



FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INFORMÁTICA

IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE TRANSMISION MEDIANTE FIBRA OPTICA PARA LA SUPERVISION DE UN HORNO EN UNA FABRICA DE CEMENTO

**Línea de investigación:
Sistemas eléctricos y electrónicos**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Autor

Romero Najarro, Ivan

Asesor

Rodríguez Figueroa, José Julio

ORCID: 0000-0002-3672-1526

Jurado

Flores Masías, Edward José

Peña Carrillo, Cesar Serapio

Rosales Fernández, José Hilarión

Pastor Castillo, José Enrique

Lima - Perú

2025

IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE TRANSMISION MEDIANTE FIBRA OPTICA PARA LA SUPERVISION DE UN HORNO EN UNA FABRICA DE CEMENTO

INFORME DE ORIGINALIDAD

7 %	7 %	1 %	1 %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	doczz.es Fuente de Internet	< 1 %
2	fdocuments.es Fuente de Internet	< 1 %
3	Submitted to UNIV DE LAS AMERICAS Trabajo del estudiante	< 1 %
4	idoc.pub Fuente de Internet	< 1 %
5	3lib.net Fuente de Internet	< 1 %
6	Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal Trabajo del estudiante	< 1 %
7	dokumen.pub Fuente de Internet	< 1 %
8	comindustrialplc.blogs.upv.es Fuente de Internet	< 1 %
9	Submitted to Universidad de Burgos UBUCEV Trabajo del estudiante	< 1 %
10	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	< 1 %
11	fr.scribd.com Fuente de Internet	< 1 %



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INFORMÁTICA

IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE TRANSMISION MEDIANTE FIBRA
OPTICA PARA LA SUPERVISION DE UN HORNO EN UNA FABRICA DE CEMENTO

Línea de investigación:
Sistemas eléctricos y electrónicos

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Autor:

Romero Najarro, Ivan

Asesor:

Rodríguez Figueroa, José Julio

ORCID: 0000-0002-3672-1526

Jurado:

Flores Masías, Edward José

Peña Carrillo, Cesar Serapio

Rosales Fernández, José Hilarión

Pastor Castillo, José Enrique

Lima - Perú

2025

Dedicatoria

Esta tesis tiene como principal dedicación a mis padres, Julia Najarro Espinoza y Melquiades Romero Ojeda, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido mi mayor inspiración y motivación en este largo camino académico. A ustedes les dedico este trabajo, como un humilde reconocimiento a todo el esfuerzo y sacrificio que han hecho para que pueda alcanzar mis metas. A mi familia quienes han sido mi sostén en los momentos difíciles y han compartido conmigo cada pequeño triunfo a lo largo de esta travesía. A todos aquellos que, de alguna manera, han contribuido a mi formación académica y personal, les agradezco de todo corazón.

Este trabajo esta dedicado a ustedes, con profundo cariño y gratitud

Agradecimiento

Gran gratitud a la facultad de Ingeniería Electrónica e Informática de la Universidad Nacional Federico Villarreal, por formarnos como profesionales. A mi asesor Dr. José Julio Rodríguez Figueroa por sus recomendaciones y sugerencias en la etapa de desarrollo de la tesis.

A mis padres, Julia Najarro Espinoza y Melquiades Romero Ojeda, por su amor incondicional y por enseñarme el valor de la perseverancia, a mi familia por su apoyo constante y moral durante toda mi trayectoria profesional, les agradezco de todo corazón

ÍNDICE

RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Descripción y formulación del problema.....	14
1.2. Antecedentes.....	15
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	18
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	18
1.4. Justificación.....	19
II. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación.....	20
III. MÉTODO.....	69
3.1. Tipo de investigación.....	69
3.2. Ámbito temporal y espacial.....	69
3.3. Variables.....	70
3.4. Población y muestra.....	70
3.5. Instrumentos.....	71
3.6. Procedimientos.....	71
3.7. Análisis de datos.....	72
3.8. Consideraciones éticas.....	72
IV. RESULTADOS.....	73

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	77
VI. CONCLUSIONES.....	79
VII. RECOMENDACIONES.....	80
VIII. REFERENCIAS.....	81
IX. ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de potencia de salida en función de la pérdida en dB	28
Tabla 2. Zonas del proceso de cocción del Clinker en un horno rotatorio.	37
Tabla 3. Características técnicas del horno rotatorio.	38
Tabla 4. Cuadro comparativo de sensor de temperatura en ingreso y salida del horno.....	39
Tabla 5. Cuadro comparativo de sensor de flujo de alimentación de material al ingreso del horno.	39
Tabla 6. Cuadro comparativo de Actuador para activar el ingreso de material en el horno....	40
Tabla 7. Cuadro comparativo de PLC para la gestión maestra.....	40
Tabla 8. Cuadro comparativo de pantalla HMI.	41
Tabla 9. Cuadro comparativo de servidores para monitoreo y supervisión de red de campo.	41
Tabla 10. Cuadro comparativo de cable de fibra óptica.	42
Tabla 11. Cuadro comparativo de switch industrial.	42
Tabla 12. Características de los componentes del sistema de comunicaciones por fibra óptica.	48
Tabla 13. Costos de equipos.	65
Tabla 14. Cuadro CAPEX.....	67
Tabla 15. Cuadro OPEX.	68
Tabla 16. Estadísticas de confiabilidad totales	73
Tabla 17. Estadísticas de confiabilidad con Alfa de Cronbach por dimensión.	73
Tabla 18. Prueba de normalidad.	73
Tabla 19. Resultados totales pretest.....	74
Tabla 20. Resultados totales post-test.....	74
Tabla 21. Diferencia de medias entre pretest y post-test	74
Tabla 22. Resultados de la dimensión fiabilidad del pretest.....	75

Tabla 23. Resultados de la dimensión fiabilidad del postest.	76
Tabla 24. Diferencia de medias para la dimensión fiabilidad.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama básico del sistema de comunicaciones de fibra óptica.....	21
Figura 2. Modelo de la ley de Snell.	24
Figura 3. Haz de luz que se refracta alejándose de la normal.....	25
Figura 4. Perfiles de índice en el núcleo.	26
Figura 5. Niveles de una red industrial según modelo CIM.	30
Figura 6. Topología física de un sistema de comunicaciones.....	31
Figura 7. Arquitectura de un sistema profinet.	34
Figura 8. Plano de la planta de cemento.	37
Figura 9. Trayectoria del sistema de comunicaciones de fibra óptica.	43
Figura 10. Plano del sistema de comunicaciones de fibra óptica.	44
Figura 11. Esquema del sistema de comunicaciones de fibra óptica.	45
Figura 12. Topología en anillo del sistema de comunicaciones de fibra óptica.	46
Figura 13. Topología en línea de los módulos de E/S de tablero de periferia descentralizada.	47
Figura 14. Red de Gestión del sistema de comunicaciones de fibra óptica.	50
Figura 15. Termocupla tipo S de la marca Endress Hauser.	51
Figura 16. Caudalímetro másico MaxxFlow HTC.	52
Figura 17. Actuador electroneumático marca Kinetrol.....	53
Figura 18. Actuador electroneumático marca Kinetrol.....	54
Figura 19. Caudalímetro térmico másico.....	55
Figura 20. Caudalímetro térmico másico.....	56
Figura 21. Patch core fibra óptica Simatic NET FO standard de 50/125 um.	57
Figura 22. Cable IE FC TP flexible, GP 2 x 2 (PROFINET Type B).	58
Figura 23. PLC S7 -400, CPU 410-5H.	59

Figura 24. Switch industrial scalance XC-206.	60
Figura 25. Switch scalance XR324-4M EEC.	61
Figura 26. Servidor Simatic IPC847D.	63
Figura 27. DVI Visión CAT MC2 ARU2 CPU.	63
Figura 28. Pantalla HMI KTP 900.	64
Figura 29. Comparación entre pretest y posttest totales.	75

RESUMEN

La investigación actual se centró en la creación de un sistema de comunicación mediante fibra óptica destinado al control de un horno en una fábrica de cemento, alineándose con la norma Profinet establecida por la Internacional Electrotechnical Commission 61784, con el fin de optimizar el proceso de producción de clínker en la planta cementera. La justificación de la tesis radica en su aplicabilidad tecnológica y práctica, lo cual resulta ventajoso al mejorar la eficacia y producción del proceso. Se presentó un marco teórico que destaca la fibra óptica como el componente esencial. Una de las principales ventajas es la extraordinaria rapidez en la transferencia de información, que alcanza los 100 megabits por segundo, lo que facilita la transmisión en tiempo real de las señales generadas por sensores, transmisores y electroválvulas en una pantalla táctil con interfaz de usuario. Finalmente, esta investigación servirá como base para futuros estudios en torno a Profinet, dado que se trata de una red que implementa tecnología avanzada y está en aumento en sectores industriales, mineros, petroquímicos y de hidrocarburos.

Palabras clave: Fibra óptica, profinet, clínker, sensores, rentabilidad, productividad

ABSTRACT

The current research focused on the development of a fiber optic communication system for kiln control in a cement Factory, aligning with the Profinet standar established by the Internacional Electrotechnical Commission (IEC) 61784, with the goal of optimizing the Clinker production process in the cement plant. The justification for the thesis lies in its technological and practical applicability, which is advantageous in improving process efficiency and production. A theoretical framework was presented that highlights fiber optics as the essential component. One of the main advantages is the extraordinary speed of information transfer, reaching 100 megabits per second, which facilitates the realtime transmission of signals generated by sensors, transmitters, and solenoid valves on a touchscreen with a user interface. Finally, this research will serve as a basis for future studies on Profinet, given that it is a network that implements advanced technology and is increasing in the industrial, mining, petro- chemical, and hydrocarbon sectors.

Keywords: Fiber optic, profinet, clinker, sensors, profitability, productivity.

I. INTRODUCCIÓN

En la industria cementera, la continuidad operativa, la confiabilidad de los sistemas de control y la disponibilidad de información en tiempo real constituyen factores determinantes para garantizar la eficiencia del proceso productivo. Dentro de este entorno, una de las etapas más críticas es la clinkerización, en la cual el material base, principalmente la caliza previamente precalcificada, es sometido a temperaturas cercanas a los 1450 °C dentro de un horno rotativo. Debido a la complejidad térmica y operativa de este proceso, la supervisión permanente de sus variables resulta indispensable para mantener condiciones estables de funcionamiento, minimizar desviaciones operacionales y asegurar la calidad del producto final.

En ese marco, la transmisión de señales asociadas a variables de proceso, tales como temperatura, presión y estados de actuación de los dispositivos de campo, demanda una infraestructura de comunicación robusta, confiable y apta para operar en ambientes industriales de alta exigencia. Los sistemas tradicionales de transmisión pueden presentar restricciones vinculadas a interferencias electromagnéticas, atenuación de señal, limitaciones de ancho de banda y vulnerabilidad frente a perturbaciones propias del entorno fabril. Frente a ello, la fibra óptica se posiciona como una solución tecnológica de alto desempeño, debido a su elevada capacidad de transmisión, inmunidad al ruido electromagnético, seguridad en el transporte de datos y estabilidad en enlaces de larga distancia.

A partir de esta necesidad tecnológica, la presente investigación plantea la implementación de un sistema de transmisión mediante fibra óptica para la supervisión de un horno en una fábrica de cemento, con el propósito de establecer un canal de comunicación eficiente entre los instrumentos de campo y la sala de control. De este modo, se busca optimizar la adquisición, transmisión y monitoreo de las señales del proceso, permitiendo una supervisión más precisa del horno rotativo y favoreciendo una respuesta operativa oportuna. Asimismo, la integración de sensores de temperatura, sensores de presión, actuadores, dispositivos finales y

controladores lógicos programables dentro de una arquitectura de comunicación basada en fibra óptica contribuye a mejorar la confiabilidad global del sistema de supervisión industrial.

En relación con el planteamiento del problema, la investigación parte de la siguiente interrogante general: ¿cómo se puede llevar a cabo la supervisión de un horno en una fábrica de cemento utilizando la tecnología de fibra óptica? A partir de ello, se establece como objetivo general crear un sistema de comunicación a través de fibra óptica para controlar y supervisar el horno de una planta productora de cemento. Esta propuesta adquiere relevancia técnica porque responde a la necesidad de incorporar redes industriales más eficientes en procesos de manufactura continua, donde la precisión en la transmisión de datos es un componente esencial para la estabilidad operacional. En consecuencia, la justificación de este estudio se sustenta en que el diseño e implementación de un sistema de comunicaciones por fibra óptica permitirá integrar las señales provenientes de los instrumentos del horno con la sala de control, facilitando la supervisión remota por parte del personal responsable y mejorando el desempeño general del proceso.

Desde una perspectiva de ingeniería, esta investigación aborda un problema de transmisión de señales, y también una necesidad de modernización tecnológica en entornos industriales donde la automatización y el monitoreo en tiempo real resultan decisivos para la productividad. En tal sentido, la propuesta representa una alternativa orientada a fortalecer la infraestructura de comunicación del sistema de supervisión del horno, reduciendo riesgos asociados a pérdidas de información, incrementando la confiabilidad del enlace de datos y mejorando la capacidad de control del proceso de clinkerización.

El desarrollo de la investigación se ha estructurado en varios capítulos articulados de manera lógica y secuencial. En el Capítulo I se presenta la introducción, que comprende la descripción y formulación del problema, los antecedentes, los objetivos y la justificación, elementos que delimitan el alcance del trabajo y sustentan su pertinencia técnica.

Seguidamente, en el Capítulo II se desarrolla el marco teórico, donde se exponen las bases teóricas y tecnológicas vinculadas con la transmisión por fibra óptica, la supervisión industrial, la automatización de procesos y el funcionamiento del horno en la industria cementera. Posteriormente, en el Capítulo III se describe el método de investigación, incluyendo el tipo de investigación, el ámbito temporal y espacial, las variables de estudio, la población y muestra, los instrumentos empleados, los procedimientos ejecutados, el análisis de datos y las consideraciones éticas correspondientes.

A continuación, en el Capítulo IV se presentan los resultados obtenidos a partir del diseño e implementación del sistema propuesto, mostrando los hallazgos técnicos derivados del proceso de investigación. Luego, en el Capítulo V se desarrolla la discusión de resultados, en la cual se interpretan los hallazgos a la luz de los fundamentos teóricos y de los antecedentes considerados. Finalmente, en los Capítulos VI y VII se exponen las conclusiones y recomendaciones, respectivamente, sintetizando los principales aportes del estudio y planteando sugerencias para futuras mejoras o aplicaciones. El documento culmina con el Capítulo VIII, correspondiente a las referencias bibliográficas, y el Capítulo IX, en el cual se incorporan los anexos que respaldan técnica y documentalmente la investigación.

1.1. Descripción y formulación del problema

Una de las fases en los procedimientos de una planta de cemento, conocida como la producción de clinker o clinkerización, consiste en calentar el material base (caliza) que ha sido pre-calcificado en un horno a una temperatura de 1450 grados Celsius. Para asegurar que este procedimiento se realice de forma eficaz, es fundamental que el horno rotativo se controle en un nivel específico.

El propósito del sistema de comunicaciones a través de fibra óptica es facilitar la transmisión y el intercambio de señales relacionadas con las variables del proceso, lo que contribuye a optimizar la respuesta de esta línea de producción (Campozano, Pincay, 2021).

Además, permite la supervisión remota de las variables y mejora el desempeño general. Este sistema incluye componentes esenciales como sensores de temperatura, sensores de presión, dispositivos finales como actuadores y elementos de control, entre ellos el controlador lógico programable, que son responsables de mantener la estabilidad del funcionamiento del horno rotativo durante el proceso.

1.1.1. Formulación del problema

Problema general

¿Cómo se puede llevar a cabo la supervisión de un horno en una fábrica de cemento utilizando la tecnología de fibra óptica?

Problemas específicos

- a. ¿Cuál es la incidencia de la incorporación del documento en el manejo de los archivos del seguro social de salud EsSalud, 2022?
- b. ¿Cómo se puede llevar a cabo la supervisión de un horno en una fábrica de cemento utilizando la tecnología de fibra óptica?
- c. ¿Cómo asegurar la fiabilidad en la creación de un sistema de comunicación por fibra óptica para el manejo de un horno en una fábrica de cemento?

1.2. Antecedentes

1.2.1. Antecedentes internacionales

Ávila (2021) en su investigación de tesis: Creación y uso de redes industriales mediante el protocolo Modbus la comunicación de datos de control de un variador de frecuencia, que se conoce como (VFD), y entre dos controladores lógicos programables, abreviados como (PLCS). Propone la investigación, planificación y ejecución de dos sistemas mediante una normativa de comunicación fundamental, abarcando las versiones del protocolo de (TCP) y de la unidad terminal remota (RTU) para el envío de datos de control desde un variador de frecuencia PowerFlex 4 y dos PLCs S7-1215C. Se discuten los fundamentos que rigen las

estructuras de comunicación en el sector industrial y se proporciona un desglose del protocolo aludido, así como el funcionamiento del controlador programable y del variador de velocidad. En el tercer capítulo, se expone el enfoque para la implementación del sistema que utiliza el protocolo TCP, mencionando los dispositivos periféricos empleados, y se describe la conexión de los equipos junto con la configuración de su programación, lo que posibilitará la integración de las redes de comunicación. En el cuarto capítulo, se presentan los hallazgos y conclusiones, destacando cómo el conjunto de directrices mencionado facilita la incorporación y validación de los dispositivos distribuidos.

Pincay (2021) en su investigación de tesis: Estudio de factibilidad de una red de fibra óptica para el mejoramiento de la comunicación de la Unidad Educativa Alejo Lascano. Presenta un estudio técnico y financiero con la finalidad de diseñar la estructura lógica de la red de internet de la Unidad Educativa para optimizar la transferencia de datos. En el marco teórico, detalla las características fundamentales de la fibra óptica y sus componentes. En la metodología de la investigación, utiliza enfoques como el inductivo- hipotético, deductivo, estadístico y de revisión bibliográfica. En el capítulo que analiza y tabula los resultados, explica una encuesta que se llevó a cabo con 321 estudiantes. Por último, en sus conclusiones, enfatiza el uso de software Cisco Packet Tracer.

Ramírez (2021) en tesis de maestría: Aplicaciones de fibra óptica en la industria minero energética, sugiere la adopción de fibra óptica en esta industria, destacando el enfoque para la puesta en práctica del sistema de detección de temperatura distribuida, conocida como DTS. Esto es especialmente relevante en minas de carbón para controlar y prevenir incendios mediante el monitoreo del perfil térmico y el sistema de detección acústica distribuida, abreviado como DAS, que permite identificar cambios en las tensiones durante las actividades de extracción y emplear tecnología acústica para sistemas de seguridad o alarmas de intrusión. Asimismo, lleva a cabo pruebas tanto en campo como en laboratorio para validar la eficacia de

la distribución de fibra de vidrio y la supervisión de diferentes parámetros. Por último, elabora aplicaciones al llevar a cabo simulaciones sobre el despliegue e instalación del medio de transmisión mencionado en un entorno de mina subterránea.

