los casos revisados demuestran que los beneficios pueden incluir reducción de tiempos de intervención, mayor utilización de equipos, disminución de carga física, mejoras de calidad y mayor flexibilidad, no obstante, los resultados dependen del volumen, la estabilidad del proceso, la cantidad de turnos, el diseño de la celda y el nivel de utilización, es sustancialmente incompatible obtener valores aproximados de manera general para cada tipo de empresa ligada a la industria. En los casos manufactureros con información económica comparable, las inversiones totales se ubicaron aproximadamente entre EUR45.000 y EUR100.000. Este rango incluye aplicaciones simples y proyectos con más de un cobot, herramientas, sistemas de seguridad e integración. Los rangos presentados sustentaron la base de la justificación económica preliminar pero no debe interpretarse como un precio general para Chile ya que los costos pueden cambiar según la herramienta, el integrador, la complejidad del proceso, el tipo de cambio y el soporte requerido.

El análisis de ventas por tamaño empresarial muestra que la capacidad de adopción es desigual. Bajo el escenario referencial de USD100.000, cerca de 10,20 % de las empresas manufactureras se ubica en tramos donde la inversión no superaría el 15 % de las ventas anuales promedio. Este resultado no representa liquidez ni capacidad efectiva de pago, pero muestra que una compra directa puede ser difícil para gran parte de las pequeñas empresas. En estos casos pueden adquirir importancia el cofinanciamiento, los pilotos compartidos, el arriendo, las celdas reasignables y el apoyo de centros tecnológicos.

Para Chile, las oportunidades iniciales más defendibles se encuentran en alimentos, productos metálicos, maquinaria, plásticos, caucho, madera y muebles. Dentro de estos subsectores se deberían priorizar tareas repetitivas, medibles, suficientemente estables y con una utilización que permita justificar la inversión. También deben considerarse las restricciones propias de cada proceso, como inocuidad, polvo, temperatura, chispas, variabilidad de piezas o peso de los componentes. La

incorporación debería comenzar con un diagnóstico del proceso y no con la selección de una marca o modelo. Luego se debe comparar el trabajo manual, el cobot y la automatización convencional, realizar una prueba conceptual, estimar el costo total, ejecutar un piloto y medir sus resultados. El escalamiento solo debería realizarse cuando la aplicación presente un desempeño estable en productividad, calidad, seguridad, ergonomía y confiabilidad.

En respuesta a la pregunta de investigación, se concluye que las oportunidades potenciales y prioritarias de adopción de cobots en Chile se concentran principalmente en procesos manufactureros flexibles donde la persona mantiene funciones de preparación, supervisión, inspección o resolución de problemas. Estas oportunidades consisten en complementar la capacidad de precisión y repetibilidad de la maquinaria con la capacidad de adaptación y toma de decisiones de los trabajadores.

9. Discusión

Los resultados respaldan la idea de que la manufactura constituye el entorno más desarrollado para la aplicación de robots colaborativos. Este resultado es coherente con la literatura, que concentra gran parte de los casos en ensamblaje, manipulación, carga de máquinas, inspección y procesos de acabado (Y. Cohen et al., 2022; Matheson et al., 2019; Montini et al., 2024). La posición obtenida por manufactura no depende solamente de su participación económica, sino de la coincidencia entre la naturaleza de sus tareas y las características de la tecnología. Este punto permite explicar por qué minería, a pesar de liderar varios indicadores macroeconómicos, ocupa la segunda posición en la matriz: su aporte al PIB y a las exportaciones es superior, pero una parte importante de sus operaciones requiere equipos de gran carga, alta robustez, aislamiento o teleoperación lo que desplaza las oportunidades estrictamente cobóticas a actividades complementarias como la presencia en laboratorios, talleres, manipulación de muestras y otros procesos auxiliares. En manufactura por el contrario, los cobots pueden intervenir directamente en procesos centrales de producción incorporándose a la cadena de valor y permitiendo además generar métricas que la literatura fuertemente respalda.

Dentro de los resultados se muestra que la relevancia económica de un sector no es suficiente para determinar su oportunidad tecnológica, por esto la ponderación utilizada entrega una importancia mayor al nivel de manufactura, la compatibilidad técnica y la justificación económica. Esta decisión permite evitar que sectores grandes, pero con pocas tareas físicas compatibles, ocupen las primeras posiciones solo por su participación macroeconómica. Al mismo tiempo, la cercanía entre los puntajes de manufactura y minería indica que el orden obtenido no debe interpretarse como absoluto y podría cambiar tanto ante otras ponderaciones como incorporación de nuevos criterios de selección.

Por el lado de los costos, los casos internacionales muestran que el desembolso de la maquinaria, por ejemplo del brazo robótico, representa solo una parte de la inversión teniendo que considerarse a su vez las herramientas, sensores, soportes, programación, seguridad, integración y

capacitación, las cuales pueden modificar de forma importante el presupuesto final (Giberti et al., 2022; Polonara et al., 2024; Țîțu et al., 2024). Esta observación es especialmente relevante para Chile, debido a que una cotización basada únicamente en el equipo puede llevar a subestimar el capital necesario y sobrestimar el retorno esperado, adicionalmente el contexto nacional puede presentar costos adicionales ya que las tecnologías provienen principalmente de países extracontinentales sugiriendo envíos más caros, impuestos aduaneros y el simple hecho de tener que realizar las transacciones a tipo de cambio extranjero.

Los resultados económicos revisados tampoco permiten definir un período de recuperación de inversión único, algunos casos reportan retornos cercanos a dos o tres años, pero estos dependen de un volumen mínimo, cantidad de turnos, ahorro de horas y estabilidad del proceso. Una empresa chilena con baja utilización o cambios frecuentes puede obtener un resultado distinto, aunque utilice el mismo modelo de cobot. Por ello, el benchmarking funciona como referencia para definir qué medir, pero no como una promesa de desempeño. La dimensión ergonómica también debe analizarse junto con el proceso completo. Automatizar un movimiento repetitivo puede reducir la carga en una parte de la estación, pero trasladarla hacia el abastecimiento, retiro de piezas o recuperación de fallas, los estudios revisados recomiendan evaluar postura, repetición y distribución de tareas, además del tiempo de ciclo (Realyv'asquez-Vargas et al., 2019; Y. J. Zhang et al., 2021), esto respalda la necesidad de incorporar indicadores productivos y laborales dentro de una misma evaluación.

Otro resultado relevante corresponde a las diferencias por tamaño empresarial. La proporción estimada de empresas manufactureras ubicadas en tramos compatibles con una inversión referencial es relativamente baja, pero no implica que las empresas más pequeñas deban descartarse, sino que probablemente requieran modelos distintos de acceso como subsidios o políticas públicas.

En Chile existen antecedentes de formación y desarrollo de infraestructura para manufactura avanzada, esto en adición con la incorporación de cobots en instituciones técnicas y la creación de centros con capacidades de robótica colaborativa representan una base favorable para la incorporación paulatina de las tecnologías (INACAP, 2024; Ministerio de Economía, Fomento y Turismo,



2025a, 2025b). Sin embargo, estos antecedentes no prueban una adopción extendida en empresas sino que el principal valor se encuentra actualmente en la posibilidad de realizar pruebas, formar trabajadores y disminuir la incertidumbre antes de intervenir.

En términos generales, el principal aporte del estudio es relacionar datos macroeconómicos y laborales con evidencia técnica y económica de aplicaciones concretas, mediante esta integración se permite pasar desde una descripción general del mercado hacia una propuesta de selección y adopción. No obstante, el resultado debe entenderse como una orientación inicial haciendo que la decisión definitiva deba tomarse en el nivel de la empresa y de la tarea, utilizando información operacional propia.

10. Limitaciones

Una limitación fundamental corresponde al uso de fuentes secundarias ya que la investigación utiliza artículos científicos, reportes institucionales, estadísticas oficiales, documentos técnicos y casos empresariales, pero no incorpora entrevistas, encuestas, visitas a plantas ni mediciones directas. Por esta razón, los resultados permiten identificar oportunidades y formular lineamientos, pero no comprobar el desempeño de una implementación en una empresa chilena. Estas fuentes utilizadas tampoco poseen un mismo período de referencia. Los datos de PIB, exportaciones, empleo, seguridad laboral, empresas, ventas y formación de capital fijo se encuentran disponibles para años diferentes. Se utilizaron los períodos más recientes y comparables encontrados, pero la matriz integra información que no representa exactamente un mismo momento económico.

