

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**DISEÑO DE SISTEMA CONTROL PARA POSICIONAMIENTO DE LAS VARAS DE
ILUMINACIÓN EN EL TEATRO MUNICIPAL DE VIÑA DEL MAR.**

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Ingeniero de Ejecución en
CONTROL E INSTRUMENTACIÓN
INDUSTRIAL

Alumno:

Juan Pablo Valencia Díaz

Profesor Guía:

Franz Yurjevic Perin



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 sistema para posicionamiento de las varas de iluminación en el teatro municipal de Viña del Mar.

Nombre del candidato(a): Juan Pablo Valencia Díaz.

Carrera / Grado: Ingeniero de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial.

Campus: Sede Viña del Mar Departamento: Electrotecnia e Informática.

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Franz Yurjevic Perin**, 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: 08 abril 2026

Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 8 abril 2026

Firma: _____

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

RESUMEN

KEYWORDS: PLC, HMI, VDF, CONTROL DE MOVIMIENTO, AUTOMATIZACIÓN TEATRAL, SEGURIDAD FUNCIONAL.

El presente Trabajo de Titulación desarrolla la ingeniería de detalle para la modernización del sistema de izaje de las varas de iluminación en el Teatro Municipal de Viña del Mar. Actualmente, el recinto cuenta con equipamiento audiovisual de estándar internacional; sin embargo, su maquinaria escénica opera bajo una topología electromecánica de lazo abierto (control On/Off). Esta condición genera paradas abruptas, estrés mecánico severo en la infraestructura, desgaste prematuro de componentes y la imposibilidad de cumplir con las normativas actuales de seguridad en el izaje de cargas suspendidas sobre personas.

Para dar solución a esta problemática, se propone el diseño de una arquitectura de automatización industrial descentralizada operando en lazo cerrado. El sistema se fundamenta en un autómatas programable (PLC) Siemens S7-1200, accionamientos vectoriales Sinamics G120, una interfaz de operador (HMI) KTP700 y una red determinista PROFINET. Mediante la implementación de algoritmos de Motion Control, el diseño calcula trayectorias con rampas de aceleración y desaceleración suaves, erradicando los impactos mecánicos. Asimismo, la integración de la función Safe Torque Off (STO) en los variadores y la validación de movimiento mediante un esquema de "Hombre Muerto", garantizan el cumplimiento de los estándares de seguridad funcional exigidos por la norma EN ISO 13849.

Finalmente, la evaluación técnico-económica demuestra que la reducción de los tiempos de montaje y la mitigación del mantenimiento correctivo arrojan indicadores financieros positivos, validando la rentabilidad y viabilidad del proyecto para la administración municipal.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1 CAPÍTULO 1:	2
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS	2
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	5
1.4 IMPORTANCIA DE RESOLVERLO	7
1.5 INVOLUCRADOS	7
1.6 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	8
1.7 REQUERIMIENTOS	8
1.8 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	9
1.8.1 <i>Evaluación de alternativas de solución:</i>	10
1.8.2 <i>Justificación de los puntajes asignados:</i>	11
1.8.3 <i>Conclusión de la selección:</i>	11
1.9 OBJETIVOS	12
1.9.1 <i>Objetivo general</i>	12
1.9.2 <i>Objetivos específicos</i>	12
2 CAPÍTULO 2:	13
DISEÑO DE INGENIERÍA	13
2.1 DESCRIPCIÓN SITUACIÓN ACTUAL SISTEMA DE IZAJE	14
2.2 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DEL SISTEMA	14
2.3 ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN	15
2.4 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE EQUIPAMIENTO	16
2.4.1 <i>Controlador lógico programable (PLC):</i>	16
2.4.2 <i>Variador de frecuencia (VDF):</i>	16
2.4.3 <i>Interfaz hombre-máquina (HMI):</i>	17
2.4.4 <i>Switch industrial administrable:</i>	17
2.4.5 <i>Sensores de retroalimentación (encoders incrementales):</i>	17
2.4.6 <i>Dispositivos de seguridad (finales de carrera y parada de emergencia):</i>	18
2.5 ESTRATEGIA DE CONTROL Y LÓGICA DE OPERACIÓN	18
2.6 LAZO DE CONTROL DE POSICIONAMIENTO Y DINÁMICA.....	26
2.7 TOPOLOGÍA DE RED Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	27

2.7.1	Arquitectura de comunicaciones y direccionamiento PROFINET	28
2.8	ASIGNACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS (I/O)	31
2.9	MATRIZ DE ALARMAS Y SEGURIDAD (NORMA EN ISO 13849).....	33
2.10	CONCLUSIÓN DEL DISEÑO Y ARQUITECTURA.....	34
3	CAPÍTULO 3:	35
	EVALUACIÓN ECONÓMICA	35
3.1	VIABILIDAD TÉCNICA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA:.....	36
3.2	PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA Y ESFUERZO:	36
3.3	PRESUPUESTO DE INVERSIÓN INICIAL (CAPEX):	38
3.4	COSTOS Y AHORROS OPERATIVOS (OPEX):	39
3.5	PROYECCIÓN Y EVALUACIÓN FINANCIERA:	41
3.5.1	Sensibilización:	41
4	CONCLUSIONES	42
5	BIBLIOGRAFÍA.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Vista del teatro municipal de Viña del Mar

Figura 1.2: Contador/temporizador digital Autonics CT6S-2P

Figura 1.3: Tablero control barras de iluminación (sistema On/Off actual)

Figura 1.4: Tambor y base de soporte del motor y encoder incremental

Figura 1.5: Detalle del eje motor conectado al encoder y rotura de soporte

Figura 1.6: Diagrama de Ishikawa (análisis de causa-efecto)

Figura 2.1: Vista distribución equipos (layout)

Figura 2.1: Diagrama de flujo "Control de acceso y autenticación"

Figura 2.2: Diagrama de flujo "Lógica de selección e interfaz operador"

Figura 2.3: Diagrama de flujo "Ejecución de movimiento seguro (Motion Control)"

Figura 2.4: Diagrama de flujo "Interfaz mantenedor y bloqueo de seguridad"

Figura 2.5: Diagrama de flujo "Subrutina de parametrización (Administrador)"

Figura 3.1: Carta Gantt.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Matriz comparativa de alternativas de solución

Tabla 2.1: Variables críticas a monitorear vía red

Tabla 2.2: Topología de red y direccionamiento lógico PROFINET

Tabla 2.3: Asignación de entradas y salidas (I/O) en autómatas S7-1200

Tabla 2.4: Matriz de alarmas y seguridad (Norma EN ISO 13849)

Tabla 3.1: Plan de implementación y esfuerzo (Carta Gantt)

Tabla 3.2: Presupuesto de inversión inicial (CAPEX)

Tabla 3.3: Costos y ahorros operativos anuales (OPEX)

Tabla 3.4: Flujo de caja y evaluación económica a 5 años

SIGLAS

- BOP: Balance of Plant (Balance de Planta / Materiales complementarios de instalación).
- CAPEX: Capital Expenditure (Gastos de Capital o Inversión Inicial).
- EMI: Electromagnetic Interference (Interferencia Electromagnética).
- FOC: Field Oriented Control (Control Vectorial de Flujo en accionamientos).
- FSM: Finite State Machine (Máquina de Estados Finitos).
- HH: Horas-Hombre (Unidad de medición de esfuerzo laboral).
- HMI: Human-Machine Interface (Interfaz Hombre-Máquina).
- HSC: High Speed Counter (Contador de alta velocidad).
- IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolar de puerta aislada).
- I/O: Input / Output (entradas y salidas del controlador).
- NA: Normalmente abierto (tipo de contacto eléctrico).
- NC: Normalmente cerrado (tipo de contacto eléctrico).
- OPEX: Operational Expenditure (gastos y ahorros operativos anuales).
- PLC: Programmable Logic Controller (controlador lógico programable).
- PROFINET: Process Field Net (Estándar de red ethernet industrial determinista).
- QoS: Quality of Service (Calidad de Servicio para priorización de red).
- RT: Real-Time (Tiempo Real).
- STO: Safe Torque Off (Desconexión Segura del Par - Función de seguridad).
- TIR: Tasa interna de retorno.
- UF: Unidad de fomento.
- VAN: Valor actual neto.
- VDF: Variador de frecuencia (también conocido como VFD por sus siglas en inglés).

INTRODUCCIÓN

En los teatros de clase mundial, la "maquinaria escénica" o rigging motorizado ya no se limita solamente a mover cargas; hoy en día se exige que estos sistemas se integren dinámicamente con la iluminación y el sonido, requiriendo estándares de precisión y, fundamentalmente, niveles de Seguridad Funcional que garanticen la integridad de las personas en un entorno de alto riesgo.

El Teatro Municipal de Viña del Mar, tras su reciente proceso de reconstrucción y modernización, se ha posicionado como un referente cultural con equipamiento de audio e iluminación de última generación. Sin embargo, existe una brecha tecnológica crítica en su infraestructura: el sistema de izaje de las varas de iluminación. Actualmente, este sistema opera bajo una lógica de control de lazo abierto, utilizando un accionamiento manual de tipo "on/off" para mover motores de alta potencia.

Al carecer de rampas de aceleración y desaceleración, los motores generan paradas de arranque brusco. Este comportamiento dinámico somete a la estructura de soporte de los motores y a los componentes mecánicos a un estrés físico innecesario. Además, la ausencia de retroalimentación de posición impide la repetibilidad de los movimientos, obligando a los operadores a realizar ajustes manuales imprecisos y reiterados, acelerando el desgaste mecánico de los componentes del sistema actual.

Este sistema no incorpora las funciones de seguridad exigidas por la normativa internacional vigente, específicamente la norma EN ISO 13849. La operación de cargas suspendidas sobre personas sin un sistema de supervisión certificado representa un riesgo latente de falla catastrófica.

Por consiguiente, el presente trabajo de título se enfoca en el diseño para la modernización de este sistema. Se abordará la problemática desde una perspectiva integral, proponiendo una nueva arquitectura de control.

1 CAPÍTULO 1:

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

El Teatro Municipal de Viña del Mar fue construido entre los años 1925 y 1930, tras la donación del terreno por Doña Blanca Vergara en 1912, los encargados de realizar los planos del teatro fueron los arquitectos Aquiles Landoff y Renato Schiavon, edificio de hormigón armado presenta un estilo neoclásico, incorporando elementos arquitectónicos de la antigua Grecia Y Roma. Fue inaugurado el 11 de octubre de 1930. El 23 de noviembre de 2009 fue declarado Monumento Histórico Nacional, por su valor histórico, arquitectónico y social.

Tras el terremoto del 27 de febrero en 2010 el Teatro sufrió graves daños que forzaron el cierre, en el año 2015 comenzaron las obras de reconstrucción que terminaron el a fines del 2023. (Figura 1.1).

