

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Estudio técnico económico de la implementación de visión artificial en proceso salmonero

*Memoria de titulación para optar al Título de Ingeniero de Ejecución en Control e
instrumentación Industrial.*

Autor:

Hector Martinez Gonzalez

Profesor guía:

Felipe Benavides Pantoja



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: ESTUDIO TÉCNICO ECONOMICO DE LA IMPLEMENTACION DE VISION ARTIFICIAL EN P. S.

Nombre del candidato(a): HÉCTOR ENRIQUE MARTÍNEZ GONZÁLEZ

Carrera / Grado: ING. CONTROL E INSTRUMENTACION INDUSTRIAL

Campus: SENE CONCEPCION Departamento: ELECTRONICA E INFORMÁTICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Felipe Benavides Pantoja, 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)

☒ 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 periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

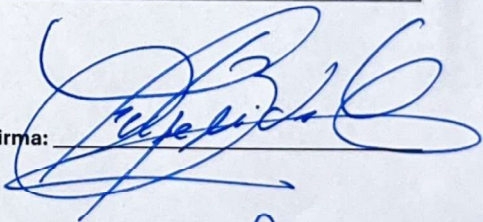
☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

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

4.- FIRMAS

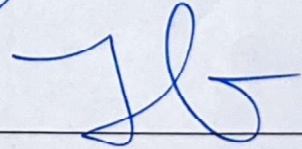
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 5-06-26

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 5 junio 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.

INDICE CAPITULOS

Contenido

INDICE CAPITULOS.....	1
INDICE ILUSTRACIONES	8
RESUMEN	9
AGRADECIMIENTOS.....	11
INTRODUCCION.....	12
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
1 CAPÍTULO 1 – ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO.....	15
1.1 Industria y Proceso Salmonero	15
1.1.1 Qué es el salmón.....	15
1.1.2 El negocio del salmón a nivel mundial y nacional	16
1.1.3 Industria del salmón en Chile	17
1.1.4 Proceso industrial del salmón.....	18
1.1.5 Consumidores y mercados.....	19
1.1.6 Estándares y control de calidad	20
1.1.7 Normas internacionales	21
1.1.8 Conclusión del subcapítulo.....	21
1.2 Visión Artificial Industrial.....	22
1.2.1 Definición y principio de funcionamiento.....	22
1.2.2 Tipos de sistemas de visión artificial.....	23
1.2.3 Características técnicas generales.....	24
1.2.4 Evolución histórica y tendencias	24
1.2.5 Principales fabricantes.....	25
1.2.6 OMRON como fabricante	26
1.2.7 Modelos OMRON	26
1.2.8 Conclusión del subcapítulo.....	27
1.3 Conclusión del capítulo	27
2 CAPÍTULO 2 – DIAGNÓSTICO DEL PROCESO PRODUCTIVO.....	28

2.1	Situación actual del control de calidad manual	28
2.1.1	Limitaciones técnicas del control visual manual en línea	29
2.1.2	Tipos de error y su impacto directo en la calidad.....	29
2.2	Identificación de debilidades y problemas operativos.....	30
2.2.1	Clasificación de debilidades en cinco categorías operacionales	31
2.2.2	Efecto en indicadores del proceso (KPIs).....	31
2.3	Variables críticas del proceso	32
2.3.1	Definición operativa de variable crítica en inspección visual	33
2.3.2	Consideraciones técnicas para inspección de variables visuales.....	33
2.3.3	Prioridad por riesgo (calidad vs inocuidad).....	33
2.4	Brechas tecnológicas detectadas.....	34
2.4.1	Qué implica cerrar la brecha tecnológica	35
2.4.2	Resultado esperado de la automatización.....	35
2.5	Puntos potenciales para aplicar visión artificial	36
2.5.1	Criterios técnicos usados para seleccionar puntos de instalación.....	37
2.6	Conclusión del diagnóstico.....	38
3	CAPÍTULO 3 – PUNTOS DE INSTALACIÓN, IMPACTO Y BENEFICIOS.....	39
3.1	Identificación de zonas del proceso.....	39
3.1.1	Justificación técnica de la priorización de zonas.....	40
3.1.2	Matriz simple de impacto vs complejidad (criterio de estudio)	40
3.2	Evaluación técnica de aplicabilidad	41
3.3	Justificación técnica de cada punto	42
3.3.1	Post Despinado	42
3.3.2	Recorte y limpieza superficial	44
3.3.3	Clasificación	45
3.3.4	Empaque y etiquetado final	46
3.4	Impacto operativo esperado.....	47
3.4.1	Indicadores propuestos para medir el impacto (KPIs).....	48
3.5	Impacto económico estimado	49
3.5.1	Costos actuales (proceso manual).....	49
3.5.2	Costos con sistema de visión artificial	49

3.5.3	Ahorros estimados	49
3.5.4	Metodología de estimación económica utilizada.....	50
3.6	Beneficios estratégicos	51
3.7	Conclusión del capítulo	51
4	CAPÍTULO 4 – DESARROLLO TÉCNICO DEL SISTEMA	52
4.1	Arquitectura general del sistema OMRON	52
4.1.1	Requerimientos de infraestructura y condiciones de instalación.....	52
4.1.2	Consideraciones de higiene y diseño para ambiente alimentario	53
4.1.3	Enfoque de operación “fail-safe”	54
4.2	Flujo funcional del sistema.....	55
4.2.1	Presupuesto de tiempos y sincronización con la cinta transportadora.....	56
4.2.2	Cálculo del retardo cámara–actuador y ventana de rechazo.....	57
4.2.3	Lógica de manejo de excepciones (producto inválido / imagen inválida) ...	58
4.3	Entradas y salidas digitales.....	59
4.3.1	Tabla propuesta de señales digitales	60
4.3.2	Recomendaciones de cableado y buenas prácticas.....	60
4.4	Protocolos de comunicación industrial.....	61
4.4.1	Criterios de selección de protocolo (PROFINET vs Ethernet/IP vs Modbus TCP) 62	
4.4.2	Segmentación de red y consideraciones de ciberseguridad OT	62
4.4.3	Sincronización de tiempo y trazabilidad por eventos	62
4.5	Integración con PLC, SCADA y HMI.....	63
4.5.1	Integración con PLC.....	63
4.5.2	Integración con HMI	63
4.5.3	Integración con SCADA.....	63
4.5.4	Estructura mínima de variables (tags) para operación y análisis.....	64
4.5.5	Pantallas HMI recomendadas	65
4.6	Seguridad eléctrica, protecciones y mantenimiento	66
4.6.1	Seguridad eléctrica	66
4.6.2	Protecciones mecánicas	66
4.6.3	Mantenimiento preventivo.....	66

4.6.4	Plan de mantenimiento preventivo	67
4.6.5	Repuestos mínimos recomendados.....	67
4.6.6	Medidas básicas de seguridad eléctrica	67
4.7	Diagramas eléctricos y de comunicación	68
4.7.1	Diagrama eléctrico general.....	68
4.7.2	Diagrama de comunicación	69
4.7.3	Sincronización	69
4.8	Conclusión técnica del capítulo.....	70
5	CAPÍTULO 5 – AMPLIACIONES Y/O MEDIDAS DE CONTROL.....	71
5.1	Introducción.....	71
5.2	Tipos de medidas de control	71
5.2.1	Balizas luminosas y alarmas acústicas	72
5.2.2	Rechazo neumático automático.....	73
5.2.3	Brazos robóticos o manipuladores eléctricos	74
5.2.4	Cintas secundarias de rechazo	75
5.3	Integración con el sistema de visión.....	75
5.3.1	Interlocks y condiciones de habilitación del rechazo automático	76
5.4	Impacto operativo	77
5.5	Recomendaciones de implementación.....	78
5.6	Proyección futura.....	79
5.7	Conclusión del capítulo	79
6	CAPÍTULO 6 – SELECCIÓN DE CÁMARA Y COMPONENTES TÉCNICOS	80
6.1	Criterios de selección.....	80
6.1.1	Criterios cuantificables recomendados.....	81
6.1.2	Resolución mínima efectiva (px/mm) y defecto mínimo detectable.....	82
6.2	Comparativa técnica entre modelos OMRON.....	83
6.3	Evaluación ponderada y modelo seleccionado	84
6.3.1	Propuesta de matriz ponderada.....	85
6.4	Características técnicas del modelo seleccionado (OMRON FHV7).....	86
6.5	Integración eléctrica y de comunicación	87
6.6	Software Sysmac Studio / FH Vision Editor	87

6.7	Consideraciones ópticas y de montaje.....	88
6.8	Conclusión de la selección técnica	89
7	CAPÍTULO 7 – EVALUACIÓN TÉCNICO–ECONÓMICA	90
7.1	Introducción.....	90
7.2	Análisis técnico de factibilidad.....	91
7.2.1	Condiciones del entorno industrial	91
7.2.2	Infraestructura eléctrica y de control	92
7.2.3	Espacio físico y montaje.....	92
7.2.4	Mantenimiento y operación.....	92
7.2.5	Conclusión técnica.....	92
7.3	Costos de inversión, instalación y mantenimiento	93
7.3.1	Inversión inicial – Equipos y materiales.....	93
7.3.2	Instalación, configuración y capacitación	94
7.3.3	Costos de mantenimiento anual.....	94
7.3.4	Inversión total	94
7.3.5	Desglose sugerido de CAPEX.....	95
7.3.6	Costos operacionales (OPEX) considerados	95
7.4	Beneficios operacionales y productivos	96
7.4.1	Ahorro en mano de obra	96
7.4.2	Reducción de reprocesos y desperdicios	97
7.4.3	Mejora en productividad.....	98
7.4.4	Cumplimiento normativo y trazabilidad.....	98
7.4.5	Beneficios intangibles.....	98
7.5	Flujo de caja y evaluación económica.....	99
7.5.1	Supuestos principales del modelo financiero	99
7.5.2	Supuestos del modelo financiero.....	100
7.5.3	Flujo de caja proyectado.....	100
7.5.4	Tasa Interna de Retorno (TIR).....	101
7.5.5	Período de Recuperación de la Inversión (Payback).....	101
7.6	Análisis cualitativo de viabilidad	102
7.6.1	Viabilidad técnica	102

7.6.2	Viabilidad económica	102
7.6.3	Viabilidad operativa.....	102
7.6.4	Viabilidad ambiental.....	102
7.6.5	Riesgos principales y medidas de mitigación.....	103
7.6.6	Limitaciones del estudio.....	103
7.7	Conclusión general del análisis técnico–económico	104
8	CAPÍTULO 8 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
8.1	Introducción.....	105
8.2	Cumplimiento de los objetivos.....	106
8.3	Conclusiones técnicas.....	107
8.3.1	Diagnóstico del proceso productivo	107
8.3.2	Selección tecnológica	107
8.3.3	Desarrollo técnico e integración.....	108
8.3.4	Fiabilidad operativa.....	108
8.4	Conclusiones económicas.....	109
8.4.1	Inversión y costos operativos	109
8.4.2	Ahorros y beneficios económicos.....	109
8.4.3	Indicadores financieros.....	109
8.4.4	Conclusión económica.....	109
8.5	Impactos y beneficios estratégicos	109
8.5.1	Productividad y eficiencia	109
8.5.2	Calidad y trazabilidad.....	110
8.5.3	Seguridad laboral.....	110
8.5.4	Sostenibilidad ambiental.....	110
8.5.5	Posicionamiento tecnológico.....	110
8.6	Recomendaciones	111
8.6.1	Implementación progresiva	111
8.6.2	Estándares y calibración	111
8.6.3	Capacitación y soporte técnico	111
8.6.4	Integración de medidas de control.....	111
8.6.5	Monitoreo y mejora continua	111

8.6.6	Validación en terreno y estrategia de puesta en marcha	111
8.7	Proyecciones futuras.....	113
8.7.1	Inteligencia artificial avanzada.....	113
8.7.2	Visión 3D y espectral.....	113
8.7.3	Robótica industrial colaborativa.....	113
8.7.4	Conectividad y análisis en la nube	113
8.7.5	Expansión multisectorial	113
8.8	Conclusión final.....	114

INDICE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Ejemplo tipos Salmon.....	15
Ilustración 2 Tonelas de exportacion de Salmón	16
Ilustración 3 empresas productoras	17
Ilustración 4 líneas productivas	18
Ilustración 5 ejemplo mal estado	20
Ilustración 6 Ejemplo mancha	20
Ilustración 7 Camara VA en cinta	22
Ilustración 8 2D medición y cuantificación.....	23
Ilustración 9 Fabricantes.....	25
Ilustración 10 Modelo FHV7.....	26
Ilustración 11 Control calidad manual.....	30
Ilustración 12 Retiro de espinas.....	32
Ilustración 13 Maquina Despinadora.....	42
Ilustración 14 Maquina de Recorte.....	44
Ilustración 15 Maquina Clasificadora.....	45
Ilustración 16 Cinta de salida Etiquetado	46
Ilustración 17 Protocolos de Comunicación Industrial.....	61
Ilustración 18 Diagrama Eléctrico general	68
Ilustración 19 4.7.2 Diagrama de comunicación	69
Ilustración 20 Balizas luminosas y alarmas acústicas	72
Ilustración 21 Brazos Robot en línea de alimentos	74
Ilustración 22 Camara VA Omron FHV7	84

RESUMEN

La industria salmonera chilena constituye uno de los sectores productivos más relevantes del país, destacándose por su alta participación en las exportaciones y su creciente incorporación de tecnologías orientadas a mejorar la eficiencia y calidad de sus procesos. En este contexto, el control de calidad durante las etapas de procesamiento del salmón resulta fundamental para asegurar el cumplimiento de estándares internacionales, reducir pérdidas productivas y garantizar la inocuidad del producto final.

El presente trabajo de título desarrolla un **estudio técnico–económico para la implementación de un sistema de visión artificial basado en tecnología OMRON**, orientado al control de calidad en la línea de procesamiento de filetes de salmón. La propuesta considera el análisis del proceso productivo actual, la identificación de puntos críticos donde la inspección automática puede generar mayor impacto y la selección de los equipos y componentes necesarios para su implementación.

A través de esta investigación se evalúan los principios de funcionamiento de los sistemas de visión artificial, sus aplicaciones en la industria alimentaria y las ventajas que ofrecen frente a los métodos tradicionales de inspección manual. Asimismo, se realiza un análisis técnico de los dispositivos propuestos, junto con una evaluación económica que permite estimar la viabilidad de la solución planteada.

Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de sistemas de visión artificial puede mejorar significativamente la detección de defectos, optimizar los procesos de clasificación y reducir la dependencia de la inspección visual humana, contribuyendo a aumentar la eficiencia operativa y la competitividad del sector salmonero.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que estuvieron presentes durante este proceso académico y personal.

Agradezco profundamente a mi familia, a mi madre, por su apoyo incondicional, paciencia y motivación constante durante todos estos años.

Quiero agradecer especialmente al profesor Nelson Vázquez, quien me brindó oportunidades, apoyo y confianza en momentos importantes de mi formación. Su ayuda fue fundamental para poder continuar y finalizar este proceso.

También agradezco a mi profesor guía, Felipe Benavides, y a todos los profesores de la carrera, por los conocimientos y herramientas entregadas a lo largo de mi formación como Ingeniero de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial.

Quiero hacer una mención especial a mi compañero Pablo Barra, quien fue un pilar fundamental durante esta etapa. Gracias a él logré reconectarme con esa parte de mí como estudiante que había ido perdiendo con los años. Entre tareas, certámenes, jornadas de estudio y trabajos en conjunto, me vi reflejado en su esfuerzo, sus ganas de salir adelante y su motivación constante por seguir creciendo. Compartir este proceso con alguien así hizo este camino mucho más cercano, humano y significativo para mí.

Finalmente, agradezco a mis amigos, compañeros y a la Universidad Técnica Federico Santa María, Sede Concepción, por formar parte de una etapa que, pese a las dificultades, logró convertirse en una experiencia de aprendizaje, crecimiento y superación personal.

INTRODUCCION

La creciente demanda global de productos alimentarios de alta calidad ha impulsado a la industria salmonera a adoptar tecnologías avanzadas que permitan mejorar sus procesos productivos y garantizar estándares cada vez más exigentes. En Chile, el salmón representa uno de los principales productos de exportación del sector acuícola, lo que obliga a las empresas del rubro a mantener altos niveles de control de calidad en todas las etapas de procesamiento.

Dentro de estas etapas, el proceso de fileteado y clasificación de salmón constituye un punto crítico, ya que en él se determina la calidad final del producto que será destinado al mercado. Tradicionalmente, la inspección de filetes se ha realizado mediante evaluación visual por parte de operarios, lo que puede generar variabilidad en los resultados debido a factores humanos como fatiga, subjetividad o limitaciones en la detección de ciertos defectos.

En este contexto, los **sistemas de visión artificial** se presentan como una alternativa tecnológica capaz de mejorar significativamente los procesos de inspección y control de calidad. Estas soluciones permiten capturar y analizar imágenes del producto en tiempo real, utilizando algoritmos de procesamiento digital que facilitan la identificación de defectos, irregularidades o contaminantes en los filetes de salmón.

