

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE DE CONCEPCIÓN - REY BALDUINO DE BÉLGICA

**DISEÑO DE UN MODELO DE SERVICIO TÉCNICO ORIENTADO AL
MANTENIMIENTO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS Y MOTORES
ELÉCTRICOS EN SISTEMAS DE RIEGO AGRÍCOLA**

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Ingeniero en
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Nombre Alumno:
Sr. Pedro Miguel Soto Jaramillo

Nombre Profesor Guía:

Ing. Aldo Gabriel Fuentes Troncoso

2025



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: Diseño de un modelo de servicio técnico orientado al Mantenimiento de Bombas centrífugas y Motores eléctricos en sistemas de riego agrícola.

Nombre del candidato(a): Pedro Miguel Soto Jaca millo.

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial.

Campus: Concepción Departamento: Mercedes

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Aldo Fuentes Troncoso, 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: 06 Abril 2026 Firma: [Firma]

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 06 Abril 2026 Firma: [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.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi pareja, a mis padres y a mis hermanos, por su apoyo incondicional, por estar siempre presentes, por darme aliento e inspirarme a seguir adelante sin bajar los brazos, a pesar de todos los inconvenientes que enfrenté durante mi etapa estudiantil.

Gracias por su paciencia en los momentos en que estuve estresado o de mal humor, y aun así lograron comprenderme. A cada uno de ellos, gracias por nunca dejarme solo y por insistirme en luchar por mis sueños y metas hasta alcanzar este objetivo.

Asimismo, me dedico esta tesis a mí mismo, por no rendirme a pesar de todo lo que tuve que pasar para llegar a este punto. Dejé el liceo en primero medio, repetí primero y segundo medio en cinco ocasiones y en distintas instituciones, y finalmente logré completar tercero y cuarto medio mediante exámenes libres.

A pesar de no contar con una base académica tradicional para enfrentar la universidad, nunca dejé de creer en mí. Este logro demuestra que, cuando uno realmente quiere alcanzar algo, es posible. Hoy me siento orgulloso de este camino, y aunque muchas veces pensé en rendirme, el apoyo de mi familia, mi pareja y mis compañeros fue fundamental para no desistir.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi pareja, Geraldine Espinoza, por su apoyo incondicional y amor a lo largo de todo este proceso. Por cada noche en que estuvo a mi lado mientras estudiaba, por su dedicación al prepararme cosas para llevar a la universidad, y por su constante preocupación por mi bienestar. Por motivarme seguir adelante cuando quería dejar todo, por escucharme, entenderme y comprenderme.

Gracias por ayudarme a mejorar mis trabajos, por cada informe en el que me apoyaste para avanzar más rápido, por tu paciencia en cada detalle, y por acompañarme también en el desarrollo de esta tesis, aportando en la redacción, correcciones y mejoras. Agradezco también tu generosidad en momentos difíciles, como cuando me facilitaste tu auto en días de lluvia. Tu apoyo fue fundamental, y siempre lo llevaré en el corazón con profunda gratitud.

Agradezco a mi madre, Iris Jaramillo, por nunca dejarme solo, por su apoyo constante y sus valiosos consejos. Por confiar en mí, por sentirse orgullosa de mis logros y por darme siempre palabras de aliento para no desistir y dar lo mejor de mí en cada momento.

A mi hermana Antonia y a mi hermano Jason, por su apoyo incondicional, por motivarme a ser mejor cada día y por acompañarme en este proceso. Agradezco especialmente los momentos en que me ayudaron de manera concreta, como cuando me facilitaron herramientas para poder continuar, y por sus palabras de ánimo que fueron clave para seguir adelante.

Agradezco a mi profesor guía, Aldo Fuentes, por su compromiso y dedicación desde el primer momento. Por estar siempre disponible para resolver dudas, ya sea de manera presencial o por videollamada, por su comprensión durante los periodos en que no estuve en la región y por su constante apoyo. Su vocación, claridad al enseñar y disposición fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

A mis compañeros y profesores, quienes también fueron parte importante de este proceso, por su apoyo, por ayudarme a comprender mejor los contenidos y por su compromiso para que todo resultara de la mejor manera. Nunca me sentí solo, y eso fue clave en mi formación académica.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron a que este logro fuera posible, incluso si no han sido mencionadas directamente.

Muchas gracias.

INDICE

INTRODUCCION 1

ALCANCE 2

OBJETIVO GENERAL 3

OBJETIVOS ESPECIFICOS 3

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO 4

1. MARCO TEÓRICO 5

1.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA SERVIMANT 5

1.1.1 Fundación y ubicación..... 5

1.1.2 Giro y especialización 5

1.1.3 Misión y visión..... 6

1.1.4 Constitución y organización 6

1.1.5 Funciones principales 6

1.1.6 Cobertura geográfica 6

1.2 IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD Y PROBLEMÁTICAS DEL 7

SECTOR AGRÍCOLA 7

1.2.1 Necesidad del mercado agrícola..... 7

1.2.2 Principales carencias del cliente agrícola. 7

1.2.3 Impacto operativo y económico de las fallas. 8

1.3 SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO EN CHILE 10

1.3.1 Contexto nacional..... 10

1.3.2 Tipos de riego presurizado..... 10

1.3.3 Particularidades del pivote central 11

1.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE BOMBAS Y MOTORES UTILIZADOS EN 12

RIEGO AGRÍCOLA. 12

1.4.1 Bomba centrífuga. 13

1.4.2 Motor eléctrico..... 13

1.4.3 Conjunto bomba- motor..... 13

1.4 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL EQUIPO TIPO UTILIZADO EN RIEGO

AGRÍCOLA..... 14

1.5.1 Bomba centrífuga utilizada en riego agrícola 14

1.5.2 Tipos de bombas utilizadas en agricultura 14

1.5.3 Despiece funcional de la bomba centrífuga seleccionada 15

1.5 SISTEMA DE INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO EN RIEGO

16

AGRÍCOLA 16

1.6.1 Columna de agua y parámetros hidráulicos 18

1.6.2. Análisis de fallas del sistema de bombeo agrícola 19

1.6.3	Identificación de fallas frecuentes en el sistema de bombeo	19
1.7	NORMAS Y LEGISLACIÓN APLICABLE AL RIEGO TECNIFICADO. .	21
1.7.1	Marco legal del riego en Chile.....	21
1.7.2	Normas técnicas aplicables.....	21
1.7.3	Organismos de apoyo técnico	21
	Conclusión del marco teórico.....	22
CAPÍTULO 2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
2.1.	CONTEXTO Y ORIGEN DE LA IDEA	24
2.1.1	Experiencia profesional previa.....	25
2.1.2	Identificación de brechas en el mercado agrícola	26
2.2	LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN EN TERRENO	26
2.2.1	Instrumento de recolección de datos	27
2.3	CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA Y DEL TIPO DE EQUIPO	29
	PREDOMINANTE	29
2.3.1	Sistemas de riego presurizado utilizados en el sector agrícola	30
2.3.2	Predominio del sistema de riego por pivote central	31
2.3.3	Caracterización del conjunto bomba-motor utilizado en riego agrícola	32
2.3.4	Condiciones de operación del equipo en predios agrícolas	33
2.3.5	Importancia del conjunto bomba-motor como equipo crítico	34
2.4	CATASTRO DE EQUIPOS DE RIEGO AGRÍCOLA EN LA ZONA DE	34
	ESTUDIO	34
2.4.1	Objetivo del catastro.....	34
2.4.2	Zona geográfica y alcance del catastro.....	35
2.4.3	Metodología de levantamiento de información.....	37
2.4.4	Resultados del catastro de equipos.....	38
2.4.5	Identificación del equipo tipo para el caso piloto.	39
2.5	ANÁLISIS DE CAUSAS MEDIANTE METODOLOGÍA PARETO	40
2.5.1	Análisis de causa raíz de fallas en la bomba centrífuga mediante diagrama de Ishikawa.	43
2.5.2	Análisis de causa raíz en el motor eléctrico mediante diagrama de Ishikawa	44
2.5.3	Determinación de la causa raíz mediante la metodología de los 5 Por Qué	45
CAPÍTULO 3.	SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	47
3.	SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	48
3.1.	OBJETIVO DEL MODELO PROPUESTO	48
3.1.1	Oportunidad de desarrollo del proyecto	48
3.1.2	El modelo se estructura sobre tres pilares fundamentales.	49
3.2	DISEÑO DEL MODELO DE SERVICIO TÉCNICO SERVIMANT.....	49
3.2.1	Componentes operativos del modelo	50
3.2.2	Recursos necesarios para la implementación del modelo	50

3.2.3	Procedimientos operativos del servicio	51
3.3	SEGURIDAD INDUSTRIAL EN MANTENIMIENTO AGRÍCOLA	51
3.3.1	Importancia de la seguridad en faenas agrícolas.....	51
3.3.2	Normativa chilena de seguridad aplicable	51
3.3.3	Medidas preventivas y procedimientos operativos	52
3.4	APLICACIÓN DEL MODELO AL CASO PILOTO	52
3.4.1	Descripción del cliente y del sistema de bombeo	52
3.4.2	Diagnóstico inicial del sistema	53
3.4.3	Ejecución de la intervención en terreno	53
3.4.4	Resultados y verificación de operación	53
CAPÍTULO 4 – ESTUDIO ECONÓMICO.....		56
4.1	SUPUESTOS Y ALCANCE DEL ANÁLISIS ECONÓMICO.....	57
4.1.1	Horizonte de evaluación, moneda y enfoque del análisis.....	57
4.1.2	Alcance operativo y escenarios comparados	57
4.1.3	Supuestos comerciales y de costos.....	58
4.2	COSTOS ASOCIADOS A LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	59
4.2.1	Costos de inversión inicial (CAPEX).....	59
4.2.2	Costos operacionales (OPEX).....	61
4.3	PROYECCIÓN DE INGRESOS DEL MODELO	62
4.4	FLUJO DE CAJA PROYECTADO DEL MODELO	63
4.4.1	Estructura del flujo de caja	64
4.4.2	Resultados del flujo de caja proyectado	64
4.5	ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DEL MODELO	65
CONCLUSIONES		66
RECOMENDACIONES		67
BIBLIOGRAFÍA / FUENTES DE INFORMACIÓN		68
Referencias.....		68
ANEXOS.....		69

INDICE DE TABLAS

TABLA 1-1	Indicadores técnicos para evaluar disponibilidad y necesidad de mantenimiento.....	9
TABLA 1-2	Causas y efectos en fallas de sistemas de bombeo agrícola.....	20
TABLA 2-1	Resultados de la encuesta.....	28
TABLA 2-2	Brechas operativas y necesidades de mantenimiento en predios agrícolas.....	28
TABLA 2-3	Catastro de equipos de bombeo agrícola evaluados.....	36
TABLA 2-4	Catastro técnico del equipo de riego agrícola observado.....	38
TABLA 2-5	Priorización de fallas del sistema de bombeo agrícola mediante análisis Pareto.....	41
TABLA 2-6	Priorización de fallas del motor eléctrico mediante análisis Pareto.....	42
TABLA 3-1	Diagnostico técnico del cliente piloto (agrícola Transvaal SPA).....	54
TABLA 3-2	Indicadores de disponibilidad y confiabilidad del sistema de bombeo agrícola (caso piloto Transvaal SPA).....	55
TABLA 4-1	Supuestos de bombeo del cliente agrícola Traansval SPA.....	59
TABLA 4-2	Costos de inversión inicial (CAPEX).....	60
TABLA 4-3	Costos operacionales anuales del modelo de servicio técnico (OPEX).....	62
TABLA 4-4	Proyección de ingresos anuales del modelo de servicio técnico.....	63
TABLA 4-5	Flujo de caja proyectado del modelo de servicio técnico.....	64

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1	Sistema de riego por pivote central en operación.....	11
FIGURA 1-2	Despiece de la bomba centrífuga KSB Meganorm.....	16
FIGURA 1-3	Sistema de bombeo e impulsión para riego por pivote central.....	17
FIGURA 1-4	Esquema de aspiración, impulsión y altura manométrica total en un sistema de bombeo.....	18
FIGURA 1-5	Distribución regional de equipos de riego tipo pivote central y avances frontales en Chile (CNR, 2021)	22
FIGURA 2-1	sistema de bombeo en riego agrícola.....	24
FIGURA 2-2	Actividades de mantenimiento realizadas por la empresa Servimant en sistemas de bombeo.....	25
FIGURA 2-3	Levantamiento de información técnica en terreno mediante inspección de equipos de bombeo.....	27
FIGURA 2-4	Sistemas de riego presurizado utilizados en el sector agrícola....	31
FIGURA 2-5	Sistema de riego por pivote central utilizado en predios agrícolas.....	32
FIGURA 2-6	Conjunto bomba centrífuga horizontal acoplada a motor eléctrico trifásico.....	33
FIGURA 2-7	Evaluación técnica de equipos de bombeo en terreno para levantamiento de información.....	35
FIGURA 2-8	Zona agrícola con sistemas de riego por pivote central considerada en el catastro.....	36
FIGURA 2-9	Bomba centrífuga horizontal KSB Meganorm 125-400 (80) con motor eléctrico WEG 50 HP.....	40
FIGURA 2-10	Diagrama de Ishikawa para fallas recurrentes en bombas centrífugas.....	44
FIGURA 2-11	Diagrama de Ishikawa de fallas en el motor eléctrico.....	45
FIGURA 3-1	Sistema de bombeo del cliente agrícola Transvaal SPA.....	54

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

Sigla	Significado
CAPEX	Capital Expenditure (Inversión de capital inicial)
OPEX	Operational Expenditure (Costos operacionales)
CLP	Pesos Chilenos
CNR	Comisión Nacional de Riego
INDAP	Instituto de Desarrollo Agropecuario
EPP	Elementos de Protección Personal
MTTR	Mean Time To Repair (Tiempo medio de reparación)
MDT	Mean Down Time (Tiempo medio de indisponibilidad)
LOTO	Lock Out – Tag Out (Bloqueo y etiquetado de energía)
HMT	Alturo Manométrica Total
HP	Horse Power (Caballos de fuerza)

Símbolo	Descripción
\$	Valor monetario en pesos chilenos
%	Porcentaje
≥	Mayor o igual que
≤	Menor o igual que
→	Indica relación o consecuencia
kW	Kilowatt
mm	Milímetros
h	Hora

INTRODUCCION

Servimant es una empresa creada con el propósito de ofrecer servicios de reparación y mantenimiento de bombas centrífugas y motores eléctricos, orientada principalmente al área agrícola e industrial. La motivación para formar esta empresa surge de mi experiencia previa de más de tres años trabajando en otra compañía dedicada al mismo rubro, donde adquirí conocimientos técnicos, operativos y administrativos relacionados con la atención de clientes, gestión de servicios y diagnóstico de fallas en equipos electromecánicos.

Durante ese periodo de trabajo en terreno y en contacto directo con clientes de distintos sectores productivos, pude observar la creciente necesidad de apoyo técnico especializado en faenas agrícolas, especialmente en predios que utilizan sistemas de riego presurizado. Muchos agricultores enfrentan dificultades para mantener operativos sus equipos, carecen de proveedores que brinden asistencia confiable y oportuna, y dependen de servicios externos que no siempre llegan al campo o no cuentan con la disponibilidad necesaria en momentos críticos de la temporada.

