



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Cristian Eduardo Silva Muñoz

Proyecto de expansión en tecnología DCS para la línea 1 de la División El Teniente de Codelfco

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 19 de abril de 2018



Proyecto de expansión en Tecnología DSC para la línea 1
de la División El Teniente de Codelco

Cristian Eduardo Silva Muñoz

Informe Final para optar al título de Ingeniero Electrónico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Francisco Alonso Villalobos
Profesor Guía

Sr. Eduardo Muñoz Ponce
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth
Secretario Académico

Valparaíso, 19 de abril de 2018

Resumen

El proyecto de expansión para línea 1, consiste en la migración a la tecnología de sistema de control distribuido. La línea 1, que abarca parte del proceso de chancado primario del material, está actualmente funcionando con lógica control tipo PLC. El proyecto consiste en hacer una mejora, expandiéndola igual que la línea 2, a la tecnología DCS. La motivación de este proyecto, es para realizar un perfeccionamiento en los estándares de control de esta línea.

El proyecto se emplazará en la Planta de chancado Primario Colon, de la División El Teniente de la empresa Codelco.

El sistema DCS es una tecnología emergente de los últimos años en la industria mundial; se caracteriza por ser redundante y tolerante a fallos. Esta tecnología involucra controladores, servidores, elementos de campo, UPS, tarjetas de entrada-salida analógica digital, etc.

El informe hace una descripción de los sistemas de control generales y los componentes que se necesitan para poder implementarse. Se realiza una descripción de los sistemas PLC y DCS, para luego comparar sus características importantes para el proyecto.

Se presenta la descripción de los dispositivos reales y su uso en el sistema, y su conexión esperada en el mismo. También se indican las normas técnicas con las cuales se debe realizar las conexiones.

Finalmente trata en exclusiva del análisis financiero del proyecto de migración desde PLC a DCS. El análisis financiero comienza con la información provista de primera línea desde la minera El Teniente, sobre la inversión inicial, las mantenciones, la mano de obra, los materiales, los tiempos de falla o detenciones de los sistemas, y los costos asociados a lo anterior.

En base a los datos proporcionados por la empresa, se realizan los análisis financieros del VAN y el TIR, para posteriormente analizar los resultados.

Por último, se concluye y comenta sobre la factibilidad y los beneficios de implementar este sistema.

Palabras claves: El Teniente, Chancador, DCS, PLC.

Abstract

The expansion project for line 1, consists in the migration to the distributed control system technology. Line 1, which covers part of the primary crushing process of the material, is currently operating with PLC-like control logic. The project consists of making an improvement, expanding it, like line 2, to DCS technology. The motivation of this project is to carry out an improvement in the control standards of this line.

The project will be located in the Colon Primary Crushing Plant, of the El Teniente Division of Codelco.

The DCS system is an emerging technology of recent years in the global industry; it is characterized by being redundant and fault-tolerant. This technology involves controllers, servers, field elements, UPS, digital analog input / output cards, etc.

The report describes the general control systems and the components needed to implement them. A description of the PLC and DCS systems is made, to then compare their important characteristics for the project.

It presents the description of the real devices and their use in the system, and their expected connection in it. It also indicates the technical standards with which connections must be made. Finally, it deals exclusively with the financial analysis of the migration project from PLC to DCS. The financial analysis begins with the information provided by the first line from the mining company El Teniente, about the initial investment, maintenance, labor, materials, failure times or system shutdowns, and the costs associated with the above. .

Based on the data provided by the company, the financial analyzes of the VAN and the IRR are carried out, to later analyze the results.

Finally, it concludes and comments on the feasibility and benefits of implementing this system.

Key words: El Teniente, Crusher, DCS, PLC.

Índice general

Introducción.....	1
1 Antecedentes generales del problema.....	4
1.1 Empresa Codelco	4
1.2 División El Teniente.....	5
1.2.1 Sección de chancado Colón en la división El Teniente.....	9
1.2.2 Descripción del problema a resolver y solución propuesta	14
2 Marco Teórico	16
2.1 Descripción de sistemas de control generales	16
2.2 Sistemas de control implementados con PLC/HMI/SCADA.....	17
2.2.1 Controladores Lógicos Programables (PLC)	17
2.3 Descripción de los sistemas DCS.....	19
2.4 Comparaciones entre sistemas PLC/SCADA con los sistemas DCS.....	20
2.4.1 Comparación por diseño del Sistema.....	20
2.4.2 Comparación por programación del sistema	20
2.4.3 Comparación por comisionamiento y puesta en marcha	21
2.4.4 Comparación por solución de problemas.....	21
2.4.5 Capacidad de cambiar para cumplir requerimientos del proceso	21
2.4.6 Comparación por documentación del sistema	22
2.5 Elementos de un sistema DCS	22
2.5.1 Control Distribuido	23
2.5.2 Tarjetas Análogas y digitales de Entrada-Salida	24
2.5.3 Bus de Campo (Field bus)	24
2.5.4 Protocolo Ethernet Industrial.....	26
2.5.5 PROFIBUS	26
2.6 Alimentadores de bandeja Apron 120-1, 120-2 y Apron 72-1, 72-2	26
3 Desarrollo del proyecto	29
3.1 Descripción de componentes del sistema DCS	29
3.1.1 Marshalling Panel.....	29
3.1.2 Tarjeta de salida digital modelo CC-SDOR01	31

3.1.3 Tarjeta de entrada digital modelo CC-TDI110, CC-TDI120, CC-TDI220	33
3.1.4 Tarjeta de entrada análoga modelo CC-TAIX01, CC-TAIX11	34
3.1.5 Tarjeta de salida análoga modelo CC-TAOX01, CC-TAOX11, CC-TAON01	36
3.2 Conexión general de componentes.....	37
3.2.1 Cableado estructurado.....	37
3.2.2 Norma ISA	39
3.3 Diagrama de conexión general del sistema DCS.....	43
3.3.1 Diagrama de conexión de las tarjetas analógicas	44
3.3.2 Diagrama de conexión de las tarjetas digitales.....	47
4 Análisis económico del proyecto	49
4.1 Descripción del análisis económico.....	49
4.2 Descripción de las entradas del análisis económico	50
4.2.1 Inversión Inicial.....	50
4.2.2 Datos para el cálculo de ganancias y pérdidas en la implementación del proyecto ..	52
4.2.3 Cálculo de ganancias del proyecto	54
4.2.4 Cálculos de las pérdidas del proyecto	55
4.3 Análisis económico	55
4.3.1 Flujo de caja esperado del proyecto	56
4.3.2 Análisis VAN.....	57
4.3.3 Análisis TIR.....	57
Conclusiones	58
Bibliografía	59

Introducción

El desarrollo de la minería chilena está muy avanzado y es, incluso, considerada la minería de vanguardia para las demás faenas mineras extranjeras. Esto es debido a la seriedad, profesionalismo, experiencia y nivel de producción de la minería chilena. La minería chilena también se caracteriza por ser muy rentable, ya que aporta, a través de la minería estatal, un importante porcentaje del PIB del país.