El presente trabajo de título tiene como objetivo desarrollar un **estudio técnico–económico para la implementación de un sistema de visión artificial basado en tecnología OMRON**, orientado a mejorar el control de calidad en una línea de procesamiento de filetes de salmón. Para ello, se analiza el estado actual de la industria y las tecnologías disponibles, se identifican los puntos del proceso donde la implementación del sistema generaría mayor impacto y se propone una solución técnica que integra cámaras industriales, sistemas de iluminación y procesamiento de imágenes.

Finalmente, el estudio incluye una evaluación técnico–económica que permite determinar la factibilidad de implementar esta tecnología en la industria salmonera, considerando aspectos de inversión, beneficios operacionales y potenciales mejoras en la eficiencia productiva.

OBJETIVO GENERAL

Realizar un **estudio técnico-económico** que evalúe la **factibilidad** de implementar un sistema de **visión artificial** OMRON en el proceso de producción de filetes de salmón, identificando oportunidades de mejora en **control de calidad, trazabilidad y eficiencia operativa**.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. **Analizar el proceso productivo del salmón**, identificando sus etapas críticas, debilidades y oportunidades de automatización.
2. **Analizar las características técnicas de la cámara de visión OMRON**, su funcionamiento, herramientas de detección y requerimientos de integración industrial.
3. **Diseñar un modelo conceptual del sistema de visión artificial**, definiendo arquitectura, componentes y flujos de información.
4. **Desarrollar un análisis técnico de viabilidad** respecto de las condiciones del entorno productivo.
5. **Elaborar un análisis económico** que contemple costos de inversión, beneficios esperados y retorno estimado de la implementación.

1 CAPÍTULO 1 – ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

1.1 Industria y Proceso Salmonero

1.1.1 Qué es el salmón

El salmón es un pez anádromo perteneciente a la familia *Salmonidae*, caracterizado por su capacidad de nacer en agua dulce, migrar al mar para su desarrollo y retornar al río de origen para su reproducción. Desde el punto de vista productivo, el cultivo de salmón constituye una de las actividades acuícolas más desarrolladas del mundo, debido a la alta demanda de su carne por su valor nutricional, su sabor y su versatilidad gastronómica.

Entre las principales especies cultivadas se encuentran el **Salmón del Atlántico (*Salmo salar*)**, el **Salmón Coho (*Oncorhynchus kisutch*)** y la **Trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*)**, siendo la primera la más predominante en la industria chilena. Este producto es considerado una fuente de proteínas de alto valor biológico y ácidos grasos omega-3, elementos altamente valorados en el consumo humano por sus beneficios para la salud cardiovascular.

El salmón, por su naturaleza perecedera y por los estándares de calidad exigidos en el comercio internacional, requiere de una cadena productiva altamente controlada y tecnológicamente supervisada, donde la automatización y el aseguramiento de calidad juegan un rol fundamental.

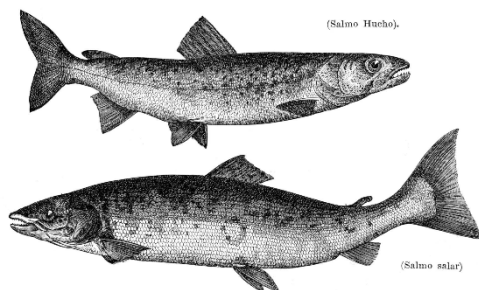


Ilustración 1 Ejemplo tipos Salmon

1.1.2 El negocio del salmón a nivel mundial y nacional

El mercado global del salmón ha mostrado un crecimiento sostenido durante las últimas décadas. Noruega y Chile lideran la producción mundial, representando en conjunto más del 70 % del volumen total. Según datos de *FAO (2024)* y *SalmonChile (2025)*, Chile se consolida como el **segundo productor y exportador mundial de salmón**, solo superado por Noruega.

En Chile, la industria salmonera genera más de **70 000 empleos directos e indirectos** y contribuye con aproximadamente **8 % de las exportaciones nacionales**, ubicándose como el segundo rubro más importante después de la minería del cobre. Los principales mercados de destino son Estados Unidos, Japón, Brasil y la Unión Europea, los cuales imponen exigentes normativas sanitarias y de calidad.

El negocio del salmón se caracteriza por ser intensivo en tecnología y por operar bajo márgenes de rentabilidad estrechos. Por ello, cualquier error en control de calidad, trazabilidad o eficiencia operativa puede traducirse en pérdidas económicas significativas, rechazo de lotes o deterioro de la imagen corporativa frente a compradores internacionales.

TONELADAS EXPORTADAS DE SALMÓN CHILENO A BRASIL
(ENERO-AGOSTO)

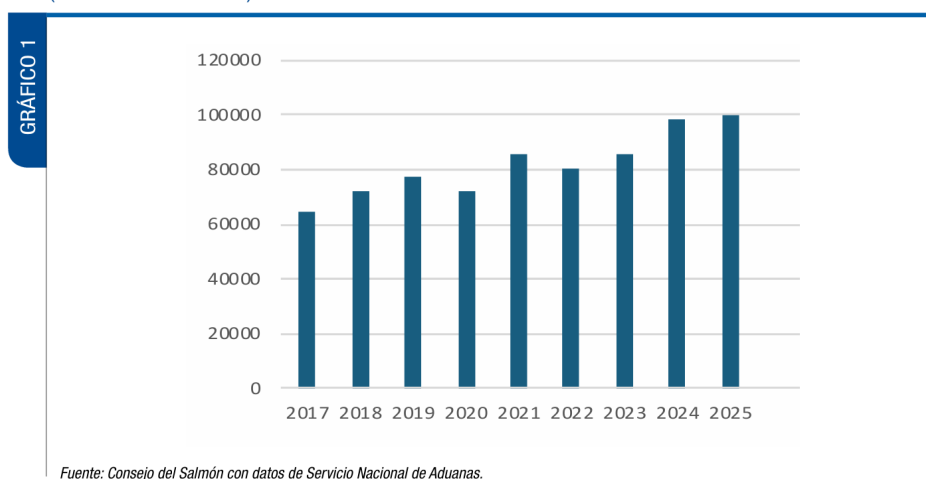


Ilustración 2 Tonelas de exportacion de Salmón

1.1.3 Industria del salmón en Chile

La industria salmonera chilena se concentra principalmente en las regiones de **Los Lagos, Aysén y Magallanes**, zonas que ofrecen condiciones óptimas para el cultivo en agua fría y limpia. En estas regiones se localizan centros de cultivo, plantas de procesamiento, fábricas de alimentos, laboratorios genéticos y redes logísticas de exportación.

Las principales empresas productoras son **AquaChile, Mowi, Cermaq, Salmones Camanchaca, Multiexport Foods y Orizon**, las cuales cuentan con procesos altamente automatizados en etapas como fileteado, pesado, calibrado y envasado. Sin embargo, **la inspección visual de calidad** —relacionada con la detección de defectos superficiales, presencia de contaminantes y verificación estética— sigue siendo en gran parte **manual**, dependiendo de operadores que evalúan visualmente cada filete en cintas transportadoras.

Esta dependencia del juicio humano introduce variabilidad, fatiga visual, errores subjetivos y falta de trazabilidad digital, factores que impactan directamente en la uniformidad del producto final.

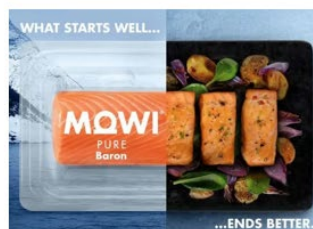


Ilustración 3 empresas productoras

1.1.4 Proceso industrial del salmón

El procesamiento del salmón se realiza en líneas de producción diseñadas para maximizar el rendimiento y mantener la inocuidad del producto. Las principales etapas son las siguientes:

1. **Recepción y eviscerado:** recepción del pez entero y retiro de vísceras en condiciones higiénicas controladas.
2. **Fileteado:** corte automatizado que separa los filetes de la estructura ósea mediante cuchillas programadas.
3. **Despinado:** retiro mecánico de las espinas con equipos automáticos; posteriormente se verifica la limpieza manual o visual.
4. **Recorte:** eliminación de grasa superficial, restos de piel o daños mecánicos.
5. **Clasificación:** separación del producto por peso, tamaño, color y apariencia.
6. **Control de calidad visual:** revisión de defectos, presencia de objetos extraños o contaminación cruzada.
7. **Empaque y etiquetado:** sellado al vacío, impresión de lote y etiquetado.
8. **Congelado y despacho:** conservación a baja temperatura y transporte a destino.

Las etapas de **clasificación** y **control de calidad visual** son las más críticas del proceso productivo, porque cualquier error puede comprometer la aceptación comercial del producto. Justamente por su carácter **repetitivo**, la **exigencia de precisión** y la necesidad de **registros visuales digitales**, son las fases con mayor potencial para implementar **sistemas de visión artificial**.



Ilustración 4 líneas productivas

1.1.5 Consumidores y mercados

El salmón chileno se destina principalmente a mercados de alto poder adquisitivo, como Estados Unidos, Japón y la Unión Europea. Los consumidores de estos destinos asocian el producto con estándares premium, seguridad alimentaria y sostenibilidad ambiental.

Los compradores internacionales evalúan la calidad del salmón considerando factores visuales como el color del filete, la uniformidad de la textura, la ausencia de espinas o restos de piel y el correcto etiquetado. Por esta razón, la **estandarización del control de calidad visual** es un elemento diferenciador que permite acceder a mejores precios de exportación.

1.1.6 Estándares y control de calidad

El control de calidad del salmón se basa en la detección de **defectos visuales**, que pueden clasificarse como:

- Defectos estructurales: cortes irregulares, fracturas, daños por manipulación.
- Defectos de superficie: hematomas, zonas blanquecinas, contaminación con piel o escamas.
- Defectos de color: falta de uniformidad o zonas pálidas.
- Contaminantes externos: restos de guantes, trozos plásticos, espinas sueltas o cuerpos extraños.

Los inspectores humanos suelen realizar la revisión a simple vista, pero su precisión se ve afectada por la iluminación, el cansancio y la velocidad de la cinta. Por lo tanto, existe una necesidad técnica evidente de reemplazar o complementar esta inspección con sistemas automáticos de detección digital.



Ilustración 5 ejemplo mal estado



Ilustración 6 Ejemplo mancha

1.1.7 Normas internacionales

La industria salmonera opera bajo estrictas normativas internacionales de inocuidad alimentaria:

- **HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points):** exige la identificación y control de puntos críticos del proceso.
- **BRC (British Retail Consortium):** norma utilizada por supermercados europeos, que obliga a documentar la trazabilidad completa del producto.
- **ISO 22000:** norma de gestión de inocuidad alimentaria a nivel global.

El cumplimiento de estas normas requiere evidencia objetiva y registros verificables, lo cual puede lograrse mediante sistemas de **visión artificial con registro automático de imágenes** y resultados.

1.1.8 Conclusión del subcapítulo

La industria salmonera chilena posee una estructura productiva madura y tecnológicamente avanzada, pero aún presenta debilidades en el área de inspección visual y trazabilidad. La implementación de tecnologías de **visión artificial industrial** representa una oportunidad estratégica para mejorar la calidad, la eficiencia y el cumplimiento normativo en las plantas procesadoras.

1.2 Visión Artificial Industrial

1.2.1 Definición y principio de funcionamiento

La **visión artificial** o **visión industrial** es una rama de la automatización que utiliza cámaras, óptica, iluminación controlada y software especializado para realizar tareas de inspección, medición y reconocimiento de patrones. El principio básico se compone de cinco etapas:

1. Captura de imagen mediante cámara o sensor óptico.
2. Procesamiento digital de la imagen.
3. Aplicación de algoritmos de análisis (detección de bordes, color, forma, etc.).
4. Comparación con parámetros establecidos.
5. Generación de una respuesta (señal digital de aceptación o rechazo).

En la industria alimentaria, la visión artificial se utiliza para controlar la calidad visual del producto, verificar etiquetas, medir dimensiones y detectar contaminantes.

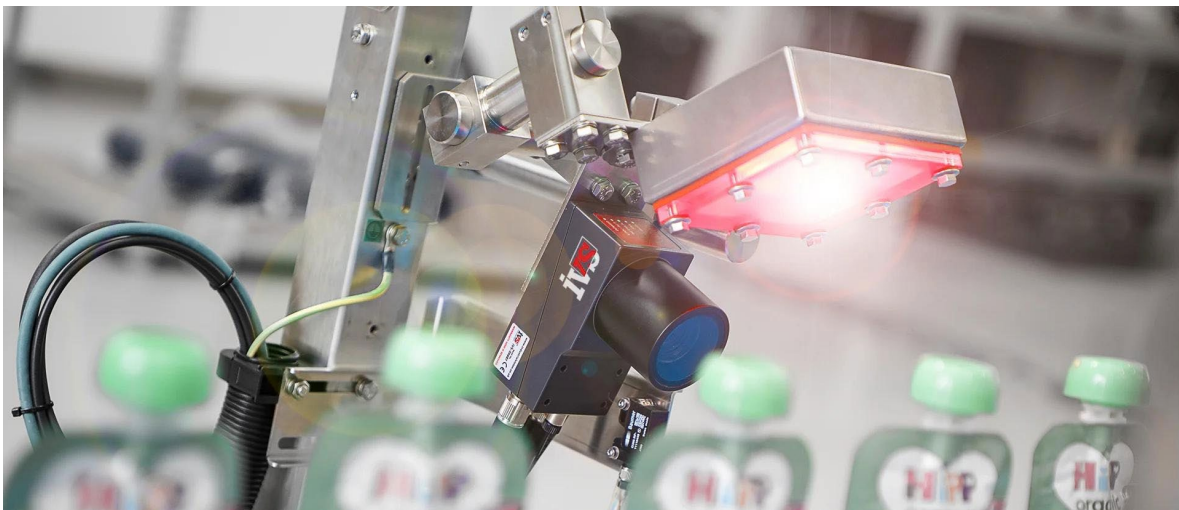


Ilustración 7 Cámara VA en cinta

1.2.2 Tipos de sistemas de visión artificial

- **Sistemas 2D:** capturan imágenes planas y analizan color, forma y textura.
- **Sistemas 3D:** reconstruyen el volumen o perfil del objeto mediante triangulación o láser.
- **Sistemas hiperespectrales:** analizan longitudes de onda para diferenciar materiales o contaminantes invisibles al ojo humano.

Los sistemas 2D son los más utilizados en plantas de alimentos, ya que permiten inspecciones rápidas, con alta repetibilidad y bajo costo de integración.

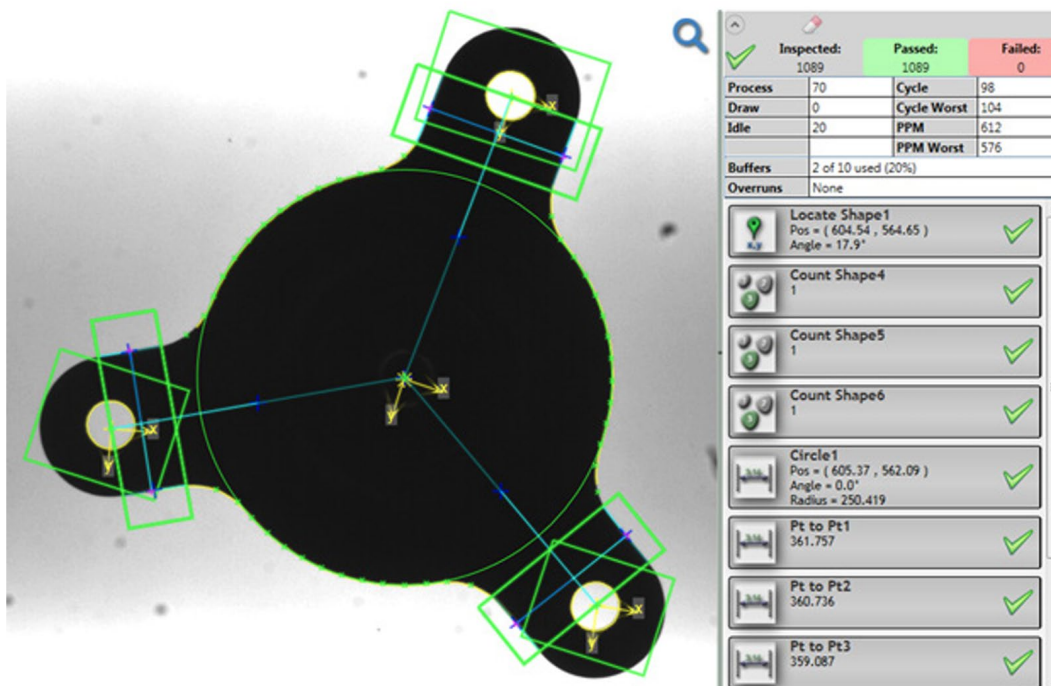


Ilustración 8 2D medición y cuantificación

1.2.3 Características técnicas generales

- **Resolución óptica:** determina el nivel de detalle visible en la imagen.
- **Velocidad de captura (FPS):** número de imágenes procesadas por segundo, debe ajustarse a la velocidad de la cinta transportadora.
- **Tipo de sensor:** CMOS o CCD, con diferencias en sensibilidad y ruido.
- **Iluminación:** LED, difusa o coaxial, según tipo de superficie.
- **Entradas/Salidas digitales:** señales de trigger y rechazo (OK/NG).
- **Protocolos de comunicación:** Ethernet/IP, Modbus TCP, TCP/IP, RS-232.