Por otra parte, las homologaciones para la confección de la matriz entre las categorías del Banco Central de Chile, el Servicio de Impuestos Internos, el Instituto Nacional de Estadísticas y el Servicio Nacional de Aduanas fueron construidas para hacer posible la comparación. Estas correspondencias no constituyen conversiones oficiales por lo que se presentan los casos donde algunos productos, rubros o ramas pueden relacionarse con más de una actividad económica, por lo que su asignación ha sido bajo criterio propio. La ponderación de esta matriz multicriterio también corresponde a una decisión metodológica donde se entregó mayor importancia al nivel de manufactura, compatibilidad técnica y justificación económica, debido al objetivo del estudio. Además no se desarrolló un análisis de sensibilidad para comprobar la estabilidad de la clasificación frente a cambios en los pesos. Dentro de los componentes, el indicador de seguridad laboral combina accidentabilidad y mortalidad las cuales se expresan en escalas distintas, si bien su uso permite construir una comparación exploratoria, no debe interpretarse como una medida exacta del riesgo sectorial. Además, las categorías de SUSESO agrupan actividades que no coinciden completamente con las del Banco Central, como transporte y comunicaciones o agricultura y pesca lo cual puede afectar en la calidad del dato.

En cuanto a la evaluación de capacidad financiera, esta utiliza ventas promedio y tramos

de empresa como aproximación. Las ventas al no representar utilidades, liquidez, flujo de caja ni acceso efectivo a crédito generan que la razón de inversión respecto de ventas no demuestre que la empresa pueda realmente financiarla, sino que solo permite comparar la magnitud relativa del desembolso entre tamaños empresariales. Paralelamente la razón entre formación de capital fijo (FBCF), PIB y número de empresas también debe interpretarse con cautela puesto que los promedios sectoriales pueden ocultar una alta concentración de inversión en pocas compañías y no reflejan la situación de una empresa individual. Esta limitación es especialmente relevante en sectores compuestos por grandes firmas y una cantidad elevada de pequeñas empresas.

Finalmente, los casos internacionales presentan diferencias de moneda, año, escala, salarios, regulación y metodología. Algunos corresponden a evaluaciones académicas, otros a implementaciones industriales y otros a información comunicada por fabricantes. Por ello, los porcentajes de productividad, los costos y los períodos de recuperación no son directamente transferibles a Chile.

11. Anexos

11.1 Homologación de elementos exportados a actividades económicas del Banco Central de Chile

La Tabla 11.1 presenta la homologación utilizada para vincular los elementos exportados registrados en la base de comercio exterior con las actividades económicas publicadas por el Banco Central de Chile. Esta correspondencia permite incorporar la dimensión exportadora dentro del análisis ex-ante de sectores relevantes para la adopción de robots colaborativos en Chile. Sin embargo, la homologación debe interpretarse como una aproximación metodológica, debido a que las exportaciones se clasifican principalmente por producto o categoría comercial, mientras que el PIB por actividad económica se organiza según ramas productivas de Cuentas Nacionales.

Tabla 11.1: Homologación de elementos exportados a actividades económicas del Banco Central de Chile

Elemento exportado	Actividad económica BCCh homologada
Abonos	Industria manufacturera → Química, petróleo, caucho y plástico
Aceites de oliva	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Alambres de cobre	Industria manufacturera → Productos metálicos, maquinaria, equipos y otros
Algas	Pesca
Arándanos	Agropecuaria-silvícola
Avellanas	Agropecuaria-silvícola
Bacalaos	Pesca
Carnes de ave	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Carnes de bovino	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Carnes de otras especies	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Carnes de porcino	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Cecinas y embutidos	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Celulosa	Industria manufacturera → Celulosa, papel e imprentas
Cerezas	Agropecuaria-silvícola
Ciruelas	Agropecuaria-silvícola
Cobre	Minería → Minería del cobre
Conservas y preparaciones de pescados y mariscos	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Duraznos y nectarinas	Agropecuaria-silvícola

Tabla 11.1: Homologación de elementos exportados a actividades económicas del Banco Central de Chile (continuación)

Elemento exportado	Actividad económica BCCh homologada
Erizos	Pesca
Exportación de servicios calificados por Aduanas	Servicios financieros y empresariales / servicios no desagregados por actividad BCCh
Ferroaleaciones	Industria manufacturera → Minerales no metálicos y metálica básica
Frambuesas y moras	Agropecuaria-silvícola
Frutillas	Agropecuaria-silvícola
Granos de avena	Agropecuaria-silvícola
Grasas y aceites de pescado	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Harinas de pescado	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Hortalizas y tubérculos	Agropecuaria-silvícola
Jugos de frutas, frutos y hortalizas	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Jureles	Pesca
Kiwis	Agropecuaria-silvícola
Leche y otros productos lácteos	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Limones	Agropecuaria-silvícola
Litio	Minería → Otras actividades mineras
Madera y sus manufacturas	Industria manufacturera → Maderas y muebles
Mandarinas y clementinas	Agropecuaria-silvícola
Manzanas	Agropecuaria-silvícola
Maquis	Agropecuaria-silvícola
Medicamentos	Industria manufacturera → Química, petróleo, caucho y plástico
Metanol	Industria manufacturera → Química, petróleo, caucho y plástico
Miel	Agropecuaria-silvícola
Minerales de zinc y sus concentrados	Minería → Otras actividades mineras
Minerales de cobre y sus concentrados	Minería → Minería del cobre
Minerales de hierro y sus concentrados	Minería → Otras actividades mineras
Minerales de molibdeno y sus concentrados	Minería → Otras actividades mineras
Minerales de oro y sus concentrados	Minería → Otras actividades mineras
Minerales de plomo y sus concentrados	Minería → Otras actividades mineras
Moluscos	Pesca
Mostos de uva	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Naranjas	Agropecuaria-silvícola
Neumáticos	Industria manufacturera → Química, petróleo, caucho y plástico

Tabla 11.1: Homologación de elementos exportados a actividades económicas del Banco Central de Chile (continuación)

Elemento exportado	Actividad económica BCCh homologada
Nitratos de potasio	Industria manufacturera → Química, petróleo, caucho y plástico
Nueces de nogal	Agropecuario-silvícola
Oro	Minería → Otras actividades mineras
Óxidos e hidróxidos de molibdeno	Industria manufacturera → Química, petróleo, caucho y plástico
Paltas	Agropecuario-silvícola
Papel y cartón y sus manufacturas	Industria manufacturera → Celulosa, papel e imprentas
Peras	Agropecuario-silvícola
Plata	Minería → Otras actividades mineras
Rancho de naves	No homologable directamente a actividad económica BCCh
Resto Forestales y sus derivados	Industria manufacturera → Maderas y muebles / Celulosa, papel e imprentas
Resto Frutas y frutos	Agropecuario-silvícola
Resto Minería	Minería → Otras actividades mineras
Resto No minería	No homologable directamente / categoría residual exportadora
Resto Otros alimentos	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Resto Productos del mar	Pesca
Sal gema, sal de salinas y sal marina	Minería → Otras actividades mineras
Salmones y truchas	Pesca
Semillas para siembra	Agropecuario-silvícola
Tomates preparados o conservados	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Uvas	Agropecuario-silvícola
Vinos	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Vinos espumosos	Industria manufacturera → Alimentos, bebidas y tabaco
Yodo	Minería → Otras actividades mineras

Nota. La homologación presentada corresponde a una aproximación metodológica entre elementos de exportación y actividades económicas utilizadas por el Banco Central de Chile. La clasificación de exportaciones se basa en productos o categorías de comercio exterior, mientras que las actividades del Banco Central de Chile corresponden a ramas productivas de Cuentas Nacionales. Por ello, algunas correspondencias deben interpretarse como homologaciones aproximadas y no como equivalencias contables directas. Las categorías residuales o sin correspondencia productiva clara se mantienen como no homologables para evitar asignaciones arbitrarias.

11.2 Homologación de criterios de ocupación laboral del INE a actividades económicas del Banco Central de Chile

La Tabla 11.2 presenta la homologación utilizada para vincular los criterios de empleabilidad utilizadas por el INE con las actividades económicas publicadas por el Banco Central de Chile. Esta correspondencia permite incorporar la dimensión laboral dentro del análisis ex-ante de sectores relevantes para la adopción de robots colaborativos en Chile. Sin embargo, la homologación debe interpretarse como una aproximación metodológica, debido a que la empleabilidad se clasifica por categorías funcionales de empresas, mientras que el PIB por actividad económica se organiza según ramas productivas de Cuentas Nacionales.