A partir de esta experiencia y del conocimiento adquirido, surge la oportunidad de ampliar los servicios de Servimant a los distintos sistemas de riego tecnificado, por pivote central, goteo y otros, presentes en el medio, mediante la implementación de un modelo de negocio de servicio técnico en terreno que permita atender directamente en los predios, entregar diagnósticos precisos y ofrecer soluciones de mantención oportunas para bombas y sistemas de riego.

El presente estudio tiene como propósito evaluar la viabilidad técnica y económica de esta ampliación, identificando la demanda potencial, caracterizando el equipo tipo más utilizado por los agricultores, analizando las fallas recurrentes que afectan su operación y determinando los recursos, procedimientos y costos necesarios para implementar este servicio especializado. Con ello se busca establecer si la inversión es factible y si representa una oportunidad real de crecimiento para Servimant.

ALCANCE

El presente estudio se centra en evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar un modelo de negocio de servicio técnico en terreno para sistemas de riego agrícola, como una ampliación de las operaciones actuales de Servimant. El análisis se limita a:

1. La Región del Biobío y Ñuble, donde se concentra el catastro de agricultores considerado para el estudio.
2. Equipos de riego presurizado utilizados en predios agrícolas, particularmente el equipo tipo más representativo identificado en el catastro regional.
3. Servicios asociados a la mantención preventiva y correctiva en terreno, incluyendo inspección, diagnóstico, limpieza, ajuste, pruebas de funcionamiento y asesoría técnica.
4. Evaluación técnica de fallas recurrentes mediante herramientas de análisis como Pareto, Ishikawa y 5 porqués.
5. Proyección económica del modelo de negocio, considerando inversión inicial, costos operacionales, ingresos estimados y flujo de caja a 10 años.

Diseño del modelo operativo, que incorpora recursos humanos, equipamiento, logística y medidas de seguridad necesarias para ofrecer el servicio.

El estudio no incluye:

1. Mantención de pozos profundos (solo se menciona como proyección futura).
2. Análisis técnico de todas las marcas y modelos existentes en el mercado.
3. Evaluación de plantas de proceso industrial o sistemas eléctricos complejos fuera del ámbito agrícola.

El alcance se acota específicamente al servicio técnico en terreno para equipos de riego agrícola, permitiendo una evaluación clara y realista de la factibilidad del modelo propuesto.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar un modelo de negocio de servicio técnico en terreno orientado al mantenimiento de sistemas de riego agrícola, como una estrategia de ampliación de las operaciones de Servimant, para ofrecer un servicio eficiente y sostenible que permita captar, atender y fidelizar a la clientela agrícola.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1- Realizar un estudio de mercado y un catastro regional para identificar el número de agricultores, los tipos de sistemas de riego utilizados y el potencial nivel de demanda para un servicio técnico especializado en terreno.
- 2- Caracterizar el equipo tipo predominante en el sector agrícola, describiendo su funcionamiento, componentes principales y requerimientos básicos de operación, con el fin de establecer la base técnica para el análisis del problema.
- 3- Analizar las fallas más recurrentes del equipo tipo, aplicando herramientas de análisis como el diagrama de Pareto, el diagrama de Ishikawa y la metodología de los 5 porqués para determinar las causas raíz que afectan su rendimiento.
- 4- Definir, comparar y seleccionar alternativas de solución, evaluando criterios técnicos, operacionales y económicos que permitan determinar la viabilidad de implementar un modelo de servicio técnico en terreno.
- 5- Evaluar la viabilidad económica del modelo de negocio, desarrollando una memoria de cálculo con proyecciones de inversión, costos operacionales, captación de clientes y flujo de caja, que permita justificar la conveniencia de la inversión.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1. **MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se presentan los fundamentos técnicos y normativos que sustentan el funcionamiento de los sistemas de riego agrícola presurizado, los cuales operan mediante bombas centrífugas y motores eléctricos, tanto en pivotes centrales como en otros sistemas presurizados (aspersión, goteo o microaspersión).

Se abordan los principios operativos del conjunto bomba–motor y los conceptos de lubricación, rodamientos, alineación, seguridad laboral y normativa chilena aplicable al mantenimiento industrial.

El objetivo del capítulo es entregar una base conceptual que permita comprender los subsistemas involucrados en el riego tecnificado y su mantenimiento, sentando las bases para el diseño del modelo de servicio técnico propuesto.

Finalmente, este marco teórico permitirá sustentar el servicio técnico permanente de Servimant, estableciendo lineamientos para ofrecer soluciones de mantenimiento eficientes, seguras y adaptadas al sector agrícola nacional.

1.1 **ANTECEDENTES DE LA EMPRESA SERVIMANT**

1.1.1 **Fundación y ubicación**

Servimant – Servicios de Ingeniería y Mantenimiento Industrial fue fundada en el año 2025, en la comuna de Talcahuano, Región del Biobío (Chile). La empresa nació con el propósito de ofrecer soluciones técnicas eficientes y confiables en el área de mantenimiento industrial y agrícola. Actualmente, opera bajo un modelo de atención flexible, realizando reparaciones principalmente en terreno.

1.1.2 **Giro y especialización**

El giro principal de Servimant corresponde al mantenimiento industrial, con especial enfoque en equipos agrícolas e industriales, tales como bombas centrífugas, motores eléctricos, reductores y sistemas de impulsión de agua. Si bien la empresa posee en su razón social el servicio de ingeniería, esta área aún no se

encuentra plenamente implementada. En una segunda etapa se proyecta incorporar servicios de piping (montaje de cañerías industriales), selección de bombas y análisis de curvas hidráulicas, con el fin de complementar el mantenimiento con soluciones de ingeniería aplicada.

1.1.3 Misión y visión

Misión: Entregar un servicio técnico confiable, de calidad y trazable, orientado a mantener la continuidad operacional de los equipos de nuestros clientes mediante procedimientos seguros y eficientes

Visión: Posicionarse en un plazo de 10 años como una empresa líder en el rubro del mantenimiento industrial y agrícola en la zona centro-sur de Chile, contando con un taller físico propio y presencia regional consolidada.

1.1.4 Constitución y organización

Servimant es una microempresa compuesta por:

- **Dirección general y técnica:** Responsable de gestión comercial, coordinación operativa y supervisión técnica
- **Administración y contabilidad:** A cargo de un profesional Interno, responsable de la gestión financiera y tributaria.
- **Área operativa:** técnicos especializados contratados por faena, según la naturaleza y magnitud del trabajo.

1.1.5 Funciones principales

- Mantenimiento preventivo y correctivo de bombas centrífugas y motores eléctricos agrícolas e industriales.
- Cambio de rodamientos utilizando calentador por inducción.
- Sustitución de sellos mecánicos y alineamiento láser de ejes.
- Lubricación controlada y elaboración de registros trazables de mantenimiento.
- Medición eléctrica: aislamiento, continuidad y balance de fases.
- Diagnóstico técnico en terreno y atención de emergencias en sistemas de riego y equipos industriales.

1.1.6 Cobertura geográfica

Servimant presta servicios principalmente en la zona centro-sur de Chile, abarcando desde la Región Metropolitana hasta la Región de Los Lagos. Para

optimizar los tiempos de respuesta, la empresa proyecta establecer convenios con talleres de bobinado, maestranzas y proveedores locales en distintas regiones, lo que permitirá reducir costos logísticos y mejorar la eficiencia operativa en la atención de clientes agrícolas e industriales.

1.2 IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD Y PROBLEMÁTICAS DEL SECTOR AGRÍCOLA

1.2.1 Necesidad del mercado agrícola.

El sector agrícola chileno presenta una dependencia crítica de sus sistemas de bombeo y riego para sostener la producción, especialmente en zonas con déficit hídrico. Sin embargo, gran parte de los predios opera bajo esquemas de mantención correctiva o por temporada, realizando intervenciones sólo antes del inicio del periodo de riego o ante fallas graves. Esta práctica genera una brecha técnica y operativa en el rubro: existe escasa disponibilidad de servicios de mantenimiento industrial especializados en terreno, capaces de responder en tiempos acotados y con procedimientos normalizados. En la actualidad, los productores agrícolas con sistemas de bombeo tecnificado cuentan, en promedio, con entre 3 y 60 equipos por predio, lo que implica una alta demanda de disponibilidad operacional y necesidad de atención rápida en caso de falla. El tiempo máximo de inactividad admisible suele ser inferior a medio día, ya que, dependiendo del tipo de cultivo, un retraso prolongado en el riego puede generar pérdidas irreversibles en la producción.

Según antecedentes recopilados, un predio puede perder entre 5 y 20% de la producción por interrupciones de riego superiores a 12 horas.

1.2.2 Principales carencias del cliente agrícola.

Las entrevistas informales y observaciones en terreno realizadas por Servimant reflejan patrones comunes de insatisfacción y riesgo entre los productores agrícolas:

- Pérdida de cosecha: ante la falla de una bomba o motor en plena temporada de riego, el impacto económico supera con creces el costo del mantenimiento preventivo.

- Escasa disponibilidad de servicio técnico: los clientes manifiestan dificultad para encontrar empresas con atención inmediata en terreno, lo que agrava la pérdida de tiempo operativo.
- Dependencia de personal no técnico: en muchos casos, las tareas de lubricación o revisión son ejecutadas por operarios agrícolas sin formación en mantenimiento.
- Falta de planificación y trazabilidad: no existen registros de mantención ni pautas estandarizadas, lo que impide anticipar fallas o justificar tiempos de inactividad.
- Esta realidad refleja una oportunidad estratégica para la creación de un servicio técnico agrícola permanente, enfocado en bombas y motores eléctricos, que combine diagnóstico predictivo, mantenimiento planificado y respuesta inmediata ante emergencias.

1.2.3 Impacto operativo y económico de las fallas.

La falla de un sistema de bombeo puede traducirse en interrupciones parciales o totales del riego, con consecuencias directas sobre el rendimiento de los cultivos, el consumo energético y la continuidad productiva. En predios agrícolas orientados a la exportación, incluso una interrupción de medio día puede implicar pérdidas significativas en calidad y cantidad de producción, afectando contratos y plazos de entrega. A nivel económico, los principales impactos observados son:

Aumento del costo energético por funcionamiento forzado de bombas auxiliares.

- Horas improductivas de personal de riego.
- Disminución del caudal efectivo en la red de riego.
- Pérdida de confiabilidad en los equipos críticos.

1.2.4 Fundamentación de indicadores de mantenimiento

Los indicadores utilizados para evaluar la disponibilidad y necesidad de mantenimiento en sistemas de bombeo se basan en estándares de confiabilidad industrial y en recomendaciones de organismos técnicos y fabricantes.

En el ámbito industrial, fabricantes como SKF establecen que una adecuada lubricación, monitoreo de condición y registro de fallas permiten aumentar el tiempo medio entre fallas (MTBF) y reducir fallas prematuras, además de llevar control de horas de operación y detención como base para indicadores de confiabilidad.

En el contexto agrícola, el INIA señala la importancia de realizar mantenimiento

periódico en sistemas de riego, incluyendo inspecciones diarias, semanales y mensuales, con el fin de asegurar la continuidad operacional y prevenir fallas en equipos de bombeo. Asimismo, establece que la mantención adecuada de bombas es fundamental para evitar desgaste prematuro y pérdida de eficiencia.

Por su parte, la CNR promueve la gestión eficiente del riego, donde la continuidad operacional de los sistemas de bombeo depende directamente de la implementación de planes de mantenimiento preventivo y del control de la operación durante la temporada de riego.

En base a estos lineamientos, se definen los siguientes indicadores técnicos:

TABLA 1-1: Indicadores técnicos para evaluar disponibilidad y necesidad de mantenimiento.

Indicador	Definición	Unidad de medida	Objetivo o referencia
Tiempo medio entre fallas (MTBF)	Promedio de horas de funcionamiento entre fallas del equipo	Horas	$\geq 2000\text{ h}$
Tiempo medio de reparación (MTTR)	Tiempo promedio necesario para restaurar el equipo a operación	Horas	$\leq 4\text{ h}$
Disponibilidad operacional (%)	Porcentaje del tiempo en que el sistema se mantiene operativo	%	$\geq 95\%$
Frecuencia de mantenimiento	Cantidad de intervenciones planificadas por año	Nº intervenciones/año	4 (trimestral)
Registro de trazabilidad	Existencia de planillas o registros técnicos actualizados.	Si/No	100% cumplido

Nota. Indicadores propuestos en base a referencias SKF, CNR e INIA, aplicados a sistemas de bombeo agrícola con operación continua en temporada de riego. Elaboración propia.

1.3 SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO EN CHILE

1.3.1 Contexto nacional

Chile enfrenta un escenario de creciente escasez hídrica, lo que ha impulsado la incorporación de tecnologías de riego tecnificado que optimizan el uso del agua en la producción agrícola.

Según la Comisión Nacional de Riego (CNR, 2023), la superficie con riego presurizado supera las 300.000 hectáreas, registrando un aumento sostenido en las últimas dos décadas gracias a los incentivos de la Ley N.º 18.450 de Fomento al Riego y Drenaje. El Ministerio de Agricultura (2023) informa que existen más de 2.000 sistemas de pivote central y avances frontales distribuidos principalmente en las regiones del Maule, Ñuble, Biobío y La Araucanía, los cuales se han convertido en una herramienta esencial para enfrentar la sequía prolongada y mantener la productividad agrícola.

En los últimos veinte años, la superficie con riego tecnificado ha mostrado una tendencia sostenida al alza, impulsada por la necesidad de mejorar la eficiencia hídrica, especialmente en cultivos de exportación como berries (arándanos y frutales menores), maíz, frutales y alfalfa. Los reportes de la CNR (2023) indican que la tecnificación ha pasado de ser una práctica complementaria, a consolidarse como un componente esencial para sostener la productividad agrícola en escenarios de sequía prolongada.

Dentro de este contexto, el correcto funcionamiento de bombas centrífugas y motores eléctricos adquiere un rol crítico, ya que los sistemas presurizados dependen directamente de la presión y el caudal continuo generados por estos equipos. Una falla en el conjunto bomba-motor no solo interrumpe el riego, sino que reduce la eficiencia hídrica y energética, afectando la disponibilidad operativa del sistema completo.

1.3.2 Tipos de riego presurizado

Los principales sistemas de riego presurizado utilizados en Chile son:

- **Riego por aspersión fija o móvil:** aplica el agua en forma de lluvia mediante boquillas distribuidas en la superficie a regar.
- **Riego por pivote central:** sistema circular mecanizado con torres móviles que rotan en torno a un punto fijo.

- **Riego lineal o de avance frontal:** similar al pivote, pero se desplaza en línea recta cubriendo áreas rectangulares.
- **Microaspersión y goteo:** sistemas de aplicación localizada, utilizados principalmente en cultivos frutales y hortalizas de alto valor.

Por ello, la mantención de estos equipos es fundamental para asegurar la disponibilidad operativa del riego tecnificado y evitar pérdidas productivas por fallas durante la temporada. Por ello, la mantención de estos equipos es fundamental para asegurar la disponibilidad operativa del riego tecnificado y evitar pérdidas por fallas en temporada.