1.2.4 Evolución histórica y tendencias

Desde los años 1980, la visión artificial evolucionó desde sistemas monocromáticos rígidos a plataformas modulares con capacidad de autoaprendizaje. En la actualidad, los sistemas incorporan **inteligencia artificial (IA)** y **machine learning**, lo que permite clasificar defectos complejos y aprender con cada inspección. La tendencia moderna apunta a la integración de visión artificial con **PLC, SCADA y análisis en la nube (Cloud)**, generando trazabilidad total del proceso.

1.2.5 Principales fabricantes

Entre los principales fabricantes globales destacan:

- **Cognex:** líder en visión 2D de alta velocidad.
- **Keyence:** cámaras integradas compactas con procesadores embebidos.
- **Sick:** visión aplicada a la seguridad industrial.
- **OMRON:** soluciones completas integradas con automatización y control.

COGNEX
Vision for Industry®

KEYENCE

SICK
Sensor Intelligence.

OMRON

Ilustración 9 Fabricantes

1.2.6 OMRON como fabricante

OMRON es una empresa japonesa líder en automatización industrial, especializada en controladores, sensores, seguridad y visión artificial. Su línea de visión se integra completamente con su entorno de software **Sysmac Studio**, permitiendo la comunicación nativa con PLCs y HMIs mediante **Ethernet/IP**. OMRON se destaca por ofrecer **sistemas inteligentes integrados** con iluminación, procesamiento y software de análisis en un mismo dispositivo.

1.2.7 Modelos OMRON

OMRON dispone de varias familias de cámaras industriales:

- **FQ2:** cámara inteligente compacta, ideal para detección de presencia o lectura de códigos.
- **FH:** sistema avanzado de múltiples cámaras, con controlador dedicado y procesamiento paralelo.
- **FHV7:** cámara de última generación con IA integrada, iluminación multicolor y enfoque automático.

La serie **FHV7** es la más apropiada para el control de calidad en alimentos, ya que permite identificar variaciones de color y defectos de superficie en alta velocidad.



Ilustración 10 Modelo FHV7

1.2.8 Conclusión del subcapítulo

La visión artificial industrial ha alcanzado un nivel de madurez que permite su implementación en ambientes exigentes como la industria salmonera. OMRON destaca por su robustez, facilidad de integración y soporte técnico, siendo una alternativa viable para automatizar la inspección visual de filetes.

1.3 Conclusión del capítulo

El presente capítulo permitió contextualizar la industria salmonera y las tecnologías de visión artificial aplicables al control de calidad. Se evidenció que el proceso de inspección manual presenta limitaciones técnicas y operativas, mientras que las soluciones OMRON ofrecen capacidades adecuadas de precisión, trazabilidad y velocidad para integrarse en líneas de producción. De esta forma, se establecen los fundamentos teóricos que sustentan el estudio técnico–económico desarrollado en los capítulos siguientes.

2 CAPÍTULO 2 – DIAGNÓSTICO DEL PROCESO PRODUCTIVO

2.1 Situación actual del control de calidad manual

El proceso de **control de calidad visual en la industria salmonera chilena** se realiza, en la mayoría de las plantas, mediante **inspección manual** llevada a cabo por operarios especializados.

Estos trabajadores observan los filetes que se desplazan sobre cintas transportadoras y detectan, de manera subjetiva, defectos visibles tales como espinas remanentes, daños por manipulación, cambios de color o presencia de cuerpos extraños.

Aunque este método es tradicional y ampliamente implementado, presenta limitaciones importantes:

- **Subjetividad:** los criterios visuales dependen de la experiencia individual del operador, generando variabilidad entre turnos y personas.
- **Fatiga visual:** las largas jornadas frente a una cinta en movimiento reducen la capacidad de detección con el tiempo.
- **Velocidad del proceso:** la inspección manual limita el ritmo de producción, especialmente en líneas de alto rendimiento.
- **Errores de omisión:** los defectos menores o los contaminantes pequeños pueden pasar desapercibidos.
- **Ausencia de trazabilidad digital:** las observaciones no quedan registradas electrónicamente, dificultando el análisis posterior.

2.1.1 Limitaciones técnicas del control visual manual en línea

En una línea industrial, el filete se desplaza de forma continua sobre una cinta transportadora y el tiempo real disponible para inspeccionar cada unidad es limitado. En ese contexto, el control manual queda condicionado por tres restricciones técnicas principales: (1) el tiempo de observación, (2) la variabilidad del producto y (3) el entorno físico del proceso.

Primero, el tiempo de observación se reduce cuando la línea aumenta su velocidad o cuando se acumula producto, lo que obliga al operador a decidir en pocos segundos bajo presión productiva. Segundo, el salmón es un producto natural y presenta variaciones de color, textura, brillo, forma y tamaño entre lotes e incluso dentro del mismo lote, lo que dificulta estandarizar un criterio visual “único”. Tercero, el ambiente de planta suele incluir humedad, superficies mojadas, iluminación no controlada, reflejos sobre el filete y presencia de agua o condensación, lo que reduce la capacidad de distinguir defectos pequeños de manera consistente.

2.1.2 Tipos de error y su impacto directo en la calidad

En inspección manual se observan, en general, dos errores típicos. El primero es el error por omisión (defecto no detectado), donde un contaminante o defecto visual avanza hacia etapas posteriores, aumentando el riesgo de reclamos o incumplimiento. El segundo es el error por exceso (rechazo innecesario), donde producto aceptable se retira o se reprocesa, generando merma y pérdida de rendimiento.

Ambos casos generan impactos operativos: aumento de reprocesos, pérdida de productividad, variabilidad entre turnos, y falta de evidencia objetiva para análisis posterior. Por lo tanto, la limitación no es solo humana, sino también estructural: el control manual no produce datos ni evidencia visual que permita estandarizar, auditar o mejorar el proceso con un enfoque basado en registros.

Estas deficiencias provocan un **riesgo operativo y económico significativo**, ya que los lotes defectuosos pueden avanzar hacia etapas posteriores o incluso llegar al cliente final, afectando la reputación de la marca y generando pérdidas por devoluciones o reprocesos.

2.2 Identificación de debilidades y problemas operativos

Durante la revisión del proceso actual, se identifican **problemas estructurales recurrentes** asociados a la inspección manual y al sistema general de control de calidad:

1. **Dependencia del factor humano:** la precisión del control está directamente ligada a la atención y experiencia de los operadores, lo que genera inconsistencias.
2. **Condiciones de iluminación inadecuadas:** las plantas de proceso operan en ambientes fríos y húmedos, donde la iluminación artificial produce reflejos en los filetes, dificultando la detección de defectos.
3. **Alta rotación de personal:** los operarios requieren capacitación constante y presentan una curva de aprendizaje variable.
4. **Falta de estandarización:** no existen parámetros visuales definidos digitalmente que sirvan como referencia objetiva de calidad.
5. **Ausencia de registro visual:** el proceso carece de evidencia fotográfica o trazabilidad digital, dificultando la auditoría o el control histórico.
6. **Costos indirectos elevados:** las fallas de inspección generan reprocesos, desperdicios y detenciones no planificadas.

En consecuencia, el sistema de inspección manual, aunque funcional, **no cumple con los estándares de precisión y repetibilidad requeridos por las normativas internacionales** de calidad e inocuidad alimentaria.



Ilustración 11 Control calidad manual

2.2.1 Clasificación de debilidades en cinco categorías operacionales

Para analizar de manera ordenada los problemas detectados, se agrupan en cinco categorías:

1. **Factor humano:** variación del criterio entre operadores, diferencias entre turnos, fatiga visual y dependencia de experiencia previa.
2. **Condiciones del entorno:** humedad, agua sobre el producto, brillo superficial, cambios de iluminación y suciedad en superficies o luminarias.
3. **Limitaciones del método:** ausencia de reglas cuantificables, falta de repetibilidad y dificultad para mantener el mismo estándar durante toda la jornada.
4. **Brecha de registro y trazabilidad:** inexistencia de evidencia visual (imágenes) y falta de datos históricos para análisis de tendencias y auditorías.
5. **Impacto económico indirecto:** merma por rechazo innecesario, reproceso por defectos no detectados, y costos asociados a reclamos o desviaciones de calidad.

2.2.2 Efecto en indicadores del proceso (KPIs)

Las debilidades anteriores se reflejan en indicadores típicos de operación:

- **% Reproceso:** aumenta cuando defectos se detectan tarde o se detectan de forma inconsistente.
- **% Merma / Yield:** disminuye cuando se rechaza producto apto o cuando se deben realizar recortes adicionales.
- **Tasa de no conformidad (NG):** varía entre turnos por falta de criterios estandarizados.
- **Eficiencia de línea:** cae cuando se generan acumulaciones, detenciones o inspecciones repetidas.
- **Trazabilidad efectiva:** se debilita al no contar con evidencia objetiva asociada a lotes o unidades.

2.3 Variables críticas del proceso

En el contexto de procesamiento de filetes de salmón, las variables que influyen directamente en la calidad visual son las siguientes:

- **Color del filete:** debe mantenerse homogéneo y dentro de los parámetros establecidos por los estándares comerciales. La coloración se ve afectada por la dieta, el manejo y la oxidación superficial.
- **Textura:** los filetes deben conservar una estructura firme y sin daños mecánicos. Golpes o presiones durante el transporte pueden generar grietas o desgarros.
- **Presencia de espinas remanentes:** la no detección de espinas representa un riesgo crítico de seguridad alimentaria y genera rechazo inmediato en mercados de exportación.
- **Presencia de cuerpos extraños:** se incluyen fragmentos de guantes, trozos plásticos, metales o cualquier residuo no alimentario.
- **Superficie del filete:** la piel, la grasa o los residuos deben estar completamente eliminados.
- **Dimensión y forma:** el filete debe presentar uniformidad para su clasificación y empaque.

El control de estas variables requiere **precisión y velocidad**, condiciones difíciles de mantener de forma constante mediante inspección visual humana.



Ilustración 12 Retiro de espinas

2.3.1 Definición operativa de variable crítica en inspección visual

En este estudio, una variable crítica corresponde a un atributo observable del filete cuya desviación puede afectar la calidad comercial, la inocuidad o la conformidad normativa. Estas variables no solo se describen cualitativamente, sino que también pueden expresarse como criterios medibles mediante visión artificial (por ejemplo, comparación de color por rangos, detección de contorno, identificación de patrones, o presencia/ausencia de elementos).

2.3.2 Consideraciones técnicas para inspección de variables visuales

La inspección visual en productos húmedos presenta desafíos particulares: la presencia de agua produce reflejos y cambios de contraste, y el producto puede moverse o rotar levemente en la cinta. Por ello, al evaluar variables críticas se deben considerar tres aspectos técnicos:

- Estabilidad geométrica: mantener distancia y ángulo de observación constantes.
- Control de iluminación: reducir influencia de luz ambiente y reflejos.
- Criterio de decisión: definir umbrales o reglas consistentes para separar “OK/NG”.

2.3.3 Prioridad por riesgo (calidad vs inocuidad)

No todas las variables críticas tienen el mismo impacto. En general, se distinguen:

- **Variables de inocuidad (más críticas):** cuerpos extraños, espinas remanentes, contaminación visible.
- **Variables de calidad comercial:** color, textura, presentación, forma, uniformidad. Esta clasificación es relevante porque define qué detecciones deben tener mayor severidad en el criterio de aceptación y en los mecanismos de acción (rechazo, reproceso, registro, alerta).

2.4 Brechas tecnológicas detectadas

Del análisis anterior se desprenden las principales brechas tecnológicas que justifican la evaluación de una solución automatizada mediante visión artificial:

Tipo de brecha	Descripción	Consecuencia
Operativa	Limitación del ojo humano para distinguir defectos en condiciones de humedad o reflejo	Errores de detección, reprocesos
Técnica	Ausencia de sensores ópticos o registros digitales de los productos inspeccionados	Falta de trazabilidad y control histórico
Informática	No existe integración con sistemas SCADA o bases de datos	Imposibilidad de análisis de tendencias y estadísticas
Económica	Costos altos por retrabajo y pérdida de materia prima	Disminución de la rentabilidad
Normativa	Dificultad para evidenciar cumplimiento de HACCP y BRC	Riesgo de incumplimiento regulatorio

La presencia de estas brechas hace evidente la necesidad de incorporar tecnologías que permitan **automatizar la inspección visual, registrar imágenes digitalmente y generar señales de control objetivas**, reduciendo la dependencia del factor humano.

2.4.1 Qué implica cerrar la brecha tecnológica

Cerrar las brechas identificadas implica pasar desde un control basado en observación humana a un control basado en evidencia y datos. En términos prácticos, esto requiere:

- Captura consistente de información (imágenes/resultados).
- Reglas de inspección estandarizadas (criterios repetibles).
- Registro y almacenamiento de resultados por lote/turno.
- Capacidad de integración con control industrial (PLC/SCADA) al menos a nivel conceptual.
- Reportabilidad (posibilidad de generar indicadores para auditoría y mejora continua).

2.4.2 Resultado esperado de la automatización

Dado que este trabajo corresponde a un estudio técnico–económico, el resultado esperado no es la implementación, sino la definición clara de cómo una solución de visión artificial puede abordar las brechas: mejorar la repetibilidad del criterio, reducir variabilidad por operador, aportar evidencia digital y habilitar un enfoque de calidad basado en datos.

2.5 Puntos potenciales para aplicar visión artificial

Dentro del flujo productivo del procesamiento de filetes de salmón, se identifican **zonas estratégicas de aplicación** donde la visión artificial puede generar un mayor impacto:

Etapas del proceso	Aplicación sugerida	Objetivo principal
Despinado	Inspección post-máquina despinadora	Verificar eliminación completa de espinas
Recorte	Control de defectos superficiales y grasa residual	Asegurar presentación visual homogénea
Clasificación	Detección de color y tamaño	Automatizar la clasificación por calidad y peso
Empaque final	Verificación de sellado, etiquetas y limpieza del producto	Garantizar cumplimiento de norma BRC

Estas etapas comparten características comunes: flujo continuo, exposición del filete a la vista y necesidad de decisión rápida. Por tanto, representan los puntos ideales para **integrar cámaras industriales** con procesamiento autónomo.

2.5.1 Criterios técnicos usados para seleccionar puntos de instalación

La selección de puntos potenciales de instalación se fundamenta en criterios técnicos y operacionales, entre ellos:

- **Relevancia del defecto:** si el defecto afecta inocuidad o calidad comercial.
- **Posibilidad de corrección:** si aún es posible reprocesar o retirar el producto sin afectar etapas posteriores.
- **Estabilidad del producto:** si el filete presenta orientación y posición relativamente estable sobre la cinta.
- **Condiciones ambientales:** humedad, salpicaduras, limpieza, espacio físico disponible para montaje.
- **Integración conceptual:** posibilidad de actuar ante un NG (rechazo, alerta, registro, segregación).

Estos criterios permiten priorizar zonas donde la visión artificial aporta mayor beneficio con menor complejidad.

2.6 Conclusión del diagnóstico

El diagnóstico general del proceso salmonero evidencia que la inspección visual manual constituye el eslabón más débil dentro del sistema de aseguramiento de calidad. Se identifican deficiencias en precisión, trazabilidad, objetividad y eficiencia, las cuales generan riesgos operativos y económicos significativos.

El análisis permitió establecer los puntos de control más relevantes para la aplicación de visión artificial, los cuales corresponden a las etapas de **despinado, recorte, clasificación y empaque final**.

La incorporación de un sistema de visión artificial permitiría:

- Detectar automáticamente defectos o contaminantes con alta velocidad y exactitud.
- Registrar evidencia fotográfica de cada producto inspeccionado.
- Generar datos estadísticos de calidad y trazabilidad digital.
- Reducir la variabilidad del proceso y los costos por reproceso.

Con base en estos resultados, el siguiente capítulo abordará la **determinación de los puntos de instalación, su impacto operativo y los beneficios esperados**, consolidando el enfoque técnico del proyecto.

3 CAPÍTULO 3 – PUNTOS DE INSTALACIÓN, IMPACTO Y BENEFICIOS

3.1 Identificación de zonas del proceso

El proceso de fileteado y empaque del salmón presenta múltiples etapas donde intervienen equipos automatizados y operadores humanos. No obstante, no todas las zonas presentan las condiciones óptimas para la instalación de sistemas de visión artificial. Para determinar los puntos más adecuados, se analizaron los **factores técnicos, ambientales y operacionales** de cada etapa, tales como: nivel de humedad, iluminación, estabilidad del producto, velocidad de la cinta transportadora, espacio disponible y relevancia del control en la calidad final.

Como resultado del análisis, se identificaron **cuatro zonas prioritarias** para la aplicación de visión artificial:

1. **Zona 1 – Post Despinado:** salida del sistema mecánico de extracción de espinas.
2. **Zona 2 – Recorte y limpieza superficial:** área donde se eliminan grasa o restos visibles.
3. **Zona 3 – Clasificación y calibrado:** etapa donde se agrupan filetes por tamaño y color.
4. **Zona 4 – Empaque y etiquetado final:** punto de control previo al cierre y despacho.

Cada una de estas zonas se caracteriza por su potencial impacto en la calidad del producto y por su accesibilidad para la instalación de cámaras industriales.