La minería estatal de Chile está concentrada en la empresa Codelco, o Corporación Nacional del Cobre. Esta empresa estatal, se encarga de la producción de gran cantidad de metales puros para venta posterior. La empresa cuenta con una gran cantidad de faenas mineras principalmente distribuidas en la zona norte y centro del país, dando una gran cantidad de trabajo para chilenos y extranjeros.

Una de las faenas mineras más importante de la empresa Codelco es la minera El Teniente, la cual está ubicada en la zona central del país, en la precordillera de la sexta región, muy cercana a la capital regional Rancagua. La producción principal de esta minera es el concentrado de cobre de alta pureza, el cual es obtenido de la extracción del mineral disperso en la roca viva, en las profundidades de la tierra.

El proceso para la obtención del concentrado de cobre, en la mina subterránea El Teniente, consiste de varias etapas. La primera etapa general consiste en la extracción del material rocoso desde las profundidades de la mina, para ello se debe perforar la roca y transportarla hacia el exterior de la mina: esto último se hace a través de correas transportadoras. La siguiente etapa consiste en la disminución de los elementos ajenos al cobre deseado; esto se hace mediante la molienda, o chancado de la roca, para luego mezclarlo con químicos que lo separarán de otros elementos ajenos. Una última etapa general del proceso, llamada fundición, se encarga de concentrar aún más el cobre para obtener un producto con un porcentaje de más del 99% de cobre puro.

El desarrollo de este proyecto se realizó en la sección de chancado de la mina El Teniente de Codelco. La etapa de chancado en la minería es una parte muy importante de ésta, donde se logra reducir el material hasta aproximadamente 7 pulgadas. Una característica de ésta etapa es que es un proceso bruto y simple. El principal propósito del chancado es efectuar las reducciones de tamaño necesarias, hasta obtener un producto de una granulometría adecuada que permita el desarrollo de la lixiviación en pilas o depósitos en forma eficiente.

En la mina El Teniente, existen una gran cantidad de chancadores, y obtienen parte de su nombre de acuerdo a su ubicación dentro de la línea de proceso minera, así existen chancadores primarios, secundarios y terciarios ya que ocurren en ellos la primera molienda de material, la segunda y la tercera, respectivamente. El primer chancador de la línea de proceso es el chancador primario Colón. Este chancador tiene 2 líneas independientes de chancado, la línea 1 y la línea 2. En este chancador se desarrolló el trabajo presentado en este documento.

Dada la ubicación de la mina El Teniente, y la planta, el chancador primario Colón se emplaza en un lugar en que la distancia de viabilidad económica entre esos dos puntos sea la mínima. Además, por temas de seguridad de tronaduras, las cuales se realizan en la profundidad de la mina, el chancador primario se ha mantenido hasta hoy relativamente alejado de la mina. Debido a esto, el material rocoso es transportado hacia el chancador a través de correas transportadoras, ya que su utilización es más rentable que utilizar camiones mineros. El control de las líneas de chancado, así como de sus correas transportadoras, es muy importante, debido a la función específica, evidente e intrínseca que cumplen en el proceso.

Actualmente, cada una de las líneas del chancador primario Colón debe controlar muchos procesos para su correcto funcionamiento. Los procesos son principalmente de control y monitoreo, adquiriendo variables de presión, fuerza, velocidad, entre otras, y controlando comportamiento como la velocidad de la cinta transportadora, o el accionar del motor del chancador, o la activación de la parada de emergencia en caso de fallas, entre otras.

La línea 1 y la línea 2 del chancador Colón, son similares entre sí, pero se diferencia en el sistema de control y monitoreo de las variables mencionadas. Para la línea 1, se cuenta con un sistema de control basado en el uso de controladores lógicos programables PLC, y para la línea 2 se cuenta con un sistema de control distribuido o DCS (en inglés).

Se ha notado que los controladores tipo DCS presentan características avanzadas con respecto a sus pares PLC, que lo hacen más atractivo a la hora de su implementación. Estas características avanzadas son observadas en los rendimientos superiores de la línea 2 con respecto a la línea 1, particularmente en las horas de detención por fallas mensuales menores, de la línea 2 con respecto a la línea 1.

Cuando una línea de chancado falla, se queda de pasar una gran cantidad de material rocoso por ellas mientras la falla persiste, y el costo de la detención es elevado debido a la gran cantidad de material que circula por cada línea de chancado. Debido a las menores detenciones por fallas del sistema tipo DCS de la línea 2, es que se decidió implementar el mismo sistema en la línea 1 del chancador primario Colón. El objetivo principal de este trabajo es el estudio, diseño y propuesta de un sistema DCS para la línea 1 del chancador Colón.

Una parte importante de este proyecto es el estudio de los materiales que se deben utilizar para desarrollar el sistema completo. Estos deben ser lo más robustos, eficaces y eficientes posibles, debido al uso industrial y minero a los cuales se expondrán. La elección de estos es muy importante, como también es la interconexión dentro del sistema DCS.

Todos los proyectos son buenos para algo, por mucho que no sean eficientes. Todos tienen un propósito que satisfacen en mayor o menor manera, todos pueden ser útiles. Pero a la hora de implementar uno, se debe elegir el mejor en base a decisiones lógicas, llevando la eficiencia por delante, en general, la eficiencia económica. La eficiencia económica, indica el mayor efecto económico positivo que se puede obtener de un proyecto, cuando se toman las mejores decisiones económicas. El desarrollo de la búsqueda de la eficiencia económica se llama análisis económico. Este análisis devuelve resultados numéricos, que, bajo ciertas circunstancias, permiten evaluar un proyecto de cualquier tipo. El proyecto de cambio de tecnología de automatización de una de las líneas de la planta de chancado primario Colón claramente es muy conveniente en el ámbito económico y técnico, ya que es un prototipo sofisticado y probado que entrega los mayores beneficios.