Figura 1–1. Sistema de riego por pivote central en operación

Nota. Imagen tomada de Comisión Nacional de Riego (CNR). Manual de Riego Tecnificado: *riego por aspersión y pivote central*. Santiago, Chile, 2023. En la figura se observa un sistema de riego por pivote central que distribuye agua mediante aspersores instalados en torres móviles, logrando un riego uniforme y eficiente en grandes superficies agrícolas.

1.3.3 Particularidades del pivote central

El pivote central es un sistema de riego mecanizado que distribuye agua mediante tuberías montadas sobre torres móviles con ruedas motrices, las cuales giran en torno a un punto fijo.

El caudal es impulsado por una bomba centrífuga, que entrega la presión necesaria para que el agua sea esparcida uniformemente mediante aspersores o boquillas a lo largo de la estructura

Entre sus principales componentes destacan:

- **Torre fija o punto central:** conexión principal de alimentación hidráulica.
- **Torres móviles:** soportan la línea de distribución y permiten el movimiento circular.
- **Tubería principal:** conduce el agua hacia los aspersores.
- **Panel de control:** regula presión, velocidad y tiempo de riego.

Este sistema ofrece ventajas como uniformidad de riego, automatización, reducción de mano de obra y eficiencia energética, siendo una alternativa clave para el riego en grandes extensiones agrícolas.

La operación eficiente del pivote depende directamente de que la bomba centrífuga mantenga el caudal y la presión requeridos. Una disminución en estos parámetros provoca:

- Menor uniformidad de riego,
- Reducción del alcance de los aspersores,
- Sobreesfuerzo mecánico en el equipo,
- Pérdida de eficiencia hídrica.

Por ello, la mantención del conjunto bomba–motor es fundamental para asegurar la disponibilidad operativa del sistema durante toda la temporada agrícola.

1.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE BOMBAS Y MOTORES UTILIZADOS EN RIEGO AGRÍCOLA.

Los sistemas de riego presurizado requieren de equipos mecánicos y eléctricos que permitan impulsar el agua con la presión necesaria para garantizar una distribución uniforme. Entre estos equipos destacan las bombas centrífugas y los motores eléctricos, que constituyen el núcleo del funcionamiento de un sistema de riego tecnificado.

1.4.1 Bomba centrífuga.

Una bomba centrífuga es un equipo hidráulico que transforma energía mecánica en energía de presión para mover agua. Funciona mediante un rodete giratorio que impulsa el fluido hacia el exterior aprovechando la fuerza centrífuga.

Estas bombas se utilizan ampliamente en agricultura debido a su simplicidad, confiabilidad y facilidad de instalación.

1.4.2 Motor eléctrico.

Un motor eléctrico es una máquina que convierte energía eléctrica en energía mecánica mediante la interacción de campos magnéticos. En riego agrícola se utilizan principalmente motores trifásicos, por su eficiencia y capacidad para operar cargas continuas como bombas de agua.

Los motores se acoplan a la bomba para proporcionar el movimiento rotacional necesario para impulsar el agua.

1.4.3 Conjunto bomba- motor

En aplicaciones agrícolas, ambos equipos funcionan como un sistema integrado, donde el motor transmite el torque y velocidad adecuados para que la bomba opere en su rango óptimo.

Este conjunto constituye el equipo base para sistemas de riego por pivote, aspersión o riego por tuberías presurizadas.

Una vez establecidos los conceptos básicos de bombas y motores utilizados en sistemas de riego agrícola, se procede a describir técnicamente el equipo tipo considerado en el presente estudio, con el fin de analizar sus componentes, funcionamiento y condiciones de operación en terreno.

1.4 **DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL EQUIPO TIPO UTILIZADO EN RIEGO AGRÍCOLA**

1.5.1 **Bomba centrífuga utilizada en riego agrícola**

Las bombas centrífugas son equipos hidráulicos fundamentales en los sistemas de riego agrícola, ya que transforman la energía mecánica del motor en energía hidráulica, generando presión y caudal para transportar el agua.

Su funcionamiento se basa en un impulsor giratorio, que acelera el fluido desde el centro hacia la periferia mediante la fuerza centrífuga, produciendo un flujo continuo.

Las principales partes que componen una bomba centrífuga son:

1. **Impulsor:** transfiere energía al fluido.
2. **Carcasa o voluta:** convierte la energía cinética en presión.
3. **Eje y rodamientos:** permiten el movimiento del impulsor.
4. **Sello mecánico:** evita fugas entre el eje y la carcasa.
5. **Tapa y conexiones:** permiten el ingreso y descarga del fluido.

1.5.2 **Tipos de bombas utilizadas en agricultura**

En el sector agrícola se utilizan principalmente bombas centrífugas horizontales, debido a su fácil mantención y alta confiabilidad. Sin embargo, existen otros tipos de bombas adaptadas según las necesidades del sistema.

1. **Bombas horizontales:** utilizadas cuando se requiere alta presión y caudal constante.
2. **Bombas verticales o de eje prolongado:** utilizadas en aplicaciones agrícolas para la extracción e impulsión de agua desde pozos profundos, canales o tranques. Son ideales para sistemas de riego que requieren altas columnas de bombeo y un motor en superficie para facilitar el mantenimiento.

La eficiencia hidráulica de una bomba depende de parámetros como la altura manométrica total (HMT), el diámetro del impulsor, las condiciones de succión y la alineación mecánica con el motor acoplado.

1.5.3 Despiece funcional de la bomba centrífuga seleccionada

La comprensión del funcionamiento y las posibles fallas del sistema de bombeo requiere una identificación detallada de los componentes que conforman la bomba centrífuga utilizada en el caso de estudio.

Para el presente proyecto se considera como equipo tipo una bomba centrífuga horizontal KSB Meganorm 125-400 (80), ampliamente utilizada en sistemas de riego agrícola por su robustez, facilidad de mantenimiento y disponibilidad de repuestos.

El despiece funcional permite identificar las partes críticas del equipo y analizar posteriormente los modos de falla asociados a cada componente.

Partes principales:

- Carcasa espiral
- Rodete (impulsor)
- Eje
- Rodamientos
- Sello mecánico
- Anillos de desgaste
- Soporte de cojinetes
- Acople bomba-motor

asegurar un funcionamiento eficiente y evitar fallas prematuras como cavitación, desalineación o ingreso de aire.

El sistema típico está compuesto por la bomba centrífuga, el motor eléctrico, la base metálica o de hormigón, tuberías de aspiración y descarga, válvulas de control, instrumentación básica y conexión al sistema de riego (pivote central).

Componentes del sistema:

- Tranque o fuente de agua
- Tubería de aspiración
- Bomba centrífuga
- Motor eléctrico trifásico
- Base y fundación
- Tubería de descarga hacia pivote
- Válvulas y manómetros



FIGURA 1-3. Sistema de bombeo e impulsión para riego por pivote central

Nota. Sistema de riego agrícola compuesto por un tranque de acumulación de agua, tubería de succión, bomba centrífuga acoplada a un motor eléctrico, tubería de descarga y pivote de riego. Este conjunto permite impulsar el caudal y la presión necesarios para el funcionamiento continuo del sistema de riego presurizado en predios agrícolas. Elaboración propia (2025).

1.6.1 Columna de agua y parámetros hidráulicos

La columna de agua, también denominada altura manométrica total (HMT), corresponde a la energía que la bomba debe entregar al fluido para vencer la altura geométrica, las pérdidas de carga por fricción en las tuberías y la presión requerida en el punto de descarga. Este parámetro es fundamental para la correcta selección y operación de bombas centrífugas utilizadas en sistemas de riego agrícola.

En el caso del equipo tipo seleccionado para el presente estudio —bomba centrífuga horizontal KSB Meganorm 125-400 (80)— la columna de agua depende directamente de la configuración hidráulica del sistema, considerando la altura de aspiración desde el tranque, la altura de impulsión hacia el sistema de riego por pivote central y las pérdidas de carga asociadas a tuberías, válvulas, accesorios y caudal de operación.

Una estimación incorrecta de la columna de agua puede generar problemas operacionales como cavitación, bajo rendimiento hidráulico, sobrecarga del motor eléctrico y fallas prematuras del conjunto bomba–motor, afectando la continuidad del riego durante la temporada agrícola.

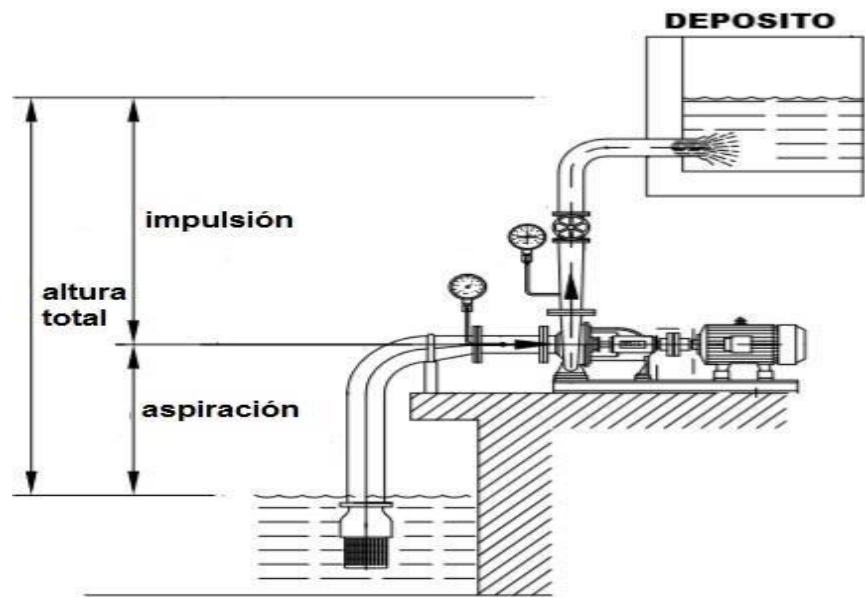


FIGURA 1– 4. Esquema de aspiración, impulsión y altura manométrica total en un sistema de bombeo.

Nota. Esquema representativo de un sistema de bombeo que muestra la captación de agua desde un depósito mediante una tubería de aspiración, el conjunto bomba–motor instalado sobre una base rígida y la conducción del fluido a través de la tubería de impulsión hacia el punto de descarga. En la figura se identifican los componentes de la altura manométrica total del sistema, incluyendo la altura de

aspiración, la altura de impulsión y la altura total, parámetros fundamentales para el diseño, selección y operación de bombas centrífugas en instalaciones de riego agrícola. Adaptado de Monge Redondo, M. A. (s. f.). Algunas observaciones sobre instalaciones y equipos de bombeo.

1.6.2. Análisis de fallas del sistema de bombeo agrícola

En este apartado se analizan las principales fallas asociadas al sistema de bombeo seleccionado como equipo tipo para el sector agrícola, correspondiente a una bomba centrífuga horizontal KSB Meganorm 125-400 (80) acoplada a motor eléctrico trifásico, utilizada en sistemas de riego por pivote central.

El análisis se realiza a partir de información recopilada en terreno, registros de intervenciones, experiencia operacional y aplicación de metodologías de análisis de fallas.

1.6.3 Identificación de fallas frecuentes en el sistema de bombeo

Durante las visitas técnicas realizadas y la recopilación de antecedentes en predios agrícolas, se identificaron fallas recurrentes que afectan directamente la disponibilidad operativa del sistema de riego. Las fallas más frecuentes detectadas en el conjunto bomba– motor son las siguientes:

- Desalineación del eje bomba–motor, generando vibraciones excesivas y desgaste prematuro de componentes.
- Desgaste o falla del sello mecánico, provocando fugas hidráulicas.
- Deterioro de rodamientos, asociado a lubricación deficiente o contaminación.
- Cavitación, causada por condiciones inadecuadas de aspiración o pérdidas hidráulicas excesivas.
- Problemas eléctricos en el motor, tales como conexiones defectuosas o degradación del aislamiento.

Estas fallas provocan paradas no programadas del sistema de riego, afectando la continuidad del suministro de agua durante la temporada agrícola.

TABLA 1 – 2: Causas y efectos en fallas de sistemas de bombeo agrícola.

Falla principal	Causas identificadas	Efectos en operación
Desalineación bomba- motor	Vibraciones excesivas, desgaste de acople, error de montaje, falta de alineación láser.	Ruido anormal, sobrecalentamiento, daño de rodamientos, pérdida de eficiencia mecánica.
Cavitación	Aire en succión, bajo nivel de agua, impulso dañado, diámetro inadecuado de succión.	Pérdida de caudal, vibraciones, erosión interna, sobrecarga en el motor.
Lubricación deficiente	Falta o exceso de grasa, contaminación con polvo o agua, grasa no adecuada.	Vida útil reducida de rodamientos, aumento de temperatura, ruido anormal.
Ingreso de agua o barro (motores)	Falta de drenaje o techumbre, ubicación a nivel del río o tranque, prensaestopas dañados.	Falla eléctrica, cortocircuito, corrosión en bobinados, pérdida total del equipo.
Conexiones eléctricas defectuosas	Bornes flojos o sulfatados, empalmes mal aislados, falta de mantenimiento eléctrico.	Calentamiento localizado, fallas intermitentes, daños en terminales y contadores.

Nota. La tabla resume las principales fallas detectadas en sistemas de bombeo agrícola compuestos por bombas centrífugas y motores eléctricos, considerando causas mecánicas, eléctricas y ambientales. Elaboración propia, Servimant (2025).

1.7 NORMAS Y LEGISLACIÓN APLICABLE AL RIEGO TECNIFICADO.

1.7.1 Marco legal del riego en Chile.

La Ley N.º 18.450 de Fomento al Riego y Drenaje es la principal herramienta legal vigente en Chile para promover la eficiencia hídrica y energética mediante inversiones en infraestructura de riego.

Su reglamento incentiva la instalación de sistemas presurizados y automatizados, así como la incorporación de tecnologías que reduzcan pérdidas de agua y mejoren la productividad.

1.7.2 Normas técnicas aplicables.

Las Normas Chilenas (NCh) compiladas por AGRYD (Asociación Gremial de Riego y Drenaje) regulan aspectos técnicos relacionados con el diseño y la operación de sistemas de riego:

- **NCh 3293:** Sistemas de riego – diseño de instalaciones presurizadas.
- **NCh 3233:** Tuberías plásticas – uniones y resistencia a presión.
- **NCh 3288:** Riego tecnificado – requisitos de operación y eficiencia.

Estas normas aseguran la calidad de los materiales y la correcta instalación de equipos, contribuyendo al cumplimiento de la Ley N.º 18.450 y a la gestión eficiente del recurso hídrico.

1.7.3 Organismos de apoyo técnico

El marco técnico y de fomento es complementado por instituciones nacionales como:

- **CNR (Comisión Nacional de Riego):** planificación y financiamiento de proyectos.
- **INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario):** asistencia técnica a pequeños agricultores.

- **CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales):** estudios y catastros de infraestructura hídrica.

Estas entidades proporcionan guías, manuales y programas de apoyo que promueven la modernización del riego agrícola en el país.