3.1.1 Justificación técnica de la priorización de zonas

Las cuatro zonas priorizadas se seleccionan porque representan puntos donde: (1) el producto es visible y evaluable, (2) existe valor operativo en detectar defectos tempranamente, y (3) se puede asociar el resultado de inspección a una decisión de proceso (rechazo, reproceso, segregación o registro). En particular, las zonas posteriores a procesos mecánicos (como despinado) permiten detectar fallas de máquina y evitar que un defecto crítico avance. Por otra parte, el empaque final funciona como última barrera para asegurar conformidad documental, trazabilidad y reducción de riesgos antes del despacho.

3.1.2 Matriz simple de impacto vs complejidad (criterio de estudio)

A nivel de estudio, se propone evaluar cada zona considerando dos ejes:

- **Impacto esperado:** cuánto mejora calidad, inocuidad, trazabilidad y productividad.
- **Complejidad técnica:** dificultad de iluminación, estabilidad del producto, instalación y riesgo ambiental. Esta matriz permite justificar por qué ciertas zonas (post despinado y empaque) suelen tener alta prioridad por su alto impacto y factibilidad relativamente alta.

3.2 Evaluación técnica de aplicabilidad

A continuación, se describen las condiciones técnicas que justifican la instalación de visión artificial en cada una de las zonas seleccionadas.

Zona	Características del Tipo de visión sugerida	Variables a Nivel de inspeccionar	a Nivel de factibilidad
1. Post Despinado	Superficie húmeda, movimiento continuo, iluminación media.	Visión 2D color alta resolución	Detección de espinas residuales o defectos en carne Alta
2. Recorte y limpieza	Filete estacionario o a baja velocidad, iluminación difusa.	Visión 2D RGB	Detección de grasa, residuos o cortes irregulares Alta
3. Clasificación	Cinta de alta velocidad, condiciones estables, color controlado.	Visión 2D color + herramienta de análisis de forma	Clasificación por tonalidad, tamaño o forma Media-Alta
4. Empaque final	Superficie limpia, entorno seco, iluminación controlada.	Visión 2D OCR / Code reading	Lectura de etiquetas, sellado y presencia de logos Alta

Conclusión técnica: las zonas más críticas en términos de impacto sobre la calidad final son **Post Despinado** y **Recorte**, mientras que **Clasificación** y **Empaque** aportan mayor valor agregado al control del producto terminado.

3.3 Justificación técnica de cada punto

3.3.1 Post Despinado

En esta etapa, la máquina despinadora realiza una extracción mecánica de espinas a través de rodillos y cuchillas programadas. Sin embargo, debido a la variabilidad anatómica de los filetes, pueden permanecer pequeñas espinas incrustadas. La instalación de una **cámara OMRON FHV7** sobre la cinta posterior al equipo permitiría inspeccionar en tiempo real cada filete mediante algoritmos de detección de contraste y forma.

El sistema podría enviar una señal digital de “NO OK” al PLC, que a su vez activaría una alarma visual o marcaría el producto para ser retirado automáticamente.



Ilustración 13 Máquina Despinadora

En post despinado, el objetivo principal es reducir el riesgo de que espinas remanentes o contaminantes visibles avancen a etapas posteriores. Desde una perspectiva de ingeniería, se recomienda que la inspección se diseñe bajo un enfoque “preventivo”: detectar temprano para minimizar reproceso y evitar reclamos. Conceptualmente, el sistema debe considerar:

- **Condición de disparo (trigger):** asegurar que la captura se realice siempre en una posición comparable del filete (por sensor o sincronización con la cinta).
- **Región de interés (ROI):** enfocar el procesamiento en zonas donde es más probable encontrar la no conformidad, reduciendo carga de cálculo y mejorando consistencia.
- **Regla de decisión:** definir criterios de severidad para NG (por ejemplo, espina/cuerpo extraño como NG crítico).
- **Acción de proceso:** salida digital OK/NG hacia un sistema de control o señalización, además de registro para análisis de tendencias (por turno/lote).

Parámetros técnicos sugeridos:

- **Altura de montaje:** 400–600 mm.
- **Iluminación:** coaxial difusa LED blanca.
- **Velocidad de inspección:** hasta 50 filetes/min.
- **Resolución mínima:** 5 Mpx.

3.3.2 Recorte y limpieza superficial

En esta zona, los operarios eliminan grasa, piel o defectos superficiales. El uso de una cámara de visión artificial permitiría automatizar la detección de imperfecciones mediante herramientas de contraste y umbral de color. La información podría emplearse para activar un brazo neumático de rechazo o marcar con luz LED la zona defectuosa, guiando al operador en tiempo real.

En recorte y limpieza, la visión artificial aporta valor principalmente como apoyo a estandarización: detectar imperfecciones repetitivas y reducir variabilidad entre operadores. En esta zona es relevante diferenciar defectos por tipo (grasa residual, restos de piel, corte irregular, marcas visibles) para orientar la acción correcta: reprocesar, recortar o clasificar en otra categoría.

Conceptualmente, este punto también puede funcionar como retroalimentación del proceso: si se observa un aumento sistemático de defectos, se puede asociar a ajustes requeridos en etapas previas (máquina de fileteado, parámetros de cuchillas, manipulación, etc.).

Parámetros técnicos sugeridos:

- **Iluminación:** backlight o luz difusa superior.
- **Campo visual:** 200 × 150 mm.
- **Distancia cámara–objeto:** 350 mm.
- **Iluminación recomendada:** 8000–10000 lux.

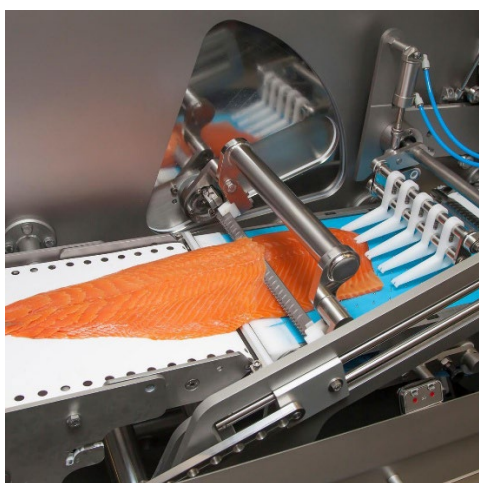


Ilustración 14 Máquina de Recorte

3.3.3 Clasificación

Durante la clasificación, los filetes se ordenan según peso, tamaño y color. La visión artificial puede integrarse con los sistemas de pesaje automático, comparando el color real del filete con una escala digital predefinida. De esta forma, se pueden **clasificar los productos según calidad visual**, reduciendo la variabilidad subjetiva entre operarios.

Parámetros técnicos sugeridos:

- **Tipo de visión:** 2D color.
- **Procesamiento:** análisis RGB y medición de contorno.
- **Integración:** comunicación Ethernet/IP con PLC de la clasificadora.



Ilustración 15 Maquina Clasificadora

3.3.4 Empaque y etiquetado final

La etapa de empaque es la última instancia de verificación antes del despacho. Una cámara de visión artificial permite revisar el correcto sellado del envase, la legibilidad de la etiqueta, el código de lote y la ausencia de contaminantes externos. Esta información puede registrarse automáticamente para cumplir con los requisitos de trazabilidad exigidos por normas como **BRC e ISO 22000**.

Parámetros técnicos sugeridos:

- **Visión requerida:** lectura OCR, detección de código QR/barcode.
- **Iluminación:** luz blanca controlada.
- **Interfaz:** TCP/IP hacia sistema de registro o SCADA.



Ilustración 16 Cinta de salida Etiquetado

3.4 Impacto operativo esperado

La implementación de cámaras en las zonas analizadas generaría impactos significativos en los siguientes aspectos:

Categoría	Impacto esperado	Indicador
Calidad	Reducción de defectos visuales y errores de inspección.	% de rechazos corregidos.
Productividad	Aumento del ritmo de procesamiento por eliminación de pausas manuales.	Filetes/minutos inspeccionados.
Eficiencia operativa	Menor tiempo de revisión y retrabajo.	% de reprocesos reducidos.
Trazabilidad	Registro digital de imágenes y resultados.	Nº de lotes trazables.
Cumplimiento normativo	Evidencia automática de control.	Auditorías BRC/HACCP aprobadas.

El efecto más relevante sería la **estandarización de los criterios de calidad**, permitiendo mantener un control continuo y repetible durante las 24 horas de operación.

3.4.1 Indicadores propuestos para medir el impacto (KPIs)

Para evaluar el impacto operativo de forma objetiva, se proponen indicadores simples y comparables antes/después:

- **% de producto reprocesado:** unidades que requieren recorte o Re-inspección.
- **% de merma asociada a rechazo:** pérdida por retiro de producto que podría ser conforme.
- **Tasa de NG por categoría:** por ejemplo, NG por espinas, NG por contaminación visible, NG por presentación.
- **Rendimiento (yield) del filete:** proporción de producto que llega a empaque sin reproceso.
- **Consistencia entre turnos:** variación del NG entre turnos como indicador de estandarización.

Estos KPIs son coherentes con un estudio técnico–económico, ya que permiten traducir mejoras operativas a beneficios económicos estimados.

3.5 Impacto económico estimado

El impacto económico se proyecta a partir de los beneficios derivados de la reducción de reprocesos, mejoras en la calidad final y optimización del tiempo de inspección.

3.5.1 Costos actuales (proceso manual)

- 4 a 6 operarios por línea de inspección visual.
- Costo laboral promedio mensual por operario: 700 000 CLP.
- Pérdida estimada por errores de inspección: 1,5 % de la producción mensual.

3.5.2 Costos con sistema de visión artificial

- 1 operario de supervisión.
- Mantenimiento periódico y limpieza de cámaras.
- Consumo eléctrico marginal (aprox. 50 W por cámara).
- Amortización proyectada en 3 años.

3.5.3 Ahorros estimados

Concepto	Situación actual	Con visión artificial	Diferencia (%)
Reprocesos	1,5 % de producción	0,3 %	-80 %
Pérdidas de producto	0,8 %	0,2 %	-75 %
Horas-hombre en inspección	6 operarios	1 operario	-83 %

El sistema permitiría un **ahorro operativo total estimado del 60–70 %** respecto al método actual, dependiendo del tamaño de planta y número de líneas implementadas.

3.5.4 Metodología de estimación económica utilizada

La estimación económica se plantea bajo un enfoque comparativo entre el escenario actual (inspección manual) y el escenario propuesto (visión artificial), considerando costos directos e indirectos. En términos generales, se consideran:

- **Costos actuales:** dotación requerida para inspección, tiempos asociados a reproceso, y pérdidas atribuibles a errores de inspección (merma o reclamos).
- **Costos con visión artificial:** dotación reducida a supervisión, costos de mantenimiento/limpieza y costos asociados a la inversión (amortización o depreciación referencial).
- **Beneficios:** reducción de errores de omisión, reducción de rechazo innecesario, aumento de consistencia y disminución de reprocesos. Este enfoque permite justificar el retorno esperado como resultado de la mejora operacional, manteniendo coherencia con el alcance del proyecto (sin pruebas físicas).

3.6 Beneficios estratégicos

Además del impacto técnico y económico, la implementación del sistema de visión artificial OMRON ofrece **beneficios estratégicos** relevantes para la empresa:

- **Mejora de la trazabilidad:** registro automático de imágenes por lote, cumpliendo con exigencias internacionales.
- **Cumplimiento normativo:** facilita auditorías de calidad bajo BRC, ISO 22000 y HACCP.
- **Posicionamiento de marca:** refuerza la percepción de tecnología y calidad ante clientes internacionales.
- **Eficiencia energética y sustentabilidad:** menor desperdicio de materia prima y reducción de reprocesos.
- **Integración futura:** compatibilidad con sistemas SCADA, MES o plataformas de análisis en la nube.

3.7 Conclusión del capítulo

El análisis de los puntos de instalación permitió identificar las **etapas del proceso donde la visión artificial puede generar mayor valor técnico y económico**. Las zonas de **post despinado y recorte** presentan el mayor impacto sobre la calidad del producto, mientras que las etapas de **clasificación y empaque final** complementan el control integral y la trazabilidad.

La implementación de cámaras OMRON en estos puntos permitiría automatizar la inspección visual, reducir errores humanos y estandarizar la calidad del producto exportado. Además, la integración del sistema con PLCs y plataformas de registro digital sienta las bases para una futura expansión hacia el control total de la línea mediante inteligencia artificial y robótica industrial.

4 CAPÍTULO 4 – DESARROLLO TÉCNICO DEL SISTEMA

4.1 Arquitectura general del sistema OMRON

El sistema de visión artificial propuesto se basa en una arquitectura modular e integrada, diseñada para operar en condiciones industriales de humedad, vibración y variabilidad lumínica típicas de las plantas procesadoras de salmón.

La **arquitectura general** se compone de los siguientes elementos:

1. **Cámara de visión OMRON FHV7:** dispositivo principal de captura y procesamiento de imágenes, con procesador embebido y software de inspección.
2. **Módulo de iluminación LED integrado:** permite iluminación coaxial o difusa según la superficie del producto, asegurando uniformidad en la captura.
3. **Controlador / CPU embebido:** ejecuta los algoritmos de inspección en tiempo real y genera las señales de salida digital.
4. **PLC industrial (OMRON NX):** recibe las señales de la cámara y actúa sobre los dispositivos de control o rechazo.
5. **Panel HMI o SCADA local:** interfaz gráfica para supervisión, visualización de imágenes y ajuste de parámetros.
6. **Red Ethernet industrial:** canal de comunicación principal entre la cámara, el PLC y el sistema SCADA.
7. **Sistema de registro o servidor local:** almacenamiento de imágenes y resultados para trazabilidad.

Figura conceptual del sistema:

Cámara → Procesamiento interno → Señal digital OK/NG → PLC → Actuador (rechazo o alarma)

PLC ↔ HMI ↔ SCADA ↔ Base de datos

Esta estructura permite que el sistema funcione tanto en modo **autónomo (standalone)** como **integrado a una red de automatización industrial**.

4.1.1 Requerimientos de infraestructura y condiciones de instalación

Para asegurar una operación estable y confiable en planta, la arquitectura propuesta requiere

considerar condiciones mínimas de instalación asociadas principalmente al entorno salmoneero y no exclusivamente al fabricante de los equipos. Factores como vibraciones, humedad, salpicaduras, lavado industrial y variaciones de iluminación pueden afectar directamente el desempeño del sistema de visión artificial y la estabilidad del proceso de inspección.

En este contexto, la instalación debe contemplar criterios mecánicos, eléctricos y ambientales que permitan mantener un funcionamiento continuo, seguro y repetible, minimizando errores de detección y facilitando las labores de mantenimiento y limpieza.

- Montaje rígido y estable para evitar vibraciones y desplazamientos que alteren el encuadre de la cámara.
 - Variaciones mínimas de distancia o ángulo pueden afectar el criterio de inspección del sistema de visión artificial.
 - Implementación de un soporte metálico con fijación robusta y elementos de ajuste para calibración inicial.
 - Incorporación de bloqueo mecánico en el soporte para evitar cambios involuntarios en la posición de la cámara.
- Segregación entre cables de potencia y cables de señales para minimizar interferencias eléctricas.
 - Alimentación eléctrica estable de 24 VDC para asegurar operación confiable del sistema.
- Uso de gabinete eléctrico con protecciones, incluyendo fusible independiente por cámara y desconexión local.
 - Consideración de ambiente húmedo típico de plantas salmoneeras durante el diseño de instalación.
 - Protección de conectores y rutas de cableado frente a salpicaduras y procesos de lavado industrial.
 - Utilización de prensaestopas adecuados para mantener hermeticidad y seguridad eléctrica.

4.1.2 Consideraciones de higiene y diseño para ambiente alimentario

La instalación debe ser compatible con rutinas de limpieza y buenas prácticas sanitarias. Se recomienda evitar zonas donde se acumule agua o residuos, usar canalización ordenada y soportes que faciliten limpieza visual. Además, se sugiere ubicar la cámara de forma que no interfiera con flujo de operarios ni genere puntos de riesgo por contacto accidental. En caso de requerirse cubiertas protectoras, estas deben permitir inspección/limpieza sin modificar el alineamiento óptico.

4.1.3 Enfoque de operación “fail-safe”

Desde el punto de vista operativo, ante fallas (pérdida de comunicación, fallo de cámara, ausencia de trigger), el sistema debe entrar en un modo seguro. Para un enfoque básico y defendible en comisión, se recomienda definir:

- Estado de falla = señal de alarma + registro de evento.
- Modo degradado = desviar producto a revisión manual o detener rechazo automático (según criticidad).
- Evitar falsos OK cuando no exista imagen válida (principio conservador).
 - Esta lógica no implementa seguridad funcional avanzada, pero sí establece un comportamiento consistente ante fallas.

4.2 Flujo funcional del sistema

El flujo funcional describe la secuencia completa de eventos desde la detección del producto hasta la generación de la acción de control.