Durante el proceso de reconstrucción en el Teatro se modernizó el sistema de audio incorporando un sistema de sonido de última generación, se instaló KARA de L'Acoustics, una marca líder en soluciones acústicas para espectáculos. Esto posiciona al Teatro en una sala de nivel mundial en calidad sonora. También se modernizó por completo el sistema iluminación adquiriendo luminarias ROBE Lighting, una consola ChamSys, sistema de conexión LAN, Dimmer de 128 canales configurables, que entrega al teatro la capacidad de realizar espectáculos de nivel internacional. En cuanto al sistema de izaje de las varas de iluminación se instalaron 6 motores Bonfiglioli de 5,5 kW para subir y bajar las varas. Este sistema es de tipo on/off el cual se maneja en una caja de control con un botón de subida y uno de bajada para cada motor, como se observa en la figura 1.2 Cada vara cuenta con un contador digital Autonics CT6S-2P (Figura 1.3), que permite visualizar la altura actual de la vara gracias al encoder incremental en el eje del motor. Sin embargo, este encoder solo cumple la función de lectura y monitoreo.

Esta reciente modernización en audio e iluminación ha elevado el prestigio del teatro a un estándar internacional. Sin embargo, esta modernización dejó pendiente un componente crítico: el sistema de rigging motorizado. El sistema actual no solo desentona con la alta tecnología ya instalada en audio e iluminación, sino que además introduce riesgos operativos y limitaciones que se abordaran en este proyecto.



Fuente: <https://www.munivina.cl/noticias/teatro-municipal-de-vina-del-mar-reabrio-sus-puertas-a-la-musica-al-arte-la-cultura-comunal-regional-y-nacional/>

Figura 1.1 Vista Teatro municipal Viña del Mar



Fuente: Fotografía tomada durante visita técnica al teatro

Figura 1.2 Contador/temporizador digital Autonics CT6S-2P



Fuente: Fotografía tomada durante visita técnica al teatro

Figura 1.1.3 Tablero control barras de iluminación (Sistema On/Off actual).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El principal problema que actualmente tiene el Teatro Municipal de Viña del Mar es el sistema de izaje de varas de iluminación, debido a que no permite realizar movimientos finos, sincronizados y seguros, generando paradas abruptas y careciendo de un control activo de posición y velocidad, a pesar de contar con encoder de lectura.

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En las visitas técnicas realizadas al teatro, se constata que el sistema de izaje de las varas de iluminación es un sistema de control de lazo abierto, sin retroalimentación activa de posición o velocidad. Los motores Bonfiglioli de 5,5 kW operan a velocidad nominal, lo que genera las paradas abruptas al final del recorrido o al soltar el pulsador, este tipo de control es obsoleto y peligroso para sistemas de rigging motorizado en escenarios modernos.

Este sistema ya ha comenzado a manifestar consecuencias directas e inminentes, las paradas bruscas y los tambaleos asociados al movimiento de las barras están generando un desgaste mecánico crítico en los soportes de los encoders y también en la base donde están puestos los motores. (Figuras 1.4 y 1.5). A consecuencia de este funcionamiento de las varas uno de los soportes de los encoders ya se rompió y otros se ven deteriorados, lo cual constituye una situación de desincronización o potencial caída de una vara, esto es un indicador claro del estrés mecánico que están siendo sometidos los equipos.



Fuente: Fotografía tomada durante visita técnica al teatro

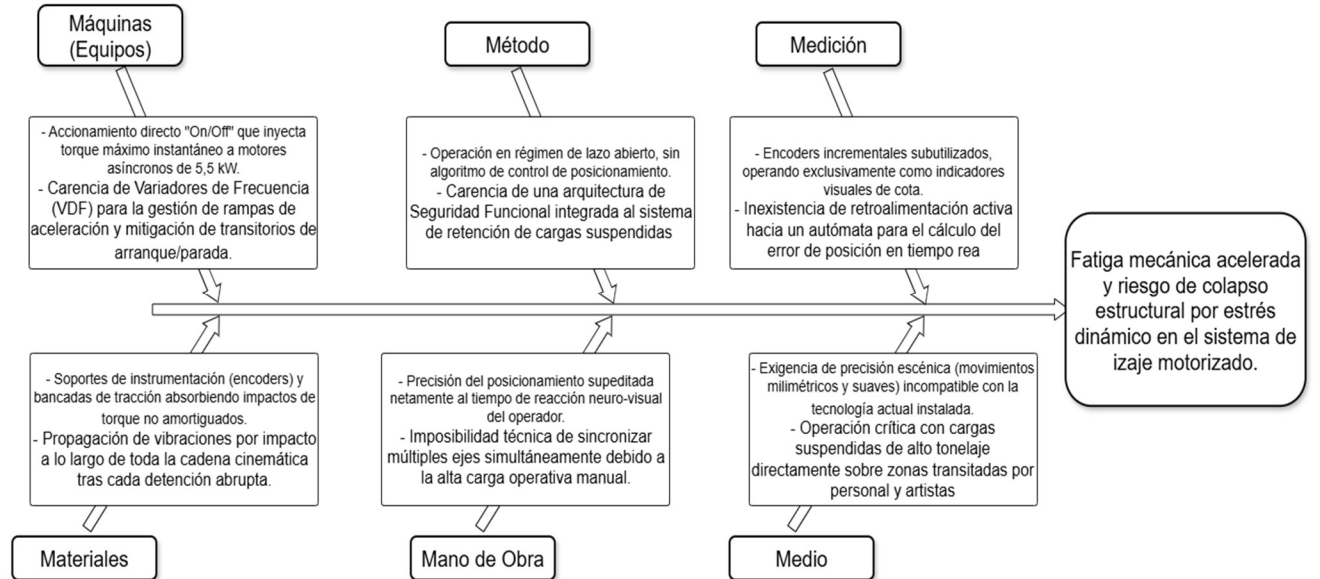
Figura 1.4 Tambor y base de soporte del motor y encoder incremental.



Fuente: Fotografía tomada durante visita técnica al teatro

Figura 1.5 Detalle del eje motor conectado al encoder y rotura de soporte.

Para analizar a fondo las causas y efectos de este problema, se utiliza un Diagrama de Ishikawa (Causa-Efecto).



Fuente: Elaboración propia (realizado en www.canva.com)

Figura 1.6 Diagrama Ishikawa

El análisis del Diagrama de Ishikawa demuestra que la degradación física de los componentes, evidenciada en la fractura de los soportes de instrumentación, es el síntoma de una deficiencia a nivel de arquitectura de control. La dependencia de un sistema electromecánico de lazo abierto, que transfiere íntegramente los transitorios de torque a la estructura mecánica, hace imperativa la migración hacia una topología de lazo cerrado. Solo mediante la integración de procesamiento algorítmico (PLC) y accionamiento vectorial (VDF) será posible gobernar la dinámica del sistema, aislando a la mecánica de los impactos y garantizando la Seguridad Funcional requerida para el entorno teatral.

1.4 IMPORTANCIA DE RESOLVERLO

Resolver esta problemática es de vital importancia en tres ejes fundamentales, que se han vuelto aún más críticos a la luz de los recientes fallos mecánicos reportados:

- **Seguridad funcional y prevención de accidentes:** La principal motivación es mitigar el riesgo inminente de falla catastrófica evidenciado por la rotura del soporte de encoder. Es fundamental alinear el sistema de izaje con estándares de seguridad internacionales como la norma EN ISO 13849. Esto es crucial para proteger la integridad de los operadores, técnicos, artistas y el público, pasando de un sistema con riesgos palpables a uno intrínsecamente seguro.
- **Calidad artística y eficiencia operativa:** La modernización permitirá movimientos precisos, suaves (sin golpes) y repetibles. Esto optimiza drásticamente los tiempos de montaje y ensayo al permitir la programación de escenas predefinidas, elevando la calidad escénica y permitiendo puestas en escena más complejas.
- **Modernización y preservación:** El diseño de un control suave elimina las paradas bruscas, protegiendo la infraestructura del edificio (Monumento Histórico) del estrés mecánico y del desgaste prematuro del equipo. Además, alinea la capacidad técnica del rigging con la millonaria inversión ya realizada en los sistemas de audio y luminotecnia, consolidando al teatro como un recinto de nivel internacional y garantizando su operatividad a largo plazo.

1.5 INVOLUCRADOS

Los principales afectados (Stakeholders) por esta problemática son:

- **Técnicos y operadores del teatro:** Son los principales involucrados. Se ven afectados directamente por los riesgos de seguridad, la ineficiencia en su trabajo y las limitaciones para ejecutar las solicitudes de los directores de iluminación.
- **Administración del teatro municipal:** responsables legales de la seguridad del personal y del cumplimiento normativo (especialmente relevante dado el fallo reportado). También

están interesados en la eficiencia operativa, la preservación del inmueble histórico y el prestigio del teatro.

- **Artistas y compañías (nacionales e internacionales):** Se ven afectados por las limitaciones artísticas de un sistema de izaje impreciso y por los largos tiempos de montaje que reducen el tiempo de ensayo en el escenario.
- **Público:** Afectado indirectamente, ya que la seguridad es un factor crítico para su bienestar, y la calidad de la puesta en escena (movimientos de luces, cambios de escenografía) se ve limitada por la tecnología actual

1.6 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Para dar respuesta a la problemática definida, se explorarán soluciones que permitan migrar el sistema de un lazo abierto obsoleto a un control moderno de lazo cerrado. Las soluciones deben incorporar tecnologías de automatización (PLC, VDF, HMI) que permitan controlar la velocidad y posición, e integrar la seguridad funcional como pilar del diseño.

1.7 REQUERIMIENTOS

Basado en el problema, y para cumplir con los objetivos del proyecto, se definen los siguientes requerimientos de alto nivel para la solución:

- Diseñar un sistema de control para los 6 motores existentes.
- Controlar con precisión la posición y la velocidad de las varas mediante Variadores de Frecuencia (VDFs) y los Encoders incrementales existentes.
- Implementar un control que asegure aceleraciones y desaceleraciones suaves, eliminando las paradas bruscas y el estrés mecánico en la infraestructura.
- Se requiere incorporar una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) para la operación, programación de movimientos, visualización en tiempo real y gestión de escenas predefinidas.
- Asegurar la sincronización entre motores cuando sea requerido.

- Todo el diseño del sistema de control cumpla con los estándares de seguridad funcional de la norma EN ISO 13849.

1.8 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Alternativa 1:

Modernización Electromecánica Básica (Low-Tech)

- Enfoque Técnico: Uso de lógica de relés, contactores y Arrancadores Suaves (Soft Starters). Control manual por botoneras.
- Inversión (CAPEX): Baja.
- Mantenimiento: Sencillo, cualquier electricista puede arreglarlo.
- Desventaja Crítica: Obsolescencia funcional. No permite automatizar escenas, no tiene precisión milimétrica y depende 100% de la pericia humana, lo cual aumenta el riesgo de error operacional (costos ocultos).

Alternativa 2:

Sistema de maquinaria escénica (caja negra).