1.2.2. Antecedentes nacionales

Cuellar (2019) en su proyecto de tesis: Creación de una red de fibra óptica para optimizar la transmisión de datos en entidades públicas y residentes del distrito de Quichuas Tayacaja, Huancavelica-2018. Ofrece una solución centrada en el avance de las comunicaciones en la zona mencionada. La meta es desarrollar un plan para un vínculo óptico entre el nodo Mariscal Cáceres de la Red Regional Huancavelica y otro nodo localizado en el distrito previamente citado. Es importante señalar que lleva a cabo el análisis del cálculo y tamaño del enlace óptico utilizando el software Matlab en la interfaz interactiva Guide. Para el diseño del área de cobertura, recurre al programa Link Planner. Posteriormente, menciona los componentes que integran la red y también destaca las ventajas que obtienen los usuarios en las entidades públicas y los habitantes.

Leveau y Marín (2019), en su estudio sobre competencias profesionales, propone mejorar la conexión entre el edificio administrativo y la refinería de Iquitos de Petroperú mediante el uso de fibra óptica en 2019. Sugiere una solución tecnológica a través de la fibra óptica para el enlace entre sus oficinas y la planta de refinación de Iquitos, las cuales están separadas por aproximadamente 14.5 kilómetros. Lleva a cabo un análisis de la situación actual de la red corporativa. También proporciona un presupuesto necesario para optimizar los recursos del área de Recursos Humanos y otros interesados. Indica que una de las soluciones más efectivas es la instalación aérea por su facilidad y de implementación, reducción de costes y la factibilidad que ofrece para inspecciones y corregir fallos que puedan surgir. Por último, lleva a cabo pruebas esenciales como el uso de reflectómetro óptico en el dominio del tiempo, polarización mediante modo de transmisión, dispersión cromática, evaluación a 10 gigabits y

revisión visual para asegurar el funcionamiento adecuado de la fibra óptica entre la Refinería de Iquitos y el Edificio administrativo.

Beltrán (2018) en su tesis: Diseño del sistema de comunicaciones que incorpora el estándar C37.94, por sus siglas en inglés IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), entre las subestaciones eléctricas Azángaro y San Gabán. Sugiere que se diseñe un sistema de intercomunicación a través de tecnología de fibra óptica desde la central eléctrica primaria hasta una fuente secundaria de suministro de energía. También señala los cálculos necesarios que llevó a cabo en el sistema comunicativo entre las subestaciones previamente citadas. Incluye la teoría de la fibra óptica, fundamentada en la obra titulada "Sistemas de comunicaciones electrónicas" así como una descripción de los sistemas de comunicación por fibra óptica, escrito por Tomasi Wayne. En lo que se refiere al capítulo siguiente, calcula la atenuación y la pérdida, y también determina estimaciones de la potencia de recepción y del tiempo de un bit. Como conclusión, indica que la energía del láser emisor debe ser igual o más alta, al menos 59.09 decibeles, que la del receptor.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Crear un sistema de comunicación a través de fibra óptica para controlar el horno de una planta que produce cemento.

1.3.2. Objetivos específicos

- a. Elaborar un esquema de red y explicar la topología empleada en las comunicaciones de fibra óptica, para que se pueda controlar el horno rotativo de una fábrica de cemento.
- b. Detallar un enlace óptico en las comunicaciones de fibra óptica y describir el cálculo del mismo, que sea capaz de regular un horno perteneciente a una planta cementera.

1.4. Justificación

Como resultado de los avances tecnológicos y las redes industriales en los procedimientos de las compañías cementeras, se logra conseguir procesos muy eficientes y mantener niveles óptimos de operación. Por esta razón, el diseño de un sistema de comunicaciones por fibra óptica que posibilite la integración de las señales de los instrumentos del horno con la sala de control para que el personal correspondiente supervise y monitoree este proceso justifica el desarrollo del presente trabajo de investigación.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

Esta investigación se sustenta en los fundamentos teóricos de la transmisión de señales luminosas en forma de pulsos, junto con los elementos que integran un sistema de comunicaciones por fibra óptica. En este marco, la fibra óptica se concibe como un medio capaz de transportar información mediante luz y de integrarse a sistemas de control automatizados en entornos industriales y mineros, permitiendo la comunicación a través de diversos protocolos de control y supervisión de procesos (Wayne, 2003).

Estos sistemas de comunicación, al emplear fibra óptica, tienen beneficios en comparación con otros que se basan en cable coaxial o en cable UTP (cable de par trenzado no apantallado), tales como:

Resistencia a la interferencia estática: Los cables de fibra óptica no se ven afectados por el ruido que genera la inducción electromagnética (EMI) originada por lámparas incandescentes, motores eléctricos, rayos y otros elementos. Asimismo, se debe a que los cables ópticos no son conductores de electricidad, pues el ruido eléctrico no modifica la energía en los cables de fibra óptica.

Resistencia a la diafonía: Los cables ópticos son inmunes a la diafonía entre cables adyacentes porque se basan en la inducción magnética y no tienen campos magnéticos asociados.

Capacidad de transferencia más elevada: Es importante destacar que tiene una mayor capacidad para transmitir gigabits por segundo a lo largo de kilómetros, lo que posibilita la conexión de millones de canales individuales de voz y datos con un solo cable.

Seguridad: Son más fáciles de instalar que los cables coaxiales o los cables de par trenzado sin blindaje. No son conductores de electricidad y no tienen relación con voltajes ni corrientes eléctricas. Incorporar que es posible utilizarlas en la proximidad de gases sin temor

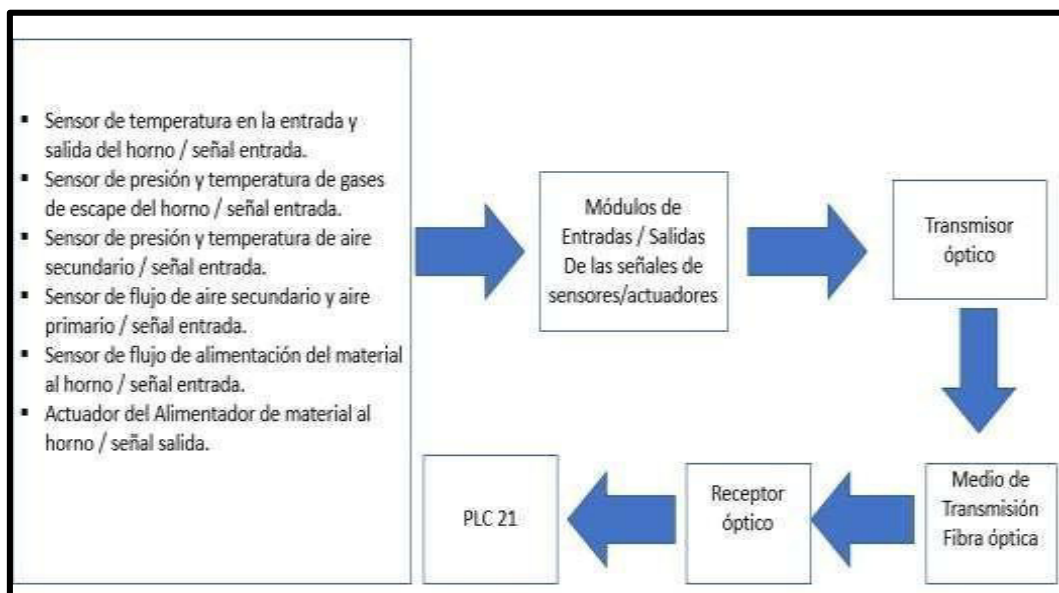
a que puedan provocar explosiones o incendios, lo cual las hace mucho más livianas que otros tipos de cables para transmitir información.

Economía: El coste de los cables coaxiales es similar al de los de fibra. Además, es importante destacar que los cables de fibra óptica tienen pérdidas más bajas, por lo cual necesitan menos equipos amplificadores. Esto se traduce en costos más bajos para la instalación y el sistema en su totalidad, además de ser más confiables.

En lo que respecta al sistema de comunicación por fibra óptica, este se divide en tres partes: la fibra óptica, el receptor y el transmisor. En la ilustración 1 se presenta un esquema simplificado (Vester Training, 2024).

Figura 1

Diagrama básico del sistema de comunicaciones de fibra óptica.



El transmisor de un sistema de fibra óptica está constituido por un conversor electro-óptico encargado de generar y modular múltiples pulsos de luz, los cuales son enviados al receptor a través del medio de transmisión (Schiffer, 2015). Dicho generador luminoso puede

ser controlado mediante una señal analógica o digital, lo que permite adaptar su funcionamiento a las características del sistema de control. Además, en la interfaz resulta indispensable incorporar un convertidor de voltaje a corriente (A/C), que actúa como enlace eléctrico entre la fuente óptica y los circuitos de entrada, habitualmente materializado en un diodo emisor de luz que transforma la señal eléctrica en señal luminosa adecuada para la transmisión (Gerónimo, 2015). El receptor tiene la responsabilidad de recibir los pulsos ópticos, por lo que incluye un aparato acoplador y un detector fotoeléctrico, el cual convierte la energía luminosa en energía eléctrica

2.2. Categorías de fibra óptica

Hay tres clases que se emplean en la actualidad. Estos se componen de vidrio, material que puede moldearse, o una mezcla de ambas cosas:

- Revestimiento y núcleo de plástico.
- Núcleo de vidrio recubierto con un polímero, al que normalmente se le conoce como fibra de sílice revestida con plástico.
- Cubrimiento de vidrio y núcleo (también se le conoce como sílice revestida con sílice).

La luz se propaga en el espacio libre a una velocidad aproximada de 300 000 000 metros por segundo; sin embargo, cuando atraviesa la frontera entre un medio y otro de mayor densidad, su velocidad disminuye y el rayo luminoso experimenta un cambio de dirección, refractándose hacia la normal en función del índice de refracción de cada material implicado (Grazzini, 2021).

La relación entre la longitud de onda, la velocidad de propagación de la luz y la frecuencia se expresa mediante la ecuación (1):

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde λ representa la longitud de onda, medida en metros; c es la velocidad de la luz en el vacío, aproximadamente $3,0 \times 10^8$ metros por segundo; y f es la frecuencia de la señal, expresada en hertz (ciclos por segundo)

El índice de refracción de los materiales permite deducir la cantidad de desviación que ocurre en el límite entre ellos, ya sea por difracción o por refracción, cuando tienen densidades distintas. En otras palabras, se trata de la correlación de la celeridad con la que un rayo de luz se propaga en una región libre a través de un material específico.

La relación correspondiente se indica en la siguiente ecuación 2:

$$n = \frac{c}{v}$$

Donde n es el índice de refracción; c representa la velocidad de la luz en el espacio libre, aproximadamente $3,0 \times 10^8$ m/s; y v es la velocidad de propagación de la luz en el material considerado, expresada igualmente en m/s.

En caso de que existan diversos medios, aclara que la manera en que un rayo luminoso se refracta y choca con el límite entre dos sustancias transmisoras con índices de refracción divergentes es lo que establece la fórmula de refracción de la luz.

La ley de Snell describe cómo se desvía un rayo de luz al pasar de un medio a otro con distinto índice de refracción y se expresa mediante la ecuación (3):

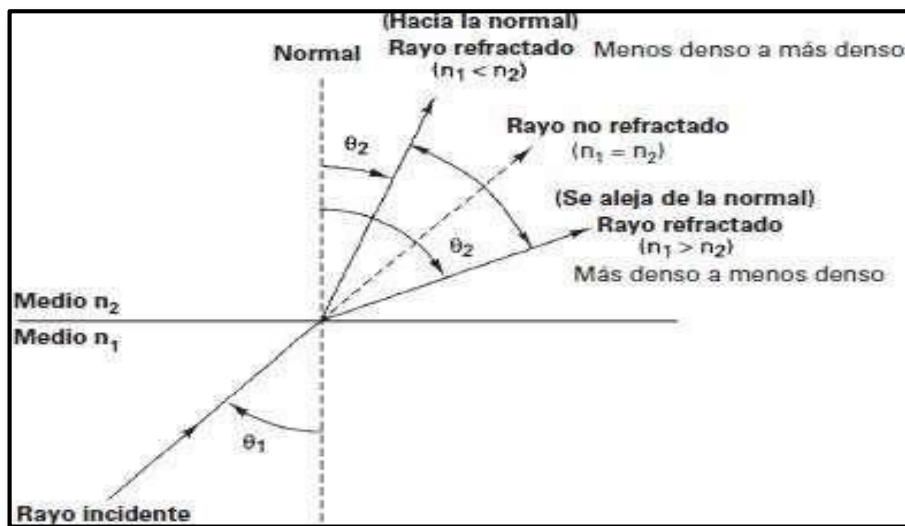
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción adimensionales de los medios 1 y 2, respectivamente, mientras que θ_1 es el ángulo de incidencia y θ_2 el ángulo de refracción, ambos medidos en grados.

La ley de la contracción se representa gráficamente en la Figura 2. En el punto de frontera, el rayo puede refractarse ya sea al acercarse o alejarse de la normal, según que n_1 sea menor o mayor que n_2 (Wayne, 2003).

Figura 2

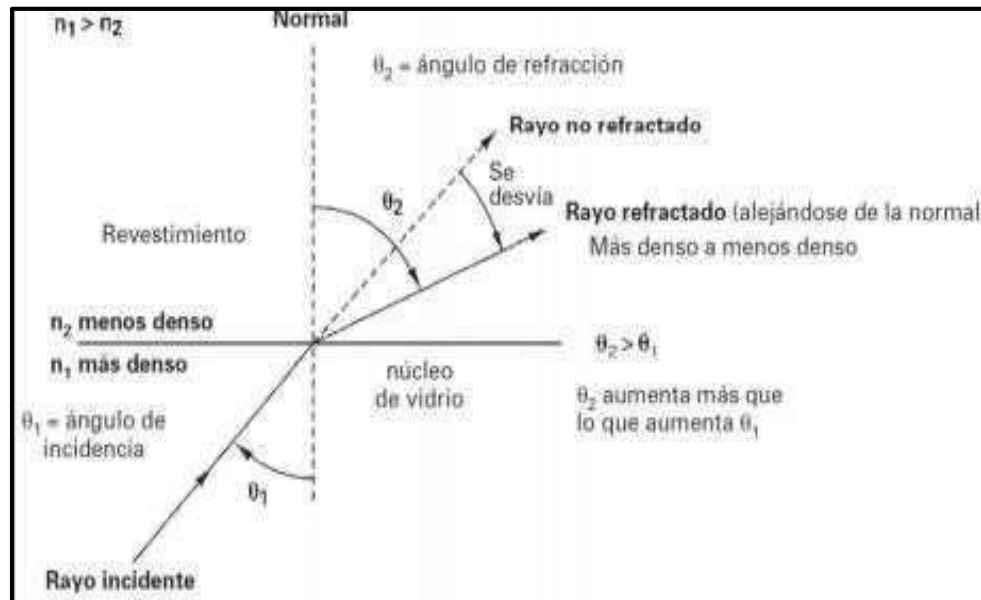
Modelo de la ley de Snell.



La Figura 3 muestra la forma en que el punto luminoso se refracta al pasar de un componente a otro con un índice de refracción distinto (Wayne, 2003).

Figura 3

Haz de luz que se refracta alejándose de la normal.



La arista crítica como es definido como el ángulo mínimo de incidencia en que un rayo de luz tiene la capacidad de atravesar el límite entre dos medios y poseer un ángulo de refracción igual o superior a 90° . Este concepto se utiliza únicamente cuando el rayo de luz va de un medio más denso a otro menos denso. Si el ángulo de refracción es igual o inferior a noventa grados, la superficie luminosa no tiene la capacidad de atravesar el elemento que tiene menos masa en comparación con su volumen. Por lo tanto, la reflexión es total en la interfaz y el ángulo de reflexión coincide con el ángulo de incidencia (Nacho, 2020).

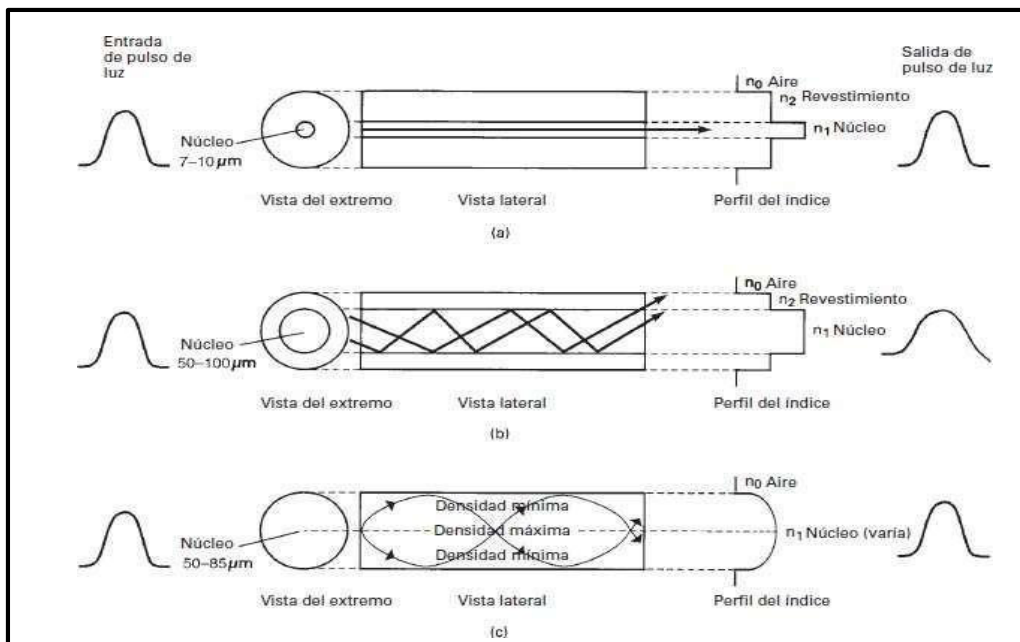
También explica que el cable de fibra óptica es una guía de onda en la que la información posibilita la prolongación de señales informativas a través de portadores lumínicos (luz), conocidos como modos de luz. Este cable está formado por dos vías transparentes con un distinto índice de refracción, un núcleo y un revestimiento que lo rodea.

Hay formas de transmisión y características del perfil del índice de la fibra. En los modos de propagación, se pueden distinguir entre el modo único o unimodal y el modo múltiple

o multimodal. La Figura 4 que sigue ilustra las clases presentes en su dispersión (Tomasi, 2003):

Figura 4

Perfiles de índice en el núcleo.



La fibra óptica se clasifica de acuerdo con la cantidad de modos en dos categorías: la fibra óptica monomodo y la fibra óptica multimodo. La primera es útil para aplicaciones de largo y regular alcance o cuando se necesita enviar información a largas distancias y con alta capacidad mediante el multiplexado denso por división en longitudes de onda (WDM, por sus siglas en inglés). También tiene una relación entre revestimiento y núcleo de 9/125 micrómetros, abreviada como (um).

La segunda clase es beneficiosa para aplicaciones de alcance corto y medio. La recomendación G.651 de la ITU-T establece que el diámetro entre el núcleo y el revestimiento debe ser de 62,5/125 um o 50/125 um.

Uno de los rasgos más relevantes de los filamentos de fibra de vidrio es la reducción de energía luminosa, también conocida como atenuación. Es la disminución de la potencia a lo largo de toda la longitud de un vínculo óptico.