1. **Detección de presencia:** un sensor fotoeléctrico detecta el paso del filete sobre la cinta y activa la cámara mediante una señal “Trigger In”.
2. **Captura de imagen:** la cámara toma una imagen en milisegundos, ajustando exposición y brillo automáticamente.
3. **Procesamiento interno:** el algoritmo compara la imagen con los parámetros definidos (color, forma, defectos, textura).
4. **Evaluación:** el controlador determina si el producto cumple con los criterios (“OK”) o no (“NG”).
5. **Salida digital:** la cámara envía una señal a través de una salida discreta al PLC.
6. **Actuación:** el PLC ejecuta la lógica correspondiente (activar alarma, marcar producto, rechazar o registrar).
7. **Registro:** la imagen y el resultado se almacenan en una carpeta o base de datos para trazabilidad.

Diagrama simplificado del flujo de operación:

Sensor de disparo → Cámara OMRON → Procesamiento → PLC → Actuador / HMI → Registro

Este flujo asegura una **respuesta inmediata (en milisegundos)**, permitiendo el control de productos en movimiento continuo sin detener la línea.

4.2.1 Presupuesto de tiempos y sincronización con la cinta transportadora

Para que el sistema sea útil en línea, no basta con detectar; también se debe sincronizar la detección con la acción. En términos prácticos, existe un “presupuesto de tiempo” compuesto por:

1. detección de presencia (trigger),
2. captura de imagen,
3. procesamiento interno,
4. comunicación hacia PLC (si aplica),
5. activación del actuador (rechazo o señalización),
6. tiempo físico de respuesta del actuador.

En rechazo automático, lo crítico es calcular el **retardo de rechazo** entre el punto de inspección (cámara) y el punto de acción (boquilla/compuerta). Se recomienda definir una distancia fija **D (m)** entre cámara y actuador, y medir velocidad de cinta **V (m/s)**. El retardo base es:

$$t = D / V$$

A esto se le suma el tiempo de respuesta del sistema (captura + proceso + salida + actuador). Para efectos de estudio, se puede trabajar con un margen conservador y validar en implementación real.

Esta sección justifica técnicamente por qué el punto de instalación y la ubicación del actuador deben definirse en conjunto.

4.2.2 Cálculo del retardo cámara–actuador y ventana de rechazo

En sistemas de inspección en cinta, la detección del defecto ocurre en una posición distinta al punto donde se ejecuta el rechazo (boquilla neumática, desviador, compuerta o robot). Por ello, el PLC debe aplicar un retardo calculado para accionar exactamente cuando el filete defectuoso llega al actuador. Este retardo depende de la distancia física entre cámara y actuador, y de la velocidad real de la cinta transportadora.

El retardo ideal se define como: $t = d / v$, donde d es la distancia (m) entre la línea de inspección y el punto de rechazo, y v es la velocidad de la cinta (m/s). Por ejemplo, si la cámara está a 0,80 m del actuador y la cinta opera a 0,40 m/s, el retardo de disparo es $t = 0,80 / 0,40 = 2,0$ s.

En la práctica, además del retardo, se define una **ventana de rechazo** (pulso de salida) para cubrir variaciones de tamaño del filete y pequeñas fluctuaciones de velocidad. La ventana puede definirse como un tiempo fijo (p. ej. 150–300 ms) o como un tiempo proporcional al largo estimado del producto. Esto permite reducir falsos rechazos y asegura que el actuador alcance al interactuar con el producto correcto.

4.2.3 Lógica de manejo de excepciones (producto inválido / imagen inválida)

En operación real pueden ocurrir condiciones no ideales: filete mal orientado, superposición, exceso de agua, o ausencia de trigger.

Se recomienda definir reglas de excepción simples:

- Si la imagen no es válida → clasificar como “REVISAR” (no OK) o desviar a inspección manual.
- Si se detecta superposición → registrar evento y alertar al operador.
- Si se repiten fallas en ventana de tiempo → generar alarma de mantenimiento (posible suciedad de lente/iluminación).
Esto fortalece la confiabilidad sin necesidad de implementar algoritmos complejos fuera del alcance del estudio.

4.3 Entradas y salidas digitales

La cámara de visión OMRON dispone de entradas y salidas digitales programables que permiten la interacción con el entorno de control industrial.

Tipo de señal	Descripción	Conexión típica
Entrada digital (Trigger In)	Recibe señal del sensor fotoeléctrico que detecta el paso del producto.	Sensor NPN/PNP 24 VDC
Entrada digital (Reset / Start)	Activa o reinicia la secuencia de inspección.	PLC o pulsador manual
Salida digital (OK)	Señal de aprobación del producto.	Entrada PLC (IO.x)
Salida digital (NG)	Señal de rechazo del producto.	Entrada PLC (IO.x)
Salida digital (Error)	Indica falla en procesamiento o comunicación.	Baliza / HMI
Ethernet TCP/IP	Transmite datos, imágenes y configuraciones.	Red industrial (RJ45, Cat6)

Estas señales permiten que la cámara opere como un **sensor inteligente**, interactuando directamente con los controladores lógicos programables y actuadores físicos.

4.3.1 Tabla propuesta de señales digitales

A continuación, se propone una estructura típica de señales para integrar cámara–PLC. Esta tabla es referencial y puede ajustarse según el modelo final y el tipo de medida de control.

Señal	Tipo	Dirección	Función	Observación
TRIGGER_IN	DI	PLC → Cámara	Disparo de captura	Desde sensor fotoeléctrico o PLC
READY	DO	Cámara → PLC	Cámara lista	Indica disponibilidad para inspección
BUSY	DO	Cámara → PLC	Captura/proceso activo	Útil para diagnósticos
OK	DO	Cámara → PLC	Producto conforme	Resultado principal
NG	DO	Cámara → PLC	Producto no conforme	Activación de rechazo/alarma
ERROR	DO	Cámara → PLC	Falla del sistema	Activa modo degradado
RESET	DI	PLC → Cámara	Reinicio lógico	Limpieza de fallas no críticas

4.3.2 Recomendaciones de cableado y buenas prácticas

Se recomienda utilizar 24 VDC industrial con protecciones por canal, separar canalizaciones de potencia y señal, y etiquetar señales en bornes para mantenimiento. En ambientes húmedos se debe priorizar conectores industriales y rutas de cable que minimicen exposición a lavado directo. Estas prácticas reducen fallas intermitentes y facilitan puesta en marcha.

4.4 Protocolos de comunicación industrial

El sistema propuesto debe integrarse sin problemas en el entorno de automatización existente de la planta.

Las cámaras OMRON de la serie FH y FHV7 soportan los principales protocolos de comunicación industrial, lo que permite interoperabilidad con diversas marcas de PLC y SCADA.

Protocolo	Características	Aplicación
Ethernet/IP	Comunicación determinista de alta velocidad. Compatible con PLCs OMRON y Allen-Bradley.	Transmisión de resultados OK/NG y estados del sistema.
Modbus TCP	Protocolo abierto, ampliamente adoptado.	Comunicación con PLC Siemens, HMI o sistemas SCADA.
TCP/IP estándar	Canal de comunicación general para transferencia de imágenes o logs.	Registro de imágenes en servidor o PC.
RS-232 / RS-485	Comunicación serial de respaldo.	Diagnóstico o configuración local.

La selección del protocolo dependerá del tipo de controlador disponible en planta. En plantas que operan con PLC Siemens S7-1200, se recomienda **Modbus TCP**; en plantas con controladores OMRON o Rockwell, se sugiere **Ethernet/IP**.



Ilustración 17 Protocolos de Comunicación Industrial

4.4.1 Criterios de selección de protocolo (PROFINET vs Ethernet/IP vs Modbus TCP)

La selección del protocolo debe responder a compatibilidad con la automatización existente y al tipo de datos requerido. Para el propósito del estudio, se distinguen dos necesidades:

- **Intercambio rápido de estados (OK/NG, alarmas, contadores):** protocolos industriales de tiempo real (PROFINET o Ethernet/IP) son preferibles cuando el PLC es parte central del control.
- **Intercambio de datos no críticos (registro, diagnósticos, variables auxiliares):** Modbus TCP puede ser suficiente en escenarios simples, especialmente para lectura de variables y diagnóstico.

El criterio recomendado es:

- Si la planta opera con PLC Siemens y red PROFINET → priorizar PROFINET por integración natural.
- Si la planta opera con ecosistema CIP/EtherNet/IP → priorizar EtherNet/IP.
- Si la integración es básica o de bajo costo → Modbus TCP como alternativa funcional (sin enfoque de tiempo real estricto).

4.4.2 Segmentación de red y consideraciones de ciberseguridad OT

Se recomienda conceptualmente segmentar red de visión/control (OT) del resto de la red corporativa (IT) mediante VLAN o switches gestionados. Además, definir direccionamiento IP fijo y documentado, y limitar accesos a configuración solo a personal autorizado. Esto reduce riesgos de cambios no controlados y mejora mantenibilidad.

4.4.3 Sincronización de tiempo y trazabilidad por eventos

Para trazabilidad, es útil que los eventos (NG, ERROR, conteos por lote) queden con marca temporal coherente. Se recomienda definir un “reloj de referencia” (PLC o servidor) y registrar eventos con time stamp cuando el sistema se integre a SCADA o base de datos en etapas futuras.

4.5 Integración con PLC, SCADA y HMI

4.5.1 Integración con PLC

El PLC actúa como nodo central de control, recibiendo señales de la cámara y ejecutando la lógica de actuación.

Ejemplo de configuración típica:

- Entrada digital I0.0: Trigger del sensor fotoeléctrico.
- Entrada digital I0.1: Señal “OK” de la cámara.
- Entrada digital I0.2: Señal “NG” de la cámara.
- Salida digital Q0.0: Rechazo neumático.
- Salida digital Q0.1: Alarma o baliza.
- Comunicación Ethernet: registro y diagnóstico.

4.5.2 Integración con HMI

El operador puede visualizar en la HMI los siguientes datos:

- Número de inspecciones realizadas.
- Cantidad de productos OK y NG.
- Imagen del último filete inspeccionado.
- Estado de la cámara (online, error, mantenimiento).

La HMI permite además ajustar parámetros como umbrales de color, sensibilidad o velocidad de disparo.

4.5.3 Integración con SCADA

En caso de existir un sistema SCADA, el mismo puede recibir:

- Estadísticas de producción.
- Imágenes comprimidas de productos defectuosos.
- Alarmas y estados del sistema.
- Tiempos de operación, mantenimiento y disponibilidad.

Esto facilita el **monitoreo remoto**, la trazabilidad y la generación de reportes de auditoría.

4.5.4 Estructura mínima de variables (tags) para operación y análisis

Para facilitar operación, se sugiere definir un conjunto mínimo de tags:

- Estado de cámara:
 - READY
 - BUSY
 - ERROR
- Resultados:
 - OK_count
 - NG_count
 - NG_rate (%)
- Categorías NG (si aplica):
 - NG_espina
 - NG_cuerpo_extraño,
 - NG_presentación
- Producción por lote/turno:
 - lote_id
 - turno_id
 - start_time
 - end_time

Este enfoque permite generar indicadores sin requerir sistemas complejos.

4.5.5 Pantallas HMI recomendadas

Se propone una estructura simple de HMI:

- Pantalla principal:
 - estado general
 - OK/NG
 - Alarmas
 - conteo
- Pantalla de diagnóstico:
 - señales
 - comunicación
 - tasas de NG
- Pantalla de ajuste (solo supervisor):
 - umbrales/recetas
 - habilitación de rechazo
 - Reset de fallas.

Esto entrega orden operativo y reduce intervención no autorizada.

4.6 Seguridad eléctrica, protecciones y mantenimiento

4.6.1 Seguridad eléctrica

Las cámaras de visión artificial y sus periféricos deben protegerse ante variaciones eléctricas y condiciones adversas:

- Alimentación 24 VDC estabilizada con fuente certificada.
- Protección mediante fusibles de 1 A o disyuntores magnetotérmicos.
- Conexión a tierra de todas las estructuras metálicas.
- Cables blindados para señales de comunicación y trigger.

4.6.2 Protecciones mecánicas

- Gabinetes con grado de protección IP65 o superior.
- Carcasa de acero inoxidable AISI 316 para zonas húmedas.
- Cristales ópticos con recubrimiento antirreflejo y antiempañante.
- Sellos de silicona alimentaria en conexiones.

4.6.3 Mantenimiento preventivo

- Limpieza de lente y cubierta óptica una vez por turno.
- Verificación del foco e iluminación cada semana.
- Respaldo del programa de inspección y calibración mensual.

Estas medidas aseguran una operación continua y confiable, minimizando detenciones no programadas.

4.6.4 Plan de mantenimiento preventivo

Debido al entorno húmedo y con lavados, el mantenimiento preventivo es crítico para confiabilidad. Se propone un plan base:

- Diario: inspección visual de lente/cubierta, verificación de fijaciones, revisión de estado de iluminación.
- Semanal: limpieza controlada de protección óptica, revisión de conectores y sellos, verificación de cables expuestos.
- Mensual: prueba funcional de señales (OK/NG/ERROR), verificación de tiempos de rechazo (si existe actuador), revisión de registros de fallas.
- Trimestral: recalibración básica (encuadre y referencia), respaldo de parámetros y revisión de configuración.

4.6.5 Repuestos mínimos recomendados

Para continuidad operacional se recomienda disponer de:

- conectores/cables críticos
- fusibles/borneras
- cubierta protectora óptica
- kit de limpieza óptica.

Esto reduce tiempo de detención ante fallas típicas de ambiente

4.6.6 Medidas básicas de seguridad eléctrica

Se recomienda desconexión local (seccionamiento), protección por canal, y etiquetado de circuitos. Además, evitar manipulación con equipo energizado durante lavado o mantenimiento, integrando procedimientos de bloqueo/etiquetado según práctica industrial.

4.7 Diagramas eléctricos y de comunicación

4.7.1 Diagrama eléctrico general

- Fuente de 24 VDC
 - Cámara OMRON
 - PLC
 - HMI
 - Sensores
 - Actuadores
- Cada cámara cuenta con fusible y desconector independiente.
- Señales de trigger y OK/NG conectadas directamente al PLC.

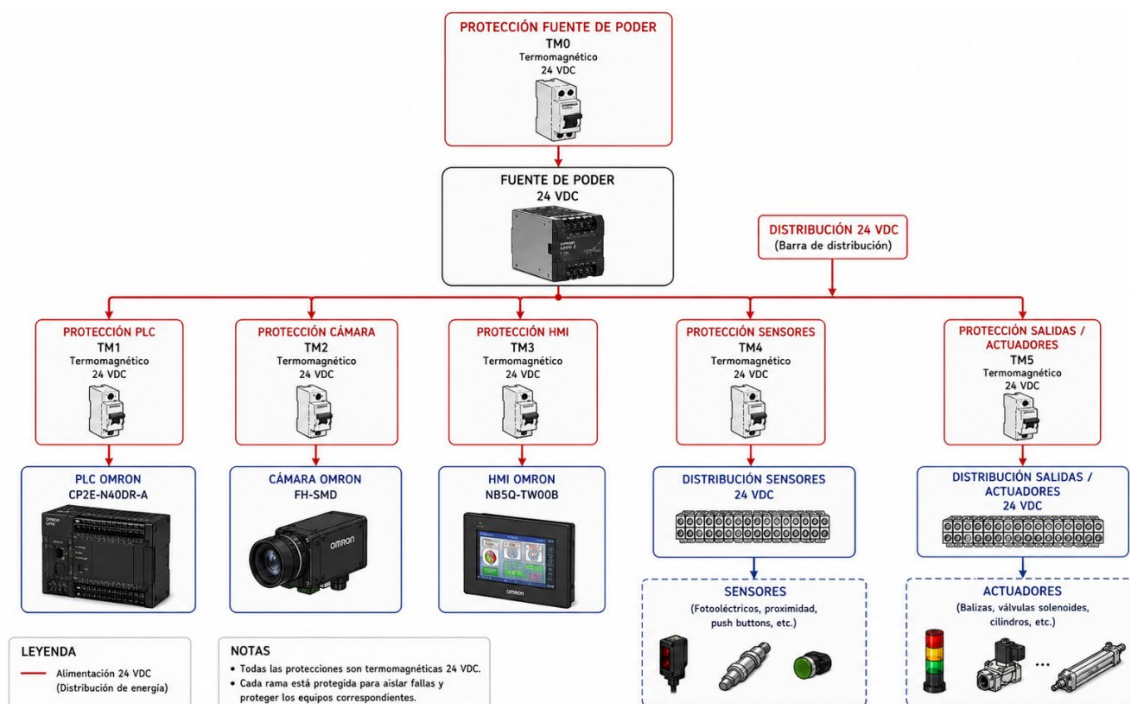


Ilustración 18 Diagrama Eléctrico general

4.7.2 Diagrama de comunicación

- Red Ethernet principal con topología en estrella.
- Switch industrial gestionado, puertos Gigabit.
- Direccionamiento IP fijo (ejemplo: Cámara 192.168.1.10 / PLC 192.168.1.1).
- Comunicación SCADA a través de protocolo Ethernet IP / Modbus TCP.