Objetivo general del proyecto

El objetivo general de este proyecto es:

Estudio, diseño y propuesta de un sistema DCS para la línea 1 del chancador primario Colón, de la minera El Teniente de la empresa Codelco.

Objetivos específicos:

- Diseñar planos de interconexión de las tarjetas analógicas y digitales (Dispositivos de campo, Marshalling panel y panel DCS).
- Estudio de los sistemas PLC y DCS, y hacer una comparación entre ellos.
- Estudio de los componentes necesarios para implementar un sistema DCS.
- Proponer un sistema DCS en base a los componentes estudiados.
- Estudio económico de la implementación del proyecto.

1 Antecedentes generales del problema

La minería chilena se ha caracterizado por su pionera producción de productos de alta calidad, así como de ser líderes en estándares de diseño, innovación, seguridad y muchas otras excelentes características que describen la seriedad y el compromiso de las personas que trabajan en alguna faena minera chilena.

La producción de cobre chileno, por excelencia, está asociado con la empresa Codelco Chile, debido a esto es catalogada a veces como el orgullo de Chile. Los procesos y situaciones que justifican el proyecto, del cual trata este trabajo, ocurren en la mina Codelco, específicamente en la División El Teniente. En las siguientes secciones se presentará una descripción general de la empresa Codelco, así como de la división El Teniente.

1.1 Empresa Codelco

La empresa CODELCO, o "Corporación del Cobre Chileno" es una empresa autónoma, y la principal empresa productora de cobre del mundo, también es líder en reservas del mineral a nivel mundial y motor del desarrollo nacional chileno. Fue creada en el año 1955 con el objetivo de manejar de la mejor forma el recurso minero chileno, en especial el del cobre, lo cual se ha hecho con los mayores estándares de calidad desde su fundación.

El negocio principal de la empresa es explorar, explotar y comercializar los recursos mineros del cobre refinado y sus subproductos, los cuales los realiza a través de siete divisiones distribuidas en algunas regiones de Chile. Una de ellas es la división El Teniente, la cual está ubicada en la sexta región del país. Fue en este lugar en donde se realizó el trabajo de memoria el cual concluyó con este trabajo.

El cobre fino y sus derivados fabricados en la empresa Codelco, llegan a clientes en todo el mundo, lo que convierte a esta empresa en responsable de un quinto de las exportaciones nacionales. El principal mercado de la empresa es Asia, seguido por Europa y Sudamérica. Los cátodos de cobre de alta pureza son el principal producto que Codelco vende a fabricantes de semielaborados, los que a su vez lo transforman para ofrecerlos en forma atractiva a productores de artículos de consumo. La gama de productos semielaborados es muy amplia e incluye principalmente barras, perfiles, alambres, tubos y productos planos.

1.2 División El Teniente

La División El Teniente está ubicada en la comuna de Machalí, en plena cordillera de Los Andes, entre los 2.200 y los 3.200 metros sobre nivel del mar. Está distante a 54 kilómetros de Rancagua, capital de la región del Libertador Bernardo O' Higgins, tal como se muestra en la Figura 1-1.



Figura 1-1. Locación geográfica de la mina El Teniente[1].

Es la mina subterránea de cobre más grande del mundo y entre sus unidades productivas destacan los yacimientos Diablo Regimiento Fase IV, Esmeralda, Dacita, Reservas Norte, Pipa Norte, Sur Andes Pipa, Pilar Norte y El Teniente 4 sur. También tiene una operación en superficie, el Rajo Sur, ubicado entre 2.730 y 3.240 metros sobre el nivel del mar, que entró en funcionamiento a fines de 2012.

Durante 2016 la mina El Teniente alcanzó una producción de 193.341 toneladas métricas de cobre fino, que es comercializado a través de ánodos que se generan en la fundición Caletones. También produce molibdeno y ácido sulfúrico.

La Gerencia mina de la División El Teniente tiene como objetivos; la perforación, tronaduras, extracción, transporte y finalmente chancado del material. En la sección chancado es en donde se realizará el proyecto de expansión DCS.

En la Figura 1-2 (página siguiente) se muestran las unidades productivas del yacimiento El Teniente. Nótese que solo se presentan las partes o etapas relacionadas con la mina misma, y su extracción, y no su posterior concentración y elaboración de los productos concentrados de

cobre. En esta figura se observa que los yacimientos mineros de cobre se encuentran a una diferente profundidad, debido a esto es que el proceso de extracción para esta mina en particular se basa en la perforación y explotación de zonas rocosas que caen y se extraen posteriormente. El proceso productivo de la mina El Teniente se puede dividir en extracción, concentración y fundición de material. Estos procesos serán descritos a continuación:

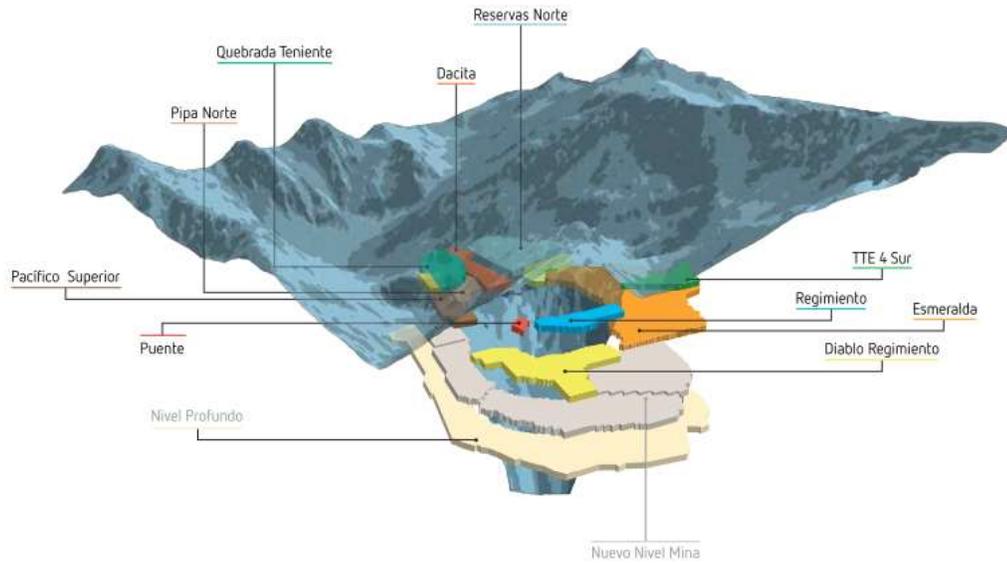


Figura 1-2. Yacimiento El Teniente[1].