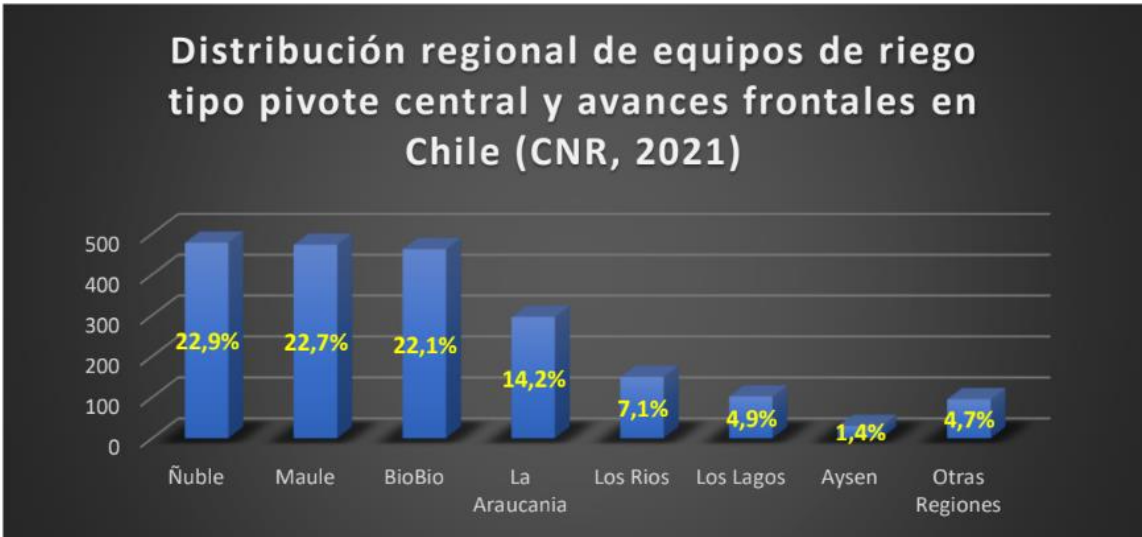


FIGURA 1 – 5. Distribución regional de equipos de riego tipo pivote central y avances frontales en Chile (CNR, 2021).

Nota. Comisión Nacional de Riego (CNR), Catastro nacional de pivotes centrales y avances frontales, Santiago de Chile, Ministerio de Agricultura, 2021. En la figura se observa que la región de Ñuble lidera a nivel nacional con 478 equipos (22,9%), seguida del Maule (22,7%) y Biobío (22,1%). Estas tres regiones concentran más de dos tercios del total de sistemas instalados en Chile. Elaboración propia.

Conclusión del marco teórico.

El análisis teórico permite comprender que la eficiencia y continuidad operativa de los sistemas de riego agrícola dependen del funcionamiento conjunto y mantenido del equipo bomba–motor, responsable de impulsar el caudal y la presión necesarios para el riego presurizado, ya sea mediante pivote central, aspersión fija o goteo. Las normas nacionales y la literatura técnica demuestran que la aplicación de programas de mantenimiento preventivo y predictivo en bombas y motores eléctricos puede reducir los tiempos de inactividad, aumentar la disponibilidad operacional y prolongar la vida útil de los equipos.

CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2. **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

2.1. **CONTEXTO Y ORIGEN DE LA IDEA**

En el sector agrícola, los sistemas de riego presurizado dependen del correcto funcionamiento de bombas centrífugas y motores eléctricos para asegurar la continuidad del suministro de agua durante la temporada de riego. Sin embargo, en muchos predios agrícolas, el mantenimiento de estos equipos se realiza principalmente de forma correctiva o estacional, sin una planificación técnica adecuada.

Esta situación genera fallas recurrentes, detenciones no programadas y aumento en los costos operacionales, afectando directamente la eficiencia del riego y la productividad agrícola.

A partir de esta problemática, y considerando la experiencia profesional del autor en el área de mantenimiento industrial, surge la necesidad de desarrollar un modelo de servicio técnico especializado, enfocado en la mantención preventiva, la trazabilidad de intervenciones y la optimización de la disponibilidad de equipos en condiciones reales de operación en el campo chileno.



FIGURA 2 - 1. Sistema de bombeo en riego agrícola.

Nota. Adaptado de condiciones típicas de instalación en predios agrícolas. Imagen obtenida de internet, sin autor identificado.

2.1.1 Experiencia profesional previa.

La idea inicial del proyecto se origina a partir de la experiencia profesional del autor en una empresa externa, dedicada al mantenimiento industrial y agrícola. Durante su labor durante 3 años en terreno, se desarrollaron múltiples trabajos de reparación y mantención de bombas centrífugas y motores eléctricos en predios agrícolas, lo que permitió conocer de manera directa las condiciones reales de operación del sector. En dichas experiencias, fue posible evidenciar la carencia de programas de mantenimiento preventivo y predictivo en los equipos de riego, así como la falta de proveedores que ofrecieran un servicio técnico especializado en terreno. Los agricultores, en su mayoría, manifestaban dificultades para acceder a soporte técnico oportuno, indicando que la disponibilidad de personal calificado era escasa y los costos de traslado de servicios externos eran elevados.



FIGURA 2 – 2. Actividades de mantenimiento realizadas por la empresa Servimant en sistemas de bombeo

Nota. Registro fotográfico de trabajos ejecutados en terreno durante servicios de mantenimiento industrial. Elaboración propia, Servimant (2025).

2.1.2 Identificación de brechas en el mercado agrícola

A través del contacto constante con los clientes, se identificó que gran parte del sector agrícola trabaja bajo un esquema de mantenimiento correctivo o por temporada, es decir, los equipos son reparados solo cuando presentan fallas o al inicio de la temporada de riego. Este enfoque genera importantes consecuencias operativas: durante los periodos de alta demanda hídrica, una falla en la bomba o el motor puede detener el sistema completo de riego, provocando pérdidas de cosecha y sobrecostos energéticos. Además, muchas empresas del rubro hidráulico o eléctrico se enfocan en la venta de equipos o proyectos de instalación, pero no ofrecen servicios de mantenimiento continuo, dejando a los agricultores sin un acompañamiento técnico permanente. Esta situación revela una brecha de mercado en la oferta de servicios de mantención en terreno, especialmente en zonas rurales donde los agricultores dependen del correcto funcionamiento de sus sistemas de bombeo y riego para sostener la producción.

Esta situación evidencia la necesidad de un modelo de servicio técnico permanente que permita mejorar la disponibilidad operacional de bombas centrífugas y motores eléctricos utilizados en riego agrícola.

2.2 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN EN TERRENO

Para identificar las principales brechas operativas en el mantenimiento de sistemas de riego agrícola, se realizó un levantamiento de información mediante una encuesta aplicada a propietarios, operadores y encargados de mantención en predios agrícolas de la zona del Ñuble y Bío Bío.

La encuesta tuvo como objetivo evaluar las prácticas actuales de mantenimiento, la disponibilidad de servicios técnicos especializados y las principales fallas que afectan la continuidad operacional de los sistemas de bombeo.

Se consideró una muestra de 20 predios agrícolas que utilizan sistemas de bombeo, por pivotes, goteos, aspersión, donde se analizaron aspectos como frecuencia de mantenimiento, tipo de fallas, nivel de capacitación del personal y existencia de registros técnicos.



FIGURA 2–3. Levantamiento de información técnica en terreno mediante inspección de equipos de bombeo.

Nota. Registro de recopilación de datos operacionales y de mantenimiento en predios agrícolas. Imagen obtenida de internet, sin autor identificado.

2.2.1 Instrumento de recolección de datos

Se aplicó una encuesta estructurada con preguntas cerradas, orientadas a identificar prácticas de mantenimiento y condiciones operacionales de los equipos de bombeo.

Preguntas aplicadas:

1. ¿Qué tipo de riego tiene implementado? (Pivote / Goteo / Aspersión)
2. ¿Hace cuánto tiempo? (1 año / 2 años o más)
3. ¿Realiza mantenimiento preventivo en sus equipos de bombeo? (Sí / No)
4. ¿Con qué frecuencia realiza mantenimiento? (Mensual / Trimestral / Anual / Solo cuando falla)
5. ¿Cuenta con servicio técnico especializado externo? (Sí / No)
6. ¿Ha presentado fallas en bombas o motores durante la temporada de riego? (Sí / No)
7. ¿El personal que realiza mantenimiento tiene formación técnica? (Sí / No)
8. ¿Mantiene registros de mantenimiento (bitácoras, planillas, informes)? (Sí / No)

Según la encuesta en 20 predios agrícolas, se excluyeron las encuestas que indicaban menos de un año de antigüedad con los equipos y por tipo de riego,

dato que no cuentan con un historial de mantención y registros, quedando 15 encuestas a utilizar.

Los resultados obtenidos a partir de la encuesta aplicada se resumen en la siguiente tabla:

TABLA 2 – 1: Resultados de la encuesta

Ítem evaluado	Respuesta	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Mantenimiento preventivo	No	11	73%
Mantenimiento correctivo	Sí (solo cuando falla)	10	67%
Servicio técnico externo	No	9	60%
Fallas en temporada	Sí	12	80%
Personal capacitado	No	10	67%
Registros de mantenimiento	No	11	73%

Nota: Los porcentajes fueron calculados en base al total de predios encuestados (n = 15), utilizando la relación entre la frecuencia observada y el total de la muestra. Elaboración propia.

La expresión utilizada para el cálculo es:

$$Porcentaje(\%) = \frac{n}{N} \times 100$$

TABLA 2 – 2: Brechas operativas y necesidades de mantenimiento en predios agrícolas

Necesidad o brecha detectada	Descripción	Impacto operativo
Falta de servicio técnico especializado en terreno.	Escases de empresas con disponibilidad inmediata y experiencia en mantenimiento de equipos agrícolas.	Aumento del tiempo de inactividad de los equipos durante temporada de riego.
Ausencia de mantenimiento preventivo planificado.	La mayoría de los predios realiza solo mantención correctiva o	Mayor frecuencia de fallas mecánicas y eléctricas, pérdida de confiabilidad

		pretemporada.	operacional.
Personal capacitado en mantenimiento industrial	no en	Operarios agrícolas ejecutan tareas sin conocimientos técnicos ni herramientas adecuadas.	Montajes incorrectos, lubricación deficiente y errores en diagnóstico de fallas.
Falla de equipos críticos durante temporada.		Detención de bombas o motores eléctricos en plena operación.	Pérdida parcial o total de cosecha, afectación de contratos de exportación
Falta de trazabilidad en registros de mantenimiento.		No existen planillas ni históricos que permitan analizar rendimiento o fallas repetitivas.	Dificultad para planificar mantenciones y justificar tiempos de parada.

Nota. Tabla elaborada con información recopilada por Servimant y referencias técnicas de CNR, INDAP y SKF sobre gestión de mantenimiento en sistemas de riego agrícola. Elaboración propia.

2.3 **CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA Y DEL TIPO DE EQUIPO PREDOMINANTE**

El correcto funcionamiento de los sistemas de riego agrícola depende directamente del desempeño del conjunto bomba–motor, encargado de suministrar el caudal y la presión necesarios para garantizar una distribución uniforme del agua en los cultivos. En el contexto agrícola chileno, estos sistemas operan en condiciones exigentes, con funcionamiento continuo durante la temporada de riego, exposición a polvo, humedad y variaciones de carga, lo que incrementa la probabilidad de fallas cuando no existe una estrategia de mantenimiento preventivo.

Otro problema importante es la sequía, baja nivel de mantos freáticos y bombas empiezan a trabajar con aguas sucias (mayor concentración de partículas) lo que daña las bombas) y por otro lado el aumento de caudal de ríos, dado a las condiciones meteorológicas, esto porque el río sube, el agua llega a las bombas que están a nivel de río, quemando los equipos, dañando sus componentes, como rodamientos, sello mecánico.

Con el fin de analizar el problema de manera objetiva, resulta necesario caracterizar el tipo de sistema de riego más utilizado por los agricultores, así como

los equipos predominantes asociados a dicho sistema. Esta caracterización permite establecer un marco técnico común sobre el cual se desarrollará el análisis posterior del problema, el catastro de equipos y la identificación de fallas recurrentes.

En base al análisis de las encuestas aplicadas sobre mantenimiento y brechas operativas en predios agrícolas, se identificó que los sistemas de riego presurizado presentan una alta dependencia del conjunto bomba–motor, así como diversas problemáticas asociadas a su operación y mantenimiento. Dentro de estos, se observó una mayor presencia y relevancia del sistema de riego por pivote central, especialmente en predios de mediana y gran escala. Por esta razón, y considerando su impacto en la continuidad operativa y en la producción agrícola, se decide enfocar el presente estudio en el análisis de este sistema en particular.

2.3.1 Sistemas de riego presurizado utilizados en el sector agrícola

En Chile, los sistemas de riego presurizado han adquirido una relevancia creciente debido a la necesidad de optimizar el uso del recurso hídrico y asegurar la productividad agrícola en escenarios de escasez de agua. Estos sistemas se caracterizan por utilizar una fuente de presión continua, generalmente generada por bombas centrífugas acopladas a motores eléctricos, que permiten transportar y distribuir el agua hacia los distintos sectores del predio.

Los principales sistemas de riego presurizado utilizados en el sector agrícola son:

- Riego por aspersión fija o móvil, donde el agua es aplicada en forma de lluvia mediante aspersores distribuidos en el terreno.
- Riego por pivote central, sistema mecanizado compuesto por una estructura móvil que gira alrededor de un punto fijo, cubriendo grandes superficies agrícolas.
- Riego lineal o de avance frontal, similar al pivote central, pero con desplazamiento en línea recta.
- Riego por goteo y microaspersión, sistemas de aplicación localizada utilizados principalmente en frutales y cultivos intensivos.

Todos estos sistemas dependen del correcto funcionamiento del conjunto bomba–motor para mantener la presión y el caudal requeridos, siendo especialmente críticos durante los periodos de máxima demanda hídrica.



FIGURA 2 – 4. Sistemas de riego presurizado utilizados en el sector agrícola.

Nota. Adaptado de imágenes referenciales de sistemas de riego por aspersión, pivote central, riego lineal y riego por goteo, 2024. Imagen obtenida de internet, sin autor identificado.

2.3.2 Predominio del sistema de riego por pivote central

Dentro de los sistemas de riego presurizado, el riego por pivote central destaca como uno de los más utilizados en predios agrícolas de mediana y gran extensión, especialmente en cultivos de cereales, forrajes y semillas. Su uso se ha masificado debido a su alta eficiencia hidráulica, capacidad de automatización y reducción de mano de obra.

El pivote central se compone de una torre fija o punto central de alimentación, una serie de torres móviles con ruedas motrices y una tubería principal que distribuye el agua a lo largo de la estructura mediante aspersores o boquillas. El movimiento y la operación continua del sistema exigen que la bomba centrífuga mantenga condiciones estables de presión y caudal, lo que convierte al conjunto bomba–motor en un componente crítico para la operación del riego.

Debido a estas características, una falla en el sistema de bombeo asociado a un pivote central puede provocar la detención total del riego, afectando directamente la producción agrícola y generando pérdidas económicas significativas.



FIGURA 2 – 5. Sistema de riego por pivote central utilizado en predios agrícolas.