Tabla 11.2: Homologación de ramas de actividad económica del INE a categorías de actividad económica del Banco Central de Chile

Rama de actividad económica INE	Categoría de actividad económica BCCh homologada
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	Agropecuaria-silvícola y pesca
Explotación de minas y canteras	Minería
Industrias manufactureras	Industria manufacturera
Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado	Electricidad, gas, agua y gestión de desechos
Suministro de agua; evacuación de aguas residuales, gestión de desechos y descontaminación	Electricidad, gas, agua y gestión de desechos
Construcción	Construcción
Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas	Comercio, restaurantes y hoteles
Transporte y almacenamiento	Transporte
Actividades de alojamiento y de servicio de comidas	Comercio, restaurantes y hoteles
Información y comunicaciones	Comunicaciones y servicios de información
Actividades financieras y de seguros	Servicios financieros y empresariales
Actividades inmobiliarias	Servicios de vivienda e inmobiliarios
Actividades profesionales, científicas y técnicas	Servicios financieros y empresariales
Actividades de servicios administrativos y de apoyo	Servicios financieros y empresariales

Tabla 11.2: Homologación de ramas de actividad económica del INE a categorías de actividad económica del Banco Central de Chile (continuación)

Rama de actividad económica INE	Categoría de actividad económica BCCh homologada
Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria	Administración pública
Enseñanza	Servicios personales
Actividades de atención de la salud humana y de asistencia social	Servicios personales
Actividades artísticas, de entretenimiento y recreativas	Servicios personales
Otras actividades de servicios	Servicios personales
Actividades de los hogares como empleadores; actividades no diferenciadas de los hogares como productores de bienes y servicios para uso propio	No homologable / no asignado
Actividades de organizaciones y órganos extraterritoriales	No homologable / no asignado
No sabe / no responde u otras categorías no clasificadas	No homologable / no asignado

Nota. La homologación corresponde a una aproximación metodológica entre las ramas de actividad económica utilizadas por la Encuesta Nacional de Empleo del INE y las categorías de actividad económica empleadas por el Banco Central de Chile en Cuentas Nacionales. La correspondencia no debe interpretarse como una equivalencia contable exacta, sino como una agrupación funcional para comparar empleo sectorial con variables macroeconómicas, exportadoras y de seguridad laboral.

11.3 Homologación de rubros económicos del SII a actividades económicas del Banco Central de Chile

Tabla 11.3: Homologación entre las actividades económicas del SII y las categorías de Cuentas Nacionales del Banco Central de Chile

Rubro económico actual (SII)	Homologación de actividad económica (BCCh)
A - Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	Agropecuario-silvícola y pesca
B - Explotación de minas y canteras	Minería
C - Industria manufacturera	Industria manufacturera
D - Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado	EGA y gestión de desechos
E - Suministro de agua; evacuación de aguas residuales, gestión de desechos y descontaminación	EGA y gestión de desechos
F - Construcción	Construcción
G - Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas	Comercio, restaurantes y hoteles
H - Transporte y almacenamiento	Transporte
I - Actividades de alojamiento y de servicio de comidas	Comercio, restaurantes y hoteles
J - Información y comunicaciones	Comunicaciones y servicios de información
K - Actividades financieras y de seguros	Servicios financieros y empresariales
L - Actividades inmobiliarias	Servicios de vivienda e inmobiliarios
M - Actividades profesionales, científicas y técnicas	Servicios financieros y empresariales

Continúa en la página siguiente

Tabla 11.3: Homologación entre las actividades económicas del SII y las categorías de Cuentas Nacionales del Banco Central de Chile (continuación)

Rubro económico actual (SII)	Homologación de actividad económica (BCCh)
N - Actividades de servicios administrativos y de apoyo	Servicios financieros y empresariales
O - Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria	Administración pública
P - Enseñanza	Servicios personales
Q - Actividades de atención de la salud humana y de asistencia social	Servicios personales
R - Actividades artísticas, de entretenimiento y recreativas	Servicios personales
S - Otras actividades de servicios	Servicios personales
T - Actividades de los hogares como empleadores; actividades no diferenciadas de los hogares	Servicios personales
U - Actividades de organizaciones y órganos extraterritoriales	No clasificado en matriz BCCh utilizada
Sin información	Sin información

Nota. Elaboración propia. La homologación corresponde a una aproximación metodológica entre los rubros económicos utilizados por el Servicio de Impuestos Internos (SII) en sus Estadísticas de Empresas y las categorías de actividad económica empleadas por el Banco Central de Chile (BCCh) en las Cuentas Nacionales. La correspondencia no debe interpretarse como una equivalencia contable exacta ni como una relación uno a uno, sino como una agrupación funcional construida para integrar información sectorial proveniente de distintas fuentes estadísticas y permitir su comparación con las variables económicas analizadas en esta investigación.

11.4 Capacidad de mejora productiva para manufactura

Tabla 11.4: Casos documentados de impacto productivo asociado a la implementación de cobots en manufactura

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Inspección de panel táctil	Productividad y jornada diaria	Aumento de productividad de 31 % y reducción de jornada diaria de 10 a 8 horas.	Puttero et al., 2026
Carga de piezas e inspección por peso en CNC vertical	Volumen productivo	Aumento de producción entre 15 % y 20 %, manteniendo salida sin defectos ni rechazos de clientes.	Puttero et al., 2026
Selección de piezas para soldadura e inspección con cámara	Eficiencia operacional	Producción de 160 piezas por hora mediante dos cobots; no se entrega línea base previa.	Puttero et al., 2026
Manipulación e inspección de piezas en torno	Resultado empresarial asociado a automatización colaborativa	Aumento de ventas de 70 % y aumento de fuerza laboral de 50 %; no corresponde a productividad física directa.	Puttero et al., 2026
Inspección de fuselaje aeronáutico	Velocidad de inspección	Inspección 10 veces más rápida en geometrías complejas.	Puttero et al., 2026
Encintado o amarre de arneses eléctricos	Tiempo de ciclo	Reducción desde 38 s a 28 s, equivalente a una disminución aproximada de 26,3 %.	da Silva Martin et al., 2025; Román Ibáñez et al., 2021
Encintado o amarre de arneses eléctricos	Producción por turno	Aumento desde 757 a 1.028 bobinas por turno, equivalente a un incremento aproximado de 35,8 %.	da Silva Martin et al., 2025; Román Ibáñez et al., 2021
Ensamblaje de producto mecánico con apoyo de realidad virtual	Tiempo promedio de ensamblaje	Reducción desde 313,6 s a 303,3 s, equivalente a una disminución aproximada de 3,3 %.	da Silva Martin et al., 2025; Dimitrokalli et al., 2020
Ensamblaje asistido en estación de trabajo	Tiempo de ciclo por pieza	Reducción desde 9,7 s a 8,2 s por pieza, equivalente a una disminución de 15,46 %.	da Silva Martin et al., 2025; Realyv'asquez-Vargas et al., 2019
Ensamblaje asistido en estación de trabajo	Productividad	Aumento de productividad de 18,3 %.	da Silva Martin et al., 2025; Realyv'asquez-Vargas et al., 2019
Torque de tuerca de rueda	Tiempo de ciclo	Reducción desde 145 s a 107 s, equivalente a una disminución aproximada de 26,2 %.	da Silva Martin et al., 2025; Salunkhe et al., 2019
Traslado de piezas y actividades sin valor agregado	Tiempo de ciclo final	Reducción desde 44,5 s a 42,1 s, equivalente a una disminución aproximada de 5,4 %.	da Silva Martin et al., 2025; Quenehen et al., 2019

Continúa en la siguiente página...