Extracción

La extracción de la roca natural se hace por el método del hundimiento por explotación, el cual se basa en disminuir la resistencia de las columnas que sostienen al mineral, para que este decaiga por su propio peso, para luego retirarlo de la mina con maquinaria especial que la lleva hacia la superficie. En la Figura 1-3 se muestra un diagrama general de este procedimiento.

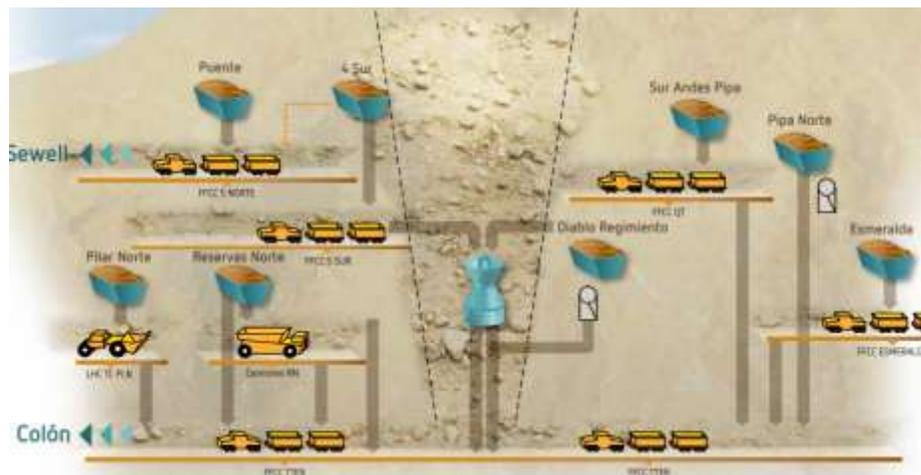


Figura 1-3. Diagrama general de la etapa de Extracción de la mina El Teniente[1].

Nótese que de la Figura 1-3, la cual se encuentra en la página anterior, que la puesta del mineral en la superficie se hace a través de una extensa red de ferrocarriles especializados. También nótese como los lugares a los que deriva son denominados Sewell y Colón, los cuales son las plantas de concentración de la roca que se obtiene de la mina. Estas se describirán en las siguientes secciones.

Concentrado

El concentrado del material tiene como objetivo eliminar los elementos ajenos al cobre, y para ello, el material se reduce de tamaño mediante molinos y chancadores formando un pequeño polvo. Este polvo es mezclado con agua y químicos para formar una pasta acuosa, la cual empieza la etapa de flotación donde el cobre se concentra aún más, separándolo de los otros elementos por medios químicos.

El concentrado en la división El Teniente se lleva a cabo en las áreas industriales de Sewell y Colón, las cuales están separadas de la mina, y en la superficie, tal como se muestra en la Figura 1-4.

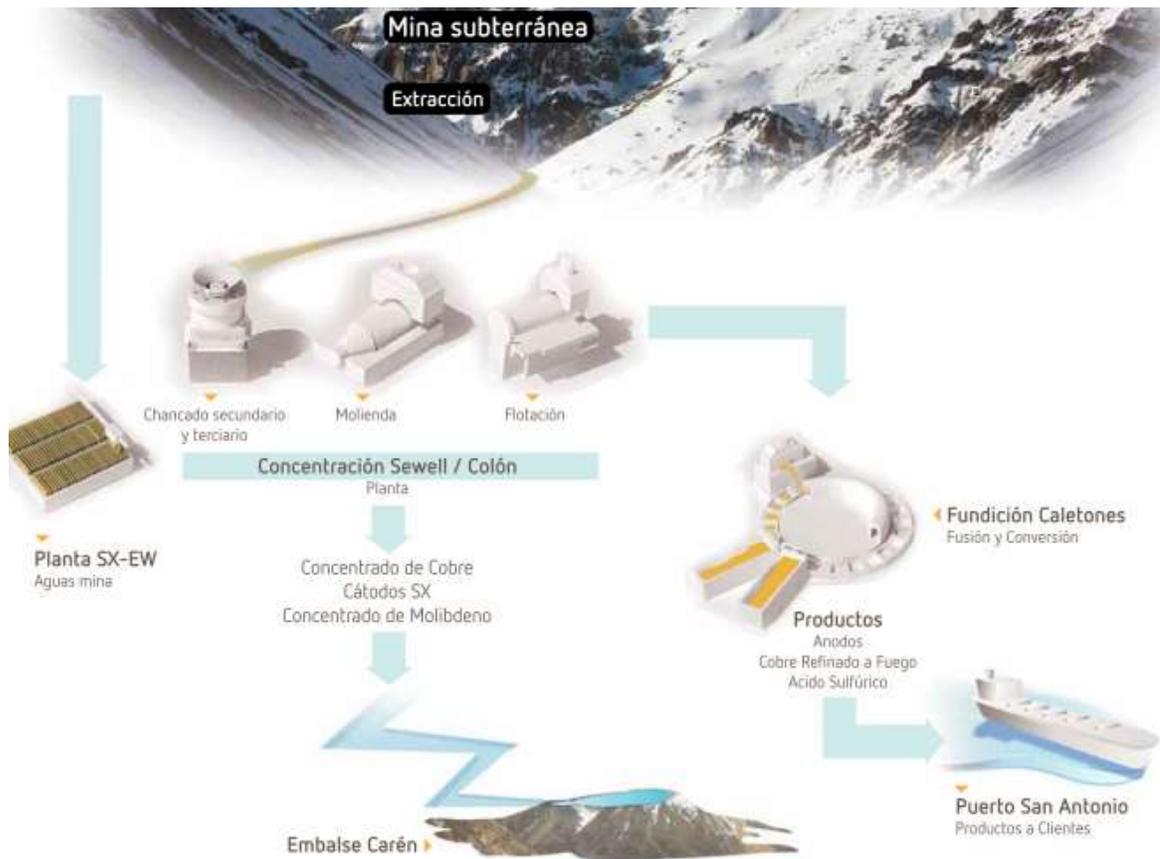


Figura 1-4. Diagrama general físico de la operación en la división El Teniente[1].