La atenuación o pérdida total de potencia en un enlace de fibra óptica se calcula mediante la relación logarítmica entre la potencia de entrada y la potencia de salida del cable, tal como se muestra en la ecuación (4):

$$A(dB) = 10_{\log} \left(\frac{P_{ent}}{P_{sal}} \right)$$

Donde $A(dB)$ representa la reducción total de potencia o atenuación expresada en decibelios, P_{ent} es la potencia de entrada al cable en watts y P_{sal} es la potencia de salida del cable, también en watts; de este modo, el cociente P_{ent} / P_{sal} refleja la proporción de potencia que se pierde a lo largo del medio de transmisión.

La potencia en vatios medida a una cierta distancia de la fuente luminosa se obtiene a partir de la potencia de transmisión y de la atenuación del medio, de acuerdo con la ecuación (5):

$$P = P_t \times 10^{-\frac{A \cdot l}{10}}$$

Donde P es el valor medido de la potencia en watts, P_t es la potencia de transmisión en watts, A representa la atenuación del cable en dB/km y l es la longitud del cable en kilómetros; de este modo, el término $10^{-\frac{A \cdot l}{10}}$ expresa la fracción de potencia que se conserva tras la propagación a lo largo del enlace óptico.

La potencia de salida para diferentes valores de pérdida en decibelios se presenta a continuación (Ogata, 2010):

Tabla 1

Porcentaje de potencia de salida en función de la pérdida en dB

Pérdida (db)	Potencia de salida %
1	79
3	50
6	25
9	12.5
10	10
13	5
20	1
30	0.1
40	0.01
50	0.001

En la actualidad, hay dos tipos de fuentes ópticas moduladas que se utilizan. Un dispositivo de unión p-n, el diodo emisor de luz (LED por sus siglas en inglés), se compone de arseniuro fosfuro de galio (GaAsP) o arseniuro de aluminio-galio (AlGaAs).

El diodo láser de inyección tiene un funcionamiento similar a la fuente inicial que se mencionó. En la parte superior de la corriente de umbral, se produce una oscilación y emisión láser en un diodo láser de inyección (ILD). Cuando la corriente fluye a través de un elemento de unión p-n con polarización directa, se emite luz por medio de emisión espontánea, a una frecuencia establecida por la banda de prohibición del material semiconductor (Tomasi, 2003).

2.3. Niveles de una red industrial

El modelo Computer Integrated Manufacturing, o CIM, establece la jerarquía de las redes industriales y las divide en tres fases de la siguiente manera (Lwp, 2018):

2.3.1. Grado de gestión

Categoría superior encargada de integrar los diversos niveles en una estructura ordenada, incluyendo varias factorías. Las máquinas generalmente funcionan como estaciones de trabajo que vinculan la sección de gestión, donde se supervisan las producciones, ventas, inventarios y demás, con el proceso de producción. Se utilizan comúnmente en redes de área

local, de área amplia y que operan con los protocolos Modbus, protocolo de control de transmisión/protocolo de internet o Ethernet industrial.

2.3.2. *Grado de control*

Se hace la conexión entre las diferentes áreas laborales y las líneas de proceso para que sean supervisadas y dirigidas en los niveles más altos. Los autómatas de gamma superior y las computadoras orientadas a la programación se localizan.

2.3.3. *Nivel de proceso y campo*

Se centra en incorporar los pequeños automatismos (robots compactos, controladores proporcional integral derivativo, etc.) en subredes. Normalmente, en esta línea se utilizan buses de campo convencionales; sin embargo, hoy en día se están usando Ethernet industrial, pero con ciertas limitaciones de seguridad informática.

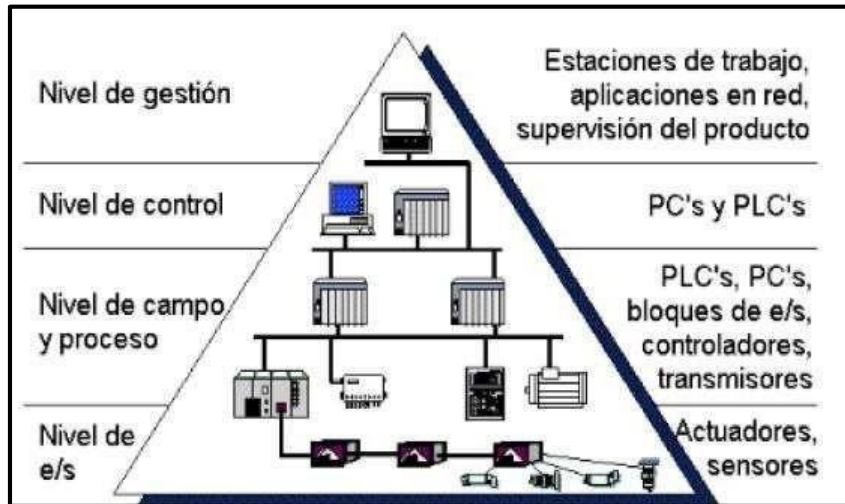
2.3.4. *Grado de sensores y actuadores*

Este nivel básico para la ejecución de cualquier proceso automatizado incluye todos los sensores, temporizadores, actuadores, contadores y cualquier otro equipo disponible para la producción. Por su naturaleza, este nivel está ubicado en el área operativa, y su control se restringe a esta zona.

En la Figura 5 se muestra los niveles de los equipos en forma jerárquica (Powell y Vandelinde, 2015):

Figura 5

Niveles de una red industrial según modelo CIM.



2.4. Topología

La topología se define como la distribución física de una red o un sistema de comunicaciones industriales. Hay dos clases. La intercomunicación y la interconexión entre los diferentes dispositivos y los equipos de control por medio de medios de transmisión se encuentran en la primera clase. La segunda clase detalla la manera en que los dispositivos acceden a los sistemas para transmitir información (Hughes, 2007).

Las topologías físicas que se emplearán en esta tesis son:

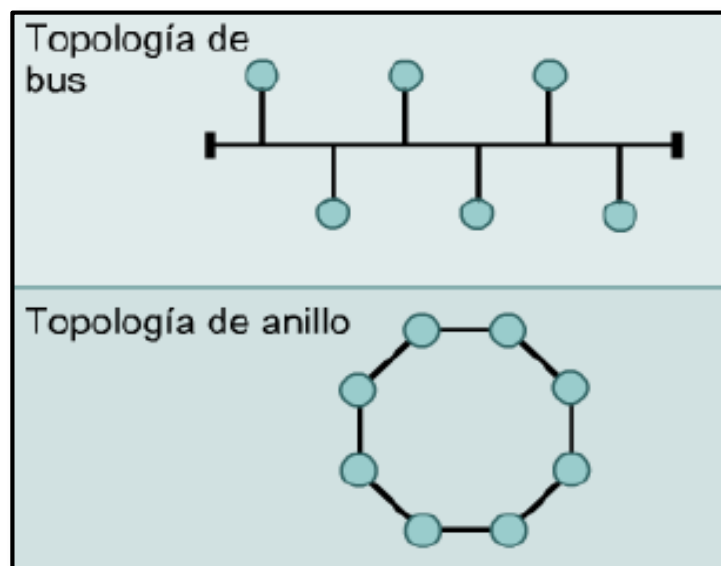
- Topología en anillo: La interconexión de la red genera un trayecto circular y con formas cerradas, que están conectadas a ella por medio de enlaces punto a punto. La información se envía en una única dirección, y el nodo principal es el encargado de manejar los conflictos evitando que los datagramas colisionen, lo cual asegura la protección contra la pérdida de conectividad.

- Topología de bus: Todos los componentes de la red que se enlazan en serie mediante un cable o troncal. En esta categoría, las tramas que incluyen datos enviados por un servidor o terminal llegan a todos los demás puntos.
- Topología en línea: Los elementos se enlazan uno seguido de otro.

La Figura 6 que se muestra a continuación ilustra gráficamente las conexiones presentes en una red industrial (Hughes, 2007).

Figura 6

Topología física de un sistema de comunicaciones.



2.5. Bus de campo

Sistema de transmisión de datos que tiene como objetivo disminuir el cableado y los enlaces entre los instrumentos de campo y las máquinas de control en la industria. En los lazos de control se utilizan señales analógicas, pero en la actualidad están siendo sustituidas por las señales digitales, que ofrecen ventajas y beneficios significativos (Bryan, Bryan, 1997).

2.6. Profinet

Para este trabajo de tesis, se emplea un protocolo de comunicación que tiene como base Profinet. La Asociación Internacional de Profibus & Profinet (PI) considera que esta tecnología con fibra óptica ofrece numerosas ventajas, pues presenta beneficios muy distintos en comparación con otros métodos de transmisión. Este estándar es una combinación lógica de Profibus DP y Ethernet industrial (Ogata, 2010).

Es importante destacar que, de acuerdo con la normativa IEC 61784-2, este estándar se configura como una extensión del Ethernet Industrial de tipo abierto, lo que permite una mayor interoperabilidad entre dispositivos y sistemas. En primer lugar, se basa en el uso del protocolo TCP/IP e incorpora normas propias de las tecnologías de la información, lo que facilita su integración con infraestructuras de red ya existentes. Además, posibilita una integración equilibrada de equipos con bus de campo, de modo que coexistan de forma armónica dispositivos heredados y tecnologías más recientes. Asimismo, está diseñado para operar en tiempo real, tanto en modo de tiempo real estándar como en tiempo real isócrono (IRT), lo que resulta crucial para aplicaciones de control exigentes. A ello se suma que se trata de una normativa abierta orientada a aplicaciones de automatización descentralizada, lo que favorece arquitecturas flexibles y escalables. Finalmente, su estructura se fundamenta en un modelo de comunicación productor–consumidor, que optimiza el intercambio de datos al organizar el flujo de información según el rol funcional de cada dispositivo dentro de la red.

Asimismo, la PI señala que hay varios estándares incluidos; sin embargo, los más destacados son:

- Entrada/salida de Profinet: Proporciona versatilidad y facilidad de configuración, al mismo tiempo que establece una tecnología de conmutación que permite a cualquier estación conectarse a la red, lo que posibilita un uso más eficiente debido a su capacidad para transmitir datos simultáneamente desde varias estaciones. El sistema Switched

Ethernet, en su modalidad de dúplex, posibilita la transmisión y recepción simultáneas a una velocidad de 100 Mbps.

En comparación con otros protocolos, hay una conservación histórica, como la de datos de entrada/salida (acceso a información periférica por medio de direcciones lógicas), registros (almacenamiento de parámetros) e integración en un sistema (notificación de eventos y buffer para diagnóstico).

- Profinet de redundancia de medios (MRP): Se emplea para optimizar la disponibilidad de los recursos y determinar los principios fundamentales para la reorganización en caso de que ocurra un fallo cuando la red cuenta con una distribución redundante.

- Profinet en tiempo real (RT): Su objetivo es la transferencia de datos con baja fluctuación y latencia.

- Profinet en tiempo isócrono (IRT): Garantiza que el traslado de la información no exceda un microsegundo.

Las tecnologías que ofrece son las que se indican a continuación:

- Ethernet rápido: Con esta tecnología, los datos se transmiten a una velocidad de 100 megabits por segundo.

- Ethernet industrial: Es un método que facilita la transmisión de mensajes resistentes a fallos en un ambiente hostil y complicado. Aparte de emplear elementos ethernet estándar.

Se señala que emplea tres clases de servicios de comunicación:

- TCP/IP estándar: Se hace referencia al uso de funciones no deterministas, como la parametrización, la transmisión de audio y video y la transferencia a sistemas tecnológicos e informáticos superiores.

- En tiempo real: Los tiempos de retardo se ubican entre 1 y 10 milisegundos, ya que hay un EtherType especial disponible.

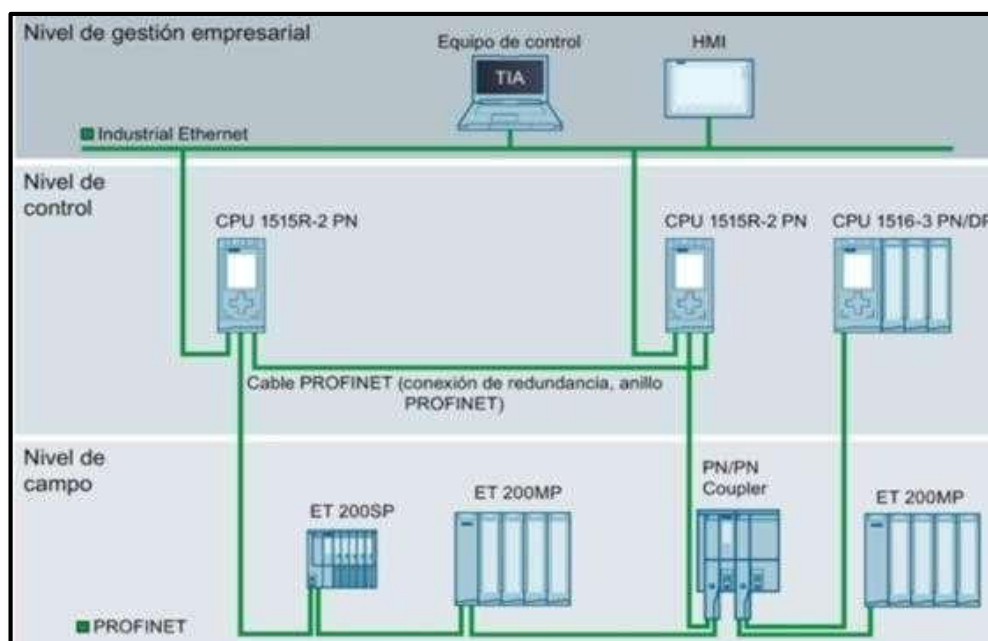
- IRT: El control del movimiento se logra gracias a la jerarquización de la señal y la conmutación programada, que ofrecen un sincronismo muy preciso.

A continuación, se explican las topologías más utilizadas (Nacho, 2020):

- Estrella: Las estaciones se conectan a un componente de distribución o a un switch. Se añade que todos los equipos están conectados a un dispositivo central de conexión.
- Línea: Las estaciones que intervienen en la comunicación se conectan sucesivamente. La arquitectura estándar de un sistema profinet se presenta a continuación:

Figura 7

Arquitectura de un sistema profinet.



2.6.1. Parámetros principales

Los parámetros más importantes para un funcionamiento eficaz del proceso de horno son los siguientes:

- Temperatura del material al entrar y salir del horno.

- Temperatura de los gases que salen del horno.
- Presión de los gases que salen del horno.
- Temperatura y presión del aire secundario.
- Flujo de aire primario y secundario.
- Proceso de alimentación del material al horno.

Por su importancia crucial, es necesario que se mantengan en una medición y evaluación constantes para conseguir un control del horno rotatorio en la línea de producción para obtener el clínker. Es por eso que es necesario señalar que se utilizarán las siguientes herramientas y que van a emitir señales.

- Sensor que mide la temperatura del material al entrar y salir del horno.
- Sensor de presión y temperatura de los gases que salen del horno.
- Sensor de temperatura y presión de aire secundario.
- Sensor de flujo de aire primario y secundario.
- Sensor de flujo que mide el aporte de material al horno.

2.6.2. Sistema de comunicaciones

El diseño del sistema de comunicaciones basado en fibra óptica con el protocolo industrial Profinet se llevó a cabo en este capítulo. Por lo tanto, se implementan métodos empíricos que posibilitan la integración de la investigación y la práctica. La recopilación de los requisitos fue el primer paso para desarrollar este apartado, pues a partir de esta información pudimos establecer su alcance.

Por otro lado, es crucial describir las particularidades técnicas que el horno rotatorio muestra en su funcionamiento, lo cual nos brindó una referencia más precisa y la capacidad de definir los parámetros principales para realizar el proceso de manera impecable.

Después de recopilar la información, prosiguió con la fase de diseño, que se divide en tres segmentos. La sección inicial incluye el plano de la planta de cemento, así como los

esquemas principales relacionados con las denominadas áreas de clinkerización en la operación de los hornos rotatorios.

La segunda parte se ocupó de las topologías empleadas para la interconexión de los módulos de entrada y salida de los transmisores, así como la conexión en cada tablero periférico descentralizado de cada sala a la que se hace referencia.

La tercera sección describió los componentes involucrados. Por esa razón, se hace mención de los medios físicos de transmisión y de los dispositivos usados en la red.

Los procesos esenciales que se llevan a cabo en una planta de producción de cemento son la trituración, dosificación y calcinación de caliza, así como la extracción de este mineral. Primero se emplean métodos de explotación en las canteras y, después de extraer la materia prima, esta es desmenuzada en una chancadora cónica. La materia prima es transportada a una chancadora secundaria mediante fajas transportadoras, las cuales se encargan de disminuir su tamaño conforme al perfil granulométrico necesario.

Posteriormente, es trasladado a la cancha de prehomogeneización. El material se acumula para recibir mineral de hierro y caliza correctiva alta, y luego ser dosificado en función del tipo de cemento que se requiera.

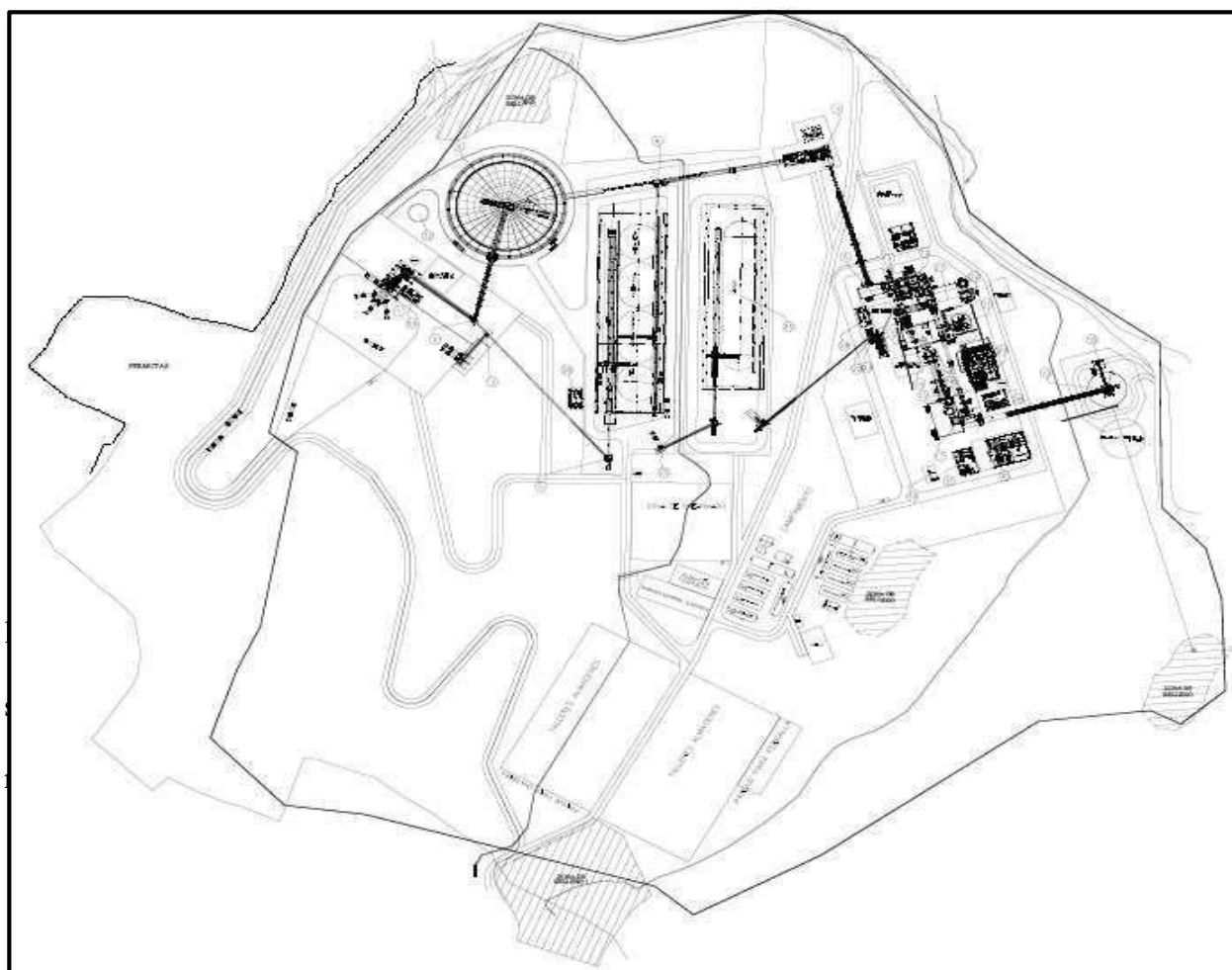
Luego se lleva a un molino de crudo, donde se pulveriza y pasa al silo de homogeneización. Luego, se calcinan en contracorriente, utilizando un intercambiador de calor para la precalcinación. La combinación precalcinada se introduce en un horno rotatorio, donde se convierte en clínker a temperaturas elevadas, y sigue con un enfriamiento veloz.