Nota. Adaptado de imagen referencial de sistema de riego por pivote central en operación agrícola, 2024. Imagen obtenida de internet, sin autor identificado.

2.3.3 Caracterización del conjunto bomba–motor utilizado en riego agrícola

El equipo más comúnmente utilizado para alimentar los sistemas de riego presurizado corresponde al conjunto formado por una bomba centrífuga horizontal acoplado directamente a un motor eléctrico trifásico de inducción, montados sobre una base metálica común y conectados mediante un acople mecánico.

Este tipo de configuración es ampliamente utilizada debido a su simplicidad, facilidad de mantenimiento y disponibilidad de repuestos en el mercado nacional. La bomba centrífuga se encarga de transformar la energía mecánica suministrada por el motor en energía hidráulica, generando el caudal y la presión necesarios para el sistema de riego.

Por su parte, el motor eléctrico trifásico proporciona una fuente de energía confiable para operación continua, siempre que se mantengan condiciones adecuadas de alimentación eléctrica, ventilación y protección contra agentes externos como humedad y polvo.



FIGURA 2 – 6. Conjunto bomba centrífuga horizontal acoplada a motor eléctrico trifásico.

Nota. Registro fotográfico propio de conjunto bomba–motor instalado en predio agrícola, correspondiente a trabajos ejecutados por la empresa Servimant, 2025.

2.3.4 Condiciones de operación del equipo en predios agrícolas

A diferencia de instalaciones industriales controladas, los equipos bomba–motores utilizados en riego agrícola operan en condiciones ambientales adversas. Generalmente se encuentran instalados a la intemperie o en salas de bombas con protección limitada, expuestos a humedad, barro, polvo y variaciones térmicas.

Durante la temporada de riego, estos equipos funcionan de manera continua o con ciclos prolongados de operación, lo que incrementa el desgaste de componentes mecánicos y eléctricos. Además, en muchos casos, la operación y supervisión diaria es realizada por personal agrícola sin formación técnica especializada, lo que dificulta la detección temprana de fallas incipientes.

Estas condiciones hacen que el conjunto bomba–motor sea altamente susceptible a problemas de desalineación, desgaste de rodamientos, fallas en sellos mecánicos, vibraciones excesivas y deterioro del aislamiento eléctrico del motor.

2.3.5 Importancia del conjunto bomba-motor como equipo critico

Dado que el conjunto bomba–motor constituye el corazón del sistema de riego presurizado, su falla representa un evento crítico para la continuidad operativa del predio agrícola. La detención del sistema de bombeo implica la interrupción inmediata del riego, con consecuencias directas sobre la productividad del cultivo, especialmente en periodos de alta demanda hídrica.

Por esta razón, la caracterización del equipo predominante y de sus condiciones reales de operación resulta fundamental para el desarrollo del presente proyecto. Esta información permitirá, en las secciones siguientes, realizar el catastro de equipos, identificar fallas recurrentes y aplicar metodologías de análisis que conduzcan a la definición de un modelo de servicio técnico permanente orientado al sector agrícola.

2.4 **CATASTRO DE EQUIPOS DE RIEGO AGRÍCOLA EN LA ZONA DE ESTUDIO**

2.4.1 Objetivo del catastro

El objetivo del catastro es identificar las características técnicas, condiciones de operación y principales necesidades de mantenimiento de los sistemas de bombeo utilizados en riego agrícola, con el fin de definir un equipo tipo representativo que permita desarrollar un análisis técnico detallado y seleccionar un caso piloto para la evaluación del modelo de servicio técnico propuesto.

Este levantamiento constituye la base para justificar técnicamente la elección del equipo analizado en etapas posteriores del proyecto.



FIGURA 2–7. Evaluación técnica de equipos de bombeo en terreno para levantamiento de información.

Nota. Adaptado de imagen referencial de inspección y análisis de equipos en mantenimiento industrial, 2024. Imagen obtenida de internet, sin autor identificado.

2.4.2 Zona geográfica y alcance del catastro

El catastro se realizó en predios agrícolas con sistemas de riego por pivote central, mediante visitas técnicas en terreno efectuadas por la empresa Servimant, en el marco de servicios reales de mantenimiento ejecutados durante la temporada de riego.

El alcance del catastro corresponde a 12 (doce) equipos de bombeo agrícola, considerados suficientes para este estudio debido a que presentan características técnicas representativas del tipo de instalaciones más comunes en el sector agrícola de la zona, permitiendo levantar información directa y detallada sobre su condición operativa, historial de mantenimiento y necesidades técnicas.

Con el fin de respaldar el catastro realizado, se levantó información técnica de cada uno de los equipos de bombeo evaluados, considerando variables como tipo de bomba, potencia del motor, condición operativa, tipo de mantenimiento aplicado y presencia de fallas.

La información recopilada se presenta en la siguiente tabla:

TABLA 2 - 3 Catastro de equipos de bombeo agrícola evaluados

Equipo	Tipo de bomba	Potencia motor (kW)	Tipo de mantenimiento	Estado operativo	Falla detectada
1	Centrifuga horizontal	30	Correctivo	Operativo	Vibración
2	Centrifuga horizontal	37	Correctivo	Operativo	Fuga sello
3	Centrifuga horizontal	45	Preventivo	Operativo	No presenta
4	Centrifuga horizontal	30	Correctivo	Detenido	Rodamiento dañado
5	Centrifuga vertical	55	Correctivo	Operativo	Cavitación
6	Centrifuga horizontal	37	Correctivo	Operativo	Desalineación
7	Centrifuga horizontal	45	Preventivo	Operativo	No presenta
8	Centrifuga vertical	60	Correctivo	Detenido	Falla eléctrica
9	Centrifuga horizontal	30	Correctivo	Operativo	Vibración
10	Centrifuga horizontal	37	Preventivo	Operativo	No presenta
11	Centrifuga vertical	55	Correctivo	Operativo	Fuga sello
12	Centrifuga horizontal	45	Correctivo	Operativo	Cavitación

Nota: Elaboración propia en base a catastro técnico realizado en terreno (2025)



FIGURA 2–8 Zona agrícola con sistemas de riego por pivote central considerada en el catastro.

Nota. Adaptado de imagen referencial de predios agrícolas con riego presurizado en Chile, 2024. Imagen obtenida de internet, sin autor identificado.

2.4.3 Metodología de levantamiento de información

El levantamiento de información se realizó mediante una metodología práctica en terreno, basada en las siguientes actividades:

- Visita técnica directa a los predios agrícolas.
- Inspección visual y técnica de los equipos bomba–motores instalados.
- Conversaciones técnicas con el encargado del predio agrícola.
- Registro de condiciones de operación, estado de componentes y prácticas de mantenimiento existentes.
- Ejecución de trabajos de mantenimiento correctivo y preventivo por parte de Servimant, lo que permitió acceder a información real del estado interno de los equipos.

Durante las intervenciones se realizaron las siguientes actividades técnicas:

En la bomba centrífuga:

- Cambio de rodamientos.
- Cambio de sello mecánico.
- Metrología de componentes mecánicos.
- Limpieza interna del cuerpo hidráulico.
- Pintado del equipo.

En el motor eléctrico:

- Medición de resistencia de aislamiento.
- Cambio de rodamientos.
- Limpieza interna.
- Metrología de componentes.
- Pintado del motor.

En el conjunto bomba–motor:

- Alineamiento láser del eje.
- Emisión de informe técnico.
- Pruebas de funcionamiento post intervención.

Esta metodología permitió obtener información confiable, basada en datos reales de operación y mantenimiento.

2.4.4 Resultados del catastro de equipos

A partir del levantamiento realizado, se identificaron las siguientes características comunes en los equipos analizados:

- Sistema de riego predominante: pivote central.
- Tipo de bomba: bomba centrífuga horizontal.
- Configuración: bomba acoplada a motor eléctrico mediante acople mecánico.
- Tipo de motor: motor eléctrico trifásico.
- Prácticas de mantenimiento observadas: mantenimiento mayoritariamente correctivo o por temporada.

- Necesidades detectadas: mayor frecuencia de mantenimiento preventivo, trazabilidad de intervenciones y disponibilidad de servicio técnico especializado en terreno.

Las brechas y necesidades detectadas durante el catastro se resumen en la Tabla 2-1, la cual corresponde directamente a la información levantada en los predios visitados y al cliente atendido por Servimant.

TABLA 2 – 4: Catastro técnico del equipo de riego agrícola observado

ITEM	DESCRIPCIÓN
Sistema de riego	Pivote central
Cantidad de equipos	2
Tipo de bomba	Bomba centrífuga horizontal
Modelo de Bomba	KSB Meganorm
Tipo de motor	Eléctrico trifásico
Marco y Potencia del motor	WEG - 50 HP
Configuración	Bomba acoplada a motor eléctrico

Tipo de Mantenimiento	Correctivo y por temporada
Condición General	Operativo, con necesidad de mantenimiento preventivo

Nota. La información fue obtenida mediante visitas técnicas en terreno, observación directa de los equipos y entrevistas con el encargado del predio agrícola. Elaboración propia.

2.4.5 Identificación del equipo tipo para el caso piloto.

Con base en los resultados del catastro, se definió como equipo tipo representativo del sector agrícola el siguiente conjunto:

- Bomba centrífuga horizontal KSB Meganorm 125-400 (80)
- Motor eléctrico trifásico WEG de 50 HP.
- Sistema de aplicación: riego agrícola por pivote central.

La selección de este equipo se justifica debido a que corresponde al tipo de instalación más común observada en los predios agrícolas visitados, presenta alta criticidad operacional durante la temporada de riego y concentra las principales fallas y necesidades de mantenimiento identificadas en el catastro.

Este equipo será utilizado como caso piloto para el análisis técnico detallado, evaluación de fallas, determinación de causas raíz y desarrollo del modelo de servicio técnico propuesto en los capítulos siguientes.



FIGURA 2 -9 *Bomba centrífuga horizontal KSB Meganorm 125-400 (80) con motor eléctrico WEG 50 HP.*

Nota. Imagen obtenida de la página oficial de KSB. Referencial de bombas para pivote en sector agrícola.

2.5 ANÁLISIS DE CAUSAS MEDIANTE METODOLOGÍA PARETO

Con el objetivo de priorizar las fallas más relevantes, se aplicó el principio de Pareto (80/20), considerando registros de intervenciones realizadas por Servimant y antecedentes recopilados durante el catastro en terreno.

El análisis permitió determinar que un porcentaje significativo de las fallas del sistema se concentra principalmente en:

- Rodamientos
- Sellos mecánicos
- Problemas de alineación
- Condiciones hidráulicas deficientes (cavitación)

Este resultado permitió enfocar el análisis detallado en aquellas fallas que generan mayor impacto operacional y económico en los sistemas de riego agrícola.

TABLA 2 - 5: Priorización de fallas del sistema de bombeo agrícola mediante análisis Pareto.

Falla detectada	Descripción	Frecuencia observada	Impacto operativo	Porcentaje acumulado (%)
Falla de sello mecánico	Desgaste prematuro, fugas hidráulicas y contaminación del sistema debido a mala lubricación, alineación deficiente o presencia de partículas en el fluido.	Alta	Pérdida de caudal, detención del sistema de riego y riesgo de daño mayor en la bomba.	40%
Rodamientos deteriorados	Desgaste por lubricación inadecuada, contaminación o vibraciones excesivas durante la operación.	Media	Aumento de vibraciones, sobrecalentamiento y posible falla del eje.	65%
Desalineación bomba–motor	Alineación mecánica deficiente del conjunto, provocada por montaje incorrecto o asentamiento de la base.	Media	Vibraciones, desgaste acelerado de componentes mecánicos y reducción de la vida útil del equipo.	80%
Cavitación	Succión deficiente, entrada de aire al sistema o nivel inadecuado de agua en el estanque.	Baja	Erosión interna del impulsor, pérdida de eficiencia hidráulica y daño progresivo de la bomba.	100%

Nota. La priorización de fallas se realizó a partir del análisis de intervenciones técnicas efectuadas por Servimant, entrevistas con el encargado del predio agrícola y observación directa en terreno. El análisis sigue el principio de Pareto (80/20), identificando que un número reducido de fallas concentra la mayor parte del impacto operacional del sistema de bombeo. Elaboración propia, Servimant (2025).

TABLA 2 - 6: Priorización de fallas del motor eléctrico mediante análisis Pareto.

Falla detectada	Descripción	Frecuencia observada	Impacto operativo	Porcentaje acumulado (%)
Deterioro de rodamientos	Desgaste por lubricación inadecuada, contaminación o vibraciones transmitidas desde la bomba.	Alta	Aumento de temperatura, vibraciones y posible detención del motor.	45%
Desalineación bomba–motor	Desalineación mecánica del conjunto que genera esfuerzos adicionales sobre el eje y los rodamientos del motor.	Media	Vibraciones, reducción de la vida útil del motor y fallas mecánicas asociadas.	70%
Fallas en el aislamiento eléctrico	Degradación del aislamiento por humedad, temperatura elevada o envejecimiento del material.	Media	Riesgo de cortocircuito, disparo de protecciones eléctricas y detención del sistema.	90%
Sobrecarga eléctrica	Operación fuera del punto de diseño debido a condiciones hidráulicas inadecuadas o arranques frecuentes.	Baja	Sobrecalentamiento del motor y reducción de la eficiencia energética.	100%

Nota. La priorización de fallas se realizó a partir del análisis de intervenciones técnicas en motores eléctricos asociados a sistemas de bombeo agrícola, entrevistas con el encargado del predio y observación directa en terreno. El análisis se basa en el principio de Pareto (80/20), identificando que un número reducido de fallas concentra la mayor parte del impacto operacional del motor eléctrico. Elaboración propia, Servimant (2025).

2.5.1 Análisis de causa raíz de fallas en la bomba centrífuga mediante diagrama de Ishikawa.

Con el objetivo de identificar las causas raíz asociadas a las fallas recurrentes detectadas en el sistema de bombeo, se aplicó la metodología de análisis causa–efecto mediante el diagrama de Ishikawa, enfocando el estudio en la bomba centrífuga horizontal utilizado en el sistema de riego agrícola.

Esta metodología permite analizar de forma estructurada las posibles causas que originan una falla, evitando conclusiones basadas únicamente en síntomas visibles. Para el presente análisis, las causas fueron agrupadas en categorías técnicas relevantes para la operación de la bomba, considerando información levantada en terreno, entrevistas con el encargado del predio agrícola, registros de mantenimiento y la experiencia técnica del autor.

Las principales categorías analizadas corresponden a condiciones hidráulicas, instalación mecánica, componentes internos, operación del sistema y mantenimiento. A partir de estas categorías se identificaron causas potenciales tales como succión deficiente, desalineación del eje, desgaste del sello mecánico, lubricación inadecuada de rodamientos y presencia de vibraciones durante la operación.

El análisis realizado mediante el diagrama de Ishikawa evidencia que las fallas en la bomba centrífuga no se deben a una causa única, sino a la interacción de múltiples factores hidráulicos, mecánicos y operacionales. Esta información resulta fundamental para comprender el origen de las fallas y constituye la base para la aplicación de metodologías complementarias de análisis de causa raíz, como la técnica de los 5 Por Qué, desarrollada en el apartado siguiente.