Nótese la Figura 1-4, la cual antecede a la Figura 1-3. Que describe todo el proceso de la mina El Teniente; la extracción, la concentración y la fundición.

Fundición

Después del concentrado (Ver Figura 1-4), el material se pasa a una planta que extrae la humedad, para después llevarlo, a través de un sistema de transporte neumático, a los convertidores para el proceso de fundición. El producto principal de estos convertidores es un metal blanco que contiene un 75% de cobre. Luego de esto, el metal blanco es vaciado en convertidores denominados Pierce Smith, donde se inicia el proceso de conversión que da origen al cobre blíster, del cual se obtiene el cobre refinado característico de la calidad del producto de Codelco.

En la Figura 1-5 se muestra el proceso general de fundición en la división El Teniente. En ella se nota, en la parte superior, como el proceso de fundición es una continuación del proceso de concentrado de cobre, para luego ser secado para extraer la humedad. En esta figura también se presenta, en la parte inferior, el producto final, el cual es denominado cobre blíster.

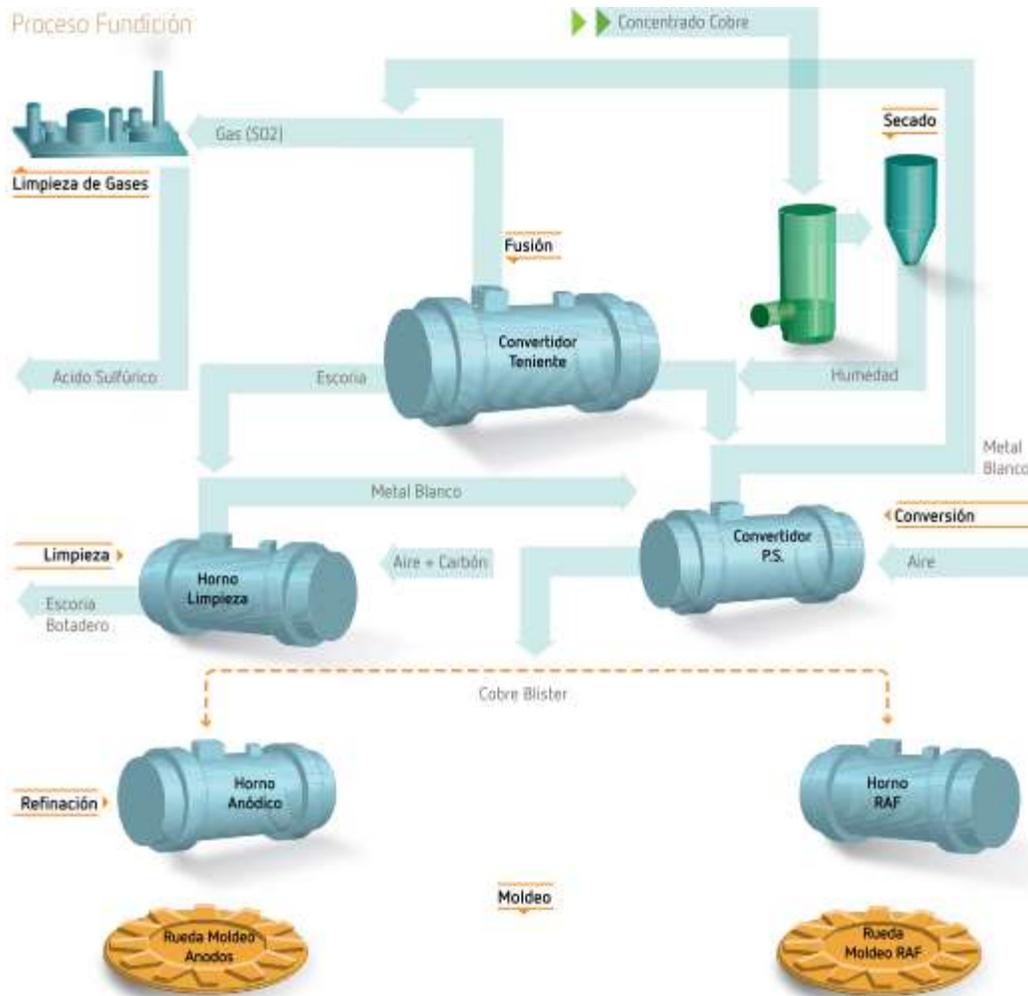


Figura 1-5. Proceso general de fundición en la división El Teniente [1]

1.2.1 Sección de chancado Colón en la división El Teniente

La sección de chancado es una parte de la sección de concentrado en la división El Teniente. En ella, el material rocoso proveniente de la mina, se muele o pulveriza hasta alcanzar una dimensión máxima de 7 pulgadas de largo máximo.

En El Teniente existen 2 secciones con 2 chancadores diferentes: la sección Sewell y la sección Colón. El diagrama general de estas 2 secciones se muestra en la Figura 1-6, donde se puede notar que existe un chancador primario, llamado chancador Colón, y otro chancador secundario llamado chancador Sewell.

El objetivo de este trabajo es realizar mejoras en el proceso de control de una línea del chancador primario Colón, por las razones que se comentarán en las siguientes secciones.