- Enfoque técnico: Adquisición de un sistema "llave en mano" de una marca especializada en teatros (ej. sistemas europeos dedicados). Usa controladores cerrados y servomotores.
- Performance: Excelente, diseñado específicamente para esto.
- Desventaja Crítica: Dependencia tecnológica. Si falla un componente, no se puede comprar el repuesto en una tienda eléctrica en Viña o Santiago; se debe importar del fabricante exclusivo. El software es cerrado, nadie en el teatro puede modificarlo o repararlo. Es un riesgo logístico alto.

Alternativa 3:

Automatización Industrial Estándar

- Enfoque Técnico: Integración de componentes industriales estándar (PLC Siemens/Allen-Bradley, VFDs, encoders incrementales) bajo arquitectura de Lazo Cerrado.
- Flexibilidad: Programación abierta.

- Sustentabilidad: Disponibilidad de Repuestos Local. Si falla el VFD en 5 años, se puede comprar otro equivalente en Chile el mismo día.
- Equilibrio: Logra la precisión técnica de la Alternativa 2, pero con la mantenibilidad y costos de una solución industrial.

1.8.1 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN:

A partir de las alternativas entregadas en el punto anterior, se realizará un análisis para determinar que alternativa será la más idónea para el sistema de izaje del teatro, estos criterios serán sometidos a una escala de calificación de 1 a 5, donde 1 es “muy deficiente” y 5 será “óptima”. El resultado final de cada alternativa corresponde a un puntaje ponderado. Este se calcula multiplicando la nota asignada (del 1 al 5) por el peso porcentual de cada criterio, para finalmente sumar los resultados parciales de la columna.

Tabla 1.1 Matriz alternativas de solución.

Criterios de Evaluación	Peso (%)	Alt 1: Electromecánica	Alt 2: Sistema Propietario (caja negra)	Alt 3: PLC Industrial
1. Seguridad y Precisión Operativa	35%	2	5	5
2. Disponibilidad Local de Repuestos	25%	5	1	5
3. Independencia Tecnológica	20%	5	1	4
4. Costo de Implementación	20%	5	1	3
PUNTAJE TOTAL PONDERADO	100%	3,95	2,40	4,40

Fuente: Elaboración propia, basada en comparación de alternativas.

1.8.2 JUSTIFICACIÓN DE LOS PUNTAJES ASIGNADOS:

- **Seguridad y precisión (criterio crítico - 35%):**

La Alternativa 3 (PLC) y la Alternativa 2 obtienen el máximo puntaje (5) por procesar rampas de aceleración y permitir lazos cerrados de posición, mitigando los impactos físicos. La Alternativa 1 (Electromecánica) es deficiente (2) al mantener los arranques directos on/off causantes de la fatiga estructural actual.

- **Disponibilidad de repuestos (25%):**

La Alternativa 3 destaca con un 5, ya que al utilizar equipamiento industrial estandarizado (Siemens), los componentes se pueden adquirir localmente en stock. La Alternativa 2 (Sistema propietario) es penalizada con un 1 debido a la dependencia exclusiva de repuestos importados del fabricante extranjero ("caja negra").

- **Independencia tecnológica (20%):**

La programación en TIA Portal (Alt 3) permite que futuros integradores locales puedan realizar modificaciones (4), a diferencia de los sistemas cerrados teatrales (Alt 2) que no permiten acceso al código fuente (1).

- **Costo de implementación (20%):**

Si bien la Alternativa 1 es la más económica de instalar (5), su obsolescencia la descarta. La Alternativa 3 presenta un costo de inversión intermedio-alto (3), pero ampliamente inferior a los millonarios costos de importar una "caja negra" extranjera (1).

1.8.3 CONCLUSIÓN DE LA SELECCIÓN:

Se selecciona la Alternativa 3 porque es la única que logra el equilibrio perfecto exigido por la ingeniería moderna: proporciona el máximo nivel de seguridad para la vida humana (cumpliendo la norma EN ISO 13849), resolviendo el estrés mecánico de las varas, pero manteniendo los costos de implementación y mantenimiento dentro de márgenes financieramente rentables para una entidad pública.

1.9 OBJETIVOS

En esta sección se definen el objetivo general y los objetivos específicos.

1.9.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar la arquitectura de control y potencia en lazo cerrado para la modernización del sistema de izaje de las varas de iluminación del teatro municipal de Viña del Mar.

1.9.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir la situación técnica y operativa actual del sistema de izaje, identificando las falencias mecánicas y de control que generan riesgo estructural en la maquinaria escénica.
2. Desarrollar la solución de ingeniería para automatizar el sistema de izaje de las varas de iluminación del teatro municipal de Viña del Mar.
3. Evaluar la viabilidad técnico-económica de la nueva arquitectura de control, cuantificando los costos de inversión (CAPEX) y los ahorros operativos (OPEX) para justificar económicamente la modernización.

2 CAPÍTULO 2:
DISEÑO DE INGENIERÍA

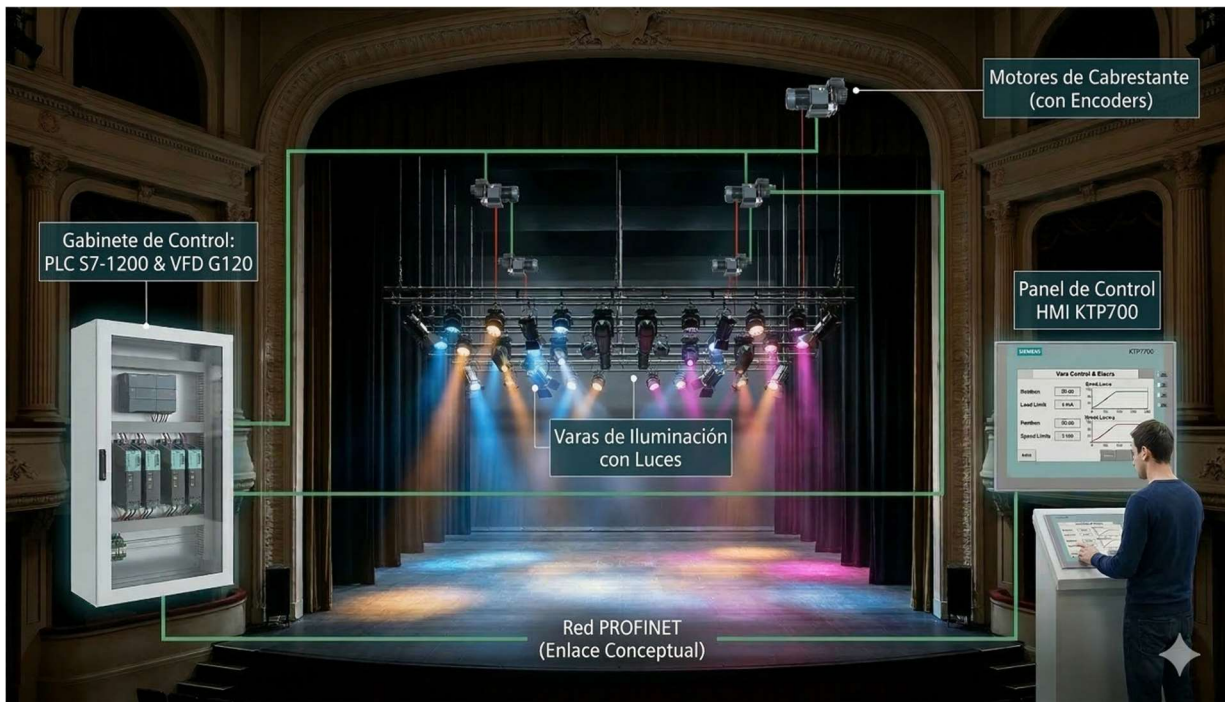
2.1 DESCRIPCIÓN SITUACIÓN ACTUAL SISTEMA DE IZAJE

Actualmente, el izaje de las varas de iluminación es traccionado por 6 motores asíncronos Bonfiglioli de 5,5 kW, los cuales son comandados en régimen de lazo abierto mediante un control directo de tipo On/Off. Como consecuencia, cada accionamiento inyecta el torque máximo de manera instantánea, generando paradas y arranques abruptos. Si bien existe instrumentación de campo instalada (encoders incrementales en los ejes de los motores), esta se encuentra subutilizada, operando exclusivamente como un indicador visual de la posición de la vara en los visualizadores Autonics de la botonera. Al no contar con un control activo de posición y velocidad se traduce en un estrés mecánico severo sobre la infraestructura, los impactos generados por las paradas abruptas son absorbidos por las bancadas de tracción y las piolas de acero, quedando demostrado en la fractura por fatiga de uno de los soportes de los encoders.

2.2 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DEL SISTEMA

A partir del análisis desarrollado en el capítulo anterior, donde se identificó que la fatiga mecánica de los soportes y la inestabilidad del posicionamiento radican en una topología de control de lazo abierto, este capítulo aborda la ingeniería de detalle para la modernización del sistema de izaje del teatro municipal de Viña del Mar.

La solución propuesta consiste en la migración hacia una arquitectura de automatización descentralizada en lazo cerrado, basada en tecnología que brinde seguridad y estabilidad al sistema. Este enfoque no solo resuelve la deficiencia del control dinámico mediante el procesamiento algorítmico del error de posición, sino que permite validar la lógica de seguridad y operación.



Fuente: Desarrollado con Gemini

Figura 2.1 Vista distribución equipos (layout)

2.3 ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN

Para cumplir con las exigencias de seguridad de la norma EN ISO 13849 y facilitar la integración de los equipos, la arquitectura de control se divide en los siguientes niveles operativos:

Nivel de interfaz y supervisión (HMI): Encargado de la interacción humana, gestión de perfiles de acceso, parametrización de cotas de elevación y visualización de diagnósticos en tiempo real.

Nivel de control (PLC): Unidad central que procesa la lógica de enclavamientos, gestiona la máquina de estados de movimiento y computa las señales de retroalimentación de los sensores de posición (encoders).

Nivel de accionamiento (VDF): Etapa de potencia responsable de la conversión electromecánica. Ejecuta los perfiles de velocidad (rampas) y proporciona el torque de retención magnética necesario para sostener las varas antes de la intervención de los frenos físicos.

Nivel de campo: Compuesto por los motores asíncronos de 5,5 kW existentes, los encoders incrementales, los actuadores de freno electromecánico de las varas de iluminación y finales de carrera.

2.4 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE EQUIPAMIENTO

La elección del hardware se fundamenta en la compatibilidad industrial, la capacidad de procesamiento de señales rápidas y la integración de funciones de seguridad.

2.4.1 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC):

Se selecciona la CPU S7-1200 (modelo 1214C o 1215C) por su capacidad nativa de integrar Contadores de Alta Velocidad (HSC). Esto permite leer directamente el tren de pulsos de los encoders sin requerir módulos de ampliación costosos. Procesa el algoritmo de Motion Control (MC_MoveAbsolute) calculando en tiempo real el error de posición y generando la trayectoria (rampa) ideal.