En la molienda, el producto se tritura añadiendo una porción de yeso (sulfato de calcio), lo que define el tipo de cemento. Por último, en la zona de despacho se empaca el producto en bolsas y a granel.

La figura 8 a continuación ilustra el plano de una fábrica de cemento.

Figura 8

Plano de la planta de cemento.

**Tabla 2**

Zonas del proceso de cocción del Clinker en un horno rotatorio.

Subdivisión del horno	Temperatura de material aproximadamente – Inicio	Temperatura de material aproximadamente – Final
	(°C)	(°C)
Zona segura	850	900
Transición	900	1050 – 1150
Ingreso de sinterización	1050 – 1150	1400 – 1500
Salida de sinterización	1400 – 1500	1350 – 1400
Enfriamiento	1350 – 1400	1250 – 1350

Fuente: EH. (2024)

En la Tabla 3 se muestra las características técnicas del horno rotatorio.

Tabla 3

Características técnicas del horno rotatorio.

Descripción	Representación	Cantidad	Unidad
Longitud	L	60	metros
Diámetro interior de la carcasa	D	5,25	metros
Capacidad de producción	C.P.	5500	TM/día
Velocidad angular	n	2,44	RPM
Relación L/D	L/D	11,43	-
Carga específica del volumen	CeV	5,33	tpd/m ³
Pendiente	S	3,5	%
Tiempo de retención	T	27,04	minutos
Porcentaje de llenado	% llenado	13,77	%
Velocidad periférica	Vp	0,68	m/s

Fuente: EH. (2024)

2.6.3. Selección de elementos del sistema de comunicaciones

La comparación técnica se toma en consideración para elegir cada componente que está integrado y que también permite definir las características de funcionamiento.

2.7. Sensor para la medición de la temperatura en ingreso y salida del horno

La Tabla 4 contiene un cuadro comparativo de los sensores que miden la temperatura al entrar y salir del horno rotatorio en la fábrica de cemento. Se muestra el modelo SensyTemp TSH200 de la marca ABB, así como los modelos S de las marcas Endres Hausser y New Flow.

Tabla 4

Cuadro comparativo de sensor de temperatura en ingreso y salida del horno.

	Termopar	Termocupla tipo S	Termopar tipo S
Especificaciones	Sensy TempTSH	modelo TAF16-31Q6D03PRD	New Flow
Tecnología	Termopar	Termopar	Termopar
Rango de Temperatura	0 °C a 1800 °C	0 °C a 1500 °C	-200 °C a 1700 °C
Integración de Transmisor a	Hart, Profibus PA, FF	Hart, Profibus PA (4 A 20 mA)	No tiene
Salida de sensor	(4 a 20 mA)	-	-

2.7.1. Sensor de flujo de alimentación de material al ingreso del horno

En la Tabla 5 que sigue, se presenta un cuadro comparativo de los sensores de la marca Schenck Process, MaxxFlow tipo másico y Siemens serie WF200.

Tabla 5

Cuadro comparativo de sensor de flujo de alimentación de material al ingreso del horno.

Especificaciones	Caudalímetro Sitrans WF200	Caudalímetro MaxxFlow HTC	Caudalímetro Schenck Process
Flujo volumétrico de	A granel hasta 900 t/h	A granel hasta 300 t/h	A granel hasta fluidez de 30 a 600 t/h
Montaje	En línea	En línea con brida, en tubo de medición	En línea
Señal de salida	Señal de 4-20 mA	4-20 mA, RS485	No tiene

2.7.2. Actuador para el ingreso de material en el horno

La Tabla 6 siguiente presenta una comparación de los actuadores de la marca REXA, serie Xpac 3; de la marca KINETROL, modelo 204-100; y de la marca FESTO, serie KDFP-DFPD.

Tabla 6

Cuadro comparativo de Actuador para activar el ingreso de material en el horno.

Especificaciones	REXA Xpac Serie 3	KINETROL modelo 204-100	FESTO serie KDFP-DFPD
Par de salida	282 Nm to 169,477 Nm	Par de salida de 12 760 Nm (a 7 bar)	Par de 10 a 2300 Nm
Ángulo de giro	90°, 120°, 180° o 270°	De 80° a 100°	90°
Señal de salida	4 – 20 mA HART	4 a 20 mA	No tiene

2.8. Controlador lógico programable para la gestión maestra

El controlador lógico programable utiliza diferentes módulos para realizar una variedad de funciones concretas y, de este modo, posibilitar la recepción de la información que proviene de los instrumentos y equipos instalados en la planta, así como el control de procesos mediante la activación de actuadores. La Tabla 7 comparativa a continuación presenta las especificaciones del PLC Allen Bradley modelo 5580, el PLC Siemens serie S7-400 y el PLC Schneider Electric modelo Modicon M340.

Tabla 7

Cuadro comparativo de PLC para la gestión maestra.

Especificaciones	Allen Bradley Control Logix 5580	Siemens series S7-400	Schneider Electric modelo Modicon M340
Fuente de alimentación	24 VDC	120/230 VAC o 24 VDC	24 V DC
Memoria usuario	40 MB	40 MB	4 MB
Protocolo de comunicaciones	EtherNet/IP, ControlNet, DeviceNet	Profibus, ASI, Modbus o Modbus TCP/IP	Ethernet TCP/IP/TCP Modbus, Ethernet TCP/IP

2.8.1. Pantalla interfaz hombre-máquina

A continuación, se presenta la Tabla 8, que compara la pantalla de interfaz hombre-máquina del modelo KTP 900 de Siemens, el modelo HMIDT551 de Schneider Electric y el Panel View Plus 7 Standard de Allen Bradley.

Tabla 8

Cuadro comparativo de pantalla HMI.

Especificaciones	Allen Bradley Panel View Plus 7	Siemens KTP 900	Schneider Electric HMIDT551
Tensión de alimentación	24 V DC	24 V DC	12 a 24 V DC
Potencia de consumo	50 watts máximo	5.5 watts	6.5 watts
Comunicación	Interfaz PROFINET	Interfaz ROFINET	No tiene

2.8.2. Servidores para el monitoreo y supervisión de red de campo

La tabla 9, que es comparativa, describe los servidores de la marca Siemens IPC847D, de la marca HPE ProLiant ML350 Gen 10 y de la marca IEIGRAND-BDE-30B

Tabla 9

Cuadro comparativo de servidores para monitoreo y supervisión de red de campo.

Especificaciones	Servidor HPE ProLiant ML350 Gen 10	Servidor Simatic IPC847D	Servidor marca IEI GRAND-BDE-30B
Fuente de alimentación	Redundante con ranura flexible HPE de 500 W	100 – 240 V AC	90 a 264 V AC
Protocolos de comunicación	Adaptador integrado; 4 x 1 GbE y opción de un PCIe vertical de 1 GbE, 10 GbE, 25 GbE o 100 GbE	Ethernet 2 x 10/100/1000 Mbit/s (dos RJ45); Profinet 3x; Conexiones RJ45, puerto compatible con CP 1616; PROFIBUS/MPI: 12 Mbit/s	4 x LAN (Gigabit)
Memoria	3 TB con DIMM; DDR4 de 128 GB	4 zócalos DIMM, máximo 32 GB DDR con 1600 MT/s SDRAM	DIMM slots: 4; Maximum memory: DDR4 128 GB (32 GB RDIMM x 4)

2.9. Cable de fibra óptica

A continuación, se muestra la Tabla 10, que compara los cables de fibra óptica. Esta tabla debe presentar las características que se alinean con las regulaciones internacionales establecidas por la Unidad internacional de telecomunicaciones sector estandarizado telecomunicaciones en la recomendación G.651 de la marca SIEMON, línea Light System,

código 9GD5L012G-T106M, de la marca Optronics con código OPCFOIE50X12 y de Corning con código 016TEY-13138A2G.

Tabla 10

Cuadro comparativo de cable de fibra óptica.

Especificaciones	SIEMON código Código 9GD5L012G- T106M	Corning código 016TEY-13138A2G	Optronics código OPCFOIE50X12
Número de fibras	12	16	12
Diámetro de núcleo/revestimiento	50 µm/125 µm	50 µm/125 µm	50 µm/125 µm
Atenuación máxima en 850/1300 nm	3.5/1.0 dB/km	3.0/1.0 dB/km	3.0/1.5 dB/km
Aplicaciones de instalación	Interior/exterior	Interior/exterior	Interior/exterior

2.10. Switch industrial

La tabla 11 comparativa a continuación describe los switches industriales de la marca Trendnet, el modelo Scalance XC-206 de Siemens y el modelo Contact de Phoenix.

Tabla 11

Cuadro comparativo de switch industrial.

Especificaciones	Switch Trendnet	Switch Siemens Scalance XC-206	Switch Phoenix Contact
Tensión de alimentación	12/24/48 V DC	24 V DC	18,5 a 30,2 V DC
Velocidad de transmisión	10/100/1000 Base-T para Gigabit y Fast Ethernet	100 Mbit/s (Fast Ethernet)	10/100/1000 Mbit/s
Interfaz Profinet	Sí tiene	Sí tiene	No tiene

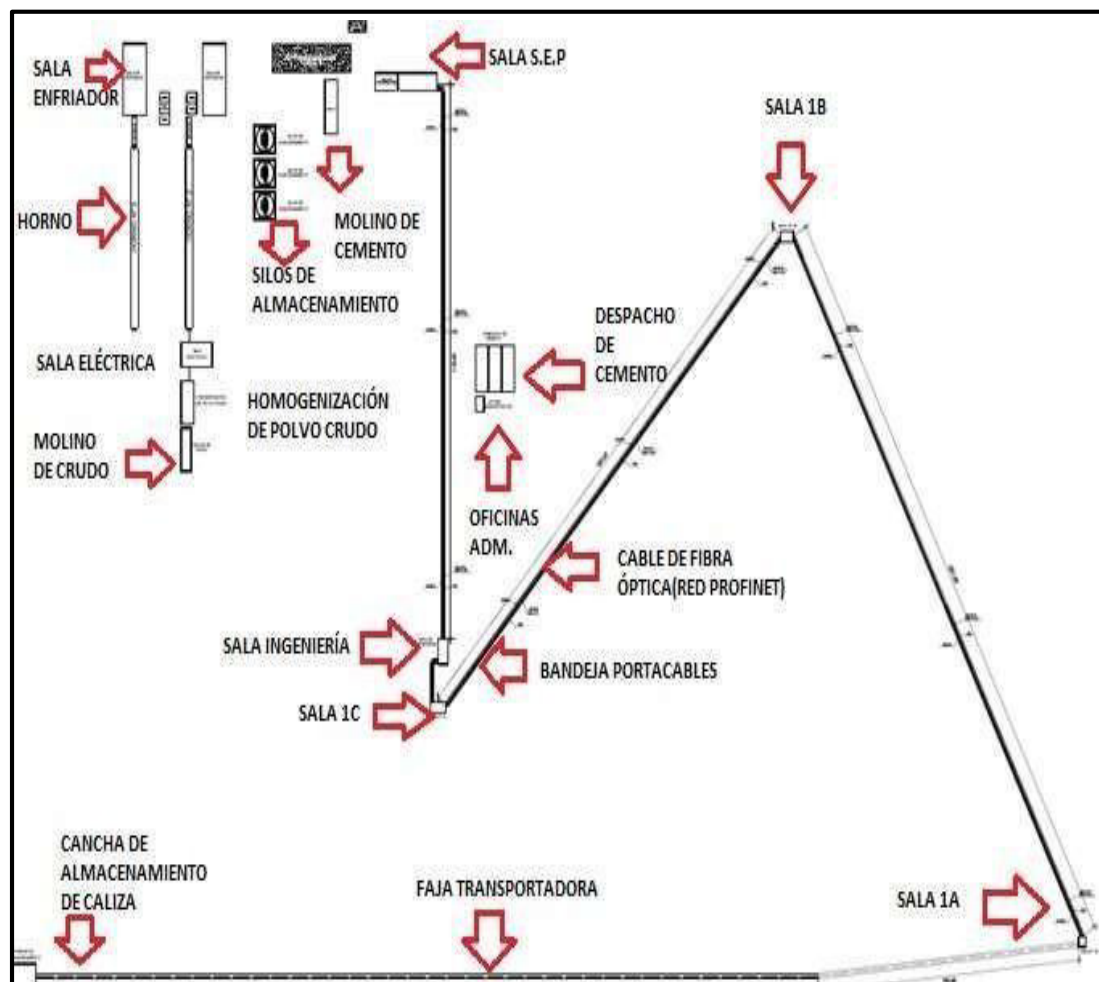
El sistema de comunicaciones por fibra óptica se extiende desde la sala 1A hasta la sala Ingeniería, pasando por las salas 1B, 1C y subestación eléctrica principal. Las bandejas

portables, que están localizadas en el interior y exterior de las distintas salas, se incorporaron a la ruta de cable.

La Figura 9 ilustra la ruta que sigue en las diferentes áreas señaladas

Figura 9

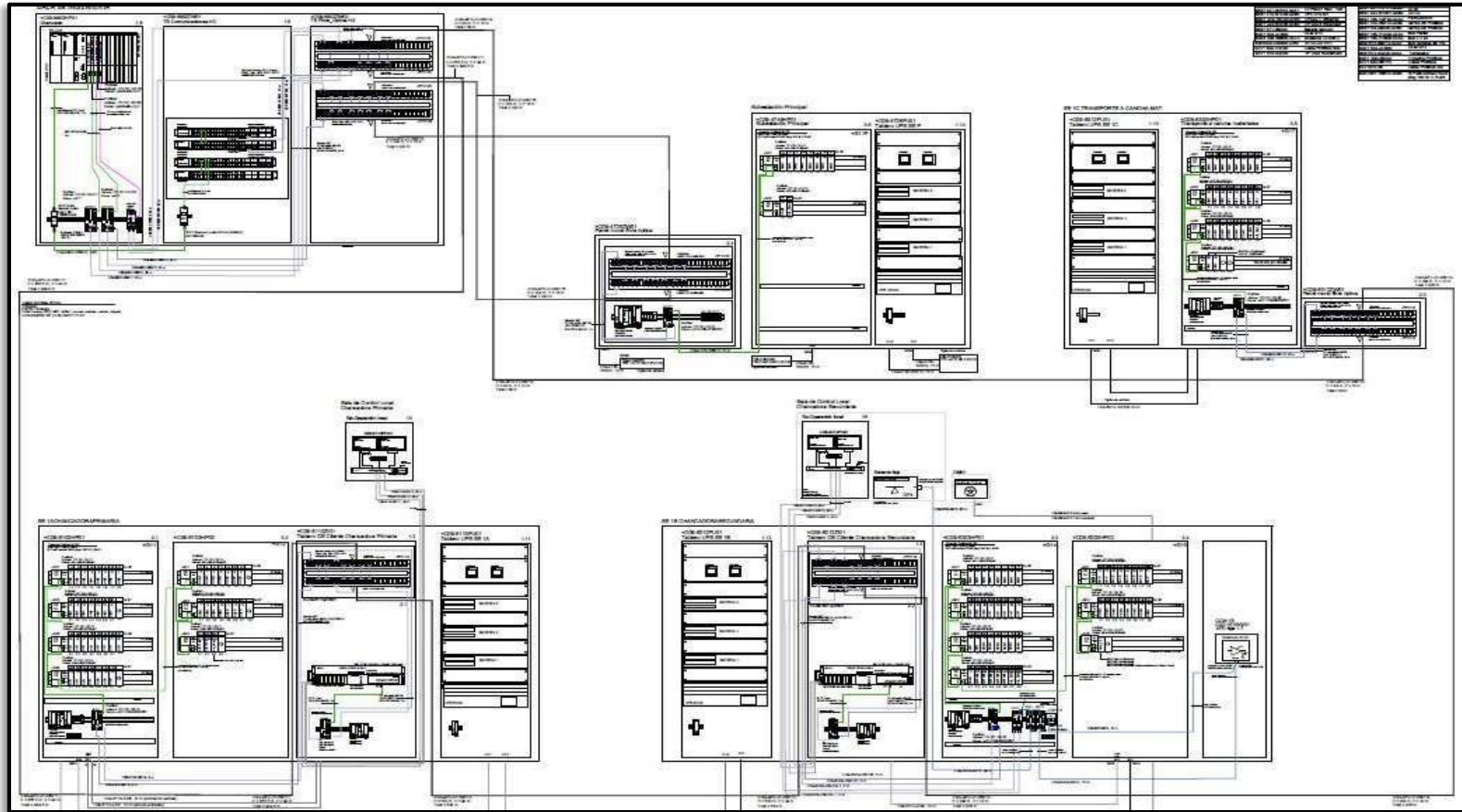
Trayectoria del sistema de comunicaciones de fibra óptica.



En la Figura 10 se puede ver el plano de interconexión del cable de fibra óptica que conecta cada patch panel (o panel de conexiones) en las salas previamente mencionadas. En la sala de Ingeniería, todas las señales que vienen de los módulos periféricos descentralizados de los tableros localizados en diferentes zonas dentro de la fábrica cementera son recibidas.

Figura 10

Plano del sistema de comunicaciones de fibra óptica.