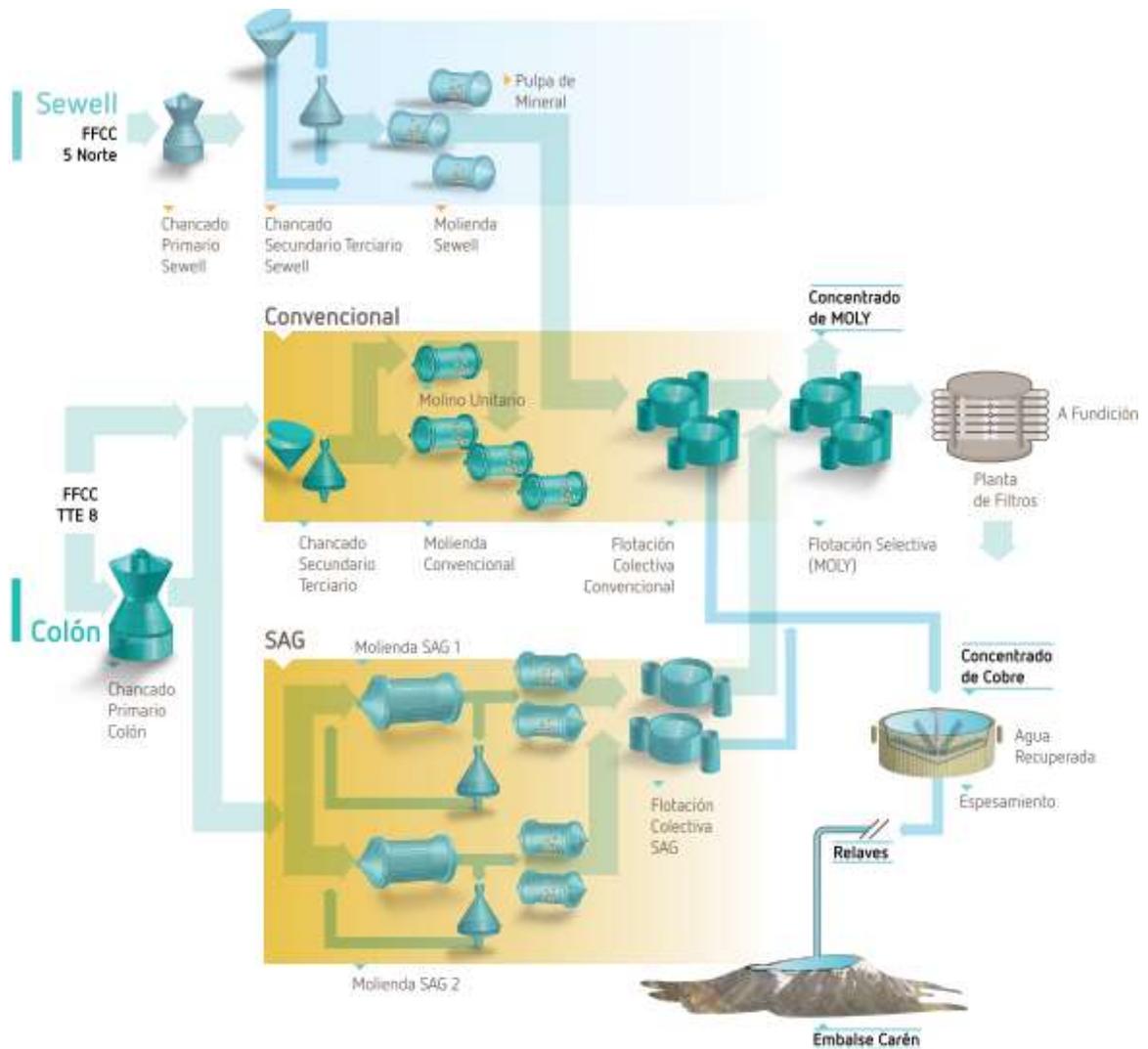


Figura 1-6. Diagrama general de las secciones Sewell y Colon[1].

Chancador Colón

El chancador Colón posee dos líneas de funcionamiento, tal como se muestra en la vista superior de la Figura 1-7, donde se observa cómo a través de estas líneas se alimenta de material a las 2 máquinas chancadoras para su molienda. En la Figura 1-8 se muestran fotografías de los chancadores reales, tomadas por el autor de este proyecto.

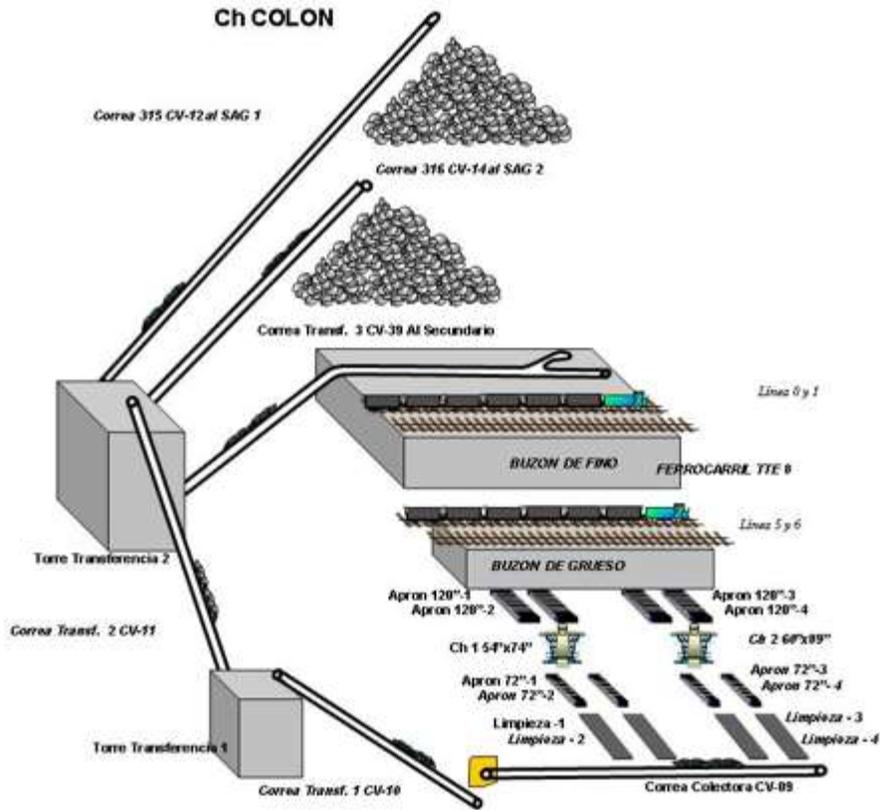


Figura 1-7. Diagrama físico del chancador Colón (fuente: Codelco.cl).



Figura 1-8. Máquinas chancadoras del chancado primario Colón (fuente propia).

A continuación se describirá los tipos de chancadores usados en la sección de chancado Colón.

Chancador 1: Allis-Chalmers

Este chancador posee, trituradores giratorios superiores primarios, los cuales son accionados por piñón y engranaje cónico de dientes espirales a través de un eje de piñón, el cual se extiende desde

el costado de la trituradora a través del brazo de la araña del casco inferior, como se muestra en a Figura 1-9.