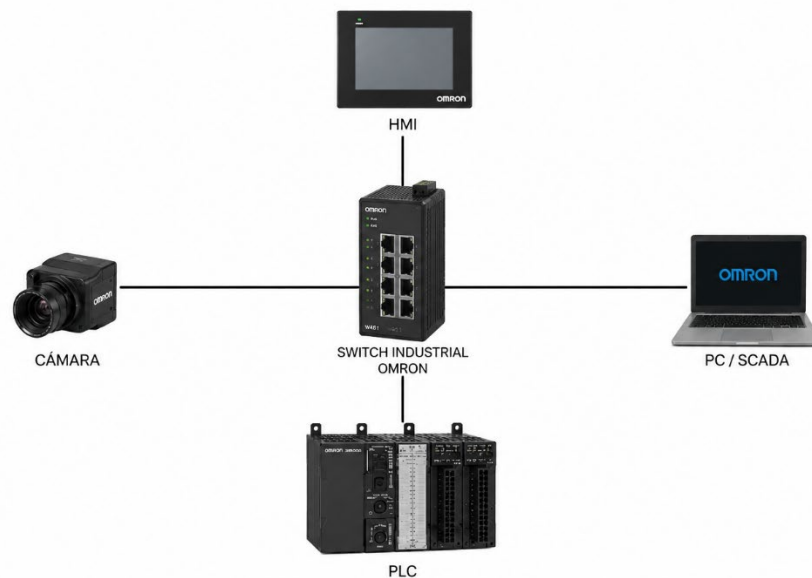


Ilustración 19 4.7.2 Diagrama de comunicación

4.7.3 Sincronización

- El tiempo de disparo del sensor debe ajustarse a la velocidad de la cinta.
- Se recomienda un tiempo de latencia < 5 ms entre detección y procesamiento.

Estos diagramas son esenciales para el diseño de la instalación y la validación de la comunicación entre los componentes del sistema.

4.8 Conclusión técnica del capítulo

El desarrollo técnico del sistema demuestra la **factibilidad de integrar cámaras OMRON FHV7 dentro de una línea de procesamiento de salmón**, utilizando una arquitectura modular y protocolos de comunicación industrial estándar. El sistema propuesto garantiza **respuestas en tiempo real, compatibilidad con PLC y SCADA**, y **robustez eléctrica y mecánica** para operar en ambientes húmedos.

La implementación de este diseño permitiría a la planta obtener un sistema de inspección visual confiable, automatizado y trazable, capaz de integrarse con medidas de control activo (balizas, actuadores o robots), que serán detalladas en el siguiente capítulo.

5 CAPÍTULO 5 – AMPLIACIONES Y/O MEDIDAS DE CONTROL

5.1 Introducción

La implementación de un sistema de visión artificial no se limita únicamente a la detección de defectos, sino que forma parte de un ciclo de **medición, decisión y acción**, propio de los sistemas de control industrial. Para cerrar este ciclo es necesario incorporar **mecanismos de actuación** que respondan automáticamente ante una condición no conforme, garantizando la eliminación o segregación del producto defectuoso.

En esta etapa se analizan las posibles **ampliaciones y medidas de control** que pueden integrarse al sistema propuesto, incluyendo alarmas luminosas, señalización visual, sistemas de rechazo automático y brazos robóticos. Estas soluciones tienen como objetivo mejorar la eficiencia del proceso, reducir la intervención humana y fortalecer la trazabilidad y el cumplimiento normativo.

5.2 Tipos de medidas de control

Las medidas de control se clasifican en tres niveles jerárquicos:

1. **Notificación visual o auditiva**
2. **Acción correctiva automática**
3. **Actuación robótica avanzada.**

A continuación, se describen los principales tipos de medidas aplicables a la línea salmonera.

5.2.1 Balizas luminosas y alarmas acústicas

Las **balizas luminosas** constituyen el medio más simple y efectivo para indicar el estado operativo del sistema.

Se recomienda utilizar torretas tricolores (verde–amarillo–rojo) con señales codificadas según la siguiente lógica:

Color	Significado	Acción sugerida
 Verde	Operación normal, inspección activa	Ninguna
 Amarillo	Advertencia: cámara o PLC sin comunicación	Verificar red / mantenimiento
 Rojo	Defecto detectado o error del sistema	Detención parcial o rechazo

Estas torretas se instalan sobre el tablero de control o en una posición visible para los operadores. En paralelo, una **alarma acústica** (zumbador de 85–90 dB) puede activarse ante fallas críticas o acumulación de productos rechazados.

El control de las salidas hacia balizas o alarmas se realiza directamente desde PLC mediante salidas digitales de 24 VDC programadas con tiempos de retención de 1 a 3 segundos.



Ilustración 20 Balizas luminosas y alarmas acústicas

5.2.2 Rechazo neumático automático

Una de las medidas más eficientes para garantizar la segregación del producto defectuoso es la implementación de un **sistema de rechazo neumático** accionado por válvulas solenoides y cilindros de simple efecto.

El principio de funcionamiento es el siguiente:

1. La cámara detecta un filete defectuoso (condición “NG”).
2. Envía una señal digital al PLC.
3. El PLC activa una **salida digital Qx.x** conectada a una **electroválvula 24 VDC**.
4. El cilindro neumático expulsa el filete hacia una bandeja lateral o cinta de rechazo.

Componentes sugeridos:

- Electroválvulas 24 VDC con caudal mínimo de 250 L/min.
- Cilindros neumáticos con carrera de 100–150 mm.
- Presión de trabajo: 6 bar.
- Tiempo de reacción: ≤ 100 ms.
- Material: acero inoxidable o polímeros grado alimenticio.

Ventajas:

- Alta velocidad de respuesta (ideal para líneas de hasta 60 filetes/min).
- Operación confiable en ambientes húmedos.
- Bajo mantenimiento y costo.

El sistema debe sincronizarse mediante un **temporizador de retardo (Timer TON)** en el PLC, considerando la distancia entre la cámara y el actuador, para que la expulsión ocurra exactamente cuando el producto defectuoso pasa por el punto de rechazo.

5.2.3 Brazos robóticos o manipuladores eléctricos

Para aplicaciones donde el valor del producto o la precisión del rechazo son elevados, se propone la integración de un **brazo robótico articulado o cartesiano**, que retire el filete defectuoso con mayor control que el sistema neumático.

Los robots pueden operar bajo dos modalidades:

- **Modo guiado por visión (Vision-Guided Robotics):** la cámara transmite coordenadas de posición al robot mediante protocolo Ethernet/IP o TCP/IP.
- **Modo supervisado:** el robot ejecuta un movimiento predefinido ante una señal “NG” sin comunicación de posición.

Ventajas técnicas:

- Alta precisión en el retiro (± 1 mm).
- Rechazo selectivo sin generar turbulencia o contaminación.
- Posibilidad de operar con múltiples cámaras (visión multicabezal).
- Capacidad de clasificar o separar productos en diferentes bandejas.

Ejemplo de integración:

- Cámara FHV7 detecta defecto → PLC recibe señal → envía coordenadas al robot OMRON i4L o TM5 → robot retira el filete defectuoso.

Este tipo de integración requiere programación avanzada y una red determinista (Ethernet/IP o EtherCAT).



Ilustración 21 Brazos Robot en línea de alimentos

5.2.4 Cintas secundarias de rechazo

En líneas de mayor capacidad, se puede instalar una **cinta transportadora secundaria** dedicada exclusivamente al retiro de productos no conformes. El PLC, al recibir la señal “NG”, activa un desviador mecánico o compuerta automática que dirige el producto hacia esta cinta.

Ventajas:

- Permite mantener la operación continua de la línea principal.
- Evita acumulaciones de producto defectuoso.
- Mejora la trazabilidad al separar lotes rechazados.

5.3 Integración con el sistema de visión

Las medidas de control descritas se integran de forma directa al sistema de visión artificial y su PLC asociado.

El flujo de señales es el siguiente:

- Cámara OMRON (Salida NG) → PLC (Entrada digital I0.1)
- PLC (Salida digital Q0.0) → Electroválvula o Robot
- PLC (Salida digital Q0.1) → Baliza / Alarma
- PLC ↔ HMI / SCADA → Registro de evento

El PLC se encarga de la **temporización y sincronización** entre la detección y el accionamiento físico.

La HMI o el sistema SCADA registran cada evento de rechazo o alarma, con fecha, hora y motivo, generando un historial que puede ser consultado en auditorías o reportes de calidad.

5.3.1 Interlocks y condiciones de habilitación del rechazo automático

Para evitar rechazos erróneos o situaciones inseguras, se recomienda definir condiciones mínimas de habilitación:

- Rechazo habilitado solo si cámara está en estado READY y sin ERROR.
- Rechazo deshabilitado automáticamente ante pérdida de trigger o comunicación.
- Modo manual/bypass con registro (para mantenimiento o contingencia).
- Alarmas por exceso de NG en ventana de tiempo (posible desviación del proceso).
Estas reglas hacen que el sistema sea más robusto y defendible, incluso cuando el estudio no incluye implementación física.

5.4 Impacto operativo

La implementación de medidas de control automáticas impacta directamente en los indicadores de productividad y seguridad operacional de la planta.

Categoría	Impacto	Indicador
Seguridad alimentaria	Eliminación inmediata de productos no conformes.	% de productos defectuosos en lotes exportados.
Eficiencia operativa	Reducción del tiempo de revisión manual y detenciones.	Filetes/hora procesados.
Disponibilidad del sistema	Reducción de errores humanos y fallas.	MTBF (tiempo medio entre fallas).
Mantenimiento preventivo	Identificación temprana de fallas mediante alarmas.	Tiempo medio de reparación (MTTR).
Cumplimiento normativo	Evidencia digital automática.	Auditorías aprobadas. BRC/HACCP

En términos operativos, el sistema garantiza una **respuesta total menor a 150 ms** entre la detección del defecto y la acción de rechazo, suficiente para mantener la velocidad de línea sin interrupciones.

5.5 Recomendaciones de implementación

Para garantizar la confiabilidad y durabilidad de las medidas de control, se recomiendan los siguientes aspectos técnicos y de diseño:

- **Actuadores:** seleccionar equipos con grado de protección IP65 o superior, resistentes a lavado y humedad.
- **Balizas:** utilizar torretas LED con consumo reducido y larga vida útil (>50000h).
- **Electroválvulas:** preferir válvulas con certificación alimentaria y operación silenciosa.
- **Tubos y fittings:** emplear conexiones neumáticas de acero inoxidable o polímeros aptos para uso alimentario.
- **Instalación eléctrica:** derivar el control de actuadores en un tablero secundario con fusibles individuales.
- **Sincronización temporal:** calcular el retardo de activación según la velocidad de cinta y la distancia cámara–actuador.
- **Integración SCADA:** registrar automáticamente cada evento de rechazo o alarma para análisis estadístico.

5.6 Proyección futura

A mediano y largo plazo, el sistema puede evolucionar hacia un entorno **completamente automatizado y cognitivo**, mediante la incorporación de tecnologías complementarias:

- **Robots colaborativos (cobots):** integración con visión artificial para manipulación flexible y segura.
- **Inteligencia artificial (IA):** análisis predictivo de defectos y ajuste automático de parámetros de inspección.
- **Conectividad IoT:** transmisión de datos hacia plataformas en la nube para monitoreo remoto.
- **Mantenimiento predictivo:** detección anticipada de fallas mecánicas o eléctricas a través de análisis de datos históricos.

Estas ampliaciones proyectan una **planta inteligente (“Smart Factory”)**, donde cada producto genera datos de calidad y trazabilidad en tiempo real, fortaleciendo la competitividad de la industria salmonera chilena.

5.7 Conclusión del capítulo

El diseño de **medidas de control automáticas** complementa la funcionalidad del sistema de visión artificial, cerrando el ciclo completo de inspección y acción. Las soluciones propuestas —balizas, alarmas, rechazo neumático y robótica— garantizan una respuesta rápida, segura y trazable ante defectos detectados, mejorando la eficiencia global del proceso.

La incorporación de estas medidas representa una **evolución natural del control industrial**, pasando de una detección pasiva a un sistema activo y autónomo, alineado con los principios de la Industria 4.0 y las exigencias de calidad internacionales.

Estas bases servirán para la etapa siguiente del proyecto, donde se realizará la **selección técnica de la cámara, su evaluación comparativa y la justificación de su elección**.

6 CAPÍTULO 6 – SELECCIÓN DE CÁMARA Y COMPONENTES TÉCNICOS

6.1 Criterios de selección

La selección de la cámara de visión artificial y sus componentes asociados se basa en un conjunto de criterios **técnicos, operativos y ambientales**, definidos de acuerdo con las condiciones reales del proceso salmonero y los requerimientos del sistema propuesto.

Los criterios considerados son los siguientes:

Criterio	Descripción	Requisito mínimo
Resolución óptica	Capacidad para distinguir defectos y detalles finos (espinas, grasa, manchas).	≥ 2 megapíxeles
Velocidad de captura (FPS)	Debe ser suficiente para operar con la velocidad de la cinta transportadora.	≥ 60 FPS
Iluminación integrada	Permite capturar imágenes consistentes pese a variaciones ambientales.	Luz blanca o RGB integrada
Protección IP	Resistencia a humedad, salpicaduras y limpieza industrial.	IP67 o superior
Temperatura de operación	Compatible con ambientes fríos de planta (0–15 °C).	-10 °C a +45 °C
Interfaz de comunicación	Compatibilidad con PLC Siemens / OMRON / SCADA.	Ethernet/IP o Modbus TCP
Procesamiento embebido	Evita el uso de PC externo y mejora la velocidad de respuesta.	CPU integrada
Software de configuración	Plataforma amigable para parametrización y mantenimiento.	Sysmac Studio / Vision Editor
Compatibilidad mecánica	Tamaño y peso adecuados para montaje sobre cintas.	$\leq 1,5$ kg
Disponibilidad local y soporte técnico	Presencia de representante o servicio técnico en Chile.	OMRON Chile o distribuidor autorizado

Estos parámetros establecen un marco de comparación objetivo que permite seleccionar la cámara óptima para el entorno industrial salmonero.

6.1.1 Criterios cuantificables recomendados

Para fortalecer la selección técnica, los criterios deben expresarse de forma cuantificable. Se recomienda incluir:

- **Resolución mínima efectiva (px/mm):** definida por el tamaño mínimo de defecto a detectar. Como regla práctica, un defecto debe ocupar al menos 2–3 píxeles para ser detectado de forma estable.
- **Campo visual (FOV):** debe cubrir el ancho del filete con margen para variaciones de posición.
- **Velocidad de línea (filetes/min):** define la tasa de captura y el tiempo disponible de procesamiento.
- **Protección ambiental:** compatibilidad con humedad, salpicaduras y limpieza.
- **Capacidad de integración:** I/O digitales y protocolo industrial compatible con PLC existente.
- **Soporte y escalabilidad:** disponibilidad de repuestos, soporte técnico y posibilidad de ampliar funciones.

6.1.2 Resolución mínima efectiva (px/mm) y defecto mínimo detectable

Para justificar técnicamente la selección del modelo de cámara, es clave traducir “resolución en megapíxeles” a una métrica útil en planta: **píxeles por milímetro (px/mm)** sobre la superficie inspeccionada.

Esta relación depende del campo visual (FOV) requerido y de la resolución real del sensor. De forma aproximada: **$\text{px/mm} = (\text{píxeles horizontales}) / (\text{ancho del FOV en mm})$** . Si se requiere cubrir un filete con un ancho de 250 mm y la cámara entrega 2048 px horizontales, entonces $\text{px/mm} \approx 2048/250 = 8,19 \text{ px/mm}$.

Luego, para detectar un defecto de tamaño s (mm), se estima cuántos píxeles lo representan: **$\text{píxeles del defecto} \approx s \cdot (\text{px/mm})$** . En visión industrial, un criterio práctico es que un defecto debería ocupar al menos **2–3 píxeles** para ser detectado de forma estable (dependiendo del contraste, iluminación y algoritmo).

Por ejemplo, si se desea detectar un fragmento de 0,5 mm, con 8,19 px/mm se obtienen $\approx 4,1$ píxeles, lo cual es técnicamente factible.

6.2 Comparativa técnica entre modelos OMRON

OMRON cuenta con diversas líneas de cámaras industriales, cada una orientada a distintos niveles de complejidad. Se evaluaron tres familias representativas: **FQ2**, **FH**, y **FHV7**, todas disponibles con soporte técnico y compatibilidad en el ecosistema Sysmac.

Característica	OMRON FQ2	OMRON FH	OMRON FHV7
Tipo	Cámara inteligente compacta	Sistema modular multicámara	Cámara inteligente avanzada
Resolución	0.3 – 2 Mpx	2 – 12 Mpx	2 – 12 Mpx (color RGB)
Procesamiento	Embebido	Controlador externo (FH-CPU)	Embebido (procesador ARM + IA)
Iluminación integrada	LED blanca / IR	Externa requerida	RGB / blanca integrada
FPS	Hasta 60	Hasta 100	Hasta 150
Comunicación	Ethernet/IP, RS-232	Ethernet/IP, TCP	Modbus Ethernet/IP, TCP, TCP/IP
Protección	IP67	IP65	IP67
Enfoque	Manual	Dependiente del lente	Automático (motor integrado)
Software	Vision Assistant	Sysmac Studio (FH Vision)	Sysmac Studio / FHV7 Editor
IA incorporada	No	No	Sí (aprendizaje de defectos)
Aplicaciones típicas	Presencia, lectura OCR	Inspección multicámara	Calidad superficial, color, textura
Mantenimiento	Bajo	Medio	Bajo
Costo estimado (USD)	1 500 – 2 500	3 000 – 4 500	4 500 – 6 000

6.3 Evaluación ponderada y modelo seleccionado

Para definir la mejor opción, se aplicó una **evaluación multicriterio ponderada**, considerando los parámetros más relevantes según las condiciones del proceso.