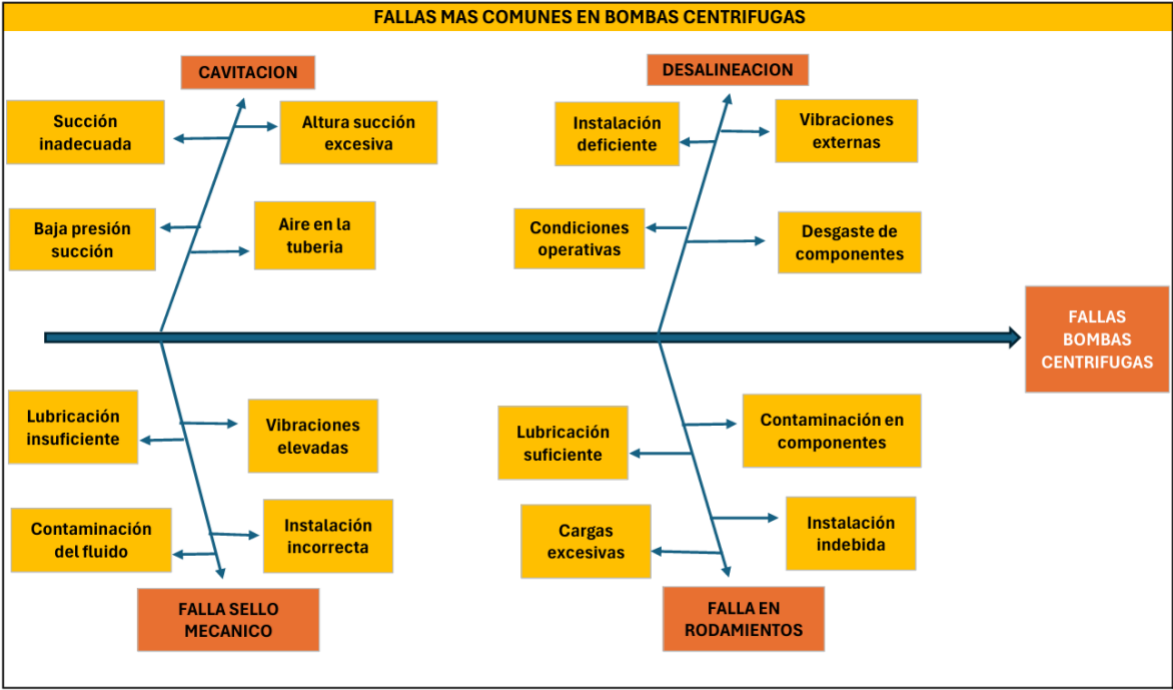


FIGURA 2 -10 Diagrama de Ishikawa para fallas recurrentes en bombas centrífugas.

Nota. El diagrama de Ishikawa representa el análisis de causa–efecto de las fallas recurrentes en bombas centrífugas utilizadas en sistemas de riego agrícola. En él se identifican y agrupan las principales causas asociadas a cavitación, desalineación, fallas en sellos mecánicos y rodamientos, considerando factores hidráulicos, mecánicos, operacionales y de mantenimiento. Este análisis permite visualizar de manera estructurada las posibles causas raíz que afectan la disponibilidad operativa del sistema de bombeo. Elaboración propia, Servimant (2025).

2.5.2 Análisis de causa raíz en el motor eléctrico mediante diagrama de Ishikawa

Con el objetivo de identificar las causas raíz asociadas a las fallas detectadas en el motor eléctrico del sistema de bombeo agrícola, se aplicó la metodología de análisis causa–efecto mediante el diagrama de Ishikawa. El análisis se enfocó en el motor eléctrico trifásico acoplado a la bomba centrífuga, considerando su operación continua durante la temporada de riego.

Las causas potenciales fueron agrupadas en categorías técnicas relevantes, tales como condiciones eléctricas, lubricación, alineación mecánica, operación del equipo y mantenimiento. A partir de este análisis se identificaron factores como sobrecargas eléctricas, deficiencias en el aislamiento, lubricación inadecuada de rodamientos, desalineación del conjunto bomba–motor y condiciones ambientales adversas.

El diagrama de Ishikawa permitió evidenciar que las fallas del motor

eléctrico no se originan únicamente por defectos propios del equipo, sino también por condiciones externas del sistema de bombeo, especialmente aquellas relacionadas con la operación hidráulica de la bomba y la ausencia de programas de mantenimiento preventivo. Este análisis complementa el estudio realizado sobre la bomba centrífuga y refuerza la necesidad de evaluar el conjunto bomba–motor como un sistema integrado.

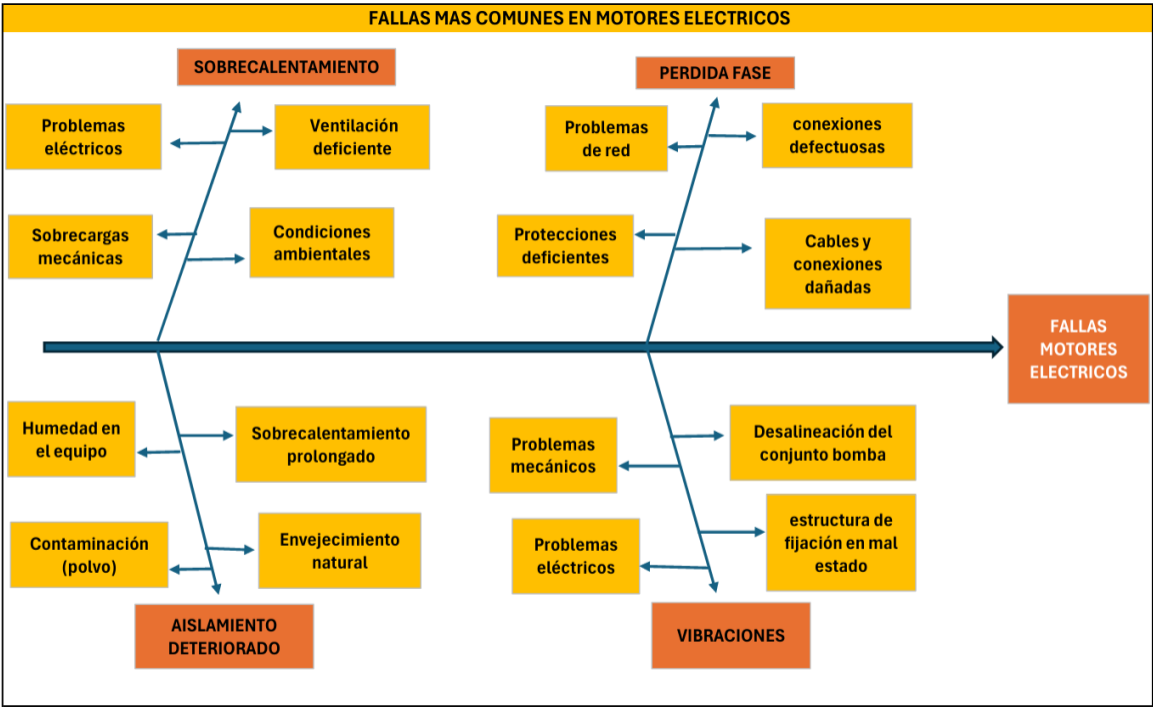


FIGURA 2 -11 Diagrama de Ishikawa de fallas en el motor eléctrico

Nota. El diagrama de Ishikawa representa el análisis de causa–efecto de las fallas recurrentes en motores eléctricos trifásicos utilizados en sistemas de bombeo agrícola. En el esquema se identifican y agrupan las principales causas asociadas a sobrecargas eléctricas, deficiencias en el aislamiento, problemas de lubricación de rodamientos, desalineación del conjunto bomba–motor y condiciones operativas adversas. Este análisis permite visualizar de manera estructurada las posibles causas raíz que afectan la confiabilidad y continuidad operativa del motor eléctrico. Elaboración propia, Servimant (2025).

2.5.3 Determinación de la causa raíz mediante la metodología de los 5 Por Qué

Con el propósito de identificar la causa raíz de las fallas más recurrentes del sistema de bombeo agrícola, se aplicó la metodología de los 5 Por Qué como herramienta complementaria a los análisis de Pareto y a los diagramas de Ishikawa desarrollados en los apartados anteriores. Esta metodología permite profundizar de manera sistemática en el origen real de una falla, evitando abordar únicamente sus manifestaciones superficiales.

Para el presente análisis se seleccionó como falla crítica el desgaste prematuro de rodamientos del conjunto bomba–motor, debido a su alta frecuencia de ocurrencia y elevado impacto operacional, según lo evidenciado en el análisis Pareto.

El desarrollo de la metodología se presenta a continuación:

- ¿Por qué fallaron los rodamientos?
- Porque presentaron sobrecalentamiento y desgaste acelerado durante la operación.
- ¿Por qué se produjo el sobrecalentamiento?
- Porque la lubricación fue insuficiente y existieron vibraciones anormales en el conjunto.
- ¿Por qué la lubricación fue insuficiente y hubo vibraciones?
- Porque el conjunto bomba–motor presentaba desalineación mecánica y no se realizaron inspecciones periódicas.
- ¿Por qué existía desalineación y no se realizaron inspecciones periódicas?
- Porque el sistema operaba bajo un enfoque de mantenimiento correctivo, sin planificación preventiva.
- ¿Por qué se trabajaba bajo un enfoque correctivo?
- Porque no existía un servicio técnico especializado permanente en terreno que ejecutara mantenimiento preventivo y seguimiento técnico del sistema de bombeo.

A partir del análisis realizado, se concluye que la causa raíz de la falla no corresponde exclusivamente a un defecto mecánico del rodamiento, sino a la ausencia de un modelo de mantenimiento preventivo estructurado, enfocado en el conjunto bomba–motor como sistema integrado. Este resultado refuerza la necesidad de implementar un servicio técnico permanente en terreno, orientado a la inspección, alineación, lubricación y monitoreo periódico de los equipos de riego agrícola.

CAPÍTULO 3. SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

3. SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

3.1. OBJETIVO DEL MODELO PROPUESTO

El presente proyecto tiene como propósito diseñar e implementar un modelo de servicio técnico permanente para sistemas de bombeo agrícola, orientado al mantenimiento preventivo y correctivo de equipos bomba–motor. Su finalidad es asegurar la continuidad operacional del sistema de riego y reducir las pérdidas productivas derivadas de fallas no planificadas durante la temporada. El modelo propuesto busca profesionalizar la gestión del mantenimiento agrícola, incorporando procedimientos técnicos estandarizados, registros trazables y tiempos de respuesta definidos que garanticen una atención oportuna y confiable en terreno. Este sistema permitirá que los agricultores cuenten con un servicio especializado, disponible de manera programada o de emergencia, capaz de restablecer la operación en el menor tiempo posible ante una contingencia mecánica o eléctrica.

A diferencia del enfoque tradicional “a la falla”, ampliamente utilizado en el rubro agrícola, la propuesta de Servimant integra un esquema mixto preventivo–correctivo basado en inspecciones periódicas, monitoreo de condiciones y diagnóstico técnico. De esta manera, se busca prolongar la vida útil de bombas y motores, optimizar el consumo energético y disminuir los costos asociados a reparaciones mayores o pérdidas de producción por paradas no programadas.

3.1.1 Oportunidad de desarrollo del proyecto

A partir de la experiencia previa y las brechas detectadas en el mantenimiento de equipos agrícolas, se identifica una oportunidad de desarrollo para establecer un modelo de servicio técnico permanente orientado al mantenimiento de bombas centrífugas y motores eléctricos en predios agrícolas. El objetivo es ofrecer una alternativa técnica confiable que asegure continuidad operativa, reduzca fallas durante la temporada de riego y permita a los agricultores optimizar el uso del recurso hídrico y energético. Para Servimant, este proyecto representa una oportunidad estratégica de crecimiento, permitiendo ampliar su cartera de clientes en el rubro agrícola y formalizar un modelo de servicio sostenible, con trazabilidad técnica, registros de mantenimiento y atención en terreno.

Asimismo, el proyecto se alinea con las políticas nacionales de fomento al riego y uso eficiente del agua impulsadas por la Comisión Nacional de Riego (CNR) y el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), que promueven la tecnificación y la gestión sustentable de los sistemas de riego en Chile.

En síntesis, la oportunidad detectada evidencia la necesidad de desarrollar un modelo de servicio técnico permanente que permita mejorar la disponibilidad operacional de bombas y motores eléctricos utilizados en riego agrícola.

3.1.2 El modelo se estructura sobre tres pilares fundamentales.

- **Estandarización de procedimientos:** definición de protocolos técnicos para mantenimiento preventivo y correctivo de bombas centrífugas, motores eléctricos y acoples, incluyendo lubricación, alineación láser, cambio de rodamientos y sellos mecánicos.
- **Disponibilidad técnica permanente:** atención en terreno bajo un sistema de cobertura regional, con técnicos especializados, herramientas calibradas y capacidad de respuesta dentro de las 24 horas siguientes al aviso del cliente.
- **Trazabilidad y control de mantenimiento:** implementación de registros digitales, informes técnicos normalizados y planillas de seguimiento que permitan analizar la frecuencia de fallas y la efectividad de las intervenciones realizadas.

En síntesis, el modelo propuesto constituye una solución integral y adaptable al contexto agrícola nacional, que contribuye al uso eficiente de los recursos hídricos y energéticos, aumentando la confiabilidad de los sistemas de riego presurizado mediante una gestión técnica profesional del mantenimiento.

3.2 DISEÑO DEL MODELO DE SERVICIO TÉCNICO SERVIMANT

El modelo de servicio técnico en terreno propuesto por Servimant se estructura en cuatro componentes operativos principales, los cuales permiten asegurar la correcta planificación, ejecución y control de las actividades de mantenimiento en sistemas de bombeo agrícola:

3.2.1 Componentes operativos del modelo

- Planificación técnica: Elaboración de un cronograma de mantenimiento anual basado en la criticidad de los equipos, disponibilidad operativa y condiciones del entorno.
- Ejecución en terreno: Desarrollo de actividades preventivas y correctivas mediante técnicos certificados, con registro fotográfico y uso de planillas estandarizadas.
- Control y trazabilidad: Registro digital de cada intervención, medición de tiempos de reparación (MTTR), evaluación de la disponibilidad técnica y generación de informes periódicos.
- Retroalimentación técnica: Análisis de fallas, emisión de recomendaciones de mejora y estandarización de prácticas según los resultados obtenidos en terreno.

3.2.2 Recursos necesarios para la implementación del modelo

Para la implementación del modelo de servicio técnico en terreno, se requiere contar con los siguientes recursos:

- Personal técnico: Dos técnicos de mantenimiento industrial especializados en alineación láser, montaje de bombas y diagnóstico eléctrico.
- Equipamiento y herramientas: Alineador láser, calentador de rodamientos por inducción, medidor de aislamiento (megóhmetro), torquímetro, juego de llaves calibradas, prensa hidráulica portátil y elementos de medición eléctrica.
- Vehículo de servicio: Furgón o camioneta equipada para el traslado de personal, herramientas y repuestos básicos.
- Repuestos y consumibles: Rodamientos, sellos mecánicos, grasas homologadas SKF LGHP2, ventiladores, bornes, conectores y materiales eléctricos de reemplazo.
- Infraestructura base: Espacio operativo en Talcahuano destinado al almacenamiento de repuestos, preparación de equipos y gestión administrativa del servicio.