La Chancadora puede ser accionada ya sea por motor diésel o eléctrico, situado en cualquiera de los lados, a través de un accionamiento de correas trapezoidales. El accionamiento de correas trapezoidales es especialmente recomendado por su habilidad de absorber los golpes de trituración, protegiendo así el motor, no obstante, las velocidades del eje del piñón de estas trituradoras han sido seleccionadas para conexión directa a través de acoplamiento flexibles. Las dimensiones de este chancador son: 54*74 pulgadas.

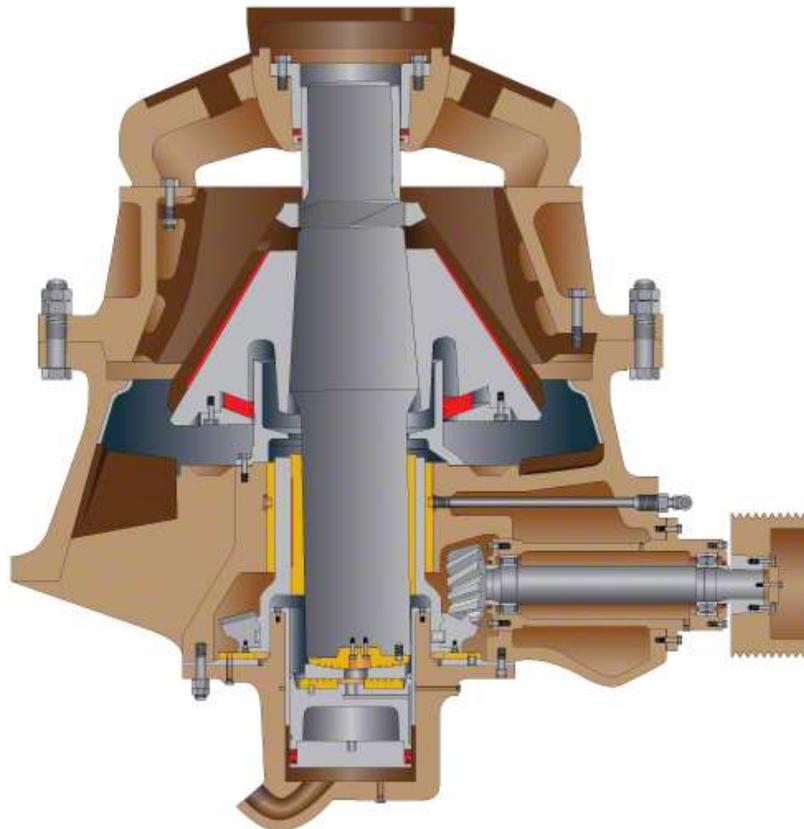


Figura 1-9. ChancadorAllis-Chalmers (fuente: <http://trituradoras-de-roca.com>).

Chancador 2: Fuller-Traylor

El tamaño de este chancador es de 64-89 pulgadas. El primer número en la designación de tamaño es la medida de la abertura de alimentación del chancador. El segundo número en la designación

del tamaño, es la medida en el diámetro más ancho en el fondo del manto inferior. Los componentes principales el chancador giratorio se muestran en la Figura 1-10.

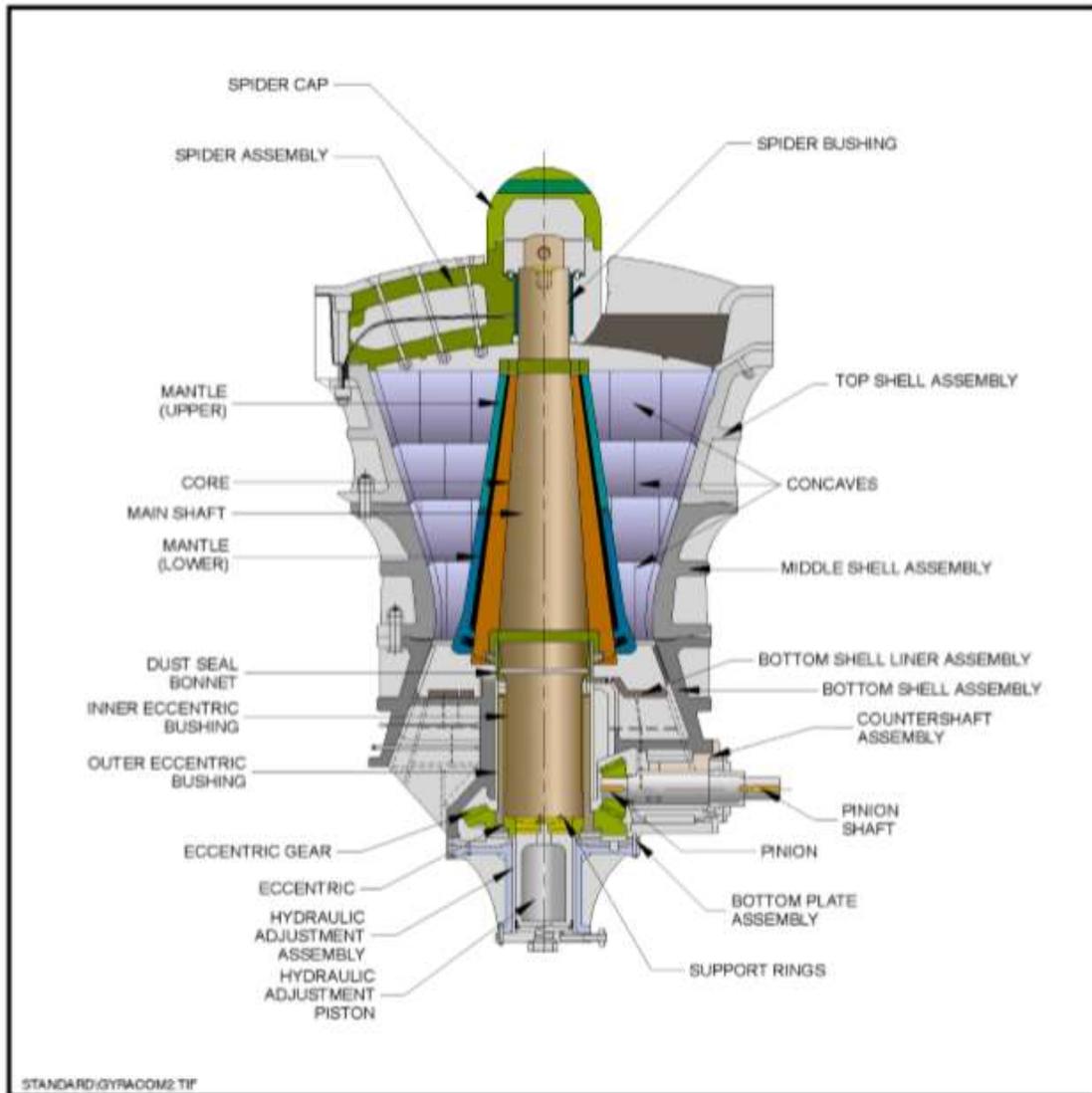


Figura 1-10. Chancador Fuller-Taylor (fuente: <http://trituradoras-de-roca.com>).