Tabla 11.4: Casos documentados de impacto productivo asociado a la implementación de cobots en manufactura (continuación)

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Ensamblaje de junta homocinética Rzeppa	Tiempo de ensamblaje	Reducción desde 25,768 s a 23,166 s; ahorro de 2,603 s, equivalente a una ganancia de productividad cercana al 10%.	Calvo y Gil, 2022
Ensamblaje de motor y torque de enfriador de aceite	Reorganización de proceso	Eliminación de 1,3 minutos de transporte manual y reasignación de operación de torque de 1,7 minutos al cobot.	da Silva Martin et al., 2025
Ensamblaje de motor y torque de enfriador de aceite	Balance de línea	El proceso original totalizaba 5,5 minutos y requería dos operadores; con la integración del cobot se consolida la operación en una estación y se reasigna mano de obra.	da Silva Martin et al., 2025

11.5 Capacidad de generar ahorros para manufactura

Tabla 11.5: Casos documentados de ahorro operacional, retorno económico y reducción de riesgos asociados a la implementación de cobots en manufactura

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Control de calidad e inspección	Retorno de inversión	Retorno de inversión desde varios meses hasta un máximo de 2 años, asociado a menor desperdicio, menor trabajo intensivo y reducción de costos operacionales.	Puttero et al., 2026
Carga e inspección por peso en CNC vertical	Costos asociados a defectos y rechazos	Se reporta salida sin defectos ni rechazos de clientes; no se entrega monto monetario específico.	Puttero et al., 2026
Automatización colaborativa en proceso productivo	Ahorros por integración de cobots	Se reporta redistribución de ahorros entre departamentos; no se entrega monto publicado.	Puttero et al., 2026

Continúa en la siguiente página...

Tabla 11.5: Casos documentados de ahorro operacional, retorno económico y reducción de riesgos asociados a la implementación de cobots en manufactura (continuación)

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Inspección y control de calidad en línea	Calidad, mantenimiento y detenciones	Se reporta inspección completa, menor mantenimiento, menor tiempo de inactividad y menos detenciones de línea; no se entrega monto monetario.	Puttero et al., 2026
Inspección de piezas pequeñas	Daño y error operativo	Inspección en proceso sin intervención del operador, con menor riesgo de daño en piezas frágiles.	Puttero et al., 2026
Inspección final y apoyo a ciclo productivo	Ciclo e inspección final	Se reporta reducción de tiempo de ciclo y aumento de piezas inspeccionadas al final del día; no se entrega porcentaje específico.	Puttero et al., 2026
Análisis de implementación de cobot en sistema colaborativo	Retorno económico de implementación	Retorno estimado de US\$ 612.500 frente a un costo máximo viable de implementación de US\$ 250.000.	Y. Cohen et al., 2022; da Silva Martin et al., 2025
Manufactura colaborativa con interacción física humano-robot	Periodo de recuperación de inversión	Costos de hardware y configuración cubiertos aproximadamente en 1 año.	Cherubini et al., 2016; da Silva Martin et al., 2025
Ensamblaje asistido en estación de trabajo	Periodo de recuperación de inversión	Integración de cobot con retorno de inversión estimado en 5,29 años.	da Silva Martin et al., 2025; Realv'asquez-Vargas et al., 2019
Ensamblaje de motor y torque de enfriador de aceite	Inversión inicial	Cobot por US\$ 52.000, integración por US\$ 16.000 e inversión inicial total de US\$ 68.000.	da Silva Martin et al., 2025
Ensamblaje de motor y torque de enfriador de aceite	Ahorro anual por costo operacional	Reducción anual de costos operacionales por US\$ 41.602,56.	da Silva Martin et al., 2025
Ensamblaje de motor y torque de enfriador de aceite	Reducción relativa de costos laborales	Disminución aproximada de 61,2% en los costos laborales operacionales asociados a la tarea intervenida.	da Silva Martin et al., 2025
Ensamblaje de motor y torque de enfriador de aceite	Costos energéticos del cobot	Costo energético anual estimado en US\$ 87,58.	da Silva Martin et al., 2025
Ensamblaje de motor y torque de enfriador de aceite	Mantenimiento preventivo	Costo de mantenimiento preventivo anual de US\$ 4.320.	da Silva Martin et al., 2025

Continúa en la siguiente página...

Tabla 11.5: Casos documentados de ahorro operacional, retorno económico y reducción de riesgos asociados a la implementación de cobots en manufactura (continuación)

Tipo de actividad realizada	Indicador observado	Impacto reportado o calculado	Fuente
Ensamblaje de motor y torque de enfriador de aceite	Retorno de inversión	Periodo de recuperación de 1,74 años, equivalente aproximadamente a 1 año y 9 meses.	da Silva Martin et al., 2025
Torque en secuencia correcta	Riesgo de falla de calidad	Reducción del RPN desde 196 a 56, equivalente a una disminución aproximada de 71,4 %.	da Silva Martin et al., 2025
Torque de enfriador de aceite	Riesgo ergonómico	Reducción de 58 % del riesgo ergonómico por transferencia de operación de torque al cobot.	da Silva Martin et al., 2025
Torque de tuerca de rueda	Calidad del proceso	Índice de calidad aumenta desde 85 % a 99,17 %, equivalente a una mejora de 14,17 puntos porcentuales.	da Silva Martin et al., 2025; Salunkhe et al., 2019
Ensamblaje de junta homocinética Rzeppa	Umbral económico de factibilidad	Para un sistema robótico de US\$ 50.000 y vida útil de 8 años, una ganancia de productividad cercana a 10 % puede ser factible en escenarios de salarios altos; el umbral inferior de compensación se ubica en torno a 10 % a 12 %.	Calvo y Gil, 2022
Evaluación económica paramétrica de ensamble	Umbral de productividad requerido	Un sistema robótico de US\$ 70.000 con salario anual de US\$ 35.000 requiere aproximadamente 15 % a 18 % de ganancia de productividad para sostener compensación social de corto plazo; con salario anual de US\$ 10.000, el umbral sube a 42 % a 52 %.	Calvo y Gil, 2022

Referencias

- Accorsi, R., Tufano, A., Gallo, A., Galizia, F. G., Cocchi, G., Ronzoni, M., Abbate, A., & Manzini, R. (2019). An Application of Collaborative Robots in a Food Production Facility. *Procedia Manufacturing*, 38, 341-348. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.044>
- Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2022). Demographics and automation. *Review of Economic Studies*, 89(1), 1-44. <https://doi.org/10.1093/restud/rdab031>
- Adamides, G., & Edan, Y. (2023). Human-robot collaboration systems in agricultural tasks: A review and roadmap. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204, 107541. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107541>
- Agioutantis, Z., Kolapo, P., Long, M., Schafrik, S., & Sottile, J. (2025). Envisioning human-machine relationship towards mining of the future: An overview. *Mining*, 5(1), 5. <https://doi.org/10.3390/mining5010005>
- Al-Rajhi, M. A. I., Osman, Y. K., Abd El-Wahhab, G. G., & Ali, K. A. M. (2023). A small boat for fish feeding. *Aquacultural Engineering*, 103, 102371. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2023.102371>
- Azadeh, K., De Koster, R., & Roy, D. (2019). Robotized and automated warehouse systems: Review and recent developments. *Transportation Science*, 53(4), 917-945. <https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0873>
- Babalola, G. T., Gaston, J.-M., Trombetta, J., & Tulk Jesso, S. (2024). A systematic review of collaborative robots for nurses: Where are we now, and where is the evidence? *Frontiers in Robotics and AI*, 11, 1398140. <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1398140>
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. En G. y J.E. Rijnnsdorp (Ed.), *Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems* (pp. 129-135). Pergamon. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-029348-6.50026-9>
- Banco Central de Chile. (s.f.-a). 2.3.11 *Actividades financieras*. Consultado el 8 de julio de 2026, desde <https://www.bcentral.cl/w/2.3.11-actividades-financieras>

- Banco Central de Chile. (s.f.-b). *2.3.14 Servicios empresariales*. Consultado el 8 de julio de 2026, desde <https://www.bcentral.cl/w/2.3.14-servicios-empresariales>
- Banco Central de Chile. (s.f.-c). *2.3.2 Pesca y acuicultura*. Consultado el 8 de julio de 2026, desde <https://www.bcentral.cl/w/2.3.2-pesca-y-acuicultura>
- Banco Central de Chile. (s.f.-d). *2.3.9 Transporte y almacenamiento*. Consultado el 8 de julio de 2026, desde <https://www.bcentral.cl/w/2.3.9-transporte-y-almacenamiento>
- Banco Central de Chile. (2022a). *2.3.12 Actividades inmobiliarias*. Banco Central de Chile. Consultado el 8 de julio de 2026, desde <https://www.bcentral.cl/w/2.3.12-actividades-inmobiliarias>
- Banco Central de Chile. (2022b). *2.3.13 Servicios de vivienda*. Banco Central de Chile. Consultado el 8 de julio de 2026, desde <https://www.bcentral.cl/w/2.3.13-servicios-de-vivienda>
- Banco Central de Chile. (2022c). *Cuentas Nacionales de Chile: Métodos y Fuentes de Información*. Banco Central de Chile. Consultado el 8 de julio de 2026, desde <https://www.bcentral.cl/areas/estadisticas/cuentas-nacionales-de-chile-metodos-y-fuentes-de-informacion>
- Banco Central de Chile. (2022d). *Métodos y fuentes de información CCNN*. <https://www.bcentral.cl/w/2.3.5-suministro-de-electricidad-gas-agua-y-gestion-de-desechos>
- Banco Central de Chile. (2022e, 29 de noviembre). *Cuentas Nacionales de Chile: Métodos y Fuentes de Información (Compilación de Referencia 2018)* (inf. téc.) (Fecha tomada del listado “Compilaciones de Referencia” del Banco Central de Chile. Sección 2.3.4 “Industria manufacturera” (p. 48 del PDF).). Banco Central de Chile. Santiago, Chile. https://www.bcentral.cl/documents/33528/3900200/Cuentas_Nacionales_metodos_fuentes_ref18.pdf.pdf
- Banco Central de Chile. (2024). *Cuentas Nacionales de Chile: Compilación de Referencia 2018, Formación Bruta de Capital Fijo y Valor Agregado Bruto por actividad económica* [Consultado en 2026]. <https://www.bcentral.cl>
- Banco Central de Chile. (2026). *Participación por clase de actividad económica, series empalmadas, referencia 2018: porcentaje sobre el PIB*. Banco Central de Chile. Consultado el 28 de mayo