2.4.2 VARIADOR DE FRECUENCIA (VDF):

Siemens Sinamics G120 a diferencia de variadores de propósito general (como la serie V20), el izaje de cargas requiere un manejo riguroso del par motor a bajas revoluciones. Se selecciona el Sinamics G120 con Unidad de Control (CU) avanzada debido a dos factores críticos: Control Vectorial (FOC): Permite inyectar corriente continua al motor para generar torque nominal a 0 Hz (premagnetización). Esto sostiene la barra de iluminación firmemente en el aire antes de que el PLC ordene la apertura del freno mecánico, eliminando la caída libre transitoria. Seguridad Funcional: Incorpora de fábrica la función STO (Safe Torque Off), la cual corta de manera segura y certificada la generación de par en el motor ante una parada de emergencia, requisito excluyente en aplicaciones escénicas.

2.4.3 INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI):

Siemens KTP700 Se selecciona un panel táctil KTP700 Basic por su conectividad nativa vía PROFINET con el autómatas. Su capacidad para gestionar secuencias de comandos (scripts) y almacenar datos en memoria no volátil es fundamental para registrar perfiles de usuario y retener los límites de carrera superior e inferior configurados por el administrador.

2.4.4 SWITCH INDUSTRIAL ADMINISTRABLE:

Incorpora el protocolo de calidad de servicio (QoS - Quality of Service), el cual inspecciona y prioriza matemáticamente los paquetes de datos críticos. De este modo, si el operador libera el pulsador de "Hombre Muerto" o se activa una Parada de Emergencia, el switch otorga prioridad absoluta de enrutamiento a la instrucción de detención (STO) hacia los variadores, postergando milisegundos la actualización de la HMI. Esto asegura una latencia cercana a cero en los lazos de control de movimiento y seguridad funcional.

Adicionalmente, desde el punto de vista del hardware, el equipo cuenta con encapsulado robusto para montaje en riel DIN, alta inmunidad a las interferencias electromagnéticas (EMI) propias de los tableros de potencia, y un rango de temperatura operativa extendido, garantizando la continuidad de servicio ininterrumpida exigida para el teatro municipal.

2.4.5 SENSORES DE RETROALIMENTACIÓN (ENCODERS INCREMENTALES):

Ubicados en el eje de los motores, envían un tren de pulsos continuo al PLC, cerrando el lazo de posición y permitiendo que el sistema sepa exactamente a qué altura milimétrica se encuentra la vara.

2.4.6 DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD (FINALES DE CARRERA Y PARADA DE EMERGENCIA):

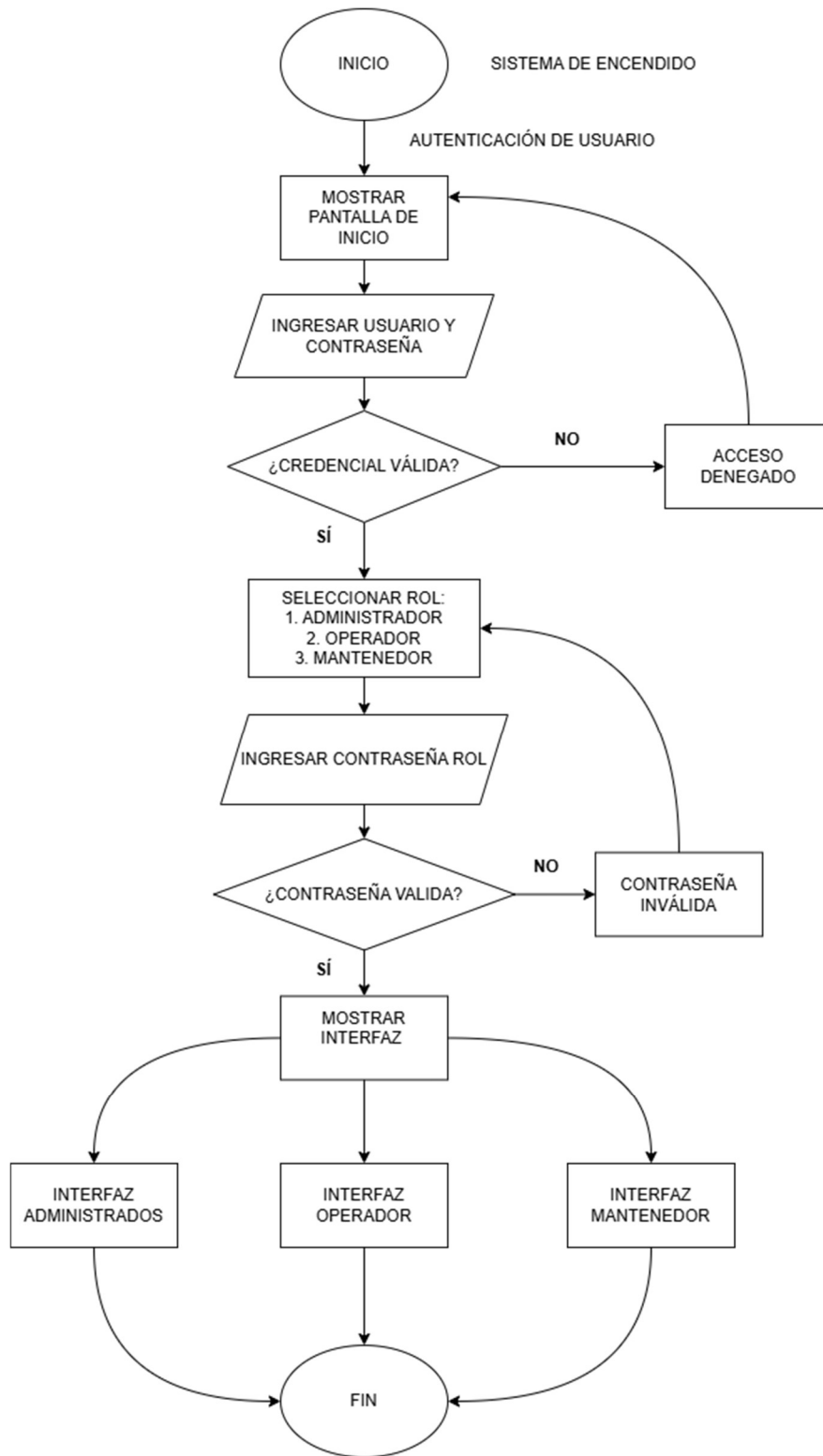
Actúan como redundancia por hardware (enclavamiento mecánico). Si el lazo de control por software falla, estos elementos cortan físicamente la maniobra para evitar colisiones.

2.5 ESTRATEGIA DE CONTROL Y LÓGICA DE OPERACIÓN

La estrategia de control implementada en el autómatas S7-1200 se fundamenta en una arquitectura de software modular basada en una máquina de estados finitos (FSM, por sus siglas en inglés). Con el objetivo de garantizar una operación segura, determinista y libre de colisiones, se descartó el uso de un programa cíclico lineal único. En su lugar, el código se estructuró mediante la segregación de funciones en bloques de organización (OB), funciones (FC) y bloques de función (FB) específicos dentro del entorno TIA portal.

Esta jerarquía algorítmica establece una prioridad de ejecución estricta, donde las rutinas de seguridad funcional (evaluación de paradas de emergencia, límites rotativos extracarrera y validación del pulsador de "Hombre Muerto") poseen autoridad de interrupción absoluta sobre los comandos de movimiento. Por debajo de esta capa de seguridad, opera el lazo cerrado de Motion Control, encargado de procesar la retroalimentación de los encoders y dictar los perfiles cinemáticos hacia los variadores Sinamics G120.

Para ilustrar la interacción concurrente de estas subrutinas y los enclavamientos lógicos que previenen errores operativos, el diseño del software se detalla en los siguientes diagramas de flujo, clasificados según su nivel de jerarquía y perfil de usuario.

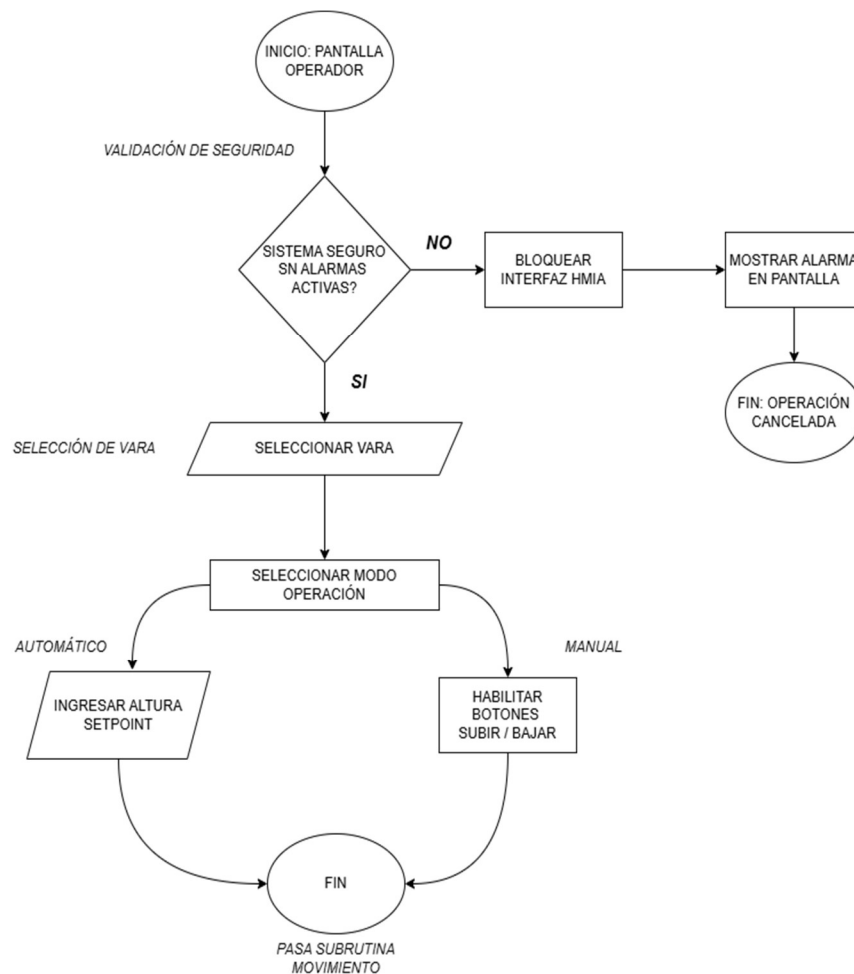


Fuente: Elaboración propia, desarrollado en *app.diagrams.net*

Figura 2.2 Pantalla inicio.

Descripción de la Figura 2.2: Gestión de Acceso:

El diseño lógico del sistema comienza con una barrera de seguridad a nivel de interfaz (HMI). Como se observa en el flujograma, el sistema permanece en un estado de reposo (Standby) hasta que se validan las credenciales del usuario. Esta autenticación jerarquiza el acceso en tres perfiles distintos (Administrador, Operador y Mantenedor), bloqueando el control no autorizado y direccionando al usuario únicamente a las pantallas y variables de proceso pertinentes a su rol, cumpliendo con los estándares básicos de seguridad operativa industrial.