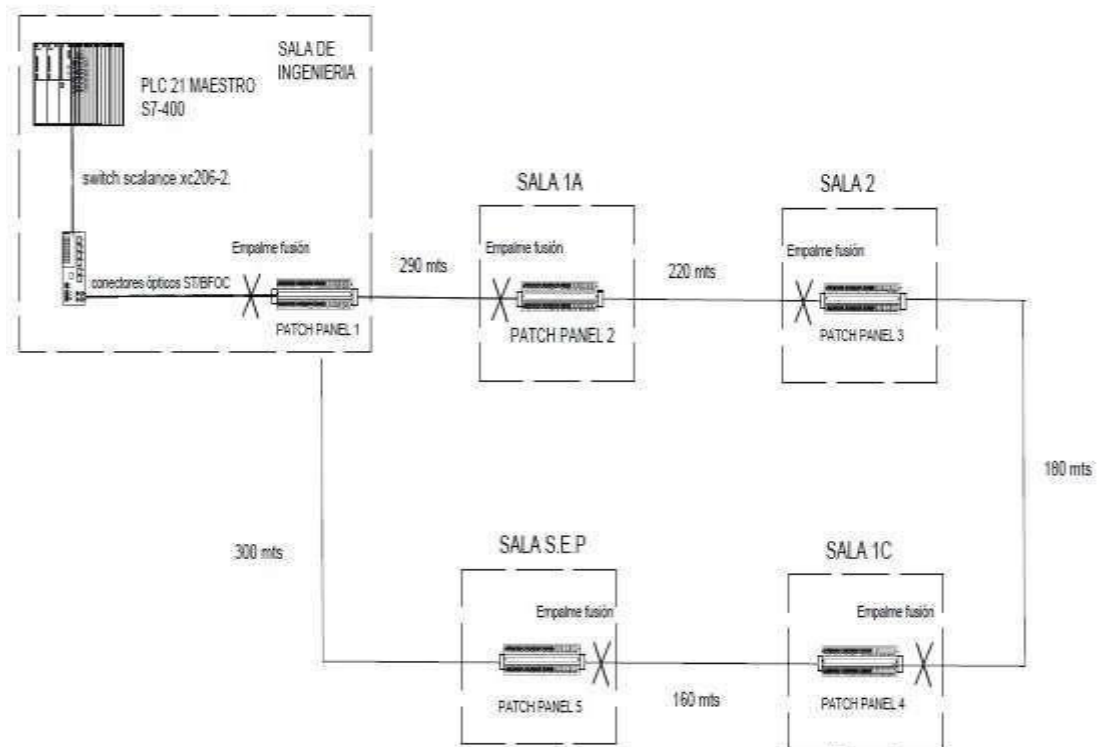


2.11. Diseño del sistema de comunicaciones

La Figura 11 ilustra la arquitectura del enlace óptico. Este comienza con las señales eléctricas del PLC 21, situadas en la Sala de Ingeniería. Estas señales son transformadas en señales ópticas por un transmisor que emite una fuente óptica LED/Class1-LASER "Eye safe". Luego, el flujo de datos se desplaza a través de la Sala 1A, sala 2, sala 1C y, finalmente, llega a la sala subestación eléctrica principal de manera redundante

Figura 11

Esquema del sistema de comunicaciones de fibra óptica.



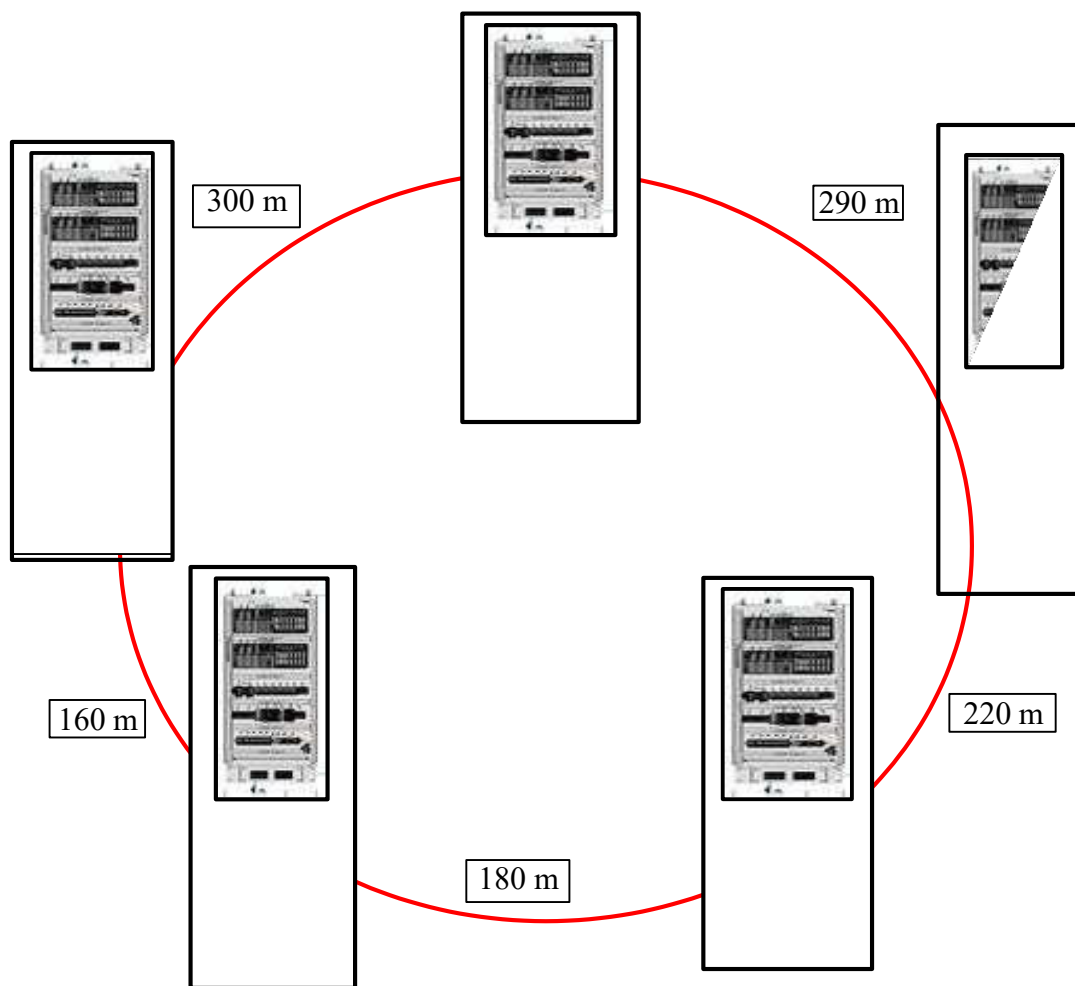
2.11.1. Topología

En esta tesis se utilizó la topología anillo para enlazar los módulos de entradas/salidas de cada tablero periférico en todas las salas con los controladores principales que se hallan en

la sala de ingeniería. La Figura 12 ilustra cómo están enlazados los tableros periféricos en un anillo. El trayecto de la fibra óptica multimodo está señalado por la línea roja.

Figura 12

Topología en anillo del sistema de comunicaciones de fibra óptica.



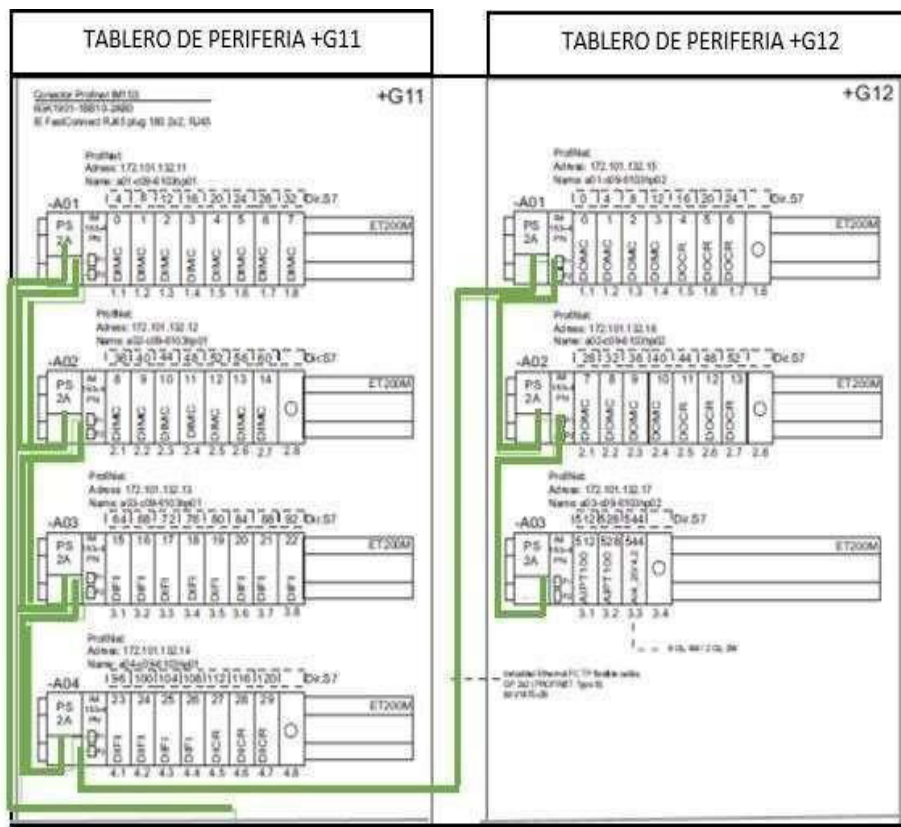
Los módulos de periferia multifuncional (ET) 200M, que están ubicados en el tablero de periferia descentralizada (TDP), reciben las señales tanto digitales como analógicas provenientes de los transmisores y las válvulas de control motorizado. En la sala de la subestación eléctrica principal (SEP) se encuentra este tablero.

Se utilizó la topología en línea para asegurar que cada módulo de E/S de cada tablero periférico esté conectado a la red Profinet; esto significa que cada módulo de entradas/salidas se conecta en línea con el módulo de E/S contiguo. La topología en línea de los módulos de E/S del tablero periférico +G11 y +G12, que están situados en la sala S.E.P., aparece en la figura 13.

La topología en línea de los módulos de E/S del tablero periférico +G11 y +G12, que están situados en la sala S.E.P., aparece en la figura 13.

Figura 13

Topología en línea de los módulos de E/S de tablero de periferia descentralizada.



Para calcular el enlace óptico, es necesario considerar las cifras de la atenuación por empalmes por fusión y de la inserción de conectores, además de las pérdidas en la bobina de

fibra óptica multimodo. En la Tabla 12 que sigue a continuación, se exponen los datos de la fibra óptica, el receptor y el emisor:

Tabla 12

Características de los componentes del sistema de comunicaciones por fibra óptica.

Componente	Parámetro	Especificación
Fibra óptica	Tipo de fibra	Multimodo (OM2), 50/125 μm
	Tipo de cable	Cable U-DQ(ZN)(SR)H 16F (1 \times 16), unitubo holgado, armado metálico, interior/exterior (Corning 16FO MPC, código 016TEY-13138A2G, serie 16FOM2CC OM2CCCT 5.0 CT5.0)
	Pérdidas por conectores	ST/BFOC: 0,25 dB
	Pérdidas por empalme de fusión	0,15 dB
	Factor de atenuación lineal	0,43 dB/km a 1300 nm
	Longitud de la bobina de cable óptico	1150 m
Transmisor óptico	Equipo	Conmutador industrial Scalance modelo XC206-2
	Tipo de fuente	LED / Class 1 LASER "eye safe"
	Potencia de salida del transmisor STP991-1	-14 dBm
Receptor óptico	Equipo	Conmutador industrial Scalance modelo XC206-2
	Sensibilidad del receptor (RX)	-32 dBm

Cabe resaltar los siguientes términos:

PENT PP1 = Potencia de entrada al Patch Panel PSAL PP1 = Potencia de salida al Patch Panel 1.

M.S = Margen de Seguridad = 2 dB. α_{lineal} = Factor de atenuación lineal = 0.43 dB/Km.

L=longitud de cable de fibra óptica.

Analizando tramo desde el transmisor óptico hasta el receptor óptico según los datos proporcionados por el fabricante:

PENT PP1 = PTX - PFUSION – PCONECTOR= -14 dBm - 0.15 dB - 0.25 dB = -

14.40 dBm.

PSAL PP1= PENT PP1 - PCONECTOR= -14.40 dBm – 0.15 dB = -14.55 dBm. PENT PP2 = PSAL PP1 – $\alpha_{\text{lineal}} \times L$ - PFUSION – PCONECTOR = -14.55 dBm (0.43 dB/Km x 0.29Km) - 0.15 dB - 0.25 dB = -15.0747 dBm.

P SAL PP2= PENT PP2 – PCONECTOR= -15.0747 dBm - 0.25 dB = -15.3247 dBm.

PENT PP3= P SAL PP2 – $\alpha_{\text{lineal}} \times L$ - PFUSION – PCONECTOR = -15.3247 dBm – (0.43 dB/Kmx 0.22Km) - 0.15 dB - 0.25 dB = - 15.8193 dBm.

P SAL PP3= PENT PP3 – PCONECTOR= - 15.8193 dBm - 0.25 dB = -16.0693 dBm.

PENT PP4 = P SAL PP3 – $\alpha_{\text{lineal}} \times L$ - PFUSION – PCONECTOR = -16.0693 dBm – (0.43 dB/Kmx 0.18Km) - 0.15 dB - 0.25 dB = -16.5467 dBm

P SAL PP4= PENT PP4 – PCONECTOR = -16.5467 dBm -0.25 dB = -16.7967 dBm.

PENT PP5 = P SAL PP4 – $\alpha_{\text{lineal}} \times L$ - PFUSION – PCONECTOR = -16.7967 dBm - (0.43 dB/Km x 0.16Km) - 0.15 dB - 0.25 dB = -17.2655 dBm.

P SAL PP5= PENT PP5 – PCONECTOR = -17.2655 dBm - -0.25 dB = -17.5155 dBm.

PRX= P SAL PP5 – $\alpha_{\text{lineal}} \times L$ - PFUSION – PCONECTOR – M.S = -17.5155 dBm – (0.43dB/Km x 0.3Km) - 0.15 dB - 0.25 dB - 2 dB = -20.0445 dBm.

De acuerdo con los cálculos de potencia, la potencia del receptor es de -20.0445 dBm y su sensibilidad es de -32 dBm, por lo que si se puede garantizar la conexión entre el transmisor óptico y el receptor óptico.

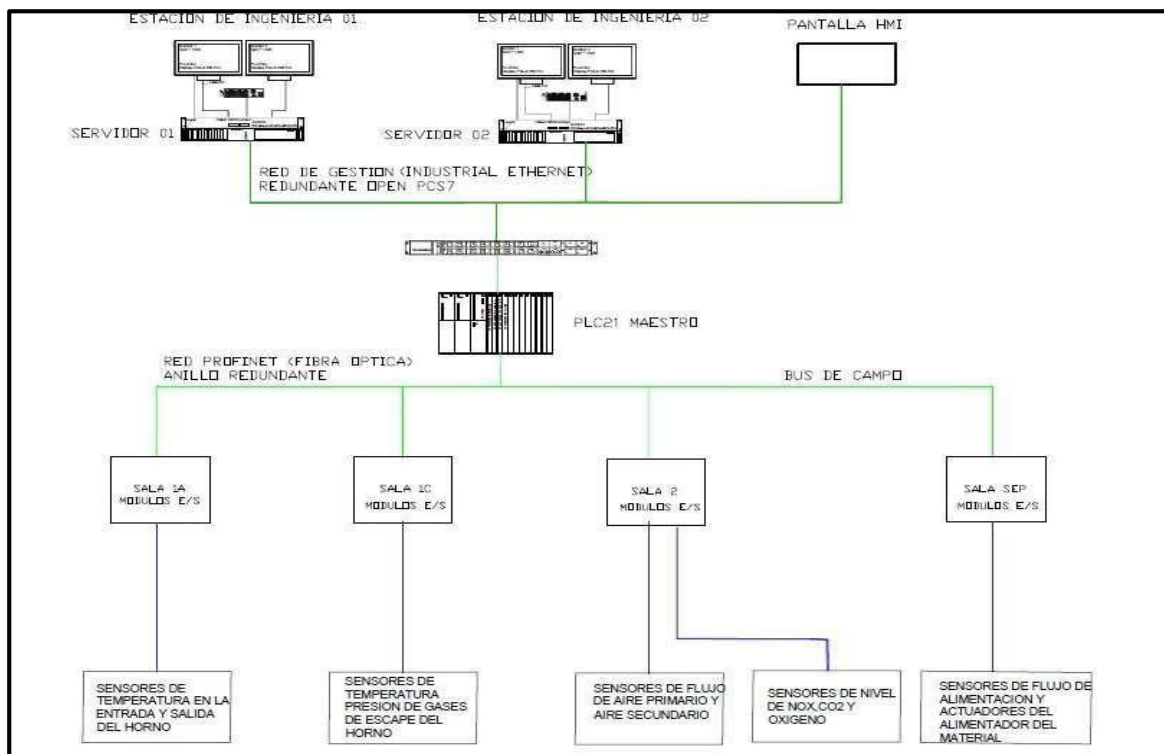
Es importante destacar que la red de gestión emplea Ethernet industrial en el bus del sistema para transmitir información entre los servidores y los controladores, además de utilizar la pantalla interfaz hombre máquina SIEMENS modelo KTP 900. Asimismo, la red de administración está compuesta por 2 estaciones de ingeniería y 2 servidores. La marca SIEMENS, sistema PCS7 V9.0 SP2 + CEMAT V9.0 SP2, es la que soporta esta red.

CEMAT, la automatización de instalaciones cementeras, cuenta con un portafolio integral para integrarse en procesos de la industria del cemento. Ofrece una configuración sobresaliente, tanto a nivel de hardware como de software. También incluye instrumentos para objetos de control, como válvulas, ventiladores y bombas.

La red de gestión del sistema de comunicaciones se presenta en la figura 14 a continuación:

Figura 14

Red de Gestión del sistema de comunicaciones de fibra óptica.



Elementos que conforman el diseño del sistema de comunicaciones

Se consideran todos los aparatos requeridos, incluso si se expande y acepta nuevos elementos, existe la posibilidad de que interactúe con otras tecnologías.

La termocupla tipo S de la marca Endress Hauser modelo TAF16-31Q6D03PRD no solo mide la temperatura cuando el horno entra y sale, sino que también verifica la temperatura de los gases que salen del horno.

La termocupla tipo S se presenta en la figura 15 (EH, 2024):

Figura 15

Termocupla tipo S de la marca Endress Hauser.



Detalles técnicos de la termocupla tipo S:

- Temperatura de funcionamiento Tipo S: desde 0 °C hasta 1500 °C (de 32 °F a 2.552 °F)
- Presión estática máxima a 20 °C: 1 bar (15 psi)
- Precisión: clase 2 de acuerdo con la IEC 60584, que corresponde a la Comisión Electrotécnica Internacional.
- Punta recta.
- Integración del transmisor de cabezal (HART, PROFIBUS PA, 4 a 20 mA)

El MaxxFlo, un caudalímetro de tipo másico que utiliza tecnología electromagnética, es capaz de medir el flujo volumétrico en línea en la entrada del horno rotativo. Es necesario llevar a cabo los ajustes requeridos para que su funcionamiento sea el mejor posible. La Figura 16 que se presenta a continuación muestra el caudalímetro (SXS Medioambiente, 2021).

Figura 16

Caudalímetro másico MaxxFlo HTC.



2.11.2. Características técnicas del caudalímetro másico

- La presión máxima del proceso es de 10 bar.
- Flujo volumétrico de material a granel que alcanza las 300 toneladas por hora.
- Señal de 4-20 mA, RS485, con salida analógica y salida de pulsos.
- Tecnología: masiva.
- Temperatura máxima: 120 grados Celsius.
- Ensamblaje en línea, con brida, dentro del tubo de medición.
- Material de acero inoxidable, que cuenta con recubrimiento de cerámica.
- Clase de protección: Resistente a la corrosión, ATEX, IP65.
- Tiene la posibilidad de ser instalado en un ángulo.