de 2026, desde https://si3.bcentral.cl/Siete/Es/Siete/Cuadro/CAP_CCNN/MN_CCNN76/CCNN_EP18_05_ratio/637801088750197615

- Barbosa Júnior, M. R., Garcia dos Santos, R., de Azevedo Sales, L., & Pereira de Oliveira, L. (2024). Advancements in agricultural ground robots for specialty crops: An overview of innovations, challenges, and prospects. *Plants*, 13(23), 3372. <https://doi.org/10.3390/plants13233372>
- Berenstein, R., & Edan, Y. (2017). Human-robot collaborative site-specific sprayer. *Journal of Field Robotics*, 34(8), 1519-1530. <https://doi.org/10.1002/rob.21730>
- Birkhoff, S. S., Merring, P., Spence, A., Bassett, W., & Roth, S. C. (2024). Integrating collaborative robots into a complex hospital setting: A qualitative descriptive study. *Delaware Journal of Public Health*, 10(5), 20-27. <https://doi.org/10.32481/djph.2024.12.05>
- Bonomi Savignon, A., Zecchinelli, R., Costumato, L., & Scalabrini, F. (2024). Automation in public sector jobs and services: A framework to analyze public digital transformation's impact in a data-constrained environment. *Transforming Government: People, Process and Policy*, 18(1), 49-70. <https://doi.org/10.1108/TG-04-2023-0044>
- Brequé, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2777/308407>
- Brinkmann, A., van den Bouwhuijsen, G., Müller-Werdan, U., Hein, A., & Schwenk, M. (2022). Providing physical relief for nurses by collaborative robotics. *Scientific Reports*, 12, 9138. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12632-4>
- Brosque, C., & Fischer, M. (2021). Comparative analysis of manual and robotic concrete drilling for installation hangers. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(3), 05021001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002002](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002002)
- Burden, A. G., Caldwell, G. A., & Guertler, M. R. (2022). Towards human–robot collaboration in construction: Current cobot trends and forecasts. *Construction Robotics*, 209-220. <https://doi.org/10.1007/s41693-022-00085-0>

- Calvo, R., & Gil, P. (2022). Evaluation of Collaborative Robot Sustainable Integration in Manufacturing Assembly by Using Process Time Savings. *Materials*, 15(2), 611. <https://doi.org/10.3390/ma15020611>
- Chauhan, S., et al. (2024). Assessing trust in construction AI-powered collaborative robots using structural equation modeling. <https://arxiv.org/abs/2308.14697>
- Chen, J., Fu, Y., Lu, W., & Pan, Y. (2023). Augmented reality-enabled human-robot collaboration to balance construction waste sorting efficiency and occupational safety and health. *Journal of Environmental Management*, 348, 119341. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119341>
- Chen, Y., Luo, Y., Yerebakan, M. O., Xia, S., Behdad, S., & Hu, B. (2022). Human workload and ergonomics during human-robot collaborative electronic waste disassembly. *2022 IEEE 3rd International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICHMS56717.2022.9980828>
- Cherubini, A., Passama, R., Crosnier, A., Lasnier, A., & Fraisse, P. (2016). Collaborative manufacturing with physical human–robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 40, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.007>
- Cochrane. (2025). *Do electronic or robotic gait-training devices help people walk better after a stroke?* Cochrane. Consultado el 8 de julio de 2026, desde https://www.cochrane.org/evidence/CD006185_do-electronic-or-robotic-gait-training-devices-help-people-walk-better-after-stroke
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128-152. <https://doi.org/10.2307/2393553>
- Cohen, Y., Shoval, S., Faccio, M., & Minto, R. (2022). Deploying cobots in collaborative systems: Major considerations and productivity analysis. *International Journal of Production Research*, 60(6), 1815-1831. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1870758>
- Colgate, M. A., J. Edward y Peshkin. (1999). *Cobots* (US Patent 5,952,796).

- Comisión Nacional de Evaluación y Productividad. (2025). *Informe anual de productividad 2024*. Comisión Nacional de Evaluación y Productividad. Santiago, Chile. Consultado el 10 de mayo de 2026, desde <https://cnep.cl/wp-content/uploads/2025/01/INFORME-ANUAL-2024-FINAL.pdf>
- CORFO. (2017). *Encuesta Longitudinal de Empresas (ELE): Principales resultados sobre financiamiento y tamaño de firma* (inf. téc.). Corporación de Fomento de la Producción.
- Correa, M., Cárdenas, D., Carvajal, D., & Ruiz-del-Solar, J. (2022). Haptic teleoperation of impact hammers in underground mining. *Applied Sciences*, 12(3), 1428. <https://doi.org/10.3390/app12031428>
- da Silva Martin, A., Rodrigues Pinto, L. F., de Oliveira Neto, G. C., & Facchini, F. (2025). Collaborative robot in engine assembly: A socioeconomic approach to technological advancement in manufacturing. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 7(1), Artículo e70044. <https://doi.org/10.1049/cim2.70044>
- Dimitrokalli, A., Vosniakos, G.-C., Nathanael, D., & Matsas, E. (2020). On the assessment of human-robot collaboration in mechanical product assembly by use of virtual reality. *Procedia Manufacturing*, 51, 627-634. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.088>
- Doosan Robotics. (2023). *Investor relations material*. Doosan Robotics Inc. Suwon, Republic of Korea. Consultado el 15 de julio de 2026, desde https://www.doosanrobotics.com/pdf/investment/EN_Doosan%20Robotics%20IR%20Material_Eng.pdf
- Espinoza, J. P., Mascaró, M., Morales, N., & Ruiz-del-Solar, J. (2022). Improving productivity in block/panel caving through dynamic confinement of semi-autonomous load-haul-dump machines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 36(8), 552-573. <https://doi.org/10.1080/17480930.2022.2077046>
- Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción. (2022, 12 de noviembre). *Centro para la Industria 4.0 inicia proyecto que mejora la competitividad de las empresas manufactureras locales*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción. Consultado el 14 de julio de

- 2026, desde <https://fi.udec.cl/centro-para-la-industria-4-0-inicia-proyecto-que-busca-mejorar-la-competitividad-de-las-empresas-manufactureras-locales/>
- Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción. (2023, 24 de noviembre). *C4i capacitó a pymes de la Región del Biobío sobre uso de sensores en líneas productivas*. Noticias UdeC. Consultado el 14 de julio de 2026, desde <https://noticias.udec.cl/c4i-capacito-a-pymes-de-region-del-biobio-sobre-uso-de-sensores-en-lineas-productivas/>
- Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción. (2026, 22 de junio). *C4i UdeC exhibió desarrollos tecnológicos y desafíos estratégicos a autoridades nacionales de Corfo*. Noticias UdeC. Consultado el 14 de julio de 2026, desde <https://noticias.udec.cl/c4i-udec-exhibio-desarrollos-tecnologicos-y-desafios-estrategicos-a-autoridades-nacionales-de-corfo/>
- FANUC. (s.f.). *Cobot relieves workers of physical strain (STIHL)*. Consultado el 19 de febrero de 2026, desde <https://www.fanuc.eu/uk-en/case-studies/cobot-relieves-workers-physical-strain>
- Fragapane, G., De Koster, R., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, 294(2), 405-426. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.019>
- Fu, J., Liu, D., He, Y., & Cheng, F. (2024). Autonomous net inspection and cleaning in sea-based fish farms: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227, 109609. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109609>
- Garcés, G. (2025). Advances in human-robot collaboration (hrc) in construction 5.0 for building construction: A bibliometric and systematic literature review. *Journal of Information Technology in Construction*, 30, 1244-1276. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2025.050>
- Garda, P. (2021). *Making digital transformation work for all in chile* (OECD Economics Department Working Papers N.º 1689). OECD Publishing. Paris. <https://doi.org/10.1787/6b1a524c-en>