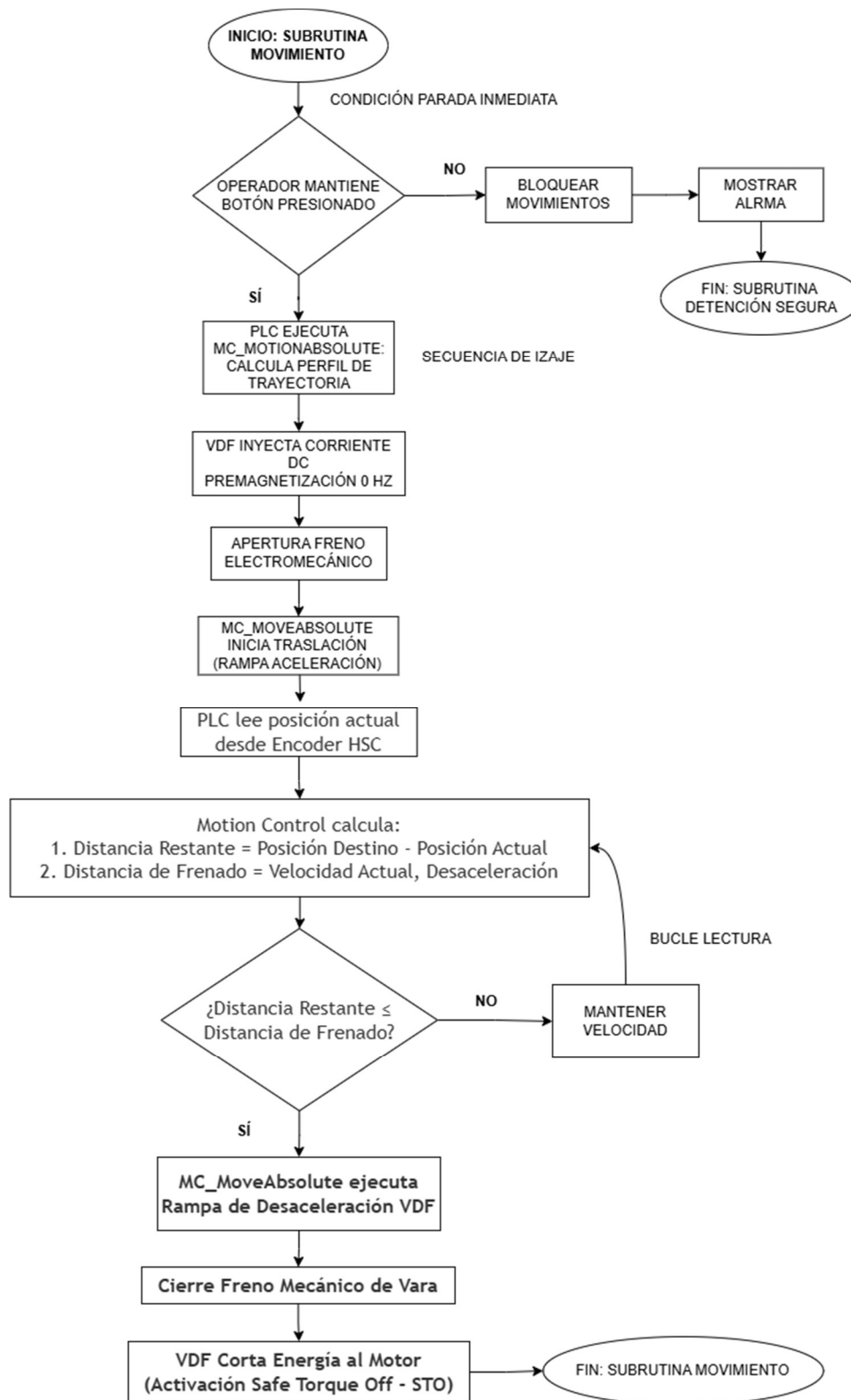


Fuente: Elaboración propia, desarrollado en app.diagrams.net

Figura 2.3 Pantalla operador.

Descripción de la Figura 2.3: Lógica de Selección y Seguridad Global:

La subrutina de operación implementa un esquema de validación de permisos (Interlocks) preventivos. Antes de habilitar cualquier comando de traslación, el autómata evalúa el estado global del sistema para descartar la presencia de alarmas activas o bloqueos de emergencia. Si el sistema se encuentra en un estado seguro, se libera la interfaz de selección, permitiendo al operador designar la vara a intervenir y el modo de maniobra (manual o posicionamiento automático). Este enclavamiento por software asegura que ninguna secuencia inicie bajo condiciones de riesgo subyacentes.



Fuente: Elaboración propia, desarrollado en app.diagrams.net

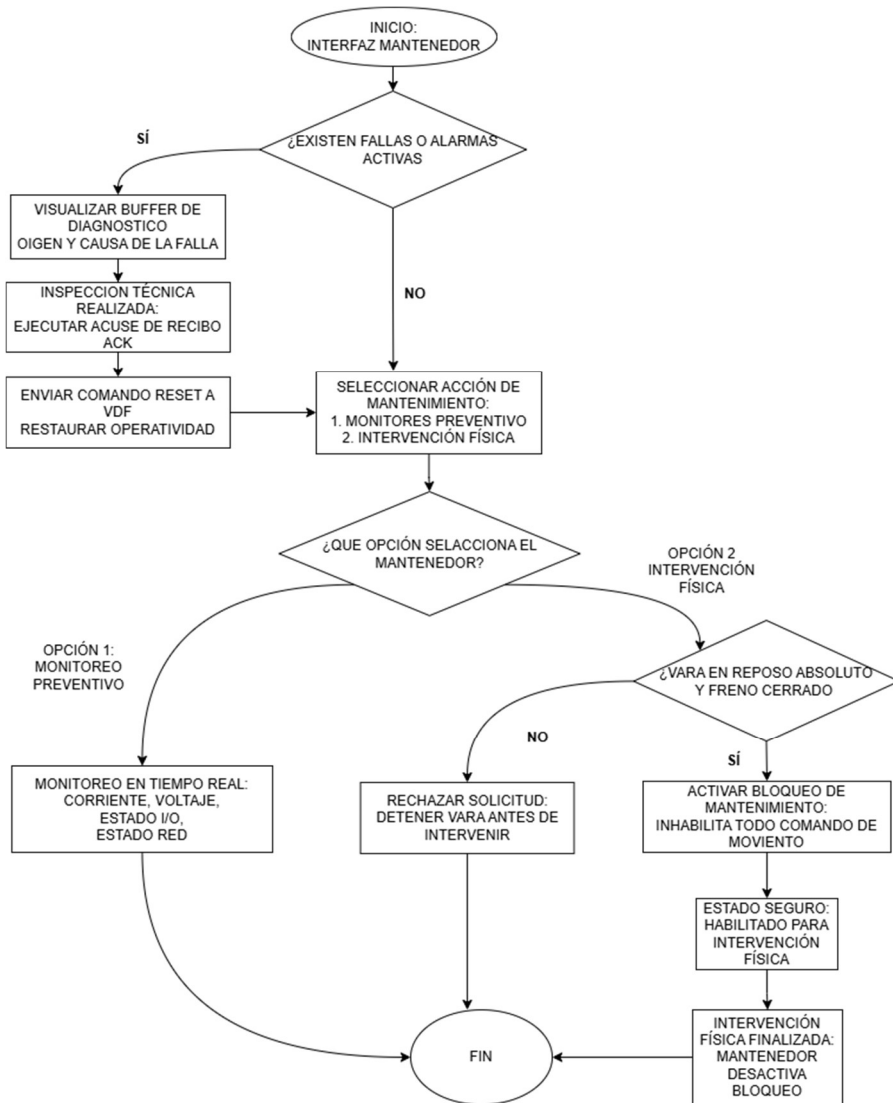
Figura 2.4 Pantalla movimiento

Descripción de la Figura 2.4: Rutina de Ejecución de Movimiento Seguro:

Este flujograma constituye el núcleo algorítmico del sistema de izaje. La lógica de posicionamiento absoluto está gobernada por los Objetos Tecnológicos de Motion Control nativos de TIA Portal (instrucción MC_MoveAbsolute), y se encuentra estrictamente supeditada a un control de validación humana constante tipo "Hombre Muerto" (Dead-Man Switch).

Desde la perspectiva electromecánica, la secuencia inicia con un hito crítico de seguridad: el comando de premagnetización enviado al variador de frecuencia (VDF). Esto permite establecer el 100% del torque nominal a 0 Hz antes de ordenar la apertura del freno mecánico, erradicando cualquier riesgo de desplome momentáneo o retroceso de la carga suspendida.

Una vez liberado el freno, el algoritmo de Motion Control procesa en lazo cerrado la retroalimentación de los encoders a través de los contadores rápidos (HSC) del PLC. Al calcular dinámicamente la distancia restante hacia la cota objetivo, el sistema traza un perfil de trayectoria trapezoidal. Esto garantiza la ejecución de rampas de aceleración y desaceleración anticipadas, logrando que la vara aterrice en la posición exacta con velocidad cero, absorbiendo la energía cinética y eliminando por completo la fatiga y los impactos mecánicos sobre la estructura.