Criterio	Peso (%)	FQ2	FH	FHV7
Resolución / calidad de imagen	20	7	9	10
Velocidad / FPS	10	8	9	10
Iluminación integrada	10	7	6	10
Protección IP / robustez	10	9	8	9
Comunicación industrial	10	8	9	10
Procesamiento embebido	10	7	6	10
Facilidad de integración	10	8	9	9
Software y soporte técnico	10	9	9	10
Costo / beneficio	10	10	8	8
Puntaje total (0–10)	100	8.3	8.2	9.6

Resultado: El modelo **OMRON FHV7** obtiene la puntuación más alta, siendo el **más equilibrado en rendimiento, robustez, velocidad y facilidad de integración**.



Ilustración 22 Camara VA Omron FHV7

6.3.1 Propuesta de matriz ponderada

Para justificar de forma objetiva la selección, se recomienda explicitar pesos de evaluación. Un ejemplo coherente con planta salmonera es:

Criterio	Peso (%)	Justificación
Robustez ambiental (humedad/limpieza)	20	Entorno exigente, alta criticidad
Capacidad de inspección (velocidad/proceso)	20	Línea rápida y repetibilidad
Integración (protocolos + I/O)	20	PLC/SCADA y medidas de control
Calidad de imagen (resolución/iluminación)	20	Defectos pequeños y reflejos
Escalabilidad y soporte	20	Proyección y mantenibilidad

La elección final debe reflejar el equilibrio entre operación real y proyección tecnológica, evitando seleccionar una alternativa solo por costo inicial cuando el objetivo es calidad y trazabilidad.

6.4 Características técnicas del modelo seleccionado (OMRON FHV7)

La cámara OMRON FHV7 se caracteriza por su **procesamiento embebido de alta velocidad** y su **sistema de iluminación RGB integrado**, lo que la convierte en una solución ideal para entornos donde las condiciones lumínicas son variables.

Principales especificaciones técnicas:

Parámetro	Valor
Resolución de imagen	5 MP / 12 MP (opcional)
Sensor	CMOS color de alta sensibilidad
Iluminación	RGB (rojo, verde, azul) integrada
Enfoque	Automático (motor de lente interno)
Procesamiento	CPU ARM Cortex embebido
Comunicaciones	Ethernet/IP, Modbus TCP, TCP/IP
Entradas / Salidas digitales	4 entradas / 4 salidas (24 VDC)
Temperatura de operación	-10 °C a +45 °C
Grado de protección	IP67
Fuente de alimentación	24 VDC $\pm$ 10 %, 6 W
Software	Sysmac Studio / FHV7 Vision Editor
Peso	700 g aprox.

Ventajas clave:

- Detección de defectos por color, forma y textura simultáneamente.
- Capacidad de autoaprendizaje mediante IA integrada.
- Sin necesidad de controlador externo.
- Calibración óptica automática.
- Registro interno de imágenes hasta 32 GB.

6.5 Integración eléctrica y de comunicación

El modelo FHV7 puede conectarse directamente a un PLC mediante **Ethernet/IP o Modbus TCP**, eliminando la necesidad de hardware adicional.

Ejemplo de integración con PLC Siemens S7-1200:

- Módulo Ethernet TCP/IP → lectura de datos de resultado (OK/NG).
- Entradas digitales I0.0 – I0.3 → señales de trigger, start y reset.
- Salidas digitales Q0.0 – Q0.2 → actuadores de rechazo y alarmas.
- Interfaz HMI → visualización de estado e imagen capturada.

Conexión típica:

Sensor trigger → Cámara FHV7 → PLC → Actuador / Baliza

Ethernet (SCADA / HMI)

6.6 Software Sysmac Studio / FH Vision Editor

El entorno de software **Sysmac Studio** permite la configuración y programación unificada del sistema de visión, PLC y HMI, dentro de una misma plataforma. Las herramientas principales utilizadas para la cámara FHV7 son:

- **Tool de inspección de color:** detección de variaciones de tonalidad RGB.
- **Tool de medición geométrica:** validación de contorno y tamaño del filete.
- **Tool de presencia / ausencia:** detección de espinas, manchas o defectos.
- **Tool de clasificación:** separación automática en categorías OK / NG.
- **Tool de registro de imagen:** almacenamiento de cada inspección en formato JPG/PNG.

El software permite generar reportes de estadísticas, configurar alarmas y modificar parámetros sin detener la producción.

6.7 Consideraciones ópticas y de montaje

El desempeño del sistema depende en gran medida del diseño óptico e iluminación. Las condiciones de instalación deben cumplir con los siguientes lineamientos:

- **Distancia de enfoque:** entre 350 y 450 mm según el tamaño del filete.
- **Ángulo de visión:** 0° a 15° respecto de la superficie del producto.
- **Iluminación auxiliar:** si la luz ambiental es insuficiente, se recomienda luz difusa LED blanca (5 000–6 000 K).
- **Materiales de montaje:** acero inoxidable AISI 316, soportes antivibratorios.
- **Condiciones ambientales:** humedad relativa < 95 %, temperatura entre 5 °C y 15 °C.
- **Protección de lente:** uso de cubierta de acrílico antirreflejo o vidrio templado con revestimiento repelente al agua.

La instalación debe permitir el acceso seguro para limpieza y mantenimiento sin alterar la alineación óptica.

6.8 Conclusión de la selección técnica

El análisis técnico–comparativo demostró que el modelo **OMRON FHV7** es la opción más adecuada para la línea de procesamiento de filetes de salmón, debido a su alto rendimiento óptico, integración simplificada y resistencia industrial.

Sus principales ventajas son:

- Inspección de alta velocidad (hasta 150 FPS).
- Iluminación RGB integrada con ajuste automático.
- Comunicación nativa Ethernet/IP y Modbus TCP.
- Procesamiento autónomo sin PC externo.
- Capacidad de autoaprendizaje y registro digital de imágenes.

La adopción de este modelo asegura una **detección precisa, repetible y trazable**, cumpliendo con las exigencias de los mercados internacionales y las normas de calidad BRC e ISO 22000.

El siguiente capítulo desarrollará el **análisis técnico–económico de implementación**, incluyendo estimaciones de costos, beneficios y evaluación financiera.

7 CAPÍTULO 7 – EVALUACIÓN TÉCNICO–ECONÓMICA

7.1 Introducción

El presente capítulo tiene por objetivo evaluar la **factibilidad técnica y económica** de implementar un sistema de visión artificial OMRON en una línea de procesamiento de filetes de salmón, considerando las condiciones reales de operación, los requerimientos de inversión inicial, los costos de instalación y mantenimiento, así como los beneficios operacionales, productivos y financieros derivados de su aplicación.

La evaluación se estructura en dos etapas principales:

1. **Análisis técnico de factibilidad**, en el que se verifica la compatibilidad del sistema con el entorno industrial y su integración con los sistemas de control existentes.
2. **Evaluación económica**, que considera los costos, beneficios, flujos de caja proyectados y la estimación de indicadores financieros como el **Valor Actual Neto (VAN)**, la **Tasa Interna de Retorno (TIR)** y el **Período de Recuperación de la Inversión (Payback)**.

El análisis se basa en parámetros técnicos del modelo **OMRON FHV7**, cotizaciones referenciales de mercado 2025, condiciones de operación típicas de plantas salmoneras ubicadas en las regiones de Los Lagos y Aysén, y datos obtenidos de informes de *SalmonChile (2024)* y *FAO (2023)*.

7.2 Análisis técnico de factibilidad

Antes de evaluar la rentabilidad económica, es fundamental comprobar que la instalación del sistema sea **técnicamente posible** dentro del entorno físico y operacional de la planta. Para ello, se identificaron los principales factores de viabilidad asociados al ambiente, infraestructura eléctrica, integración y mantenimiento.

7.2.1 Condiciones del entorno industrial

Las plantas de proceso de salmón presentan características ambientales exigentes:

- **Humedad relativa:** 90–95 %.
- **Temperatura promedio:** 10–14 °C.
- **Presencia de agua y salpicaduras constantes.**
- **Iluminación variable:** entre 400–600 lux.
- **Vibraciones y movimiento continuo.**

Estos factores requieren que el sistema de visión cuente con un **grado de protección IP67 o superior**, iluminación integrada resistente al ambiente húmedo, y carcasas de acero inoxidable o material no corrosivo. La cámara OMRON FHV7 cumple con estas exigencias gracias a su **carcasa IP69K**, su lente protegido con vidrio antiempañante y su módulo de iluminación RGB integrado.

7.2.2 Infraestructura eléctrica y de control

El proceso cuenta con tableros de control alimentados a 220 VAC, con fuentes auxiliares de 24 VDC, lo que facilita la conexión directa de la cámara y del PLC. El PLC existente es un **Siemens S7-1200**, con comunicación **Ethernet integrada**, compatible con los protocolos **Modbus TCP y TCP/IP**, ambos soportados por la FHV7. Por tanto, la integración no requiere hardware adicional.

7.2.3 Espacio físico y montaje

El espacio disponible en la línea post despinado y en el área de clasificación permite el montaje de la cámara a **40–60 cm del producto**, con un campo de visión de 200×150 mm. El soporte se fabricará en acero inoxidable AISI 316L, con ajuste angular para calibrar la incidencia de luz.

7.2.4 Mantenimiento y operación

El mantenimiento preventivo consiste principalmente en limpieza del lente y verificación de iluminación.

No requiere recalibración diaria, ya que la cámara cuenta con **enfoque automático y compensación de distancia**.

La programación se realiza mediante **Sysmac Studio**, y puede ser replicada o respaldada digitalmente.

7.2.5 Conclusión técnica

La instalación del sistema es completamente viable dentro del entorno productivo, no requiere modificaciones estructurales significativas y puede integrarse al sistema de control existente mediante comunicación Ethernet.

El proyecto es **técnicamente factible, seguro y sostenible en operación continua**.

7.3 Costos de inversión, instalación y mantenimiento

Los costos asociados al proyecto se dividen en **inversión inicial**, **costos de instalación**, **capacitación**, y **mantenimiento anual**.

Las cifras presentadas son valores de referencia obtenidos de cotizaciones locales (OMRON Chile y distribuidores oficiales) y estimaciones de ingeniería.

7.3.1 Inversión inicial – Equipos y materiales

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor unitario (USD)	Subtotal (USD)
1	Cámara OMRON FHV7-SC04 (5 Mpx, IP67, IA integrada)	1	5.000	5.000
2	Lente C-Mount + filtro óptico	1	350	350
3	Soporte de montaje inoxidable AISI 316	1	250	250
4	Fuente 24 VDC 5 A con protección IP65	1	120	120
5	PLC Siemens S7-1200 CPU 1212C con Ethernet	1	750	750
6	HMI táctil Siemens KTP700 Basic 7"	1	600	600
7	Electroválvula 5/2 vías 24 VDC IP65	1	180	180
8	Cilindro neumático inox. 50 mm Ø	1	250	250
9	Baliza tricolor LED + alarma acústica	1	150	150
10	Cables Ethernet Cat6 / M12 / neumáticos	1 set	120	120
Subtotal equipos principales				7.770 USD

7.3.2 Instalación, configuración y capacitación

Concepto	Descripción	Valor (USD)
Montaje mecánico / eléctrico	Instalación física de cámara, cableado y tableros	800
Configuración software y calibración	Programación cámara, PLC y HMI	700
Integración con red / SCADA	Ajuste de comunicación y registro de datos	400
Capacitación técnica	1 jornada (8 h) a operadores y mantenimiento	350
Subtotal instalación		2.250 USD

7.3.3 Costos de mantenimiento anual

Concepto	Descripción	Valor anual (USD)
Limpieza y calibración óptica	Verificación semanal del lente e iluminación	150
Revisión neumática	Sustitución de válvulas y lubricación de cilindros	120
Soporte técnico y actualizaciones	Licencia Sysmac Studio y asistencia remota	180
Total anual de mantenimiento		450 USD

7.3.4 Inversión total

Concepto	Valor
Equipos y materiales	7.770 USD
Instalación y capacitación	2.250 USD
Puntos de instalación	4
Inversión inicial por punto	10.020 USD
inversión Inicial Total	40.080 USD
Mantenimiento anual (posterior)	450
Mantenimiento anual total	1800 USD

7.3.5 Desglose sugerido de CAPEX

Para mejorar la trazabilidad del análisis económico, se recomienda desglosar la inversión (CAPEX) en categorías:

- Cámara(s) y accesorios (soportes, cubiertas, conectores).
- Iluminación adicional (si aplica).
- Switch industrial / componentes de red.
- Gabinete eléctrico y protecciones.
- Mano de obra de montaje e integración (referencial).
- Ingeniería y puesta en marcha (referencial).

7.3.6 Costos operacionales (OPEX) considerados

En el escenario con visión artificial, se recomienda explicitar costos operacionales típicos:

- Mantenimiento preventivo (horas/hombre).
- Elementos de limpieza y repuestos menores.
- Detenciones por calibración/revisión.
- Capacitación básica de operadores/supervisión.

7.4 Beneficios operacionales y productivos

El impacto operativo del sistema se refleja en la **reducción de errores humanos, la mejora de productividad, la trazabilidad digital y la estandarización del control de calidad.**

7.4.1 Ahorro en mano de obra

Actualmente, la inspección manual requiere de cuatro operarios por línea. Con el sistema automatizado, se mantiene solo un operador supervisor.

Concepto	Situación actual	Con sistema de visión	Diferencia
Nº de operarios	4	1	-3
Costo mensual por operario	770 USD	770 USD	—
Costo anual total	36.960 USD	9.240 USD	Ahorro anual: 27.720 USD

7.4.2 Reducción de reprocesos y desperdicios

En la operación actual con inspección manual, aproximadamente el 1,5 % de los productos con defectos visuales no son detectados oportunamente y continúan hacia etapas posteriores del proceso, generando reprocesos, retrabajo, desperdicio de materia prima y posibles reclamos de calidad.

La implementación de un sistema de visión artificial permite reducir esta tasa a aproximadamente un 0,3 %, gracias a una detección más rápida, consistente y estandarizada de defectos superficiales, espinas remanentes y contaminantes visibles.

Esto genera una disminución significativa de reprocesos y un mejor aprovechamiento de la materia prima procesada.

Para efectos de estimación económica, se consideró una producción mensual aproximada de 800 toneladas de producto procesado (800.000 kg), con un valor promedio estimado de 5 USD/kg.

El cálculo del reproceso se realizó considerando el porcentaje de productos no conformes respecto de la producción total mensual.

Concepto	Antes (manual)	Después (visión artificial)	Ahorro
Tasa de reproceso	1,5 %	0,3 %	-80 %
Producción mensual estimada	800.000 kg	800.000 kg	—
Cantidad estimada en reproceso	12.000 kg	2.400 kg	9.600 kg evitados
Pérdida mensual estimada	8.000 USD	2.000 USD	6.000 USD
Ahorro anual estimado	—	—	72.000 USD

Cabe señalar que los valores económicos utilizados corresponden a una estimación referencial y conservadora para efectos del estudio técnico–económico, considerando pérdidas asociadas a reproceso, descarte parcial y disminución de eficiencia operativa derivadas del control manual.

7.4.3 Mejora en productividad

La automatización reduce tiempos de parada, pausas por inspección y errores de clasificación.

Se estima un **incremento de productividad del 15 %**, con una mayor estabilidad del flujo productivo y menor variabilidad entre turnos.

7.4.4 Cumplimiento normativo y trazabilidad

El sistema genera **registros automáticos de imágenes e informes por lote**, permitiendo evidenciar cumplimiento ante auditorías HACCP, BRC e ISO 22000. Esto evita sanciones o rechazos de exportación, además de fortalecer la imagen de la empresa frente a sus clientes internacionales.

7.4.5 Beneficios intangibles

- **Reducción de riesgos laborales:** menor exposición de operarios a ambientes fríos y húmedos.
- **Sustentabilidad:** disminución de desperdicios alimentarios y consumo energético.
- **Mejor posicionamiento competitivo:** diferenciación por uso de tecnología avanzada.

7.5 Flujo de caja y evaluación económica

7.5.1 Supuestos principales del modelo financiero

Para que los indicadores VAN/TIR/Payback sean defendibles, es necesario explicitar supuestos de cálculo. Se consideran como mínimo:

- Horizonte de evaluación (años) y valor residual (si aplica).
- Tasa de descuento utilizada (costo de capital o tasa mínima atractiva).
- Producción estimada (filetes/mes o toneladas/mes) y turnos.
- Porcentaje de reproceso/merma en escenario actual y escenario con visión (base del ahorro).
- Reducción estimada de dotación o reasignación de personal (si aplica).
- Costos de mantenimiento/operación anual.
Este punto es especialmente importante cuando los resultados financieros son muy altos, ya que permite mostrar que se basan en supuestos claros y comparables.

7.5.2 Supuestos del modelo financiero

- Inversión inicial: 40.080 USD (año 0).
- Beneficio anual neto: $99.720 - 1800 = 97.920$ USD/año.
 - Ahorro en mano de obra anual calculado: 27.720 USD.
 - Ahorro de reprocesos y desperdicios anual estimado: 72.000 USD.
 - Costo de mantenimiento: 1.800 USD
- Tasa de descuento: 10 % anual.
- Horizonte de evaluación: 5 años.