- Giberti, H., Abbattista, T., Carnevale, M., Giagu, L., & Cristini, F. (2022). A Methodology for Flexible Implementation of Collaborative Robots in Smart Manufacturing Systems. *Robotics*, 11(1), 9. <https://doi.org/10.3390/robotics11010009>
- Halder, S., & Afsari, K. (2023). Robots in inspection and monitoring of buildings and infrastructure: A systematic review. *Applied Sciences*, 13(4), 2304. <https://doi.org/10.3390/app13042304>
- Halder, S., Afsari, K., Chiou, E., Patrick, R., & Akbari Hamed, K. (2023). Construction inspection and monitoring with quadruped robots in future human-robot teaming: A preliminary study. *Journal of Building Engineering*, 65, 105814. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105814>
- Hentout, A., Aouache, M., Maoudj, A., & Akli, I. (2019). Human-robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008-2017. *Advanced Robotics*, 33(15-16), 764-799.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015). *Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29269.22248>
- Hinrichs, P., Seibert, K., Arizpe Gómez, P., Pfingsthorn, M., & Hein, A. (2023). A robotic system to anchor a patient in a lateral position and reduce nurses' physical strain. *Robotics*, 12(5), 144. <https://doi.org/10.3390/robotics12050144>
- INACAP. (2024, mayo). *INACAP incorpora 21 robots colaborativos y capacita a docentes en robótica avanzada*. Portal INACAP. <https://portal.inacap.cl/w/inacap-incorpora-21-robots-colaborativos-y-capacita-a-docentes-en-rob%C3%B3tica-avanzada>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2014). *Clasificador chileno de actividades económicas: CIIU4.CL 2012*. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago, Chile. <https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/buenas-practicas/clasificaciones/ciiu/ciiu4/clasificador/ciiu4-cl-2012.pdf>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2026a). *Ocupación y desocupación: Encuesta Nacional de Empleo*. Instituto Nacional de Estadísticas. Consultado el 25 de mayo de 2026, desde <https://www.ine.gob.cl/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/ocupacion-y-desocupacion>

- Instituto Nacional de Estadísticas. (2026b). *Serie anual: indicadores principales de empleo* [Encuesta Nacional de Empleo]. Consultado el 7 de junio de 2026, desde <https://www.ine.gob.cl/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/ocupacion-y-desocupacion>
- International Federation of Robotics. (s.f.-a). *Industrial Robots*. Consultado el 8 de julio de 2026, desde <https://ifr.org/industrial-robots>
- International Federation of Robotics. (s.f.-b). *New colleague: LBR iisy assists plastic finishers during quality inspection*. Consultado el 19 de febrero de 2026, desde <https://ifr.org/case-studies/new-colleague-lbr-iisy-assists-plastic-finishers-during-quality-inspection>
- International Federation of Robotics. (2024a). *Executive summary world robotics 2024: Industrial robots*. International Federation of Robotics. Frankfurt, Germany. Consultado el 15 de julio de 2026, desde https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2024_Industrial_Robots.pdf
- International Federation of Robotics. (2024b). *Welding cobot in use at Stöckl Maschinen- und Gerätebau*. <https://ifr.org/case-studies/welding-cobot-in-use-at-stoeckl-maschinen-und-geraetebau>
- International Federation of Robotics. (2024c, 21 de febrero). *The magic behind Cobots: How Raymath boosted production by 200 % in welding and 600 % in machine tending*. Consultado el 19 de febrero de 2026, desde <https://ifr.org/case-studies/the-magic-behind-cobots-how-raymath-boosted-production-by-200-in-welding-and-600-in-machine-tending>
- International Federation of Robotics. (2024d, 17 de julio). *Reducing footprint with innovative, precise and cost-effective collaborative solution*. Consultado el 19 de febrero de 2026, desde <https://ifr.org/case-studies/reducing-footprint-with-innovative-precise-and-cost-effective-collaborative-solution>
- International Federation of Robotics. (2024e, 4 de diciembre). *Collaborative robots: How robots work alongside humans*. International Federation of Robotics. Consultado el 15 de julio de 2026, desde <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/how-robots-work-alongside-humans>

- International Federation of Robotics. (2025a). *Executive summary world robotics 2025: Industrial robots*. International Federation of Robotics. Frankfurt, Germany. Consultado el 15 de julio de 2026, desde https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2025_Industrial_Robots.pdf
- International Federation of Robotics. (2025b). *World robotics 2025: Industrial robots* (Página oficial del informe, con descripción, contenidos y descargas públicas asociadas). International Federation of Robotics. Frankfurt, Germany. Consultado el 15 de julio de 2026, desde <https://ifr.org/wr-industrial-robots/>
- International Federation of Robotics. (2025c, 25 de septiembre). *Global robot demand in factories doubles over 10 years*. International Federation of Robotics. Consultado el 15 de julio de 2026, desde <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-demand-in-factories-doubles-over-10-years>
- International Federation of Robotics. (2025d, 25 de septiembre). *World robotics 2025: Industrial robots: Press conference presentation*. International Federation of Robotics. Frankfurt, Germany. Consultado el 15 de julio de 2026, desde https://ifr.org/downloads/press_docs/PressConference2025_presentation.pdf
- International Organization for Standardization. (2016). *ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices — Collaborative robots* (Technical Specification). ISO. Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization. (2025). *ISO 10218-1:2025 Robots and robotic devices — Safety requirements, Part 1: industrial robots* (inf. téc.). ISO. Geneva, Switzerland.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., & Suman, R. (2022). Significant applications of Cobots in the field of manufacturing. *Cognitive Robotics*, 2, 222-233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.10.001>
- Keshvarparast, A., Battini, D., Battaia, O., & Pirayesh, A. (2023). Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: Literature review and future research agenda. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-54. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02Papers>

- Ko, P., Prieto, S. A., & Garcia de Soto, B. (2022). Developing a free and open-source automated building exterior crack inspection software for construction and facility managers. <https://arxiv.org/abs/2206.09742>
- Kolapo, P., Schafrik, S., Zhang, H., Nikolaidis, S., & Agioutantis, Z. (2024). Integrating robotic systems in underground roof support machine. *Journal of Industrial Safety*, 1(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jinse.2024.100002>
- Koreis, J., & Klumpp, M. (2025). Walk or ride? an empirical study on cobot-assisted traveling in warehouse 5.0 picker-to-parts order picking systems. *IFAC-PapersOnLine*, 59(10), 2195-2200. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.369>
- Koreis, J., Loske, D., & Klumpp, M. (2025). Together, we travel: Empirical insights on human-robot collaborative order picking for retail warehousing. *The International Journal of Logistics Management*, 36(1), 1-20. <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2023-0127>
- Lai, T.-J., Heggie, R., Kamaruzaman, H.-F., Bouttell, J., & Boyd, K. (2025). Economic Evaluations of Robotic-Assisted Surgery: Methods, Challenges and Opportunities. *Applied Health Economics and Health Policy*, 23(1), 35-49. <https://doi.org/10.1007/s40258-024-00920-1>
- Liang, C.-J., Wang, X., Kamat, V. R., & Menassa, C. C. (2021). Human-robot collaboration in construction: Classification and research trends. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(10), 03121006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002154](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002154)
- Lim, Z. Q., Shah, K. W., & Gupta, M. (2024). Autonomous mobile robots inclusive building design for facilities management: Comprehensive prisma review. *Buildings*, 14(11), 3615. <https://doi.org/10.3390/buildings14113615>
- Liu, H., Jiang, C., Chen, J., Li, H., & Chen, Y. (2024). Research advances in marine aquaculture net-cleaning robots. *Sensors*, 24(23), 7555. <https://doi.org/10.3390/s24237555>
- López-Barajas, S., Sanz, P. J., Marín-Prades, R., Gómez-Espinosa, A., González-García, J., & Echagüe, J. (2024). Inspection operations and hole detection in fish net cages through a hybrid underwater intervention system using deep learning techniques. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 80. <https://doi.org/10.3390/jmse12010080>