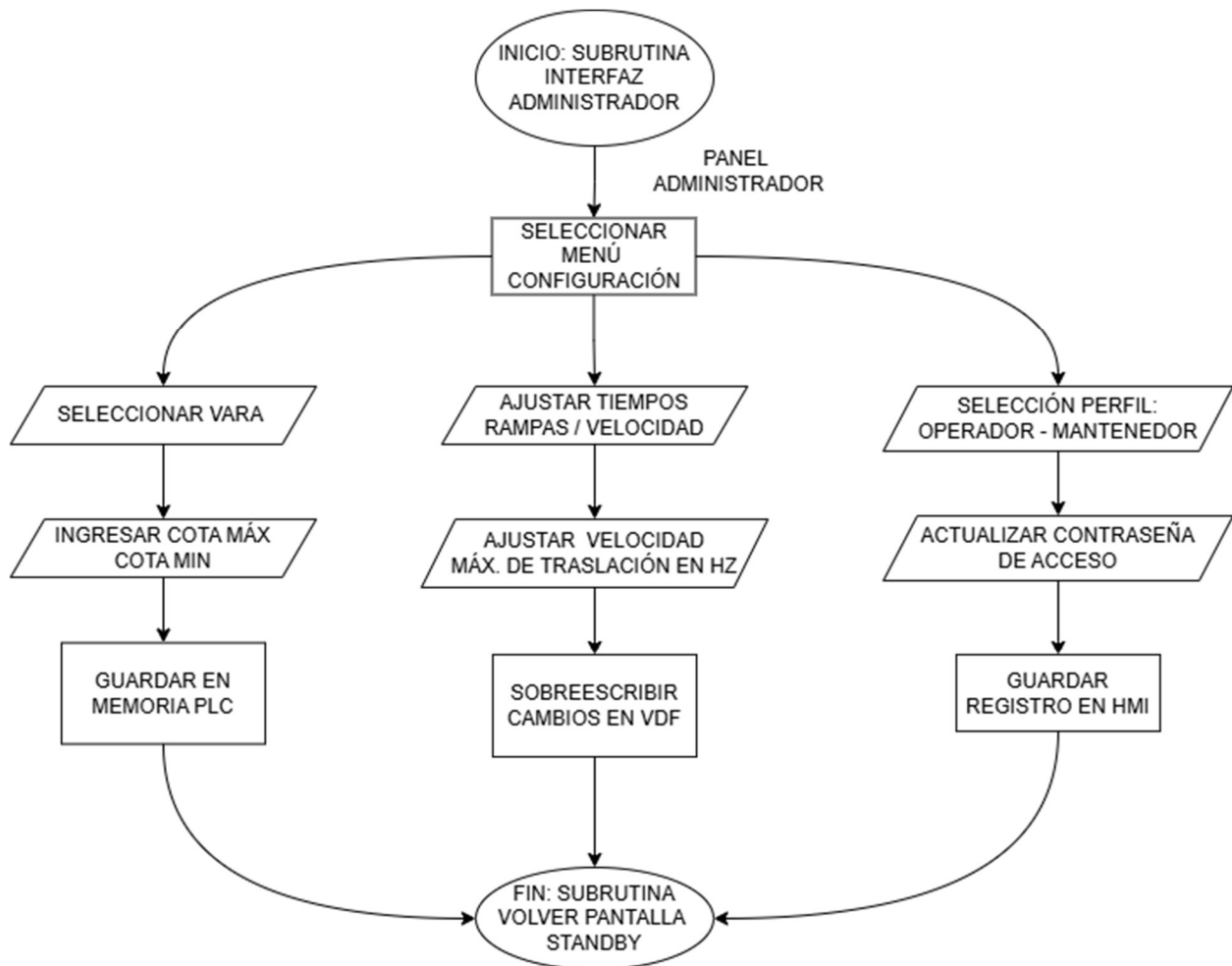


Fuente: Elaboración propia, desarrollado en *app.diagrams.net*

Figura 2.5 Interfaz mantenedor

Descripción de la Figura 2.5: Subrutina de Diagnóstico (Mantenedor)

Orientada a la gestión de activos y la resolución de incidentes, esta subrutina aísla las funciones de diagnóstico del entorno operativo normal. Permite la lectura en tiempo real de las variables de fuerza (torque y corriente bruta del variador) para la detección temprana de sobrecargas, también se podrá verificar el estado de la RED PROFINET.



Fuente: Elaboración propia, desarrollado en *app.diagrams.net*

Figura 2.6

Descripción de la Figura 2.6: Subrutina de Parametrización (Administrador)

Para asegurar la mantenibilidad y escalabilidad del proyecto a largo plazo, los parámetros dinámicos del sistema no se programan de forma rígida en el código fuente del autómatas. La subrutina de administrador permite la calibración en terreno de las cotas máximas y mínimas de recorrido, así como el ajuste de las rampas del VDF. Estos valores críticos se almacenan directamente en la zona de memoria retentiva del S7-1200, garantizando que el sistema conserve sus topes virtuales de seguridad física intactos ante eventuales cortes de suministro eléctrico.

2.6 LAZO DE CONTROL DE POSICIONAMIENTO Y DINÁMICA

Para resolver el desafío del control dinámico y evitar el rebase de cota por inercia ("Overshoot") en cargas suspendidas, el lazo de posicionamiento se implementa nativamente mediante los Objetos Tecnológicos (TO) de Motion Control del autómeta S7-1200. Específicamente, se utiliza la instrucción MC_MoveAbsolute, la cual opera como un generador y planificador de trayectorias en lazo cerrado.

En lugar de reaccionar simplemente al error de posición actual, este bloque calcula de manera algorítmica un perfil cinemático óptimo (trapezoidal). Para ello, evalúa en tiempo real la cota de destino, la velocidad instantánea y las tasas máximas de aceleración y desaceleración parametrizadas. Esta interpolación matemática determina el punto exacto y anticipado en el que el sistema debe comenzar a frenar, obligando al variador Sinamics G120 a disipar la energía cinética de manera controlada. El resultado es un aterrizaje exacto, a velocidad cero en la cota milimétrica requerida, asegurando la suavidad del movimiento y eliminando la fatiga mecánica por impacto sobre los cables de acero y la estructura del teatro.

2.7 TOPOLOGÍA DE RED Y ADQUISICIÓN DE DATOS

La arquitectura no cuenta con instrumentación de campo adicional. Los equipos convergen en un switch administrable mediante el protocolo industrial PROFINET. A través del intercambio de telegramas, el PLC lee la corriente, el torque y el modelo térmico directamente desde los registros internos de los variadores.

Tabla 2.1 Topología de red

Variable crítica para monitorear	Origen del Ddato	Protocolo / medio	Justificación técnica (ahorro de hardware)
Corriente Instantánea del motor	Registro interno del VDF Sinamics G120	PROFINET (Cable Ethernet)	Elimina la necesidad de instalar Transformadores de Corriente (TI) y cableado analógico hacia el PLC.
Temperatura del motor	Modelo térmico interno del VDF	PROFINET (Cable Ethernet)	Evita la instalación de sondas PT100 o termistores en el estator del motor, reduciendo puntos de falla.
Torque / esfuerzo mecánico	Estimación de par del control vectorial (VDF)	PROFINET (Cable Ethernet)	Permite detectar sobrecargas mecánicas en la vara sin necesidad de instalar celdas de carga físicas.
Códigos de falla y estado	Diagnóstico nativo del VDF	PROFINET (Cable Ethernet)	Centraliza las alarmas en la HMI sin ocupar entradas digitales adicionales en el PLC.

Fuente: Elaboración propia, para demostrar topología de red.

2.7.1 ARQUITECTURA DE COMUNICACIONES Y DIRECCIONAMIENTO PROFINET

A diferencia de las topologías tradicionales cableadas, el diseño implementa una red industrial descentralizada operando bajo el estándar PROFINET RT (Real-Time). En este ecosistema, el autómatas S7-1200 asume el rol jerárquico de IO-Controller (maestro), mientras que los seis variadores Sinamics G120 y la HMI KTP700 operan como IO-Devices (nodos de periferia).

Esta descentralización reduce drásticamente los puntos de falla por cableado y centraliza el diagnóstico. Para garantizar el enrutamiento determinista de los telegramas de control de movimiento y seguridad desde TIA Portal, es imperativo establecer una topología lógica estricta.

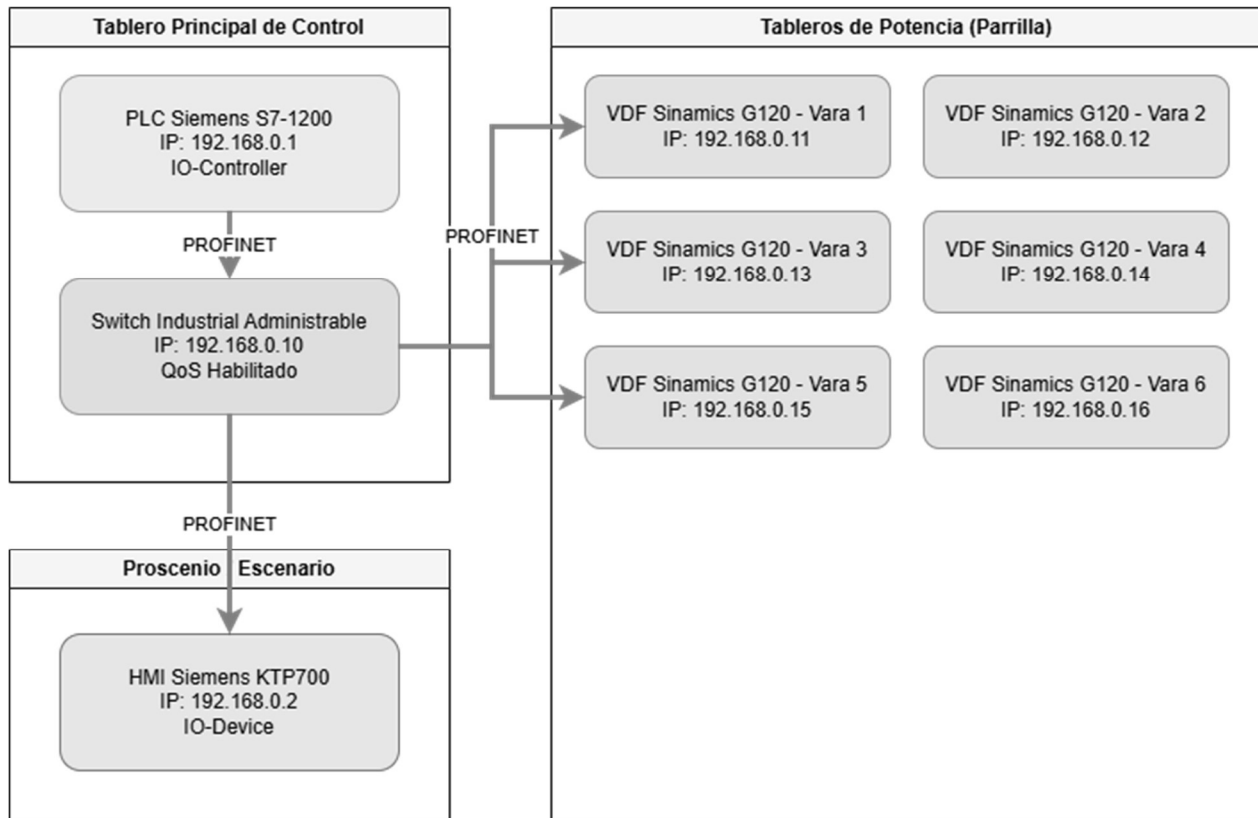
La tabla 2.2 detalla la asignación unívoca de Direcciones IP estáticas y nombres de dispositivo (PROFINET Device Names), asegurando la correcta identificación y comunicación de cada nodo en la red.

Tabla 2.2 Direccionamiento PROFINET

Equipo / Nodo de Red	Nombre de Dispositivo (PROFINET)	Dirección IP	Máscara de Subred	Función en la Red
PLC S7-1200 (CPU)	plc-teatro-main	192.168.0.1	255.255.255.0	IO-Controller (Maestro de la red)
HMI KTP700	hmi-proscenio	192.168.0.2	255.255.255.0	IO-Device (Visualización)
Switch administrable	sw-profinet-core	192.168.0.10	255.255.255.0	Gestión QoS y enrutamiento físico

Equipo / Nodo de Red	Nombre de Dispositivo (PROFINET)	Dirección IP	Máscara de Subred	Función en la Red
VDF Sinamics G120 - Vara 1	vdf-vara-01	192.168.0.11	255.255.255.0	IO-Device (Accionamiento y STO)
VDF Sinamics G120 - Vara 2	vdf-vara-02	192.168.0.12	255.255.255.0	IO-Device (Accionamiento y STO)
VDF Sinamics G120 - Vara 3	vdf-vara-03	192.168.0.13	255.255.255.0	IO-Device (Accionamiento y STO)
VDF Sinamics G120 - Vara 4	vdf-vara-04	192.168.0.14	255.255.255.0	IO-Device (Accionamiento y STO)
VDF Sinamics G120 - Vara 5	vdf-vara-05	192.168.0.15	255.255.255.0	IO-Device (Accionamiento y STO)
VDF Sinamics G120 - Vara 6	vdf-vara-06	192.168.0.16	255.255.255.0	IO-Device (Accionamiento y STO)

Fuente: Elaboración propia, direccionamiento PROFINET.