El actuador electroneumático Kinetrol 204-100 convierte la señal de salida que recibe del controlador en energía de aire comprimido, lo que le permite llevar a cabo una labor mecánica. Esto permitirá regular el flujo de harina cruda que entra al horno rotatorio. El actuador electroneumático de la marca Kinetrol se presenta en la Figura 17 (Indonetwork, 2025):

Figura 17

Actuador electroneumático marca Kinetrol.



2.11.3. Especificaciones técnicas del actuador electroneumático

- Posee un par de salida de 12760 Nm (a siete bar).
- Ángulo de giro de 80° a 100°.
- Volumen desplazado: 33,350 cm³.
- Posicionador neumático AP (3 a 15 psi).
- Posicionador electroneumático EL (de 4 a 20 mA).
- Muelle de retorno, para funcionar como un efecto simple.

El modelo PCA400, fabricado por la marca Bacharach, es un analizador portátil de emisiones y combustiones que tiene la capacidad de medir el gas natural, el oxígeno, el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno.

La concentración de oxígeno en los gases de escape varía entre el 0.7 % y el 2.5 %. Es importante destacar que, de acuerdo con el decreto supremo N° 001-2020-MINAM (Ministerio del Ambiente), la concentración de óxidos de nitrógeno debe ser inferior al límite máximo permitido de 1400 mg/m³. La siguiente figura, la número 18, presenta el sensor de nivel de oxígeno (Patagonia Tools, 2025).

Figura 18

Actuador electroneumático marca Kinetrol.



2.11.4. Características técnicas del sensor de oxígeno

- Intervalo de medición del volumen de oxígeno en los gases de escape: 0 % a 29 %.
- Intervalo de medida de hidruro de cobalto compensado: 0 a 10,000 ppm.
- El valor de medida del monóxido de carbono (alta escala) es entre 0 y 40,000 ppm.

- El rango de medición para el óxido nítrico es de 0 a 3,000 ppm.
- Intervalo de medición del dióxido de nitrógeno: 0 a 500 ppm.
- El rango de medición del dióxido de azufre es de 0 a 5000 ppm.

El sensor de flujo de aire tiene como entrada el aire primario, que es el aire naturalmente presente en el horno rotatorio. El aire secundario proviene del sistema de enfriamiento de clínker y realiza la medición con el caudalímetro térmico másico. El caudalímetro másico térmico FMT400-VTS, de la marca ABB, se presenta en la siguiente figura 19 (ABB, 2017).

Figura 19

Caudalímetro térmico másico.



2.11.5. Características técnicas del sensor de flujo de aire

- Intervalo de medición de caudal: 0 a 120 Nm³/h.
- Temperatura de operación: -25 a 300 °C.
- Presión de servicio: 40 bar (580 psi, o 4 x 10⁶ Pa).
- Señal analógica de salida que va de 4 a 20 mA.
- Tensión de alimentación: 24 V CC ± 25 %; 24 V CA ± 25 %.
- Frecuencia: Entre 48 y 62 Hz.

- Consumo de energía: menor a 15 vatios.
- La corriente consumida es menor a 600 mA.
- Modo de protección NEMA 4X / IP 65.

Los medios de transmisión guiados que se emplean son la fibra óptica y el cable de par trenzado. El cable UTP es un canal compuesto por cuatro pares de hilos que se emplea en diferentes clases de redes. Aunque este tipo de cable es el más empleado, tiene solamente el efecto de cancelación que generan los pares trenzados de hilos para restringir la degradación de la señal.

La fibra óptica multimodo resulta beneficiosa para aplicaciones de alcance corto y medio, o cuando se necesita una capacidad de transmisión mediana o alta. Las relaciones entre el núcleo y el revestimiento son 50/125 μm y 62.5/125 μm .

La fibra óptica multimodo 016TEY-13138A2G fue empleada en este trabajo de tesis debido a que es apropiada para ser utilizada en sistemas de comunicaciones a distancias medias y se usará para conectar los diversos tableros de clientes mediante la topología anillo. La Figura 20 muestra un cable Corning de 16 hilos de fibra óptica, tanto interiores como exteriores, con armado metálico unitubo holgado U-DQ(ZN)(SR)H 16F (1X16) OM2CC CT 5.0 (Politel, 2021):

Figura 20

Caudalímetro térmico másico.



La distancia que alcanza este enlace es de 30 metros. Para su implementación, se empleó el cable Simatic NET FO Standard de 50/125 μm con conectores 2x2 ST/BFOC, identificado con el código 6XV1873-3AN30. Este tramo de fibra óptica tiene como finalidad interconectar los switches de los tableros de periferia descentralizada (TDP) con los patch panels, a fin de conducir las señales ópticas hacia los controladores maestro PLC. En la Figura 21 se muestra el núcleo del patch de fibra óptica utilizado en esta interconexión (Galaxus, 2025):

Figura 21

Patch core fibra óptica Simatic NET FO standard de 50/125 μm .



Se incorporó el uso de cable industrial ethernet (IE), que es de conexión rápida y par trenzado flexible, GP 2 x 2 (PROFINET Type B), con blindaje Cat 5, cuyo código es 6XV1870-2B. Alcanza una distancia de 20 metros. El cable IE flexible (PROFINET Type B) se presenta en la siguiente figura 22 (Acomee, 2024):

Figura 22

Cable IE FC TP flexible, GP 2 x 2 (PROFINET Type B).



Controlador lógico programable (PLC) S7-400. Este equipo automático programable, de gama alta y media, se distingue por su función principal de supervisar las señales que vienen de los diversos sensores y actuadores en el sistema de comunicaciones del horno rotatorio. Es apropiado y escogido para este proyecto de tesis. Asimismo, permite la integración de estos módulos:

- Suministro de energía para el enganche Simatic S7-400 con una red a 120/230 voltios o 24 voltios de corriente continua.
- Unidad fundamental para las unidades de procesamiento central, encargada de manejar señales de entrada digitales y analógicas, así como para transmitir señales de salida que activan actuadores.
- Componentes de señal para entradas/salidas, ya sean digitales o analógicas.
- Componentes de comunicación (CP 443) para unirse al bus de red Profinet.
- El módulo de función (FM) está diseñado únicamente para realizar tareas muy exigentes. Por este motivo, se debe tener en cuenta en situaciones como el posicionamiento veloz en lazos de control abierto o cerrado.
- Se adapta muy bien a ambientes de minería, industria, fábricas de cemento, etc.

- Su alta compatibilidad y su capacidad para soportar temperaturas de hasta 60°C.
- 5 interfaces: dos para PN, una para DP y dos para sincronizar módulos.

La figura 23 que aparece a continuación ilustra el controlador lógico programable S7-400, específicamente el módulo central CPU 410-5H (Proma Industrial, 2023).

Figura 23

PLC S7 -400, CPU 410-5H.



El switch industrial fue incluido; se trata de un aparato que está orientado a la conexión y cambia dinámicamente entre sus puertos para establecer conexiones. Asimismo, muestra las especificaciones técnicas siguientes del transceptor para la comunicación óptica:

- Para la conexión óptica, se usa el sistema de conexión straight tip/bayonet fiber optic connector (abreviado ST/BFOC).
- Proceso de transmisión 100 Base-FX conforme al IEEE 802.3
- Transmisión rápida (Fast Ethernet) a una velocidad de 100 Mbits/s.
- Emisor de luz LED/Class1-LASER "seguro para los ojos"
- Longitud de onda de 1300 nanómetros.

- Longitudes máximas de cable: 3 km para un núcleo de fibra con diámetro de 50 μm y también 3 km para uno con diámetro de 62,5 μm .
- Salida de un transmisor óptico: Mínima (-23 dBm con 50 μm y -19 dBm con 62,5 μm) y máxima: -14 dBm.
- Entrada del receptor: La potencia máxima de entrada es de -3 dBm y la sensibilidad mínima es de -32 dBm.

La figura 24 siguiente ilustra el conmutador industrial de la marca Siemens Scalance, modelo xc206-2, con código 6GK5 206-2BB00-2AC2 (Redcoind, 2024).

Figura 24

Switch industrial scalance XC-206.



Se utilizó un switch gestionable de Industrial Ethernet para gestionar y organizar todas las señales de datos provenientes de los controladores maestro. Este tipo de switch tiene más puertos para conectores registrados (RJ45), así como para conectores punta cuadrado (SC), conector pequeño (LC) y punta recta (ST/BFOC).

La figura 25 que sigue ilustra un switch de la marca Siemens, modelo XR324-4M EEC (Control engineering, 2010).

Figura 25

Switch scalance XR324-4M EEC.



2.11.6. Características técnicas del interruptor Scalance XR324-4M EEC

- Suministro de energía: 2x 24 VDC.
- Corriente de consumo: 1.6 A.
- 16 puertos RJ45 para conexiones eléctricas de 10/100/1000 Mbit/s.
- Conexión para la consola del operador: 1
- Conexión para indicar el contacto: 1
- Enlace para el módulo de medios 4
- Conexión RJ11 para la consola del operador.
- Diagnóstico y configuración de Profinet IO.
- Puertos dedicados para VLAN.
- Temperatura de funcionamiento: entre -40 y 70 °C.

El servidor Simatic IPC847D de la marca Siemens, con código 6ES7660-6HW71-3FD6, fue agregado. Este es un servidor rackeable de 19" de alto rendimiento que cuenta con un sistema matriz redundante de discos independientes (RAID). Su hardware se basa en una tarjeta adaptadora RAID para la interconexión de componentes periféricos (PCI) y en una

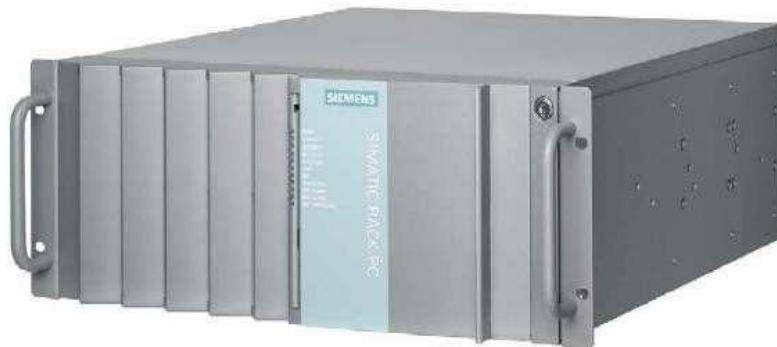
interfaz SAS para discos duros de almacenamiento adjunta al servidor. Es importante destacar que la red de gestión hizo posible la integración de la red de campo y la gestión de todas las señales que proceden de los distintos módulos de entradas/salidas desde las estaciones de Ingeniería. Como principales características (Andrea, 2014):

- PROFIBUS/MPI: 12 Mbits/s, aislado, compatible con el procesador de comunicaciones abreviado (CP) 5622, opcional.
- PROFINET: 10/100 megabits por segundo (CP 1616 en la placa), tres RJ45; opcional.
- Ethernet $2 \times 10/100/1000$ Mbits/s (con dos RJ45).
- Tiene soporte para Wake on LAN, Remote Boot y teaming.
- USB $2 \times$ frontales, cuatro traseras y uno interno (de alta corriente)
- Puerto serie de comunicaciones 1 (COM1) y puerto paralelo o serie de comunicaciones 2 (COM2); opcionales.
- Puerto paralelo opcional para la impresión, abreviado como LPT.
- Monitor: 1 interfaz digital visual (DVI-I), para la interfaz visual una señal solamente digital (DVI-D) o matriz de arreglo de videos (VGA) por medio de un adaptador, 2 puertos display tipo T y 2 puertos display tipo DVI-D/VGA con tarjeta gráfica dual head (opcional).
 - Paralelo LPT, opcional.
 - Teclado PS/2 Ratón con conector PS/2
 - Micrófono de audio, salida por línea / auriculares.
 - Fuente de alimentación: 100-240 V CA, con un alcance largo; puenteo en caso de caídas breves de tensión. 20 ms a 0,85 de voltaje nominal

El servidor SIMATIC IPC847D de la marca Siemens se presenta en la siguiente figura 26 (Siemens, 2014).

Figura 26

Servidor Simatic IPC847D.



El extensor de computadora de la marca G&D dvi visión cat mc2 aru2 cpu modelo A1110169 está compuesto por un módulo transmisor y uno receptor, que posibilitan el funcionamiento de una computadora desde una consola local o remota. Cabe mencionar que este dispositivo transmite señales a una distancia máxima de 10.000 metros utilizando cable UTP o cable de fibra óptica. Los dispositivos utilizan video DVI y existen en versiones que presentan uno, dos o cuatro canales de video. El dispositivo dvi visión cat mc2aru2 cpu se presenta en la Figura 27 (Directindustry, 2025).

Figura 27

DVI Visión CAT MC2 ARU2 CPU.



2.11.7. Especificaciones técnicas de DVI Visión CAT MC2 ARU2 CPU

- Teclado y ratón (PS/2 y USB)
- Interfaz visual digital de conexión única con un ancho de banda que oscila entre 25 y 165 MP/s.
- Hasta 1920 x 1200 a una frecuencia de 60 Hertz.
- Audio estéreo, bidireccional y analógico.
- Compatible con el protocolo RS232.
- Opcional: puerto USB 2.0 (con una velocidad máxima de 16 Mbit/s) o puerto USB 2.0 (con una velocidad máxima de 480 Mbit/s)

El modelo KTP 900 de Siemens, con el código 6AV2123-2JB03-0AX0, es una pantalla interfaz hombre-máquina que ofrece la posibilidad de monitorear y ver en tiempo real el funcionamiento del proceso del horno rotativo, así como las señales de los sensores y actuadores a distancia. La próxima Figura 28 ilustra la pantalla HMI (DidacTechnick, 2014).

Figura 28

Pantalla HMI KTP 900.



Detalles técnicos de la pantalla HMI KTP 900:

- Clase de tensión de la alimentación: corriente directa y 24 voltios.
- Valor nominal de la corriente de consumo: 230 mA.
- Potencia eléctrica consumida: 5,5 W.
- Interfaz PROFINET.
- Es configurable desde WinCC Basic V1/Step7 Basic V13.

2.12. Análisis de costos generales

A continuación, se muestra el costo de los equipos y materiales requeridos para diseñar el sistema de comunicaciones.

Tabla 13

Costos de equipos.

Nº	Descripción	Código/Modelo	Cantidad	Precio total
1	PLC simatic PCS7, S7- 400, módulo 5H-410	6GK5324-4GG00-2JR2	1	S/.35,025.00
2	Módulo procesador comunicaciones Profinet Simatic S7- 400, CP 443-1. 2x 10/100 Mbits/s (IE Switch); puertos RJ45; ISO; TCP; UDP; PROFINETIO Controller comunicación S7	6GK7443-1EX30-0XE0	1	S/.8,283.00
3	Módulo simatic PCS 7, PS 407 10A R XTR S7-400 power supply Wide range, 120/230V UC, 5 V DC/10 A	6ES7407-0KR02-0AA1	1	S/.4,534.00
4	Switch modelo XR324- 4M EEC	6GK5324-4GG00-2JR2	1	S/.104,955.00
5	Switch industrial scalance XC-206	6GK5 206-2BB00-2AC2	5	S/.8,750.00
6	SIMATIC IPC847D (Rack PC, 19", 4 módulos de altura)	6ES7660-6GW71-3BD6	2	S/.76,207.80
7	Módulo extensor KVM DVI-VISION-CAT-MC2-ARU2-CPU de la marca G& D	A1210175/ A1220205	6	S/.5,604.20
8	Pantalla HMI marca Siemens modelo KTP900	6AV2123-2JB03-0AX0	3	S/.14,778.00
9	Sensor RTD Tipo S marca Endress +Hausser	TAF1 6-31Q6D03 PRD	12	S/.9,168.00
8	Caudalímetro másico marca MaxxFlow	HTC	4	S/12,041.60

Nº	Descripción	Código/Modelo	Cantidad	Precio total
9	Actuador electroneumático marca KINETROL	204-100	3	S/12,033.00
10	Analizador portátil de combustiones y emisiones de la marca Bacharach	PCA400	3	S/20,654.80
11	Caudalímetro másico térmico marca ABB	FMT400-VTS	2	S/.6,174.72
12	Cable IE FC TP Flexible cable GP 4x2, par trenzado Cat6A	6XV1870-2E	10	S/3,219.00
13	Industrial Ethernet FC TP, cable 2x2(PROFINET Type B), order 20 m	6XV1870-2B	12	S/3,066.00
14	FO Standard cable 50/125 um, conectorizado con 2x2 conectores ST/BFOC, 30 m de largo	6XV1873-3AN30	9	S/.6,866.00
15	FO Standard cable 50/125 um, conectorizado con 2x2 conectores ST/BFOC, 20 m de largo	6XV1873-3AN20	18	S/.10,954.44
16	FO Standard cable 50/125 um, conectorizado con 2x2 conectores ST/BFOC, 5 m de largo	6XV1873-3AH50	12	S/. 4,786.56
17	FO Standard cable 50/125 um, conectorizado con 2x2 conectores ST/BFOC, 3 m de largo	6XV1873-3AH30	17	S/. 4,157.00
18	Industrial Ethernet TP Cord RJ45/RJ45, TP cord Pre-assembled with 2 RJ45 connector, length 0,5 m	6XV1850-2GE50	15	S/. 727.65
19	Industrial Ethernet TP Cord RJ45/RJ45, TP cord Pre-assembled with 2 RJ45 connector, length 2 m	6XV1850-2GH20	20	S/. 1,547.94
20	Industrial Ethernet TP Cord RJ45/RJ45, TP cord 2 RJ45 connector, length 6 m	6XV1850-2GH60	9	S/. 693.00
21	SITOP PSE200U 10 A selectivity module 4- channel input:24 V DC/40 A output:24 V DC/4 x 10 A. Level Adjustable 3-10 A	6EP1961-2BA21	10	S/. 2,299.00
22	Cable Corning 16FO, MPC, Int. /Ext., armado metálico, unitubo, holgada UDQ(ZN)(SR)H 16F (1X16) OM2CC CT 5.0. Cada carrete de bobina contiene 1000 mts.	016TEY-13138A2G	2	S/.679,140.00
Total				S/.972,692.10

Tabla 14*Cuadro CAPEX.*

Descripción	Cantidad	Precio	Precio Total
Diseño del sistema de comunicaciones de fibra óptica.	1	S/.35,000.00	S/.35,000.00
Instalación y configuración de Instrumentos (sensores TAF16 y actuadores KINETROL).	1	S/.20,000.00	S/.20,000.00
Canalizado x metro cuadrado.	500	S/40.00	S/.20,000.00
Tendido de fibra óptica Corning (x metro)	1150	S/.50.00	S/.57,500.00
Montaje de patchs panel en cada Sala	4	S/.200.00	S/.800.00
Empalme de la fibra óptica Corning en los patchs panel	5	S/.500.00	S/.2,500.00
Instalación y configuración de equipos (switches scalance XC-206, PLC's S7-400 y servidores IPC847D)	1	S/.55,000.00	S/.55,000.00
Costos de equipamiento (detalle en la Tabla N° 13)	1	S/.972,692.10	S/.972,692.10
Total			S/.1'163,492.10

Se tiene en cuenta el costo por servicio de instalación de forma representativa, dado que es un caso de estudio de investigación. Asimismo, no se toma en cuenta el costo del servicio de instalación de licencias en las estaciones de trabajo y en la estación de ingeniería.