- Mahalingam, D., Patankar, A., Phi, K., Chakraborty, N., McGann, R., & Ramakrishnan, I. V. (2024). Containerized vertical farming using cobots. *2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 17897-17903. <https://doi.org/10.1109/ICRA57147.2024.10609985>
- Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E. G. G., Faccio, M., & Rosati, G. (2019). Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review. *Robotics*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/robotics8040100>
- McBride, K., Steffens, D., Stanislaus, C., Solomon, M., Anderson, T., Thanigasalam, R., Leslie, S., & Bannon, P. G. (2021). Detailed Cost of Robotic-Assisted Surgery in the Australian Public Health Sector: From Implementation to a Multi-Specialty Caseload. *BMC Health Services Research*, 21(1), 108. <https://doi.org/10.1186/s12913-021-06105-z>
- Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. (2025a, noviembre). *Universidad de Concepción y Siderúrgica Huachipato se adjudican primer Centro de Tecnología Avanzada e Industria 4.0 en la Región del Biobío*. Gobierno de Chile. <https://www.economia.gob.cl/2025/11/18/universidad-de-concepcion-y-siderurgica-huachipato-se-adjudican-primer-centro-de-tecnologia-avanzada-e-industria-4-0-en-la-region-del-biobio.htm>
- Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. (2025b, 23 de diciembre). *Futuro de la Manufactura en Chile*. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. Santiago, Chile. Consultado el 14 de julio de 2026, desde <https://www.economia.gob.cl/wp-content/uploads/2025/12/futuro-de-la-manufactura-en-chile-231225.pdf>
- Ministerio de Salud. (2000, abril). *Decreto 594: Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=167766>
- Ministerio del Trabajo y Previsión Social. (1968, febrero). *Ley 16744: Establece normas sobre accidentes del trabajo y enfermedades profesionales*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=28650>

- Montini, E., Daniele, F., Agbomemewa, L., Confalonieri, M., Cutrona, V., Bettoni, A., Rocco, P., & Ferrario, A. (2024). Collaborative Robotics: A Survey From Literature and Practitioners Perspectives. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110, Artículo 117. <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02141-z>
- Naciones Unidas, Fondo Monetario Internacional, Banco Mundial, OCDE & Eurostat. (2008). *Sistema de Cuentas Nacionales 2008* (inf. téc.). Naciones Unidas. Nueva York, Estados Unidos. <https://unstats.un.org/unsd/nationalaccount/docs/SNA2008Spanish.pdf>
- Ng, A. P., Sanaiha, Y., Bakhtiyar, S. S., Ebrahimian, S., Branche, C., & Benharash, P. (2023). National analysis of cost disparities in robotic-assisted versus laparoscopic abdominal operations. *Surgery*, 173(6), 1340-1345. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2023.02.016>
- OCDE. (2019). *Determinants and impact of automation: An analysis of robots' adoption in OECD countries* (inf. téc.). Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. París, Francia. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/02/determinants-and-impact-of-automation_9d12b9dd/ef425cb0-en.pdf
- Osei, R., Frimpong, S., & Venkat, A. (2025). Human-machine collaboration in mining: A critical review of emerging frontiers of intelligence systems in the mining industry. *The Extractive Industries and Society*, 23, 101746. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101746>
- Overrein, M. M., Tinn, P., Aldridge, D., Johnsen, G., & Fragoso, G. M. (2024). Biomass estimations of cultivated kelp using underwater rgb images from a mini-rov and computer vision approaches. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1324075. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1324075>
- Pasparakis, A., de Vries, J., & De Koster, R. (2026). In control or under control? human-robot collaboration in warehouse order picking. *Logistics Research*, 19(1), 89-113. <https://doi.org/10.1108/LORE-03-2025-0028>
- Peng, C., Vougioukas, S. G., Slaughter, D. C., Fei, Z., & Arikapudi, R. (2022). A strawberry harvest-aiding system with crop-transport collaborative robots: Design, development, and field evaluation. *Journal of Field Robotics*, 39(8), 1231-1257. <https://doi.org/10.1002/rob.22106>

- Peshkin, J. E., Michael A. y Colgate. (1999). Cobots. *Industrial Robot: An International Journal*, 26(5), 335-341. <https://doi.org/10.1108/01439919910283722>
- Pietrantoni, L., Favilla, M., Fraboni, F., Mazzoni, E., Morandini, S., Benvenuti, M., & De Angelis, M. (2024). Integrating collaborative robots in manufacturing, logistics, and agriculture: Expert perspectives on technical, safety, and human factors. *Frontiers in Robotics and AI*, 11, 1342130. <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1342130>
- Pittman, J., Loveridge, A., Schilk, B., & Daskus, E. (2024). Integrating collaborative robots into a complex hospital setting: A qualitative descriptive study. *Delaware Journal of Public Health*, 10(1), 54-62. <https://doi.org/10.32481/djph.2024.03.12>
- Polonara, M., Romagnoli, A., Biancini, G., & Carbonari, L. (2024). Introduction of Collaborative Robotics in the Production of Automotive Parts: A Case Study. *Machines*, 12(3), 196. <https://doi.org/10.3390/machines12030196>
- Puttero, S., Verna, E., Genta, G., & Galetto, M. (2026). Collaborative robots for quality control: An overview of recent studies and emerging trends. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 37, 1345-1381. <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02600-w>
- Quenehen, A., Pocachard, J., & Klement, N. (2019). Process optimisation using collaborative robots: Comparative case study. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 60-65. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.131>
- Rahman, S. M. M. (2024). Cobotics: The evolving roles and prospects of next-generation collaborative robots in Industry 5.0. *Journal of Robotics*, 2024, 2918089. <https://doi.org/10.1155/2024/2918089>
- Rainer, J., Peretz-Andersson, E., & Hendriksen, K. (2025). How robotics is shaping digital logistics and supply chain management: An ongoing call for research. *Journal of Business Logistics*, 46(1), e70005. <https://doi.org/10.1111/jbl.70005>
- Ramadurai, S., & Jeong, H. (2022). Effect of human involvement on work performance and fluency in human-robot collaboration for recycling. <https://arxiv.org/abs/2201.07990>

- Realyvásquez-Vargas, A., Arredondo-Soto, K. C., García-Alcaraz, J. L., Márquez-Lobato, B. Y., & Cruz-García, J. (2019). Introduction and configuration of a collaborative robot in an assembly task as a means to decrease occupational risks and increase efficiency in a manufacturing company. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 315-328. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.015>
- Renteria, A., & Alvarez-de-los-Mozos, E. (2020). Human-robot collaboration as a new paradigm in circular economy for waste management. *Procedia Manufacturing*, 38, 375-382. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.048>
- Román Ibáñez, V., Pujol, F. A., García Ortega, S., & Sanz Perpiñán, J. M. (2021). Collaborative robotics in wire harnesses spot taping process. *Computers in Industry*, 125, 103370. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103370>
- Ronzoni, M., Accorsi, R., Botti, L., & Manzini, R. (2021). A Support-Design Framework for Cooperative Robots Systems in Labor-Intensive Manufacturing Processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 646-657. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.008>
- Ruiz-del-Solar, J. (2025). The road to the mine of the future: Autonomous collaborative mining. *Mining*, 5(2), 25. <https://doi.org/10.3390/mining5020025>
- Sadri, H., Fung-Kee-Fung, M., Shayegan, B., Garneau, P. Y., & Pezeshki, P. (2023). A Systematic Review of Full Economic Evaluations of Robotic-Assisted Surgery in Thoracic and Abdominopelvic Procedures. *Journal of Robotic Surgery*, 17, 2671-2685. <https://doi.org/10.1007/s11701-023-01731-7>
- Salunkhe, O., Stenseth, O., Åkerman, M., Berglund, Å. F., & Alveflo, P. A. (2019). Assembly 4.0: Wheel hub nut assembly using a cobot. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1632-1637. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.434>
- Sawicki, B., Düking, P., Placzek, G., Masur, L., Dörrie, R., Schwerdtner, P., & Kloft, H. (2026). Human–robot collaboration in digital fabrication with concrete: Quantifying productivity and psychophysiological strain of human workers. *Construction Robotics*, 10(4). <https://doi.org/10.1007/s41693-025-00173-x>