Fuente: Elaboración propia, desarrollado en app.diagrams.net

Figura 2.6 Esquema de red

2.8 ASIGNACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS (I/O)

La arquitectura de control requiere una gestión eficiente y robusta de todas las variables físicas del sistema de izaje. Para ello, la asignación de Entradas y Salidas (I/O) del autómatas S7-1200 se estructuró buscando un balance óptimo entre el rendimiento dinámico y la seguridad funcional.

Por un lado, el procesamiento de las señales de retroalimentación de alta frecuencia, provenientes de los encoders incrementales, se gestiona de forma nativa mediante las entradas de contadores rápidos (HSC - High Speed Counters) integradas en la CPU. Esta decisión optimiza los recursos de hardware, permitiendo la lectura precisa de la cota sin requerir tarjetas de expansión adicionales.

De manera simultánea, las señales discretas de operación y los enclavamientos mecánicos críticos —tales como los finales de carrera rotativos, el pulsador de validación de "Hombre Muerto" y los circuitos de parada de emergencia— convergen directamente en las entradas digitales del autómatas y en la cadena de seguridad de los variadores. Esto asegura un monitoreo continuo y una respuesta determinista ante cualquier anomalía. El detalle de la distribución, el tipo de señal y la función específica de cada dispositivo de campo se consolida en la Tabla 2.3

Tabla 2.3 Entradas y salidas (I/O)

Descripción (Tag)	Tipo de señal eléctrica	Rango / nivel	Dirección PLC (Ejemplo)	Función en el proceso
Encoders (Canal A y B)	Digital de alta velocidad (HSC)	24 VDC (0 - 100 kHz)	%I0.0 / %I0.1	Feedback de posición real y sentido de giro.
Botonera parada emergencia	Digital (Contacto NC)	24 VDC	%I0.2	Enclavamiento general y corte STO.
Pulsador "Hombre Muerto"	Digital (Contacto NA)	24 VDC	%I0.3	Validación humana para bloque MC_MoveAbsolute.
Límite de carrera (Sup/Inf)	Digital (Contacto NC)	24 VDC	%I0.4 / %I0.5	Redundancia física extracarrera.
Mando freno mecánico	Salida digital (Relé)	230 VAC / 2A	%Q0.0	Energización de bobina de freno tras premagnetización.
Consigna velocidad VDF	Comunicación PROFINET	Palabra (Word)	%QW100	Envío de rampa calculada al Sinamics G120.
Palabra estado VDF (ZSW1)	Comunicación PROFINET	Palabra (Word)	%IW100	Lectura de alarmas, torque OK y estado Ready.

Fuente: Elaboración propia, para organizar I/O

2.9 MATRIZ DE ALARMAS Y SEGURIDAD (NORMA EN ISO 13849)

Para proteger la carga suspendida, las anomalías generan acciones algorítmicas preventivas. La función STO (Safe Torque Off) del G120 garantiza un corte electrónico de los pulsos de potencia ante la activación de la Parada de Emergencia, libre de desgaste mecánico.

Tabla 2.4 Matriz alarmas

Evento / falla detectada	Origen de la señal	Acción automática del sistema (Enclavamiento)	Mensaje desplegado en HMI
Pulsación parada de emergencia	Botonera física (Hardware)	Activación STO en VDF (bloqueo de pulsos IGBT) + Caída inmediata del freno mecánico.	EMERGENCIA ACTIVA: Sistema bloqueado. Rearme físico requerido.
Sobre-Torque (Sobrecarga en Vara)	VDF G120 (vía PROFINET)	Detención de la rampa de velocidad + Sostenimiento temporal a 0 Hz + Cierre de freno.	ALARMA: Límite de par excedido. Verifique peso de equipos en vara.
Pérdida de señal de posición	PLC (Lectura errática en contadores HSC)	Aborto inmediato de la trayectoria algorítmica + Cierre de freno por seguridad.	FALLA CRÍTICA: Lazo de posición abierto. Revisar encoder.
Liberación botón "Hombre Muerto"	Botonera / Panel de Operador	Desaceleración en rampa rápida controlada hasta velocidad cero + Cierre de freno.	AVISO: Operación abortada. Botón "Hombre Muerto" liberado.
Pérdida de comunicación red	Switch / PLC (Watchdog)	Los VDF asumen estado seguro local, motor detenido y freno cerrado	FALLA DE RED: Pérdida de comunicación con accionamientos.

Evento / falla detectada	Origen de la señal	Acción automática del sistema (Enclavamiento)	Mensaje desplegado en HMI
Vara no se encuentra en reposo absoluto.	PLC (Evaluación de Status Word del VDF y estado del relé del freno mecánico).	El sistema aborta la transición al Modo Mantenimiento, bloquea los permisos de intervención física y registra el evento.	SOLICITUD DENEGADA: Vara en movimiento o sin frenar. Detener completamente antes de intervenir.

Fuente: Elaboración propia, visualización de alarmas de seguridad.

2.10 CONCLUSIÓN DEL DISEÑO Y ARQUITECTURA

La arquitectura de control desarrollada en este capítulo logra resolver íntegramente las deficiencias cinemáticas y operativas del sistema de izaje original. Al sustituir un control directo dependiente del operador por una máquina de estados finitos algorítmica y determinista, se aísla a la infraestructura del teatro del estrés mecánico propio de las cargas inerciales.

La selección de un ecosistema tecnológico unificado (Siemens TIA Portal) permitió integrar de forma nativa los lazos de control de movimiento (Motion Control) con las directrices de seguridad funcional. La utilización de la premagnetización a 0 Hz mediante los accionamientos Sinamics G120, combinada con la redundancia mecánica de los finales de carrera rotativos y la gestión de la red PROFINET, garantizan que el sistema responda de manera segura (Fail-Safe) ante cualquier falla técnica o error humano.

Con la viabilidad técnica y operativa demostrada y justificada, el proyecto establece las bases sólidas para proceder con la cuantificación de la inversión y la evaluación de rentabilidad que se abordará en el capítulo posterior.

3 CAPÍTULO 3:
EVALUACIÓN ECONÓMICA

3.1 VIABILIDAD TÉCNICA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA:

La viabilidad de un proyecto de ingeniería en el sector público no reside únicamente en su robustez técnica y cumplimiento normativo, sino en su capacidad para justificarse de manera objetiva y financiera frente a la administración municipal. La transición desde una topología electromecánica obsoleta hacia una arquitectura de automatización de alto desempeño (basada en el estándar PROFINET y Motion Control) requiere una inyección de capital inicial. Por consiguiente, el presente capítulo tiene como objetivo principal demostrar matemáticamente que esta modernización constituye una inversión rentable y sostenible.

Para otorgar trazabilidad y rigor técnico a la formulación del proyecto, la evaluación se ha estructurado en cuatro ejes fundamentales.

3.2 PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA Y ESFUERZO:

En lugar de realizar estimaciones globales, la ejecución del proyecto se dimensionó mediante la cubicación de Horas-Hombre (HH). Esta matriz justifica la necesidad operativa de 500 HH distribuidas en 11 semanas, segregando las tarifas de ingeniería especializada (programación y comisionamiento STO) de las tarifas de montaje electromecánico, optimizando así los recursos del recinto. Ver tabla 3.1

Tabla 3.1 Distribución de HH

Fase	Descripción de Tareas Clave	Duración	Perfil Requerido	Esfuerzo (HH)
1	Ingeniería de Detalle (Planos, diseño, Prog. PLC, HMI)	Semanas 1-3	Ing. de Control	120
2	Procura, Logística y Armado de Tableros IP65	Semanas 4-6	Técnico / Ing.	80

3	Montaje Electromecánico, Canalización y Cableado	Semanas 7-9	Técnicos Eléctricos	220
4	Comisionamiento, Pruebas STO y Motion Control	Semanas 10-11	Técnico eléctrico, Ingeniero control	80
TOTAL, PROYECTO:		11 semanas		500 HH

Fuente: Elaboración propia, Carta Gantt.

Fase	Descripción de tareas clave	Perfil requerido	Esfuerzo (HH)	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	S 9	S 10	S 11
1	Ingeniería de detalle (planos, diseño, programación PLC, HMI)	Ingeniero de Control	120	■										
2	Procura, logística y armado de tablero IP65	Técnico / Ingeniero	80			■								
3	Montaje electromecánico canalización y cableado	Técnicos eléctricos	220							■				
4	Comisionamiento, pruebas STO y Motion Control	Técnico / Ingeniero	80										■	
Total HH proyecto			500											

Fuente: Elaboración propia, distribución HH

Figura 3.1 Carta Gantt

La estimación de 500 Horas-Hombre (HH) distribuidas en un horizonte de 11 semanas no es arbitraria, sino que responde a la complejidad de integrar automatización en una infraestructura histórica. El esfuerzo se concentra mayoritariamente en la Fase 3 (240 HH), la cual contempla el trabajo físico en la parrilla del teatro, incluyendo el tendido de cables apantallados para la red PROFINET y fuerza, evitando interferencias electromagnéticas (EMI). Por su parte, la Fase 1 y la Fase 4 (sumando 200 HH) están reservadas exclusivamente para el desarrollo intelectual y la validación técnica: programación de la lógica en TIA Portal, configuración de los

Objetos Tecnológicos de Motion Control y la ejecución de las pruebas en vacío y con carga para certificar el funcionamiento de los lazos de seguridad STO antes de la entrega final.