3.2.3 Procedimientos operativos del servicio

El modelo técnico establece un procedimiento estandarizado para cada fase del servicio, asegurando una atención estructurada y trazable:

- Recepción del requerimiento: Registro del aviso del cliente, categorización del tipo de falla, validación del requerimiento y estimación del tiempo de respuesta.
- Diagnóstico en terreno: Inspección visual y técnica del conjunto bomba–motor, incluyendo medición de vibraciones, análisis de corriente, temperatura y aislamiento.
- Intervención técnica: Ejecución de actividades de mantenimiento correctivo o preventivo de acuerdo con los hallazgos detectados.
- Pruebas de funcionamiento: Verificación del caudal, presión y consumo eléctrico posterior a la intervención.
- Registro y cierre del servicio: Emisión de informe técnico detallado con tiempos de reparación, respaldo fotográfico y recomendaciones operativas.

3.3 SEGURIDAD INDUSTRIAL EN MANTENIMIENTO AGRÍCOLA

3.3.1 Importancia de la seguridad en faenas agrícolas

La seguridad en el trabajo es un componente esencial en toda actividad de mantenimiento, especialmente en el ámbito agrícola, donde los técnicos están expuestos a riesgos eléctricos, mecánicos e hidráulicos.

Las labores en terreno implican condiciones variables, humedad ambiental, superficies irregulares y exposición a equipos energizados, lo que aumenta la probabilidad de accidentes si no se aplican medidas preventivas adecuadas.

3.3.2 Normativa chilena de seguridad aplicable

En Chile, el Decreto Supremo N.º 594/1999 del Ministerio de Salud establece las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo.

Adicionalmente, las siguientes Normas Chilenas (NCh) complementan el marco regulatorio aplicable a labores de mantenimiento eléctrico y mecánico:

- **NCh 2245:** Riesgos eléctricos – requisitos y medidas de prevención.

- **NCh 1258:** Elementos de protección personal (EPP) – clasificación y uso.
- **NCh 2824:** Prevención de riesgos en trabajos eléctricos.

Estas normativas orientan la implementación de protocolos de seguridad y el uso adecuado de equipos de protección personal, con el objetivo de minimizar los riesgos laborales en faenas agrícolas.

3.3.3 Medidas preventivas y procedimientos operativos

Servimant aplica en todas sus faenas agrícolas e industriales un plan de seguridad preventiva, que considera las siguientes prácticas:

- Uso obligatorio de equipos de protección personal (EPP), tales como guantes dieléctricos, lentes de seguridad, casco, protección auditiva y calzado aislante.
- Aplicación del procedimiento de bloqueo y etiquetado (**LOTO**) antes de intervenir equipos energizados.
- Inspección visual previa de cables, tableros eléctricos y conexiones antes de energizar equipos.
- Mantenimiento de áreas de trabajo secas, ordenadas y señalizadas durante la ejecución de las labores.
- Revisión periódica de herramientas eléctricas y control de posibles fugas hidráulicas.
- Capacitación anual del personal en riesgos eléctricos, manipulación segura de equipos y primeros auxilios.

Estas medidas permiten resguardar la integridad física de los técnicos y asegurar la continuidad operacional de los servicios prestados.

3.4 APLICACIÓN DEL MODELO AL CASO PILOTO

3.4.1 Descripción del cliente y del sistema de bombeo

El caso piloto corresponde al predio Agrícola Transvaal SPA, ubicado en la Región de Ñuble, zona caracterizada por una alta demanda de riego tecnificado debido a la variabilidad hídrica y a la presencia de cultivos de exportación.

El sistema de impulsión del predio está compuesto por ocho equipos de bombeo, destinados a abastecer los sistemas de riego presurizado mediante impulsión desde tranques.

Cada equipo está constituido por una bomba centrífuga KSB Meganorm 100-400 (80) acoplada a un **motor eléctrico** WEG de 50 HP, montados sobre base metálica con transmisión directa mediante acople elástico.

3.4.2 Diagnóstico inicial del sistema

Durante la evaluación inicial realizada por Servimant – Servicios de Ingeniería y Mantenimiento Industrial, se detectaron dos equipos fuera de servicio debido a fallas mecánicas que afectaban la continuidad del riego. El diagnóstico identificó desalineamiento en el conjunto bomba–motor, ruidos anómalos, rodamientos en mal estado, y escasez de lubricación como causas principales.

3.4.3 Ejecución de la intervención en terreno

Las actividades de mantenimiento ejecutadas correspondieron a un servicio correctivo integral, que incluyó:

- Desacople de la bomba y retiro del conjunto para inspección.
- Limpieza y verificación dimensional de componentes mecánicos.
- Sustitución de rodamientos y sello mecánico.
- Reacondicionamiento del motor eléctrico, con limpieza de bornera, cambio de ventilador, cambio de rodamientos y medición de aislamiento mediante megóhmetro.
- Pruebas eléctricas y mecánicas en vacío.
- Alineamiento láser de ejes y pintado final del conjunto bomba–motor.

3.4.4 Resultados y verificación de operación

Con estas acciones se logró restablecer el funcionamiento normal de los equipos, garantizando un rendimiento hidráulico y eléctrico óptimo para la temporada de riego 2025/2026.



FIGURA 3-1 Sistema de bombeo del cliente agrícola Transvaal SPA

Nota. En la Figura 3.1 se muestra el conjunto bomba–motor intervenido durante la mantención correctiva. A partir de este diagnóstico, se elaboraron los diagnósticos y registros técnicos que se presentan a continuación. Registro fotográfico propio, Servimant (2025).

TABLA 3 - 1: Diagnóstico técnico del cliente piloto (agrícola Transvaal SPA)

Componente	Condición actual		Tipo de falla o síntoma	Acción realizada / recomendada
Bomba KSB Meganorm 100-400(80)	Operativa,	con desgaste moderado	Desalineamiento, ruidos, pérdida de caudal	Limpieza, cambio de sello mecánico y rodamientos, alineamiento láser.
Motor WEG 50 HP	Operativo	tras intervención	Vibración, ruido en rodamientos, suciedad en bornera	Limpieza de caja de bornes, cambio de ventilador y rodamientos, medición de aislamiento.
Acople bomba–motor	Desgastado		Holgura y vibración	Sustitución de acople elástico.
Sistema de lubricación	Deficiente		Falta de grasa, contaminación	Aplicación de grasa SKF LGHP2, control de temperatura y registro.

Sistema eléctrico	Correcto	con	Bornes sulfatados,	Limpieza, reapriete
	observaciones		aislación justa	y medición de
				resistencia de
				aislamiento.

Nota: Información recopilada en terreno por Servimant, durante mantenimiento correctivo en predio agrícola transvaal spa, Región de Ñuble. Elaboración propia, Servimant (2025).

TABLA 3 - 2: Indicadores de disponibilidad y confiabilidad del sistema de bombeo agrícola (caso piloto Transvaal SPA)

Equipo	Fallas en el período (n)	MTTR (h)	MDT (h) = MTTR + logística	Horas de operación (HOP)	MTBF (h)	Disponibilidad técnica = MTBF / (MTBF + MTTR)	Disponibilidad total = MTBF / (MTBF + MDT)
Bomba KSB MEGANOR M 125-400 (80) + Motor WEG 50 HP	1	8	56 (8 + 48 de espera)	744	744	98,94 %	93,02 %
Bomba KSB MEGANOR M 80-160 (80) + Motor WEG 30 HP	1	9	57 (9 + 48 de espera)	744	744	98.80%	92.88%

Nota. La tabla presenta los resultados de los principales indicadores de desempeño operacional calculados para los dos conjuntos bomba–motores intervenidos en el predio agrícola Transvaal SPA, durante el periodo de evaluación de enero de 2025. Se incluyen los tiempos medios de reparación (MTTR), de indisponibilidad total (MDT), y las disponibilidades técnica y total, obtenidas a partir de las fórmulas estándar de confiabilidad aplicadas en sistemas de mantenimiento industrial. Elaboración propia a partir de registros de mantenimiento, Elaboración propia, Servimant (2025).

CAPÍTULO 4 – ESTUDIO ECONÓMICO

4. ESTUDIO ECONÓMICO

4.1 SUPUESTOS Y ALCANCE DEL ANÁLISIS ECONÓMICO

El presente capítulo desarrolla una evaluación económica proyectada del modelo de servicio técnico propuesto, con el objetivo de estimar su desempeño financiero en un horizonte definido y bajo supuestos razonables. Este análisis se construye como una proyección, no como una inversión efectivamente ejecutada a la fecha, por lo que los valores utilizados corresponden a estimaciones de mercado y a parámetros operacionales consistentes con el alcance del servicio.

La evaluación se plantea mediante comparación entre el escenario actual (sin modelo formal) y el escenario con implementación del modelo, considerando la generación de ingresos por servicios de mantención y los costos necesarios para ejecutar dichos servicios en terreno. Los supuestos definidos en esta sección serán la base para los cálculos posteriores de costos (CAPEX y OPEX), proyección de ingresos y flujo de caja.

4.1.1 Horizonte de evaluación, moneda y enfoque del análisis.

El horizonte de evaluación considerado es de 10 años, incluyendo un Año 0 asociado a puesta en marcha y los Años 1 a 10 como período operacional proyectado. Todos los valores se expresan en pesos chilenos (CLP).

El enfoque corresponde a una proyección económica del modelo de servicio técnico, orientada a estimar ingresos y egresos asociados a la operación. Para simplificar la lectura y facilitar la defensa del análisis, se trabaja con valores estimados y coherentes con el contexto de operación, asumiendo que las cifras representan valores referenciales para el período base definido.

4.1.2 Alcance operativo y escenarios comparados

El alcance operativo de la evaluación considera la prestación de servicios de mantención en terreno para equipos asociados a sistemas de riego y operación agrícola,

dentro de una cobertura geográfica coherente con el alcance del proyecto (región y zonas de operación definidas en capítulos anteriores).

Se comparan dos escenarios:

- Escenario sin modelo (situación actual): prestación de servicios de manera esporádica y a demanda, sin una estructura formal de planificación y estandarización consolidada. La ejecución se realiza por faenas puntuales, con costos asociados principalmente a cada servicio efectuado.
- Escenario con modelo: implementación del modelo propuesto, incorporando estandarización, planificación de servicios y estructura de atención técnica. En este escenario se proyecta un comportamiento más estable en la operación, con crecimiento gradual de servicios y con posibilidad de incorporar mayores recursos a medida que aumente el flujo de trabajo.

Lo anterior permite evaluar si el modelo, bajo supuestos prudentes, mejora la capacidad de generar ingresos sostenibles y controlar costos operacionales.

4.1.3 Supuestos comerciales y de costos

Para efectos de esta evaluación, se considera que el servicio se comercializa mediante una tarifa integral por mantención, la cual contempla los principales componentes asociados a la ejecución del trabajo, tales como: desplazamiento (kilómetros recorridos), combustible, insumos, repuestos (rodamientos, sellos mecánicos, o ring etc.), mano de obra, y márgenes operacionales necesarios para cubrir la gestión del servicio.

Dado que la operación puede iniciar con una estructura acotada, se asume que durante las primeras etapas los costos de personal se gestionan por faena, y que, a medida que aumente el flujo de clientes/servicios, se habilita la posibilidad de incorporar personal bajo una modalidad mensual o permanente, según corresponda en la etapa de crecimiento del modelo.

Respecto al comportamiento comercial, y debido a la ausencia de un histórico consolidado para proyección, se adopta un supuesto de crecimiento conservador del 5% anual en la cantidad de servicios/clientes atendidos, reflejando una expansión gradual y defendible del modelo en el tiempo.

Las promociones serán a cargo de los representantes vía redes sociales, Instagram y búsqueda de clientes en terreno.

TABLA 4 -1: Supuestos de bombeo del cliente agrícola transvaal SPA

Supuestos	
Horizontes	10 años
Moneda	CLP
Crecimiento anual del proyecto	5%
Escenario sin modelo	Faenas puntuales a demanda
Escenario con modelo	Servicio estandarizado con crecimiento
Modalidad de personal (inicio)	Por faena
Modalidad de personal (cuando aumente el flujo)	Posible mensual
Tarifa	Servicios integrales (incluye KM, bencina, repuestos, mano de obra, margen).
Criterio de valores	Valores constantes (sin ajuste/IPC)

Nota. Para efectos de la evaluación económica, los valores utilizados se expresan en pesos chilenos (CLP) a valores constantes, sin considerar reajustes por inflación o IPC. Esta decisión metodológica permite simplificar el análisis y centrar la evaluación en la relación entre ingresos y costos operacionales del modelo, manteniendo coherencia y comparabilidad entre los escenarios evaluados. Elaboración propia, Servimant (2025).

4.2 **COSTOS ASOCIADOS A LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO**

Esta sección presenta los costos asociados a la implementación del modelo de servicio técnico propuesto. Para efectos del análisis económico, los costos se clasifican en costos de inversión inicial (CAPEX), correspondientes a los recursos necesarios para habilitar la operación, y costos operacionales (OPEX), asociados al funcionamiento regular del servicio en el tiempo. Esta distinción permite identificar de manera clara los egresos iniciales y los costos recurrentes considerados en la proyección económica del modelo.

4.2.1 **Costos de inversión inicial (CAPEX)**

Los costos de inversión inicial (CAPEX) corresponden a los recursos necesarios para habilitar la operación del modelo de servicio técnico antes del inicio de la prestación regular de servicios. En esta evaluación, se consideran como CAPEX únicamente aquellos bienes de carácter durable, con vida útil superior a un año, que son indispensables para

ejecutar mantenciones en terreno y sostener la gestión operativa del servicio.

Dado que el modelo inicia utilizando vehículo particular para el traslado de herramientas, no se incorpora la compra de vehículo como inversión inicial. En consecuencia, los gastos asociados a transporte (combustible, mantención y desgaste) se registran posteriormente como costos operacionales.

La inversión inicial del modelo se compone principalmente de:

- (a) herramientas técnicas y mecánicas durables
- (b) instrumentos de medición y diagnóstico
- (c) equipamiento eléctrico mayor requerido para intervención en terreno
- (d) equipamiento administrativo para la gestión y registro de servicios
- (e) elementos de protección personal básicos, necesarios para asegurar condiciones mínimas de seguridad durante la ejecución de trabajos.

Los insumos consumibles y materiales de reposición frecuente (por ejemplo, lubricantes, limpiadores, adhesivos y otros similares) no se incluyen en CAPEX, debido a su naturaleza recurrente, y se consideran dentro de los costos operacionales del modelo.

TABLA 4 – 2: Costos de inversión inicial (CAPEX)

Ítem	Descripción	Cantidad	Costo total (CLP)
1	Magóhmetro (Megger)	1	\$250.000
2	Multímetro / Tester	1	\$50.000
3	Alineador láser	1	\$3.000.000
4	Pie de metro	1	\$35.000
5	Taladro inalámbrico	1	\$120.000
6	Esmeril 4"	1	\$40.000
7	Pistola torque inalámbrica	1	\$200.000
8	Compresor de aire	1	\$150.000
9	Pistola calor	1	\$35.000
10	Herramientas mecánicas varias	1	\$1.500.000
11	Notebook	1	\$350.000
12	Impresora	1	\$85.000
13	Tablet	1	\$350.000
14	Elemento protección personal (EPP básico)	1	\$120.000
Total, Inversión inicial			\$6.285.000.