La Tabla 15 se presenta a continuación y describe los costos de operación (OPEX) y los costos de mantenimiento, que son aquellos asociados con la supervisión, el funcionamiento y la administración del sistema de comunicaciones basado en fibra óptica. Por lo general, se asigna un porcentaje de entre el 5 y el 9 % del costo total por equipos para calcular este valor.

Tabla 15*Cuadro OPEX.*

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Pago de personal para el Mantenimiento (cada 12 meses)	4	S/ 3,000.00	S/ 12,000.00
Costos de Mantenimiento Preventivo (cada 12 meses)	1	S/ 5,000.00	S/ 5,000.00
Costos por consumo de energía (cada 12 meses)	1	S/ 4,000.00	S/ 4,000.00
Repuestos requeridos para el sistema de comunicaciones (estimación cada 12 meses)	1	S/ 10,000.00	S/ 10,000.00
Costos Administrativos y Logística (cada 12 meses)	3	S/ 3,000.000	S / 9,000.00
Total			S/ 45,000.00

En las estaciones de trabajo y la estación de ingeniería no se toma en cuenta el costo por servicio de renovación del licenciamiento.

III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

Se trata de una investigación aplicada que utilizó un diseño experimental cuasi experimental, con un enfoque cuantitativo. La investigación es de tipo aplicado, pues su objetivo es encontrar una solución a un problema concreto (Hernández et al., 2014). La investigación activa o aplicada tiene como propósito poner a prueba la teoría contra la realidad (Tamayo, 2001).

El enfoque cuantitativo se fundamenta en el uso de un conjunto de datos con el propósito de corroborar teorías mediante el análisis estadístico de las observaciones (Hernández et al., 2014). El diseño es la estrategia empleada para tratar un problema expuesto en un estudio particular (Palella y Martins, 2006). En esta investigación en concreto, se ha utilizado una metodología experimental que ha permitido la manipulación de las variables

El método de investigación se define como el procedimiento o camino que toma el investigador para transformar su actividad en una práctica científica (Rodríguez y Pérez, 2017), y este es el método hipotético-deductivo utilizado en la investigación actual

3.2. Ámbito temporal y espacial

En el ámbito temporal, la presente tesis contó con la asesoría externa de un ingeniero supervisor de una empresa líder en el procesamiento y comercialización de cemento a nivel nacional, acompañando el desarrollo del estudio durante el periodo comprendido entre noviembre de 2024 y octubre de 2025. En cuanto al ámbito espacial, la investigación se circunscribe al diseño del sistema de comunicaciones por fibra óptica para un proceso específico de la planta cementera, de modo que los demás procesos productivos o de apoyo quedan fuera del alcance del estudio.

Por otro lado, en el plano teórico, se presentan restricciones vinculadas al análisis de información, debido a las limitaciones de acceso a ciertas bibliografías especializadas,

afiliaciones a páginas y bases de datos, así como a determinadas fuentes documentales y fichas técnicas de sistemas y dispositivos de comunicaciones utilizados en la industria del cemento. Estas restricciones condicionan la amplitud de la revisión teórica y obligan a trabajar con el conjunto de información disponible.

3.3. Variables

En cuanto a las variables consideradas en la investigación, se definió como variable independiente el sistema de comunicaciones por fibra óptica destinado a la supervisión de un horno en una planta cementera, entendido como el conjunto de elementos de hardware, software y medios de transmisión que permiten la adquisición y el envío de datos del proceso. A partir de esta variable se derivan las variables dependientes, vinculadas directamente con los productos técnicos que se esperan obtener. Así, por un lado, se plantea la elaboración de un diagrama de red acompañado de la explicación de la topología de las comunicaciones por fibra óptica empleadas para supervisar el horno en la fábrica de cemento; y, por otro, la creación y validación de un enlace óptico que materialice dichas comunicaciones, permitiendo evaluar su funcionamiento y su pertinencia para el proceso de supervisión planteado. De esta manera, las variables dependientes expresan el grado de logro en el diseño y concreción del sistema de comunicaciones propuesto.

3.4. Población y muestra

La población se define como el conjunto total de elementos que se analizan en relación con un problema de investigación (Hernández et al., 2014). En este estudio, la población estuvo conformada por el personal directamente vinculado con las operaciones de producción de una fábrica de cemento durante el período enero–octubre de 2025. En particular, se delimitó el análisis al Área de Producción, en la cual se identificó un total de 60 trabajadores que participan de manera directa en las actividades operativas y en la supervisión del proceso. Sobre este conjunto de trabajadores se orienta la propuesta de mejora del sistema de comunicaciones, con

el propósito de incrementar la eficiencia y optimizar el proceso productivo en dicho entorno.

En cuanto a la muestra, se concibe como una parte de la población que se selecciona y de la cual se obtiene la información necesaria para llevar a cabo el estudio, realizando sobre ella la observación y medición de las variables de interés (Bernal, 2010). En función de ello, se seleccionó una muestra no probabilística por conveniencia integrada por 20 trabajadores del Área de Producción, considerados durante los seis primeros meses del año 2025. Esta muestra permitirá aplicar un pretest y un postest orientados a evaluar la eficacia de la intervención propuesta en el sistema de comunicaciones por fibra óptica, de modo que los resultados contribuyan al cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación.

3.5. Instrumentos

En cuanto a la recopilación de datos para este estudio, se hizo uso de un cuestionario, que es una herramienta conocida, aplicando la técnica de encuesta. En este caso la encuesta se define como el método para recopilar datos en términos generales por medio de un instrumento que contiene un conjunto de preguntas organizadas de manera apropiada, enfocadas en una perspectiva cuantitativa, cuyos resultados se procesarán a través de tácticas estadísticas (Tamayo, 2015). Por lo tanto, para realizar esta investigación, se aplicó una encuesta con el meta de reunir datos acerca de la variable dependiente: Proceso de producción, al por medio del cual se adquirieron datos privados de la muestra elegida.

Asimismo, la encuesta está compuesta por una serie de preguntas preparadas que están vinculadas con los hechos o fenómenos relevantes en la investigación, las cuales serán respondidas por la población o su muestra (Martínez, 2012).

3.6. Procedimientos

Consiste en el método como la serie de pasos que el investigador lleva a cabo para convertir su trabajo en un ejercicio científico (Rodríguez y Pérez, 2017). Los resultados fueron procesados y analizados con la ayuda de las herramientas informáticas SPSS (versión 26) y

Excel, utilizando métodos estadísticos descriptivos e inferenciales.

3.7. Análisis de datos

Con un cuestionario que medirá el servicio de atención al cliente, se creará un instrumento para evaluar la variable dependiente. El coeficiente alfa de Cronbach se utilizará para evaluar la confiabilidad del instrumento. Además, se realizará un análisis de normalidad para identificar el enfoque adecuado para evaluar las hipótesis. Por último, se realizará la evaluación de los hallazgos para reconocer posibles correlaciones entre las variables investigadas.

3.8. Consideraciones éticas

En el proceso de investigación, se cumplió de manera estricta con las instrucciones y guías establecidas para la realización del estudio de diseño cuantitativo. Además, se garantizará que los derechos de autor sean respetados en todas las discusiones y explicaciones realizadas, cumpliendo estrictamente con las pautas definidas por la Asociación Americana de Psicología (APA).

Se garantizará la veracidad y confiabilidad de los datos obtenidos de todos los participantes en el estudio, que serán debidamente notificados de que la investigación se realizó exclusivamente para contribuir al ámbito académico y que su colaboración será manejada con confidencialidad y anonimato.

IV. RESULTADOS

Tabla 16

Estadísticas de confiabilidad totales

	Alfa de Cronbach
Pre test grupo experimental	0,951
Post test grupo experimental	0,969

Tabla 17

Estadísticas de confiabilidad con Alfa de Cronbach por dimensión.

Dimensión	Pretest	Post-test
Fiabilidad	0.821	0.812
Sensibilidad	0.820	0.924
Seguridad	0.816	0.937
Empatía	0.805	0.906
Elementos tangibles	0.806	0.916

Tabla 18

Prueba de normalidad.

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Pretest	,100	150	,001	,957	150	,000
Pre_fiabilidad	,120	150	,000	,959	150	,000
Pre_sensibilidad	,139	150	,000	,952	150	,000
Pre_seguridad	,082	150	,016	,973	150	,004
Pre_empatia	,086	150	,009	,980	150	,030
Pre_elem_tangibles	,120	150	,000	,966	150	,001
Postest	,102	150	,001	,953	150	,000
Pos_fiabilidad	,070	150	,073	,976	150	,010
Pos_sensibilidad	,154	150	,000	,942	150	,000
Pos_seguridad	,121	150	,000	,946	150	,000
Pos_empatia	,091	150	,004	,971	150	,003
Pos_elem_tangibles	,137	150	,000	,938	150	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Dado que la muestra tiene más de 50 elementos, se aplica el test de Kolmogorov-Smirnov y se opta por emplear pruebas no paramétricas.

4.1. Estadística descriptiva

Los resultados estadísticos adquiridos en el pretest y el posttest se presentan a continuación.

Tabla 19

Resultados totales pretest.

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Totalmente en desacuerdo	460	13.9	13.9	13.9
En desacuerdo	1305	39.5	39.5	53.5
Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	1268	38.4	38.4	91.9
De acuerdo	217	6.6	6.6	98.5
Totalmente de acuerdo	50	1.5	1.5	100.0
Total	3300	100.0	100.0	

Tabla 20

Resultados totales post-test.

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Totalmente en desacuerdo	144	4.4	4.4	4.4
En desacuerdo	1094	33.2	33.2	37.5
Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	1213	36.8	36.8	74.3
De acuerdo	552	16.7	16.7	91.0
Totalmente de acuerdo	297	9.0	9.0	100.0
Total	3300	100.0	100.0	

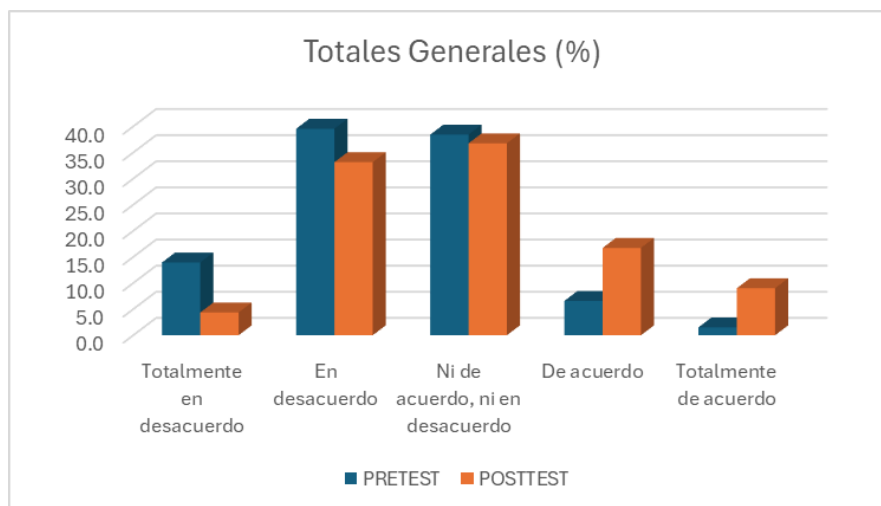
Tabla 21

Diferencia de medias entre pretest y post-test

	Pretest	Post-test	Diferencia	(%)
Media	53.28	64.43	11.15	0.21
N	150	150	150.00	150
Desv. Desviación	13.315	17.167	3.85	0.29

Figura 29

Comparación entre pretest y postest totales.



De acuerdo con los resultados, el 39.5% de las personas consultadas se oponen, el 38.4% no está de acuerdo ni en desacuerdo y el 13.9% expresa un desacuerdo total en el pretest. En cambio, en el post test, un 36.8% dice estar de acuerdo y un 9.0% expresa estar completamente de acuerdo en general con el grupo de personas encuestadas mediante el instrumento, mientras que un 16.7% se manifiesta neutral.

Tabla 22

Resultados de la dimensión fiabilidad del pretest.

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Totalmente en desacuerdo	106	3.2	14.1	14.1
En desacuerdo	273	8.3	36.4	50.5
Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	303	9.2	40.4	90.9
De acuerdo	61	1.8	8.1	99.1
Totalmente de acuerdo	7	0.2	0.9	100.0
Total	750	22.7	100.0	

Tabla 23*Resultados de la dimensión fiabilidad del postest.*

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Totalmente en desacuerdo	21	0.6	2.8	2.8
En desacuerdo	191	5.8	25.5	28.3
Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	320	9.7	42.7	70.9
De acuerdo	139	4.2	18.5	89.5
Totalmente de acuerdo	79	2.4	10.5	100.0
Total	750	22.7	100.0	

Tabla 24*Diferencia de medias para la dimensión fiabilidad*

	Pre_fiabilidad	Pos_fiabilidad	Diferencia	(%)
Media	12.27	15.43	3.16	0.26
N	150	150	150.00	150
Desv. Desviación	3.305	3.713	0.41	0.12

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para hacer frente a la demanda de productos innovadores y cumplir con los plazos de entrega más breves, las empresas deben ofrecer respuestas rápidas en sus ofertas. Esto les permite marcar una clara diferencia con respecto a sus competidores debido al ritmo acelerado del mercado. De esta manera, la distribución del producto es uno de los vínculos entre el marketing y la logística, lo cual permite que las empresas se diferencien en el servicio de entrega. En este marco, las estrategias y la optimización del suministro que se incluyen en estas disciplinas llevan a que el cliente esté satisfecho. Así, además de una distribución adecuada, los negocios se sitúan mejor frente a la competencia. Esto hace que sea más fácil proporcionar satisfacción al cliente a través de la calidad del servicio (Mohedano et al., 2023).

Álvarez y Cacao (2018), en su investigación acerca de la calidad del servicio de internet fijo en Guayaquil, muestran que los usuarios de distintas operadoras consideran que el servicio es deficiente, pero deciden seguir o cambiarse a las empresas con las que están suscritos porque valoran más otros "beneficios" que reciben de ellas, como un precio acorde con su presupuesto.

Este aspecto es atractivo para la mayoría de las familias en Ecuador y piensan con atención antes de decidir cambiar de compañía, a pesar de que el servicio es deficiente. Esta percepción concuerda con los resultados que se alcanzan en relación a la calidad del servicio brindado con las nuevas instalaciones, un aspecto que los clientes aprecian, en comparación con las dificultades creadas por la competencia y la calidad del servicio.

En su estudio, Ortiz (2018) nos dice que se buscó el conocimiento acerca de la fibra óptica y el grado de satisfacción del cliente en la Urbanización Manzanares, Huacho - 2018. En este trabajo, logró hallazgos importantes sobre la satisfacción del consumidor en todas sus dimensiones. De manera similar, la investigación realizada muestra un resultado positivo al implementar una red FTTH con tecnología GPON para optimizar la calidad del servicio de ancho de banda internet en un distrito limeño peruano en 2023.

Guadalupe (2022), en su investigación, indica que el uso del modelo de evaluación de la calidad fundamentado en el cuestionario SERVQUAL, para determinar la calidad de los servicios ofrecidos por RIONET S.A., una empresa situada en Riobamba-Ecuador, permitió conseguir información más allá de lo superficial. Esto se debe a que este modelo se ajusta a cualquier organización, permitiendo así la comprensión de las expectativas de los consumidores. Los aspectos tangibles, la fiabilidad, la seguridad, la capacidad de respuesta y la empatía fueron los más importantes para el análisis, ya que fueron las dimensiones de calidad del servicio que se identificaron donde se determinó que los empleados de la empresa Rionet no ofrecen un servicio de calidad, estableciendo la falta de compromiso, cortesía, voluntad y otros atributos esenciales para ofrecer una atención adecuada a los clientes que emplean sus servicios. Esto también se evidenció en el pretest encuestado en esta investigación actual.

VI. CONCLUSIONES

- Como parte del desarrollo del trabajo de tesis, se diseñó el sistema de comunicaciones de fibra óptica en el capítulo III. Esto posibilitó la creación de un esquema de red y la descripción de una topología para controlar un horno rotativo en una planta cementera.
- Se consiguió detallar el diseño de un sistema de comunicaciones por fibra óptica que incluye un enlace óptico. Señalar que la fibra óptica es el componente principal de su enlace óptico y que en la sección 3.3 se indica cómo las señales son transmitidas desde los módulos E/S hasta las estaciones de Ingeniería.
- El análisis de coste-beneficio revela que es un proyecto que resulta rentable y utiliza una tecnología avanzada relacionada con redes industriales, la cual se implementa para optimizar el rendimiento, el control y la eficiencia en subprocesos de hornos rotativos dentro del sector cementero.

VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que, para la implementación y ejecución del diseño del sistema de comunicaciones de fibra óptica en ambientes mineros e industriales, se tome en cuenta el estándar Profinet, debido a que este tiene la aprobación de numerosas organizaciones internacionales de la industria y ofrece múltiples beneficios.
- Se aconseja definir correctamente los parámetros de medición para optimizar el control del proceso de un horno rotativo, lo que permitirá elegir todos los equipos y dispositivos que participan en la elaboración del sistema de comunicaciones por fibra óptica.
- Para lograr un diseño adecuado de un sistema de comunicación por fibra óptica, se aconseja comprobar que los equipos y medios de transmisión cumplan estrictamente con las especificaciones técnicas.

VIII. REFERENCIAS

- ABB. (2017). *ABB Thermischer Masse-Durchflussmesser Sensyflow FMT400-VTS, FMT400-VTCS*. ABB Automation Products GmbH.
https://library.e.abb.com/public/2d571870fc2e4fbd86dbe2b496d6ff98/CI_FMT400_VTS_VTCS_X1_B.pdf
- Acomee. (2024). *Industrial Ethernet FC TP cable estándar*.
<https://www.acomee.com.mx/articulo.php?search=6XV1878-5BH20&id=SIEMENS&pro=6XV1878-5BH20>
- Andrea, E. (2014). *Tecnología metalúrgica*. Open Course Ware, UC - Universidad de Cantabria. <https://ocw.unican.es/course/view.php?id=261>
- Aula 21. (2025). *Redes de comunicación industrial: todo lo que debes saber*. Aula 21 Centro de formación técnica para la industria. <https://www.cursosaula21.com/que-son-las-redes-de-comunicacion-industrial/>
- Ávila, O. (2021). *Desarrollo e implementación de redes industriales utilizando el protocolo Modbus para la transferencia de datos de control de un VFD entre dos PLCs* [Tesis de pregrado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio institucional. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/eb352623-269a-4bd8-8a51-4a85103ffa2f>
- Beltrán, E. (2020). *Diseño del sistema de comunicaciones que incluye el estándar IEEE C37.94 entre las subestaciones eléctricas San Gabán y Azángaro, 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio institucional. <https://repositorio.urp.edu.pe/entities/publication/608b0643-81e4-49e8-ae06-097d0f450770>
- Bryan, L., y Bryan, E. (1997). *Programmable Controllers: Theory and Implementation*. Industrial Text Company.