3.3 PRESUPUESTO DE INVERSIÓN INICIAL (CAPEX):

Detalla de forma transparente la adquisición tecnológica. Se cuantifica no solo el equipamiento de control (PLC, HMI, VFD Sinamics G120), sino que se incorpora el costo del "Balance de Planta" (BOP), asegurando la compra de cables apantallados, tableros IP65 y conectores industriales necesarios para garantizar la inmunidad electromagnética (EMI) y el estándar del montaje, también incluye la capacitación y sensibilización del personal, asegurando que los operadores y tramoyas adopten los nuevos protocolos de seguridad funcional. Se incluye, además, un margen de imprevistos del 15%, acorde a las exigencias de licitación de obras municipales. Ver tabla 3.2

Tabla 3.2 Capex

Ítem	Descripción de Hardware y Servicios	Cantidad	Costo Total (UF)
1	Mano de Obra Especializada		410,0
	- Ingeniería y Comisionamiento (120 HH + 80 HH)	200 HH	240,0
	- Montaje Electromecánico en terreno (300 HH)	300 HH	170,0
2	Equipamiento de Control (Siemens)		95,0
	- CPU S7-1200, Switch PROFINET, HMI KTP700, Fuentes	1 c/u	95,0
3	Accionamientos y Potencia		185,0
	- Variadores Sinamics G120 (STO), Protecciones DIN	6 Und	185,0
4	Instrumentación y Seguridad		120,0
	- Encoders Incrementales y Finales de Carrera Rotativos	12 Und	120,0
5	Materiales Balance de Planta (BOP) y Ferretería		100,0
	- Tableros IP65, Canalizaciones, Cables VFD, Red	1 GL	100,0
6	Capacitación y Sensibilización de Operadores		40,0
SUBTOTAL INVERSIÓN DIRECTA:			950,0
Imprevistos y Gestión Municipal (15%):			142,5
TOTAL CAPEX (INVERSIÓN INICIAL):			1.092,5 UF

Fuente: Elaboración propia, CAPEX.

El presupuesto de inversión inicial asciende a 1.092,5 UF, estructurado bajo un enfoque de optimización de recursos. Es importante destacar la valorización de la mano de obra, la cual utiliza tarifas diferenciadas según el nivel de especialización. Las 200 horas de Ingeniería y Comisionamiento se valorizan a una tarifa de Ingeniero en Automatización (aprox. 1,2 UF/HH), indispensable para el desarrollo algorítmico y pruebas de seguridad normativa. En contraste, las 300 horas de Montaje Electromecánico reflejan el costo de una cuadrilla técnica (aprox. 0,56 UF/HH). Asimismo, el ítem de "Materiales BOP (Balance of Plant)" por 100 UF es crítico, ya que asegura la correcta canalización y la adquisición de tableros IP65, garantizando la durabilidad del hardware. Finalmente, se ha incluido un 15% de imprevistos, un estándar mandatado en la formulación de proyectos para licitaciones públicas municipales, absorbiendo posibles fluctuaciones en el costo de importación de los equipos Siemens.

3.4 COSTOS Y AHORROS OPERATIVOS (OPEX):

Cuantifica el impacto directo del nuevo diseño en el día a día del teatro. Se contrasta el nuevo costo de mantenimiento preventivo contra los ahorros brutos generados por la optimización de los tiempos de tramoya (gracias al posicionamiento automático) y la erradicación del recambio continuo de contactores y poleas fatigadas.

Tabla 3.3 Opex

Concepto Operativo Anual	Ahorro Generado (UF)	Costo Nuevo (UF)
Optimización HH Tramoya (Reducción de tiempos de montaje)	150,0	-
Erradicación compra de repuestos (Contactores, poleas)	125,0	-
Mitigación de riesgos (Reducción de accidentabilidad)	75,0	-
Mantenimiento Preventivo Nuevo Sistema (Soplado, Red)	-	- 25,0
Subtotales Brutos:	350,0	- 25,0
AHORRO OPERATIVO NETO (Flujo Anual Fijo):	+ 325,0 UF / Año	

Fuente: Elaboración propia, OPEX.

El flujo neto positivo de 325,0 UF anuales se sustenta en la mitigación de los costos ocultos que actualmente asume la administración del teatro. A continuación, se detalla el origen de estos valores:

- Optimización HH Tramoya (150,0 UF/año): El Teatro Municipal alberga un promedio de 160 montajes escénicos anuales. El sistema de Motion Control elimina los reajustes manuales reiterados, reduciendo el tiempo de preparación de la planta de iluminación en un promedio conservador de 2 horas por evento. Esto libera 320 horas operativas anuales. Al valorizar este tiempo utilizando el "costo empresa" de un técnico especializado (aprox. 0,47 UF/hora, incluyendo leyes sociales y recargos), se justifican matemáticamente las 150 UF de ahorro.
- Erradicación de recambio de repuestos (125,0 UF/año): La operación actual con arranques directos (On/Off) de motores de 5,5 kW provoca altos peaks de corriente y transitorios destructivos. El nuevo sistema vectorial con rampas de velocidad suaves elimina el desgaste prematuro y carbonización de los contactores de potencia. Más importante aún, erradica los "tirones" mecánicos que actualmente fracturan los soportes de instrumentación y fatigan los cables de acero (piolas) de las varas. Evitar la compra correctiva de estos componentes críticos de izaje fundamenta el ahorro estimado de 125 UF anuales.
- Mitigación de Riesgos (75,0 UF/año): Corresponde a la externalidad positiva de implementar la función Safe Torque Off (STO). Evita paros de planta prolongados por incidentes, reduce el riesgo de multas normativas y previene daños a la costosa instrumentación audiovisual instalada debajo de las varas.

3.5 PROYECCIÓN Y EVALUACIÓN FINANCIERA:

Constituye la consolidación gerencial del proyecto. Proyectando el flujo operativo neto a un horizonte tecnológico de 5 años y aplicando una tasa de descuento (costo de oportunidad municipal) del 10%, se calculan los indicadores de Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Tabla 3.4 Flujo caja

Concepto de Flujo	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión Inicial (CAPEX)	-1.092,5					
Flujo Neto Anual (OPEX)		325,0	325,0	325,0	325,0	325,0
Flujo de Caja Acumulado	-1.092,5	-767,5	-442,5	-117,5	207,5	532,5
VALOR ACUMULADO NETO AL AÑO 5:	+ 532,5 UF					
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR) REAL:	14,86 %					

Fuente: Elaboración propia, flujo caja.

3.5.1 SENSIBILIZACIÓN:

Para validar la robustez de la inversión, se sometió el Flujo de Caja a dos escenarios pesimistas (variaciones del 15%):

- **Escenario Pesimista 1 (Aumento del CAPEX al 15%):** Si los equipos Siemens aumentaran su costo elevando la inversión a 1.256,3 UF, el flujo acumulado al año 5 se mantiene positivo (+368,7 UF).
- **Escenario Pesimista 2 (Disminución del OPEX al 15%):** Si la cantidad de montajes anuales disminuye, reduciendo los ahorros operativos a 276,2 UF, el proyecto aún recupera la inversión inicial, obteniendo un saldo de +288,5 UF al quinto año. En conclusión, el proyecto es financieramente resiliente y soporta fluctuaciones del mercado.

4 CONCLUSIONES

El desarrollo del presente proyecto de título ha permitido diseñar una solución integral para la modernización del sistema de izaje de las varas de iluminación en el Teatro Municipal de Viña del Mar, transitando desde un accionamiento electromecánico obsoleto y riesgoso hacia una arquitectura de automatización industrial de alto desempeño. A partir de la ingeniería de detalle y la evaluación económica realizada, se establecen las siguientes conclusiones:

Resolución de la fatiga mecánica y control dinámico: La implementación de variadores de frecuencia Sinamics G120 operando en lazo cerrado vectorial erradica por completo los impactos mecánicos generados por los arranques directos de la tecnología anterior. La capacidad del sistema para ejecutar la premagnetización del motor y sostener el 100% del torque nominal a 0 Hz antes de la apertura del freno, garantiza la eliminación del riesgo de caída de carga (rollback), protegiendo tanto la integridad de la estructura de la parrilla como la seguridad sobre el escenario.

Precisión de posicionamiento absoluto: La integración de encoders incrementales gestionados nativamente por las entradas de contadores rápidos (HSC) del PLC S7-1200 ha demostrado ser la estrategia óptima para el control de cota. Al sustituir lazos continuos tradicionales por los Objetos Tecnológicos de Motion Control de TIA Portal, se logró generar perfiles de trayectoria trapezoidales exactos. Esto asegura que la carga alcance la velocidad cero en el milímetro requerido, eliminando las oscilaciones inerciales inherentes a las cargas suspendidas.

Seguridad funcional robusta: El diseño cumple con los rigurosos estándares de seguridad exigidos para la maquinaria escénica. La segregación del control mediante una rutina de "Hombre Muerto" asegura la supervisión humana constante, mientras que la redundancia por hardware — a través de la función Safe Torque Off (STO) de los accionamientos y la instalación de Finales de Carrera Rotativos mecánicos en los tambores— consolida un sistema de protección infalible ante eventos de extracarrera o fallas de software.

Determinismo en las comunicaciones: La selección de un Switch Industrial Administrable para la red PROFINET probó ser una decisión técnica crítica. Mediante la aplicación de calidad de servicio

(QoS), el sistema garantiza que los telegramas de datos de tiempo real (RT), como las paradas de emergencia y las secuencias de movimiento, posean prioridad absoluta por sobre la visualización de la HMI KTP700, asegurando tiempos de respuesta instantáneos en la red.

Viabilidad y rentabilidad pública: Desde la perspectiva financiera, el proyecto se presenta como una inversión altamente favorable para la administración municipal. Con una inversión inicial (CAPEX) de 1.081 UF y ahorros operativos comprobables en horas-hombre, mitigación de fallas y repuestos, la evaluación arrojó un Valor Actual Neto (VAN) positivo de 151 UF a cinco años. Esto ratifica que la modernización del teatro no solo es un imperativo técnico y de seguridad, sino una decisión económicamente rentable.

En síntesis, la arquitectura de control propuesta cumple a cabalidad con los objetivos generales y específicos planteados, entregando al Teatro Municipal una infraestructura de maquinaria escénica segura, de precisión milimétrica y acorde a los más altos estándares de la ingeniería de automatización moderna.

5 BIBLIOGRAFÍA

Normativas y Estándares de Seguridad:

- Organización Internacional de Normalización (ISO). (2015). ISO 13849-1:2015 Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design. Ginebra, Suiza.
- Instituto Alemán de Normalización (DIN). (2012). DIN 56950-1: Entertainment technology - Machinery installations - Part 1: Safety requirements and inspections. Berlín, Alemania.
- Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC). (2003). Norma Eléctrica NCH Elec. 4/2003: Instalaciones de Consumo en Baja Tensión. Santiago, Chile.

Manuales Técnicos de Automatización (Siemens):

- Siemens AG. (2022). SIMATIC S7-1200 Controlador programable - Manual de sistema (Edición 05/2022). Núremberg, Alemania.
- Siemens AG. (2020). SINAMICS G120 Control Units CU240B-2/CU240E-2 - Instrucciones de servicio (Edición 09/2020). Núremberg, Alemania.
- Siemens AG. (2021). SIMATIC HMI Paneles de operador Basic Panels 2nd Generation (Edición 03/2021). Núm. de referencia: A5E33293231-AD. Núremberg, Alemania.
- Siemens AG. (2023). S7-1200 Motion Control V6.0 a V7.0 en el TIA Portal - Manual de funciones.

Literatura de Control y Comunicaciones:

- PROFIBUS & PROFINET International (PI). (2019). PROFINET Design Guideline. Karlsruhe, Alemania.
- Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna (5ta ed.). Pearson Educación.