Nota. Los valores corresponden a costos totales estimados de inversión inicial, expresados en pesos chilenos (CLP). Elaboración propia, Servimant (2025).

4.2.2 Costos operacionales (OPEX)

Los costos operacionales (OPEX) corresponden a los egresos recurrentes necesarios para la ejecución de los servicios de mantención y la operación regular del modelo de servicio técnico. Estos costos se generan en función del volumen de servicios realizados y se encuentran directamente asociados a la prestación del servicio en terreno.

En el modelo evaluado, los costos de transporte y desplazamiento consideran el uso de vehículo particular, incorporando un valor por kilómetro recorrido, costos de combustible y peajes asociados a cada faena. Asimismo, los insumos y materiales consumibles requeridos para la ejecución de los trabajos se integran como parte del margen incluido en el presupuesto del servicio, evitando su desagregación individual.

La mano de obra se calcula en función de las horas efectivamente trabajadas en cada intervención, considerando una tarifa horaria definida para la ejecución de mantenciones. Adicionalmente, se consideran costos asociados al uso y desgaste de herramientas, equipos y elementos de protección personal, los cuales se incorporan mediante porcentajes de consumibles y depreciación.

Finalmente, el modelo contempla un porcentaje destinado a cubrir gastos operacionales generales necesarios para la continuidad del servicio. Todos los costos operacionales se expresan en pesos chilenos (CLP) y se presentan como valores constantes, sin considerar reajustes por inflación, con el fin de facilitar la comparación económica en el flujo de caja proyectado.

En el modelo evaluado, los costos operacionales se estructuran mayoritariamente como porcentajes asociados al valor del servicio facturado. En particular, se consideran porcentajes destinados a cubrir consumibles, gastos operacionales generales y provisión por garantía. Adicionalmente, los repuestos utilizados en cada mantención se valorizan a costo real, incorporando un margen porcentual sobre su valor neto, el cual permite cubrir costos de gestión, almacenamiento y riesgo asociado a la provisión de repuestos.

TABLA 4 – 3: Costos operacionales anuales del modelo de servicio técnico (OPEX)

Concepto	Descripción	Criterio de estimación
Costos operacionales del modelo	Costos asociados a la ejecución de servicios de mantención, incluyendo transporte, mano de obra, consumibles, gastos operacionales generales y provisión por garantía.	Porcentaje sobre los ingresos anuales del modelo

Nota. Los costos operacionales se estiman de manera consolidada como un porcentaje de los ingresos anuales del modelo. Dicho porcentaje integra consumibles (5%), gastos operacionales generales (10%), provisión por garantía (10%) y otros costos asociados a la operación del servicio. Los repuestos se valorizan a costo real, incorporando un margen porcentual sobre su valor neto. Los valores se expresan en pesos chilenos (CLP). Elaboración propia, Servimant.

4.3 PROYECCIÓN DE INGRESOS DEL MODELO

La proyección de ingresos del modelo de servicio técnico se desarrolla con el objetivo de estimar la capacidad del modelo para generar ingresos de manera progresiva y sostenible en el tiempo. Dado que la empresa se encuentra en una etapa inicial de operación y en proceso de captación de clientes, el análisis considera un escenario conservador y realista, coherente con la naturaleza del servicio y el contexto del sector agrícola.

Los ingresos proyectados corresponden exclusivamente a la prestación de servicios de mantención técnica. Cada servicio se factura como una orden de trabajo, cuyo valor integra la mano de obra, el transporte, los insumos, los repuestos utilizados y los márgenes operacionales definidos en el modelo.

La proyección incorpora la estacionalidad propia del sector agrícola, donde la mayor demanda de servicios de mantención se concentra principalmente entre los meses de junio y agosto, período en el cual los clientes suelen agrupar la mantención de dos o más equipos por orden de trabajo. Durante el resto del año, el modelo contempla la captación de servicios de menor escala, asociados a mantenciones de motores y bombas en empresas y comunidades más pequeñas, los cuales presentan un valor unitario inferior pero una mayor frecuencia. Esta combinación de servicios permite definir una tarifa promedio anual ponderada, representativa del comportamiento global del modelo.

Para el escenario de arranque, se considera una operación progresiva durante los primeros años, asumiendo una menor cantidad de servicios en la etapa inicial y un incremento gradual a medida que el modelo se consolida y se amplía la base de clientes.

La tarifa promedio referencial considerada por servicio es de **\$1.000.000**, valor que representa el promedio entre servicios agrícolas de mayor monto y servicios no agrícolas de menor valor. A partir del tercer año, se asume un crecimiento anual del **5%**, en coherencia con los supuestos establecidos para la evaluación económica.

TABLA 4 - 4 : Proyección de ingresos anuales del modelo de servicio técnico

Año	Servicios anuales estimados	Tarifa promedio por servicio (CLP)	Ingresos anuales
1	12	\$1.000.000	\$12.000.000
2	18	\$1.000.000	\$18.000.000
3	24	\$1.000.000	\$24.000.000
4	25	\$1.000.000	\$25.200.000
5	26	\$1.000.000	\$26.460.000
6	27	\$1.000.000	\$27.783.000
7	28	\$1.000.000	\$29.172.000
8	30	\$1.000.000	\$30.631.000
9	31	\$1.000.000	\$32.162.000
10	33	\$1.000.000	\$33.770.000

Nota. La proyección considera un período de arranque progresivo durante los primeros años de operación y un crecimiento anual del 5% a partir de la consolidación del modelo. Los valores se expresan en pesos chilenos (CLP). Elaboración propia, Servimant (2025).

4.4 **FLUJO DE CAJA PROYECTADO DEL MODELO**

El flujo de caja proyectado del modelo de servicio técnico se elabora con el objetivo de evaluar su comportamiento económico a lo largo del horizonte de análisis definido. Para ello, se consideran los ingresos proyectados por la prestación de servicios de mantención, los costos operacionales asociados a la operación del modelo y la inversión inicial requerida para su implementación.

El flujo se estructura a partir de un Año 0, correspondiente a la inversión inicial (CAPEX), y de los Años 1 a 10, en los cuales se proyectan los ingresos y costos operacionales del modelo. Los costos operacionales se estiman como un porcentaje de los ingresos anuales, en coherencia con la estructura de costos definida previamente.

A partir de estos elementos, se determina el flujo neto anual del modelo y su comportamiento acumulado en el tiempo, permitiendo analizar la recuperación de la inversión inicial y la viabilidad económica del modelo propuesto.

4.4.1 Estructura del flujo de caja

El flujo de caja proyectado del modelo se estructura considerando un Año 0, correspondiente a la inversión inicial asociada a la implementación del modelo (CAPEX), y los Años 1 a 10, en los cuales se proyectan los ingresos y costos operacionales derivados de la prestación de servicios de mantención.

Los ingresos anuales se obtienen a partir de la proyección de servicios realizada en la sección 4.3, mientras que los costos operacionales se estiman como un porcentaje de dichos ingresos, en coherencia con la estructura de costos definida en la sección 4.2. A partir de estos elementos, se determina el flujo neto anual del modelo.

4.4.2 Resultados del flujo de caja proyectado

Los resultados del flujo de caja proyectado permiten analizar el comportamiento económico del modelo a lo largo del horizonte de evaluación. En la Tabla 4-4 se presenta el detalle del flujo de caja anual, incluyendo ingresos, costos operacionales, inversión inicial y flujo neto.

El análisis del flujo acumulado muestra una recuperación progresiva de la inversión inicial, evidenciando que el modelo es capaz de generar resultados positivos una vez superada la etapa inicial de arranque. Estos resultados permiten sustentar la viabilidad económica del modelo bajo los supuestos considerados.

TABLA 4 – 5: Flujo de caja proyectado del modelo de servicio técnico

Año	Ingresos (CLP)	Costos operacionales OPEX (CLP)	Inversión CAPEX (CLP)	Flujo neto (CLP)	Flujo acumulado (CLP)
0	\$0	\$0	- \$6.285.000	-\$6.285.000	-\$6.285.000
1	\$12.000.000	\$7.800.000	\$0	\$4.200.000	-\$2.085.000
2	\$18.000.000	\$11.700.000	\$0	\$6.300.000	\$4.215.000
3	\$24.000.000	\$15.600.000	\$0	\$8.400.000	\$12.615.000

4	\$25.200.000	\$16.380.000	\$0	\$8.820.000	\$21.435.000
5	\$26.460.000	\$17.199.000	\$0	\$9.261.000	\$30.696.000
6	\$27.783.000	\$18.059.000	\$0	\$9.724.000	\$40.420.000
7	\$29.172.000	\$18.962.000	\$0	\$10.210.000	\$50.630.000
8	\$30.631.000	\$19.910.000	\$0	\$10.721.000	\$61.351.000
9	\$32.162.000	\$20.905.000	\$0	\$11.257.000	\$72.608.000
10	\$33.770.000	\$21.951.000	\$0	\$11.819.000	\$84.427.000

Nota. El Año 0 considera la inversión inicial (CAPEX) del modelo según Tabla 4-1. Los costos operacionales (OPEX) se estiman como un porcentaje de los ingresos anuales; para esta proyección se utilizó 65% como criterio consolidado. Los valores se expresan en pesos chilenos (CLP). Elaboración propia, Servimant.

4.5 **ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DEL MODELO**

El análisis de viabilidad económica del modelo de servicio técnico se realiza a partir del flujo de caja proyectado presentado en la sección 4.4. Dicho flujo considera la inversión inicial requerida para la implementación del modelo, los ingresos proyectados por la prestación de servicios de mantención y los costos operacionales asociados a la operación del servicio.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el modelo presenta un flujo neto positivo a partir de los primeros años de operación, lo que permite la recuperación progresiva de la inversión inicial. Este comportamiento se explica principalmente por una estructura de costos operacionales proporcional a los ingresos, lo que otorga flexibilidad al modelo y reduce el riesgo económico en escenarios de menor demanda.

Asimismo, el análisis del flujo acumulado evidencia que la inversión inicial es recuperada en un plazo acotado, y que el modelo es capaz de generar excedentes económicos sostenidos a lo largo del horizonte de evaluación. Estos resultados se mantienen incluso bajo supuestos conservadores de crecimiento y demanda, lo que refuerza la robustez del modelo propuesto.

En consecuencia, se concluye que el modelo de servicio técnico es económicamente viable, ya que permite cubrir la inversión inicial, sostener la operación en el tiempo y generar resultados positivos, constituyéndose como una alternativa factible para la prestación de servicios de mantención tanto en el sector agrícola como en otros segmentos asociados.

CONCLUSIONES

El desarrollo del presente estudio permitió evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar un modelo de servicio técnico permanente orientado al mantenimiento de bombas centrífugas y motores eléctricos utilizados en sistemas de riego agrícola, como una ampliación de las operaciones actuales de la empresa Servimant.

Desde el punto de vista técnico, el análisis del conjunto bomba–motor y de sus condiciones reales de operación en predios agrícolas evidenció que gran parte de las fallas que afectan la continuidad del riego se originan en la ausencia de programas de mantenimiento preventivo estructurados. La aplicación de herramientas de análisis como Pareto, Ishikawa y la metodología de los 5 Por Qué permitió identificar que problemas asociados a rodamientos, sellos mecánicos, alineación y condiciones hidráulicas deficientes concentran la mayor parte del impacto operacional del sistema.

A partir de este diagnóstico, se diseñó un modelo de servicio técnico en terreno basado en procedimientos estandarizados, disponibilidad técnica permanente y trazabilidad de las intervenciones, orientado a mejorar la disponibilidad operativa de los equipos y reducir los tiempos de inactividad durante la temporada de riego. La aplicación del modelo al caso piloto permitió comprobar su factibilidad operativa y su capacidad para restablecer el funcionamiento normal de los equipos intervenidos.

Desde el punto de vista económico, el análisis realizado en el Capítulo 4 demostró que el modelo es viable bajo supuestos conservadores de crecimiento y costos operacionales. El flujo de caja proyectado evidencia que la inversión inicial es recuperada en un plazo acotado y que el modelo genera excedentes económicos sostenidos en el tiempo, lo que respalda su implementación como una alternativa factible y sostenible para la prestación de servicios de mantención en el sector agrícola.

En consecuencia, se concluye que la implementación del modelo de servicio técnico permanente propuesto constituye una oportunidad real de mejora para la gestión del mantenimiento en sistemas de riego agrícola y un potencial de crecimiento estratégico para la empresa Servimant.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Implementar progresivamente el modelo de servicio técnico propuesto, iniciando con una estructura operativa acotada y ampliando los recursos humanos y técnicos a medida que aumente el flujo de clientes y servicios.
- Priorizar la mantención preventiva durante los meses previos a la temporada de riego, fomentando la planificación de intervenciones programadas que permitan reducir fallas críticas en periodos de alta demanda hídrica.
- Incorporar herramientas de monitoreo de condición, tales como medición de vibraciones y análisis eléctrico, como complemento al mantenimiento tradicional, con el fin de fortalecer el enfoque predictivo del modelo.
- Establecer registros digitales estandarizados de mantenimiento que permitan analizar la recurrencia de fallas, mejorar la toma de decisiones técnicas y respaldar la trazabilidad del servicio frente a los clientes.
- Evaluar, en etapas futuras, la incorporación de servicios complementarios como mantenimiento de pozos profundos, selección de bombas y análisis hidráulico, una vez consolidada la operación del modelo base.

BIBLIOGRAFÍA / FUENTES DE INFORMACIÓN

Referencias

Comisión Nacional de Riego (CNR). (2021). *Catastro nacional de pivotes centrales y avances frontales*. Ministerio de Agricultura, Chile.

Comisión Nacional de Riego (CNR). (2023). *Manual de riego tecnificado: aspersión y pivote central*. Santiago, Chile.

Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP). (2022). *Guía técnica para sistemas de riego agrícola*. Chile.

SKF Group. (2020). *Rolling bearings and lubrication fundamentals*. SKF Technical Handbook.

KSB SE & Co. KGaA. (s.f.). *Manual técnico bomba centrífuga Meganorm*. Alemania.

Ministerio de Salud de Chile. (1999). *Decreto Supremo N.º 594: Condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo*.

Figura 2.4.3 <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/algunas-observaciones-instalaciones-equipos-bombeo>

ANEXOS

Anexo A: Registros fotográficos de mantenciones en terreno

Incluye imágenes de las intervenciones realizadas por Servimant en sistemas de bombeo agrícola, alineación láser, cambio de rodamientos y pruebas de funcionamiento.

Anexo B: Informes técnicos del caso piloto

Corresponde a informes de diagnóstico y mantención emitidos durante la intervención del predio Agrícola Transvaal SPA.

Anexo C: Planillas de cálculo económico

Incluye las planillas de cálculo utilizadas para la estimación de costos, proyección de ingresos y flujo de caja del modelo económico evaluado en el Capítulo 4.