- Campozano, H., y Pincay, D. (2021). *Estudio de factibilidad de una red de fibra óptica para el mejoramiento de comunicación de la Unidad Educativa Alejo Lascano* [Tesis de pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/3042>
- Control Engineering. (2010, 9 de junio). *Conmutador Ethernet industrial*. WTWH Media. <https://www.controleng.com/siemens-scalance-xr-324-managed-industrial-ethernet-switch/>
- Cuellar, E. (2019). *Diseño de una red de fibra óptica para mejorar la comunicación de datos en las Instituciones públicas y población del distrito de Quichuas, Tayacaja, Huancavelica-2018* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unh.edu.pe/items/d5dde57f-9a5a-4b42-a549-5efc45809dbf>
- DidacTechnick. (2014). *Panel HMI Siemens KTP900 Basic PN*. <https://didactechnick.com/producto/panel-9-hmi-siemens-ktp900-basic-pn-6av2123-2jb03-0ax0/>
- Directindustry. (2025). *Prolongador KVM DVI-Vision*. Guntermann & Drunck. <https://www.directindustry.es/prod/guntermann-drunck/product-37428-2413145.html>
- EH. (2024). *Sensor de temperatura*. Endress & Hauser Group Services AG. <https://www.lasc.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-temperatura/termorresistencia-pt100?t.tabId=product-overview>
- Galaxus. (2025). *Siemens Profibus*. <https://www.galaxus.fr/en/s1/product/siemens-profibus-cat6-80-m-network-cables-33452323>
- Hughes, T. (2007). *Measurement and Control Basic* (5ta ed.). Edición Kindle. <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/35233/1/8.pdf>

- Indonetwork. (2025). *KINETROL Pneumatic Actuator*. Kantor Pusat Indonetwork. <https://www.indonetwork.co.id/product/KINETROL-Pneumatic-Actuator-6657324>
- ISA 5.1. (2022). *Símbolos e identificación de instrumentación e identificación*. International Society of Automation. <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-santa-cecilia/engenharia-mecanica/isa-51-2022-standard-for-instrumentation-symbols-identification/134454185>
- Lwp. (2018, 19 de julio). *Capítulo I - El modelo CIM y jerarquía de redes de comunicación en la industria*. La Web del Programador, S.L. <https://www.lawebdelprogramador.com/pdf/30cfacd17d243205795a8713889669ce/25545/descargar.php>
- Nacho. (2020, 2 de junio). *PLC Redundantes Siemens S7-1500R/H*. Iberian Process Solutions. <https://www.iberianps.com/siemens-s7-1500r-h-plc-redundante/>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5ta ed.). Pearson Education.
- Patagonia Tools. (2025). *Analizador Portátil Combustión Emisiones Bacharach Pca 400*. Patagonia Tools. <https://patagoniatools.com.ar/productos/refinerias-oil-gas/detectores-de-gas/analizador-portatil-combustion-emisiones-bacharach-pca-400/>
- Poltel. (2021). *Cable de fibra óptica exterior-interior, universal, tubo central, blindado con cinta de acero*. POLTEL Telecom. <https://www.poltel.com.pl/u-dq-zn-sr-h-8g-1x8-g50-mmf-clearcurve-r-om3-ct-3-0-kabel-swiatlowodowy-zewnetrzno-wewnetrny-universalny-centralna-tuba-zbrojony-tasma-stalowa,id17720.html>
- Powell, J., y Vandelinde, H. (2015). *Catching the Process Fieldbus: An Introduction to PROFIBUS and PROFINET* (2da ed.). Siemens Milltronics Process Instruments Inc.
- Proma Industrial. (2023). *PLC*. <http://promaindustrial.com/new-plc/>

- Ramírez, G. (2021). *Aplicaciones de fibra óptica en la industria minero energética* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/items/1dc8181a-be39-46db-878d-68ab951d863b>
- Redcoind. (2024). *Switch ethernet industrial*. <https://redcoind.pe/producto/6gk5206-2bb00-2ac2-scalance-x206-2-switch-ethernet-industrial-capac-02-6-puertos-rj45-2-puertos-stbfoc-1-puerto-de-consola-led-de-diagnostico-ip20-redundante-24vdc/>
- Schiffer, V. (2015). Common Industrial Protocol (CIP™) and the Family of CIP Networks. En R. Zurawski (Ed.), *Industrial Communication Technology Handbook*. CRC Press.
- Siemens. (2014, 24 de febrero). *Rack PC SIMATIC*. Siemens AG. <https://support.industry.siemens.com/cs/document/87563779/liberaci%C3%B3n-para-el-suministro-del-rack-pc-simatic-ipc847d?dti=0&lc=es-PE>
- SXS Medioambiente. (2021). *Medidor de caudal en sólidos MAXXFLOW HTC*. <https://sxsmedioambiente.com/producto/medidor-de-caudal-en-solidos/>
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Educación.
- Vester Training. (2024). *Puntos clave en las redes industriales Modbus*. <https://vestertraining.com/redes-industriales-modbus/>

IX. ANEXOS

Anexo A: Matriz de Consistencia:

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	VARIABLES
¿Cómo realizar el control de un horno en una planta cementera empleando la tecnología de la fibra óptica?	Diseñar un sistema de comunicaciones de fibra óptica para el control de un horno de una planta cementera	Sistema de comunicaciones con fibra óptica en un horno de planta cementera
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
¿Cómo se va elaborar el diseño de un sistema de comunicaciones de fibra óptica para el control de un horno de una planta cementera?	Desarrollar un esquema de red y describir la topología del sistema de comunicaciones de fibra óptica que permita el control de un horno rotativo de una planta cementera.	Desarrollo de un esquema de red y descripción de la topología en las comunicaciones de fibra óptica para el control de un horno en una planta cementera.
¿Cómo el diseño de un sistema de Comunicaciones de fibra óptica podrá brindar confiabilidad en el control de un horno de una planta cementera?	Desarrollar un enlace óptico en el detalle del diseño de un sistema de comunicaciones de fibra óptica y también describir el cálculo del enlace óptico que permita brindar confiabilidad en el control de un horno de una planta cementera.	Desarrollo de un enlace óptico en el detalle en las comunicaciones de fibra óptica para el control de un horno en una planta cementera.

Anexo B: Cable de fibra multimodo Cable Corning 016TEY-13138A2G

Central Tube Steel Armor Indoor/Outdoor Cable

16F G50 MMF ClearCurve® OM2 CT 5.0

CORNING

Corning MPC (multipurpose cable) central tube cables with corrugated steel armoring are flame-retardant, indoor/outdoor cables designed for interbuilding and intrabuilding backbones in duct, direct burial and riser applications.

The central tube cable construction, by isolating the fibers from installations and environmental rigors, provides stable and highly reliable transmission parameters. The fibers are color coded for quick, easy identification.

The cable construction, based on a central buffer tube, is compact, light, flexible and ideal for connections requiring a moderate fiber count.

These cables are designed for installation in conduits, ducts, direct burial and in-house.



Part Number: 016TEY-13138A2G

Features and Benefits

Waterblocking technology
OSP (outdoor) applications

UV- and microbe-resistant
Can be installed in ducts or conduits

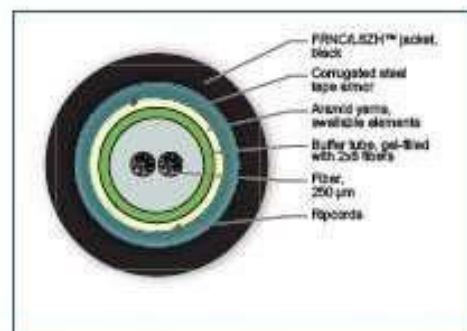
Corrugated steel armoring
Rodent, mechanical protection and direct buried applications

Small diameter and bend radius
Easy installation in space-constrained areas

Fibers color coding to Telcordia-Bellcore
Easy identification of the individual fibers

Flame retardant
LSZH™/FRNC

Silicon-free outer jacket
The cable jacket is free of harmful to paint structures



Cross Section of Part Number: 016TEY-13138A2G

Central Tube Steel Armor Indoor/Outdoor Cable

16F G50 MMF ClearCurve® OM2 CT 5.0



Cable Design	
Number of Fiber Bundles	2
Fiber Bundle Coloring	Blue, Orange
Buffer Tube Color	Green
Buffer Tube Diameter	5 mm
Number of Ripcords	2
Tensile Strength Elements and/or Armoring - Layer 1	Corrugated steel tape armor with dielectric strength elements (aramid yarns) and swellable elements
Outer Jacket Material	Flame-retardant, non-corrosive/low-smoke, zero-halogen (FRNC/LSZH) material
Outer Jacket Color	Black
Outer Jacket Nominal Thickness	1.5 mm
Cable Marking	Meter - Handset - CE 17 EN 50575 Eca - Sine - CORNING - Fibre Optic Cable - Year - U-DQ(ZN)(SR)H 16 OM2CC CT 5.0 LSZH(TM)/FRNC

Mechanical Characteristics Cable	
Nominal Outer Diameter	9.7 mm
Weight	114 kg/km
Min. Bend Radius Installation	195 mm
Min. Bend Radius Operation	145 mm
Max. Tensile Strength for Installation	1500 N
Crush Resistance	3000 N/10 cm
Fire Load	1.91 MJ/m

Chemical Characteristics	
RoHS	Free of hazardous substances according to RoHS 2011/65/EU

Ordering Information

Part Number	016TEY-13138A2G
Product Description	Central Tube Steel Armor Indoor/Outdoor Cable 16F G50 MMF ClearCurve® OM2 CT 5.0, Eca
EAN Code	4056418782409

Anexo C: Caudalímetro másico térmico marca ABB modelo FMT400-VTS.

Tipo	FMT400-VTS	FMT400-VTCS Versión higiénica
Condiciones de aplicación		
Tramos de amortiguación recomendados	Según DIN EN ISO 5167-1 Tramo de entrada min: 15 x D, tramo de salida: 5 x D	
Condiciones ambientales		
Temperatura ambiente – transmisor	-25 ... 70 °C (-13 ... 158 °F) Versión para la zona 2/22: -20 ... 50 °C (-4 ... 122 °F)	
Limpieza CIP/SIP	-	Con aparato desconectado
Temperatura de almacenamiento	-25 ... 85 °C (-13 ... 185 °F)	
Condiciones de proceso		
Temperatura de funcionamiento – fluido (sensor de caudal)	Rango estándar: -25 ... 150 °C (-13 ... 302 °F) Rango ampliado: -25 ... 300 °C (-13 ... 572 °F) Versión para la zona 2/22: -20 ... 130 °C (-4 ... 266 °F)	-25 ... 150 °C (-13 ... 302 °F)
Presión de servicio	4×10^5 Pa (40 bar [580 psi])	$1,6 \times 10^5$ Pa (16 bar [232 psi]) racor roscado S (para DN 80: 10×10^5 Pa (10 bar [145 psi])) 10×10^5 Pa (10 bar [145 psi]) brida FG
Pérdida de presión (representación logarítmica)	<p>< 1,0 kPa (10 mbar), valor típico 0,1 kPa (1 mbar)</p> <p style="text-align: center;">Caudal másico [kg/h] →</p>	
Alimentación de corriente		
Tensión	24 V DC ± 25 %; 24 V AC ± 25 %, 48 ... 62 Hz	
Consumo de potencia	< 15 W, consumo de corriente < 600 mA, protección por fusible min: 2 A, de acción lenta	
Entrada de cables	M20 x 1,5	
Salida		
Salida analógica	0/4 ... 20 mA, carga < 750 Ω, aislada galvánicamente, mensaje de error < 3,5 o > 22 mA	
Modo de protección	IP 65 / NEMA 4X	

Anexo D: Dvi vision cat mc2 aru2 cpu

The **DVI-Vision KVM Extender System** extends the following signals

- Keyboard/Mouse (USB and PS/2)
- Single-Link DVI using a bandwidth between 25 and 165MP/s (eg. up to 1920 x 1200 @ 60 Hz)
- Audio, analog, bidirectional, stereo
- RS232 transparent
- Optional: transparent USB 2.0 (up to 16 Mbit/s) or transparent USB 2.0 (up to 480 Mbit/s)
- Generic USB HID

The system consists of a computer module (transmitter) and a user module (receiver) and enables you to operate a computer on a local or remote console.

DVI-Vision uses CAT-x cables or fibre optics to transmit signals up to 10,000 m. The devices use DVI video and are available as variants displaying 1, 2 or 4 video channels. It is also possible to transmit transparent USB 2.0, RS232 and audio signals.




above: DVI-Vision-CAT-MC4-ARU-CON user module
below: DVI-Vision-CAT-MC4-ARU2-CPU computer module

GENERAL FEATURES

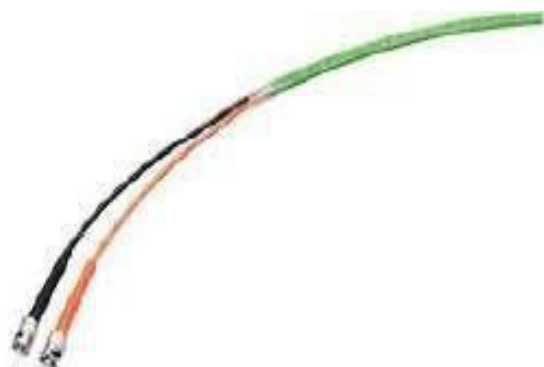
DVI-Vision-CAT

DVI-Vision-CAT series	
Interfaces for computers	
Video	see specific features
PS/2 keyboard/mouse	2 × PS/2 socket
USB keyboard/mouse	1 × USB-B socket
Audio	3.5-mm jack plug (Line In), 3.5-mm jack plug (Line Out)
USB 2.0	Variant -ARU: Shared transmission of signals of USB devices as well as keyboard and mouse via USB-B socket. Variant -ARU2: 1 × USB-B socket
RS232	1 × RS232 socket
Interfaces for remote console	
Monitor	see specific features
PS/2 keyboard/mouse	2 × PS/2 socket
USB keyboard/mouse	2 × USB-A socket
Generic-HID	1 × USB-A socket
Audio	3.5-mm jack plug (Speaker), 3.5-mm jack plug (Micro In)
USB 2.0	Variant -ARU: 2 × USB-A socket Variant -ARU2: 2 × USB-A socket (front panel), 2 × USB-A socket (back panel)
RS232	1 × RS232 plug
Interfaces for local console	
Monitor	see specific features
PS/2 keyboard	1 × PS/2 socket
USB keyboard/mouse	2 × USB-A socket
Other interfaces	
Connection to network	1 × RJ 45 socket
Service	1 × Mini-USB socket (type B)
Audio	
Transmission type	transparent, bidirectional
Resolution	24 bit digital, Stereo
Sampling rate	96 kHz
Bandwidth	22 kHz

Anexo E: Pantalla HMI KTP 900

General information	
Product type designation	KTP900 Basic color PN
Display	
Design of display	TFT widescreen display, LED backlighting
Screen diagonal	9 in
Display width	198 mm
Display height	111.7 mm
Number of colors	65 536
Resolution (pixels)	
• Horizontal image resolution	800 pixel
• Vertical image resolution	480 pixel
Backlighting	
• MTBF backlighting (at 25 °C)	20 000 h
• Backlight dimmable	Yes
Control elements	
Keyboard fonts	
• Function keys	
— Number of function keys	8
— Number of function keys with LEDs	0
• Keys with LED	No
• System keys	No
• Numeric keyboard	Yes; Onscreen keyboard
• alphanumeric keyboard	Yes; Onscreen keyboard
Touch operation	
• Design as touch screen	Yes; Analog-resistive
Installation type/mounting	
Mounting position	vertical
Mounting in portrait format possible	Yes
Mounting in landscape format possible	Yes
maximum permissible angle of inclination without external ventilation	35°
Supply voltage	
Type of supply voltage	DC
Rated value (DC)	24 V
permissible range, lower limit (DC)	19.2 V
permissible range, upper limit (DC)	28.8 V
Input current	
Current consumption (rated value)	230 mA
Starting current inrush IR	0.2 A ² s
Power	
Active power input, typ.	5.5 W
Processor	
Processor type	ARM
Memory	
Flash	Yes
RAM	Yes
Memory available for user data	10 Mbyte

Anexo F: Cable de fibra óptica Simatic NET FO standard de 50/125 μm



Suitability for use	Cable for installation indoors and outdoors, UL approval
Version of the assembled FO cable	Assembled with four BFOC connectors
Cable designation	AT-W(ZN)YY 2x1 G 50/125
Wire length	30 m

Optical data

Damping ratio per length	
<ul style="list-style-type: none"> • at 850 nm / maximum • at 1300 nm / maximum 	2.7 dB/km 0.7 dB/km
Bandwidth length product	
<ul style="list-style-type: none"> • at 850 nm • at 1300 nm 	600 GHz·m 1200 GHz·m

Mechanical data

Number of fibers / per FOC core	1
Number of FO cores / per FOC cable	2
Version of the FO conductor fiber	Multi-mode gradient fiber 50/125 μm , OM 2
Design of the FOC core	Hollow core, filled, diameter 1400 μm
Design of the fiber-optic cable	segmentable

Outer diameter	
<ul style="list-style-type: none"> • of the optical fibers • of the optical fiber sheath • of the FOC core sheath 	<p>50 µm</p> <p>125 µm</p> <p>2.9 mm</p>
Symmetrical deviation / of the outer diameter of the FOC core sheath	0.1 mm
Width / of cable sheath	7.4 mm
Thickness / of cable sheath	4.5 mm
Material	
<ul style="list-style-type: none"> • of the fiber-optic cable core • of the optical fiber sheath • of the FOC core sheath • of the fiber-optic cable sheath • of the strain relief 	<p>Quartz glass</p> <p>Quartz glass</p> <p>PVC</p> <p>PVC</p> <p>Aramid fibers</p>
Color	
<ul style="list-style-type: none"> • of the FOC core sheath • of cable sheath 	<p>orange/black</p> <p>green</p>
Bending radius	
<ul style="list-style-type: none"> • with single bend / minimum permissible • with multiple bends / minimum permissible 	<p>45 mm</p> <p>65 mm</p>
Tensile load	
<ul style="list-style-type: none"> • during installation / short-term • during operation / maximum 	<p>1200 N</p> <p>500 N</p>
Short-term shear force per length	600 N/cm
Continuous lateral force per length	400 N/cm
Weight per length	40 kg/km
Permitted ambient conditions	
Ambient temperature	
<ul style="list-style-type: none"> • during operation • during storage • during transport • during installation 	<p>-25 ... +80 °C</p> <p>-25 ... +80 °C</p> <p>-25 ... +80 °C</p> <p>-5 ... +50 °C</p>
Burning behavior	flame-resistant acc. to IEC 60332-1-2 and IEC 60332-A)
Chemical resistance	
<ul style="list-style-type: none"> • to mineral oil • to grease 	<p>conditional resistance</p> <p>conditional resistance</p>

Anexo G: Flujómetro másico

CARACTERÍSTICAS

Tecnología	másico
Fluido	para productos a granel
Montaje	en línea
Aplicaciones	industrial
Otras características	compacto
Presión de proceso	Máx.: -2 mbar (-0,03 psi) Mín.: -8 mbar (-0,12 psi)
Temperatura de proceso	Máx.: 60 °C (140 °F) Mín.: -30 °C (-22 °F)
Flujo volumétrico	Máx.: 1.250 m ³ /h (44.143,3 ft ³ /h) Mín.: 0 m ³ /h (0 ft ³ /h)