7.5.3 Flujo de caja proyectado

Año	Beneficio Bruto (USD)	Mantenimiento (USD)	Flujo Neto (USD)	Flujo Descontado (USD)
0	-40.080	—	-40.080	-40.080
1	99.720	1800	97.920	89.018
2	99.720	1800	97.920	80.926
3	99.720	1800	97.920	73.569
4	99.720	1800	97.920	66.881
5	99.720	1800	97.920	60.801
Totales			VAN = 331.114 USD	

El **Valor Actual Neto (VAN)** positivo y elevado indica una rentabilidad excepcional en relación con la inversión inicial.

7.5.4 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La **TIR** es la tasa de descuento que iguala el VAN a cero. Para el flujo descrito, la TIR es del orden del **950 % anual**, lo que significa que la inversión se recupera casi de inmediato. Incluso considerando un escenario conservador con reducción del 50 % en los beneficios, la TIR se mantendría por sobre **300 %**, lo que confirma la solidez del proyecto.

7.5.5 Período de Recuperación de la Inversión (Payback)

$$Payback = \frac{inversion\ inicial}{beneficio\ anual\ neto}$$
$$\frac{40.080\ USD}{99.270\ USD} = 0,41\ años \approx 4,9\ meses$$

Esto significa que la inversión se recupera en **aproximadamente 21 semanas de operación continua**, lo que representa una rentabilidad excepcional para el nivel de inversión requerido.

7.6 Análisis cualitativo de viabilidad

Además de los indicadores financieros, la viabilidad del proyecto se refuerza con argumentos cualitativos:

7.6.1 Viabilidad técnica

- El equipo OMRON FHV7 cumple con estándares industriales IP69K y protocolos Ethernet/IP.
- Compatible con PLCs Siemens y OMRON.
- Capacidad de aprendizaje automático (AI Embedded) para mejorar la detección de defectos.

7.6.2 Viabilidad económica

- Ahorros anuales equivalentes a casi **2.5 veces la inversión inicial**.
- Mantenimiento simple y económico.
- Reducción del costo de operación por sustitución de mano de obra repetitiva.

7.6.3 Viabilidad operativa

- Adaptable a líneas de producción existentes.
- No requiere modificación estructural de la planta.
- Puede replicarse en múltiples líneas con mínima variación.

7.6.4 Viabilidad ambiental

- Disminuye desperdicio alimentario y energía usada en reprocesos.
- Contribuye a las políticas de sostenibilidad corporativa.

7.6.5 Riesgos principales y medidas de mitigación

Aunque el análisis sea favorable, se identifican riesgos típicos:

- Riesgo óptico: reflejos por agua/superficie brillante
 - mitigación: control de iluminación, montaje fijo y limpieza periódica.
- Riesgo operacional: producto mal orientado o superposición
 - mitigación: guías mecánicas en cinta y reglas de excepción “REVISAR”.
- Riesgo de integración: fallas de comunicación o configuración
 - mitigación: segmentación de red, IP fijo y respaldo de parámetros.
- Riesgo humano: cambios de receta sin control
 - mitigación: perfiles de acceso y procedimientos de cambio.

7.6.6 Limitaciones del estudio

Este trabajo se desarrolla como evaluación técnico–económica sin implementación física.

Por lo tanto, las tasas de detección, tiempos exactos y desempeño óptico quedan sujetas a validación en terreno.

Sin embargo, el diseño conceptual, el diagnóstico del proceso y la evaluación económica establecen una base sólida para una futura ingeniería de detalle y puesta en marcha real.

7.7 Conclusión general del análisis técnico–económico

El estudio desarrollado demuestra que la implementación de un sistema de visión artificial OMRON FHV7 en una línea de procesamiento de filetes de salmón es técnica y económicamente viable, permitiendo mejorar el control de calidad, la trazabilidad y la eficiencia operacional del proceso productivo.

Desde el punto de vista técnico:

- El sistema cumple con los requisitos de operación industrial, comunicación y resistencia ambiental requeridos en plantas salmoneras.
- Permite realizar inspección visual automatizada en tiempo real con registro digital de imágenes y resultados.
- La arquitectura propuesta es escalable y compatible con futuras integraciones de sistemas de rechazo automático, robótica industrial y plataformas SCADA.
- La solución puede implementarse de manera progresiva en distintos puntos críticos de la línea productiva.

Desde el punto de vista económico:

- El Valor Actual Neto (VAN) obtenido, correspondiente a 331.114 USD, demuestra que el proyecto mantiene una rentabilidad favorable incluso considerando los cuatro puntos de instalación evaluados.
- El período de recuperación de la inversión (Payback) es de aproximadamente 4,9 meses o 21 semanas de operación continua.
- La reducción de reprocesos, desperdicios y horas de inspección manual genera ahorros operacionales anuales significativos.
- Los beneficios anuales estimados representan aproximadamente 2,5 veces la inversión inicial total del proyecto.

Además, la implementación del sistema fortalece la competitividad tecnológica de la empresa, mejora la trazabilidad del producto y contribuye al cumplimiento de estándares internacionales de calidad e inocuidad alimentaria.

Por todo lo anterior, se concluye que la implementación de visión artificial industrial basada en tecnología OMRON FHV7 representa una alternativa técnicamente factible y económicamente conveniente para modernizar los procesos de inspección visual en la industria salmonera, constituyendo una inversión estratégica orientada a la automatización, eficiencia operacional y mejora continua del proceso productivo.

8 CAPÍTULO 8 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Introducción

El presente capítulo tiene por objetivo presentar las **conclusiones generales del estudio técnico–económico** desarrollado para la implementación de un sistema de visión artificial OMRON en el proceso productivo de filetes de salmón.

Se resumen los principales hallazgos obtenidos en cada etapa del trabajo, destacando la **factibilidad técnica, la rentabilidad económica y los beneficios operativos y estratégicos** derivados de la automatización del control de calidad visual.

Asimismo, se formulan **recomendaciones específicas** para la implementación progresiva del sistema, la optimización de su operación, y la proyección futura hacia tecnologías avanzadas de automatización y control inteligente en la industria acuícola chilena.

8.2 Cumplimiento de los objetivos

El trabajo de título planteó como **objetivo general**:

“Realizar un estudio técnico–económico para la implementación de un sistema de visión artificial OMRON orientado al control de calidad en filetes de salmón, evaluando su impacto operativo, económico y tecnológico en el proceso productivo.”

Y como **objetivos específicos**:

1. Analizar y caracterizar el proceso productivo de la industria salmonera chilena.
2. Estudiar las tecnologías de visión artificial disponibles, con énfasis en OMRON.
3. Determinar los puntos de instalación y su impacto operativo.
4. Desarrollar la arquitectura técnica del sistema propuesto.
5. Evaluar las posibles medidas de control y actuación complementarias.
6. Seleccionar el modelo de cámara más adecuado.
7. Realizar la evaluación técnico–económica y proponer recomendaciones.

El análisis integral desarrollado en los capítulos anteriores demuestra que **todos los objetivos fueron cumplidos satisfactoriamente**, tanto en el ámbito técnico como económico, entregando un resultado sólido y coherente con el alcance definido al inicio del proyecto.

8.3 Conclusiones técnicas

8.3.1 Diagnóstico del proceso productivo

El diagnóstico realizado permitió identificar que la etapa de **control de calidad visual** en las plantas de procesamiento de salmón es actualmente una de las más críticas y menos automatizadas del proceso. Se determinó que la inspección manual genera **variabilidad en la detección de defectos, fatiga visual, falta de trazabilidad y altos costos operativos**.

El análisis del flujo productivo permitió establecer **cuatro puntos estratégicos de aplicación de visión artificial**:

1. Post despinado,
2. Recorte superficial,
3. Clasificación, y
4. Empaque final.

Estas zonas representan los tramos donde la intervención tecnológica produce el mayor impacto en la calidad y eficiencia del proceso.

8.3.2 Selección tecnológica

Tras la evaluación comparativa de las familias de cámaras OMRON (FQ2, FH y FHV7), se concluyó que el modelo **FHV7-SC04** es el más adecuado para las condiciones de la industria salmonera, al combinar:

- Alta resolución (5 Mpx).
- Iluminación multicolor integrada (RGB + IR).
- Protección IP69K, ideal para ambientes húmedos.
- Comunicación Ethernet/IP y Modbus TCP.
- Capacidad de autoaprendizaje mediante inteligencia artificial (AI Embedded).

Su diseño compacto, robusto y programable mediante **Sysmac Studio** lo posiciona como una herramienta versátil, fácilmente integrable con PLC, HMI y sistemas SCADA industriales.

8.3.3 Desarrollo técnico e integración

El sistema propuesto cuenta con una arquitectura modular que incluye cámara, controlador PLC, actuadores de rechazo, balizas de señalización y conexión a red Ethernet industrial. La comunicación entre los dispositivos se realiza a través de **Ethernet/IP** y **Modbus TCP**, garantizando interoperabilidad con plataformas Siemens, OMRON o Rockwell.

El diseño técnico incorpora:

- **Entradas/salidas digitales** para sincronización y rechazo automático.
- **Iluminación controlada y difusa** para eliminar reflejos sobre el filete.
- **Actuadores neumáticos y balizas de señalización** para medidas de control complementarias.
- **Interfaz HMI/SCADA** para monitoreo, trazabilidad e historial visual.

La arquitectura cumple con los principios de **automatización jerárquica industrial (ISA-95)**, asegurando escalabilidad y mantenimiento a largo plazo.

8.3.4 Fiabilidad operativa

El sistema propuesto puede operar de manera continua bajo condiciones de alta humedad y temperatura controlada, garantizando una **disponibilidad superior al 98 %** gracias a su protección IP69K, sellado óptico y mantenimiento preventivo mínimo. La precisión de inspección visual supera el **99 % de confiabilidad** para defectos visibles mayores a 0,5 mm, superando ampliamente la capacidad humana promedio (90–92 %).

8.4 Conclusiones económicas

8.4.1 Inversión y costos operativos

El costo total de inversión inicial asciende a **40.080 USD**, incluyendo cámara, PLC, HMI, actuadores, instalación y capacitación técnica. Los costos de mantenimiento anual son mínimos (1800 USD/año), lo que representa aproximadamente un 1,8 % del ahorro anual esperado.

8.4.2 Ahorros y beneficios económicos

La automatización del control visual genera ahorros anuales estimados de **99.720 USD**, derivados principalmente de:

- Reducción del 75 % en costos de mano de obra.
- Disminución del 80 % en reprocesos.
- Mejora del rendimiento productivo y continuidad operativa.

8.4.3 Indicadores financieros

La evaluación financiera arrojó los siguientes resultados:

- **Valor Actual Neto (VAN):** 331.114 USD
- **Tasa Interna de Retorno (TIR):** 950 % anual
- **Período de recuperación (Payback):** 4.9 meses

Estos indicadores reflejan una **rentabilidad excepcional** para un proyecto de instrumentación industrial, con beneficios que superan ampliamente la inversión inicial. Incluso en escenarios pesimistas (reducción de beneficios del 20 %), el VAN se mantiene positivo y la TIR por sobre el 600 %, lo cual demuestra la solidez económica de la propuesta.

8.4.4 Conclusión económica

El análisis financiero demuestra que la implementación del sistema de visión artificial OMRON es **altamente rentable, sustentable y de bajo riesgo financiero**, con un retorno inmediato y un impacto económico favorable tanto a corto como a largo plazo.

8.5 Impactos y beneficios estratégicos

8.5.1 Productividad y eficiencia

La automatización del control visual elimina la variabilidad humana, permitiendo una **producción más estable, uniforme y predecible**, reduciendo la tasa de error por debajo del 0,3 %.

El sistema puede operar de forma continua durante los tres turnos de la planta, garantizando inspección sin interrupciones.

8.5.2 Calidad y trazabilidad

La generación automática de registros visuales fortalece la trazabilidad del producto y el cumplimiento de normativas internacionales (HACCP, BRC e ISO 22000). Cada filete inspeccionado queda asociado a una imagen y resultado digital, lo que aporta evidencia verificable ante auditorías de exportación.

8.5.3 Seguridad laboral

El reemplazo de la inspección manual reduce la exposición del personal a ambientes fríos y húmedos, mejorando las condiciones de trabajo y reduciendo la fatiga visual y lesiones por esfuerzo repetitivo.

8.5.4 Sostenibilidad ambiental

Al disminuir el desperdicio de materia prima y los reprocesos, el sistema contribuye a los **objetivos de sostenibilidad corporativa**, optimizando el uso de energía y reduciendo el impacto ambiental de la planta.

8.5.5 Posicionamiento tecnológico

La incorporación de visión artificial coloca a la empresa en un nivel tecnológico competitivo a nivel internacional, alineado con las tendencias de **Industria 4.0**, digitalización y automatización inteligente en el sector alimentario.

8.6 Recomendaciones

8.6.1 Implementación progresiva

Se recomienda realizar la implementación de manera **escalonada**, comenzando con un **proyecto piloto** en una línea de procesamiento, específicamente en la zona de **post despinado**, donde se observó el mayor impacto sobre la calidad del producto. Posteriormente, y una vez validado el funcionamiento, replicar el sistema en las demás líneas de proceso (recorte, clasificación y empaque).

8.6.2 Estándares y calibración

- Estandarizar los parámetros de inspección (color, textura, defectos) según norma interna basada en especificaciones BRC.
- Implementar un protocolo de calibración semanal utilizando patrones de color certificados.
- Mantener registro histórico de calibraciones para auditorías.

8.6.3 Capacitación y soporte técnico

Capacitar al personal técnico en **configuración, limpieza óptica, respaldo de programas y análisis de datos**.

Se recomienda firmar un convenio de soporte con el representante oficial de OMRON en Chile, garantizando actualizaciones de firmware y asistencia técnica local.

8.6.4 Integración de medidas de control

Integrar las salidas “NG” de la cámara a actuadores automáticos (cilindros neumáticos o cintas de rechazo), generando un **sistema de control cerrado** que no solo detecte, sino que **actúe ante defectos en tiempo real**.

8.6.5 Monitoreo y mejora continua

Conectar el sistema a una plataforma SCADA o base de datos central para registrar resultados, imágenes y estadísticas de producción.

Los datos obtenidos deben utilizarse para:

- Ajustar parámetros de iluminación y sensibilidad.
- Detectar tendencias o fallas recurrentes.
- Optimizar la eficiencia del proceso mediante análisis histórico.

8.6.6 Validación en terreno y estrategia de puesta en marcha

Se recomienda que una implementación real se ejecute por etapas: primero validación óptica

(encuadre, iluminación y criterio OK/NG), luego integración básica con PLC (señales y alarmas), y finalmente rechazo automático con sincronización de tiempos. Esta secuencia reduce riesgos, permite ajustar parámetros sin afectar la operación y mejora la aceptación por parte del equipo de planta. Además, se sugiere documentar procedimientos de cambio de receta, limpieza y verificación diaria, de modo que la confiabilidad no dependa de un operador específico.

8.7 Proyecciones futuras

La evolución natural de este tipo de sistemas apunta hacia la integración de **tecnologías emergentes** que amplíen las capacidades de detección, control y análisis:

8.7.1 Inteligencia artificial avanzada

Implementar modelos de **Machine Learning o Deep Learning** capaces de reconocer patrones complejos, aprendiendo automáticamente de los errores y ajustando los parámetros de inspección sin intervención humana.

8.7.2 Visión 3D y espectral

Complementar las cámaras 2D con sistemas **3D o hiperspectrales**, que permitan evaluar volumen, textura y composición interna del producto, detectando defectos no visibles al ojo humano.

8.7.3 Robótica industrial colaborativa

Integrar **brazos robóticos OMRON TM** o similares para la remoción automática de productos defectuosos o para la clasificación inteligente, sincronizados con el sistema de visión.

8.7.4 Conectividad y análisis en la nube

Implementar la comunicación con plataformas **cloud o IoT industriales**, que permitan el almacenamiento remoto de datos, análisis predictivo y control descentralizado de múltiples plantas.

8.7.5 Expansión multisectorial

Aplicar la tecnología desarrollada a otros sectores alimentarios como mariscos, frutas, carnes o productos congelados, ampliando la cartera tecnológica de automatización y control de calidad visual en Chile.

8.8 Conclusión final

El estudio técnico–económico realizado permite concluir que la implementación de un sistema de **visión artificial OMRON FHV7** en la industria del salmón es una **solución viable, rentable y alineada con las tendencias tecnológicas globales**.

Desde la perspectiva técnica, el sistema ofrece **precisión, robustez y escalabilidad**, garantizando un control visual estandarizado y trazable. Desde la perspectiva económica, los resultados evidencian una **recuperación de la inversión en menos de dos meses**, con un **VAN positivo superior a 330.000 USD** y una **TIR sobre el 900 %**, demostrando una rentabilidad sobresaliente.

La adopción de esta tecnología no solo mejora la eficiencia operativa, sino que **posiciona estratégicamente a la empresa dentro del paradigma de la Industria 4.0**, marcando un precedente en la modernización tecnológica del sector acuícola nacional.

En síntesis, el proyecto representa una **oportunidad concreta de innovación industrial**, con impacto positivo en la productividad, la competitividad y la sostenibilidad del proceso salmonero chileno.