- Servicio de Impuestos Internos. (2025a). *Códigos de actividad económica*. Servicio de Impuestos Internos. Consultado el 7 de julio de 2026, desde https://www.sii.cl/ayudas/ayudas_por_servicios/1956-codigos-1959.html
- Servicio de Impuestos Internos. (2025b). Estadísticas de empresas por tamaño según ventas. %5Curl%7Bhttps://www.sii.cl/preguntas_frecuentes/factura_electronica/001_003_6503.htm%7D
- Servicio de Impuestos Internos. (2025c). Número de empresas por tramo de ventas y actividad económica [Base de datos estadística. Consultado el 12 de julio de 2026]. %5Curl%7Bhttps://www.sii.cl/sobre_el_sii/empresas/PUB_TRAM5_RUBR.xlsb%7D
- Servicio de Impuestos Internos. (2026). *Valores de la Unidad de Fomento para 2026*. Consultado el 14 de julio de 2026, desde https://www.sii.cl/valores_y_fechas/uf/uf2026.htm
- Servicio Nacional de Aduanas. (s.f.). *Base de datos dinámicas de exportaciones* [Recurso web dinámico con información actualizable de operaciones de exportación]. Servicio Nacional de Aduanas. Consultado el 28 de mayo de 2026, desde <https://www.aduana.cl/base-de-datos-dinamicas-de-exportaciones/aduana/2020-11-19/151830.html>
- Sitompul, T. A. (2022a). Human-machine interface for remote crane operation: A review. *Multimodal Technologies and Interaction*, 6(6), 45. <https://doi.org/10.3390/mti6060045>
- Sitompul, T. A. (2022b). The impacts of different work locations and levels of automation on crane operators' experiences: A study in a container terminal in indonesia. *Proceedings of the 34th Australian Conference on Human-Computer Interaction*, 1-6. <https://doi.org/10.1145/3572921.3572941>
- Srinivas, S., & Yu, S. (2022). Collaborative order picking with multiple pickers and robots: Integrated approach for order batching, sequencing and picker-robot routing. *International Journal of Production Economics*, 254, 108634. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108634>
- Su, Y., Wang, J., Shou, W., Wu, P., Wu, C., & Xu, S. (2026). Intentions prediction for human-robot collaboration in utility tunnel maintenance. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 33(15), 1-21. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2024-1156>

- Superintendencia de Seguridad Social. (2025a). *Estadísticas de accidentabilidad 2024*. Superintendencia de Seguridad Social. Consultado el 8 de junio de 2026, desde https://www.suseso.cl/607/articles-755198_archivo_01.pdf
- Superintendencia de Seguridad Social. (2025b). *Informe anual de seguridad y salud en el trabajo 2024*. Superintendencia de Seguridad Social. Consultado el 7 de junio de 2026, desde https://www.suseso.cl/605/articles-755195_recurso_1.pdf
- Superintendencia de Seguridad Social. (s.f.). *Compendio de Normas del Seguro Social de Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales: Código del Trabajo, artículo 184*. Gobierno de Chile. Consultado el 19 de marzo de 2026, desde <https://www.suseso.cl/613/w3-propertyvalue-69914.html>
- Taesi, C., Aggogeri, F., & Pellegrini, N. (2023). COBOT applications: Recent advances and challenges. *Robotics*, 12(3), 79. <https://doi.org/10.3390/robotics12030079>
- Tampier, C., Mascaró, M., & Ruiz-del-Solar, J. (2021). Autonomous loading system for load-haul-dump (lhd) machines used in underground mining. *Applied Sciences*, 11(18), 8718. <https://doi.org/10.3390/app11188718>
- Tandon, A., Stührenberg, J., Dragos, K., Mohite, I., & Smarsly, K. (2025). Bim-based human-robot collaboration for building inspections using mixed reality. *Proceedings of the European Conference on Computing in Construction*. <https://doi.org/10.35490/EC3.2025.375>
- Teradyne, Inc. (2026, 27 de marzo). *Annual report to shareholders 2025*. Teradyne, Inc. North Reading, Massachusetts. Consultado el 15 de julio de 2026, desde <https://investors.teradyne.com/sec-filings/all-sec-filings/content/0001193125-26-127510/0001193125-26-127510.pdf>
- Terreran, M., Gottardi, A., Nicola, G., Zielinski, D., Frommel, C., Rehm, M., Sabban, J., Salemi, G., Christ, D., Eitzinger, C., Ghidoni, S., & Villagrossi, E. (2026). A Human-Robot Collaborative Framework for Draping of Advanced Composite Materials. *Journal of Manufacturing Systems*, 85, 455-472. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2026.01.018>

- Țîțu, A. M., Gusan, V., Dragomir, M., Pop, A. B., & Țîțu, Ș. (2024). Cost Calculation and Deployment Strategies for Collaborative Robots in Production Lines: An Innovative and Sustainable Perspective in Knowledge-Based Organizations. *Sustainability*, 16(13), 5292. <https://doi.org/10.3390/su16135292>
- Tziolas, E., Karapatzak, E., Kalathas, I., Karampatea, A., Grigoropoulos, A., Bajoub, A., Pachidis, T., & Kaburlasos, V. G. (2023). Assessing the Economic Performance of Multipurpose Collaborative Robots toward Skillful and Sustainable Viticultural Practices. *Sustainability*, 15(4), 3866. <https://doi.org/10.3390/su15043866>
- Universal Robots. (s.f.). *Sanding Cobot delivers 40% increase in throughput (Andrew Pearce Bowls)*. Consultado el 19 de febrero de 2026, desde <https://www.universal-robots.com/case-stories/andrew-pearce-bowls/>
- Universidad de Concepción. (2025, 19 de noviembre). *UdeC junto a Huachipato y UBB desarrollarán Centro Tecnológico de Manufactura Avanzada e Industria 4.0 para el Biobío*. Noticias UdeC. Consultado el 14 de julio de 2026, desde <https://noticias.udec.cl/udec-junto-a-huachipato-y-ubb-desarrollaran-centro-tecnologico-de-manufactura-avanzada-e-industria-4-0-para-el-biobio/>
- Vasconez, J. P., Kantor, G. A., & Auat Cheein, F. A. (2019). Human-robot interaction in agriculture: A survey and current challenges. *Biosystems Engineering*, 179, 35-48. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.12.005>
- Vasileiou, M., Manos, N., & Kavallieratou, E. (2023). Mura: A multipurpose underwater robotic arm mounted on kalypso uuv in aquaculture. *Marine Systems & Ocean Technology*, 18, 111-123. <https://doi.org/10.1007/s40868-023-00129-2>
- Vollenberg, C., Hackl, J., Matthies, B., & Coners, A. (2024). Acceptance of rpa in public sector institutions. *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce*, 34(4), 400-418. <https://doi.org/10.1080/10919392.2024.2365446>

- Wang, X., Yu, H., McGee, W., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2024). Enabling building information model-driven human-robot collaborative construction workflows with closed-loop digital twins. *Computers in Industry*, 161, 104112. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104112>
- Woo, H., LeTendre, G. K., Pham-Shouse, T., & Xiong, Y. (2021). The use of social robots in classrooms: A review of field-based studies. *Educational Research Review*, 33, 100388. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2021.100388>
- Wu, M., Lin, J.-R., & Zhang, X.-H. (2022). How human-robot collaboration impacts construction productivity: An agent-based multi-fidelity modeling approach. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101589. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101589>
- Xe Corporation. (2026). *Conversor de divisas de peso chileno a dólar estadounidense* [Tipo de cambio medio de mercado utilizado en el análisis: 1 USD = 922,21 CLP al 1 de julio de 2026]. Consultado el 1 de julio de 2026, desde <https://www.xe.com/currencyconverter/convert/?Amount=1&From=CLP&To=USD>
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Yeom, D.-J., Kim, J.-H., Kim, J.-S., & Kim, Y. S. (2022). Life cycle cost analysis of a built-in guide-type robot for cleaning the facade of high-rise buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 21(5), 1736-1753. <https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2060984>
- Zahra, S. A., & George, G. (2002). Absorptive Capacity: A Review, Reconceptualization, and Extension. *Academy of Management Review*, 27(2), 185-203. <https://doi.org/10.2307/4134351>
- Zhang, T., Yang, Y., Liu, Y., Liu, C., Zhao, R., Li, D., & Shi, C. (2024). Fully automatic system for fish biomass estimation based on deep neural network. *Ecological Informatics*, 79, 102399. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102399>



Zhang, Y. J., Liu, L., Huang, N., Radwin, R. G., & Li, J. (2021). From manual operation to collaborative robot assembly: An integrated model of productivity and ergonomic performance. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 895-902. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3052427>