El cuerpo del chancador consiste en una estructura de acero fundido que incluye, en su parte más baja, el mecanismo de conducción. Este mecanismo se compone del excéntrico (que entrega el movimiento giratorio del eje principal y el manto), la corona y el conjunto del contra eje (que incluye al piñón y a su eje). La porción superior del chancador forma una superficie de chancado estacionaria que consiste en una cámara de forma cónica compuesta de las secciones media y superior de la carcasa.

1.2.2 Descripción del problema a resolver y solución propuesta

Existen 2 líneas de chancado, para 2 máquinas chancadoras, tal como lo muestran las Figuras 1-7 y 1-8. Ambas están operativas, pero funcionan con un sistema de control diferentes. La tecnología presente en las líneas son DCS (Sistemas de Control distribuido) y PLC (Controladores Lógicos Programables). La descripción de estos sistemas se hará en el capítulo 2.

Actualmente, el proceso de chancado de la planta primario Colón, línea 1, tiene una lógica de control basada en PLC, a diferencia de su par, la línea 2, que fue implementada con lógica DCS.

Un sistema PLC/SCADA funciona con muchos componentes, uno muy importante es su base de datos, la cual puede tener toda o parte de la siguiente lista de datos:

- Cada controlador y sus I/O asociadas
- Administración de Alarmas
- Manejo de Lotes, producción
- Redundancia en todos los niveles
- Históricos
- Optimización de Activos
- Administración de dispositivos con bus de campo (HART, FF, ProfiBus, etc.)

Cada una de estas bases de datos debe ser manualmente sincronizada para que todo el sistema funcione correctamente. Esta tarea se vuelve simple después del desarrollo inicial del sistema. Sin embargo, puede convertirse en una complicación innecesaria cuando se realizan cambios y/o mejoras en el sistema durante el tiempo, y mientras más grandes los cambios, dan como resultado la programación de más horas para realizar el mantenimiento de las bases de datos.

Cada vez que se realice un cambio en una base de datos, las demás usualmente requieren ser actualizadas para reflejar los cambios a la perfección. Por ejemplo, cuando se agregan señales I/O y se agrega alguna lógica de control, se puede necesitar cambiar o agregar elementos al sistema SCADA/HMI, al historiador y la base de datos de alarmas. Esto requiere que el ingeniero de planta realice los cambios en cada una de las bases de datos, y no solo en una. En otro escenario, un cambio puede ser hecho en la configuración de una alarma dentro de un lazo de control. En el mundo de los PLC no hay una conexión automática entre el PLC mismo y el SCADA/HMI. Esto se puede tornar un serio problema durante la puesta en marcha de una nueva aplicación, donde los límites de alarmas son constantemente ajustados en el controlador para manejar el proceso, mientras se trata de realizar la administración de las alarmas y mantener actualizadas las aplicaciones HMI con los cambios realizados a la vez que el operador las utiliza.

Los sistemas DCS también son denominados “Sistemas de Control de Procesos”, son desarrollados para permitir una rápida implementación en el sistema entero, integrando todas las bases de datos en una sola. Se diseña una sola base de datos, configurada y operada desde la misma aplicación. Esto puede tornarse en una reducción importante de costos cuando se usan tecnología DCS si se compara con un sistema con PLC/SCADA (o HMI), al menos en el costo de las horas de ingeniería necesarias.

Cuando se requiere la implementación en un sistema pequeño o mediano DCS, los precios de la adquisición de hardware y software son similares con los de un sistema PLC/SCADA. Por lo tanto, la diferencia real está en los costos asociados de las horas de mantenimiento/ingeniería invertidas, lo cual es mejorado y simplificado con una única base de datos de un sistema DCS.

Tradicionalmente, los DCS fueron extensos, costosos y muy complejos sistemas orientados para una solución integral sobre procesos industriales continuos o discretos. Este concepto sigue siendo cierto hoy en día, y para aplicaciones más pequeñas, los ingenieros optan por lo general en utilizar sistemas PLC/HMI/SCADA con el fin de mantener sus costos bajos. Actualmente un sistema DCS es tan funcional y rentable como un PLC para realizar lógica discreta y secuencial, e incluso costar más que un DCS para el mismo proceso y aplicación en particular.

Emigrar a tecnología de control DCS entrega mayor información del comportamiento del proceso productivo y del sistema; como registros de alarmas, tendencias, eventos e históricos facilitando la administración y gestión del proceso, aumentando la mantenibilidad y confiabilidad en el sistema, reduciendo el tiempo de respuesta ante averías o fallas.

La integración de PLC independientes, la necesidad de interfaces de operación y funcionalidades de supervisión, toma un gran tiempo y esfuerzo. El punto está en que los esfuerzos se centran en hacer que tecnología (PLC) separada trabaje en conjunto, sin mejorar las operaciones, ni reducir los costos o mejorar la calidad o rentabilidad de una planta.

Debido a la implementación actual de la línea 1, basada en PLC, no se posee una visión amplia del comportamiento del sistema; limitando el manejo de información de registros de alarmas, eventos, tendencias, históricos y muchas otras variables importantes. Esta limitación se basa en el esfuerzo y costo de ser implementada en un sistema PLC.

Se requiere diseñar el nuevo sistema de control de la línea 1 del chancador primario Colón, como un sistema similar a la línea 2, el cual está basado en la tecnología DCS. Para lograr este objetivo, se debe implementar todo el sistema DCS físico en un panel especial, y la tarea del desarrollador de este proyecto es diseñar de forma completa el panel, desde etapas mecánicas a etapas eléctricas-electrónicas, para su fabricación e implementación futura.

2 Marco Teórico

La solución propuesta, de acuerdo a lo explicado en el capítulo anterior, consiste en la implementación de un sistema DCS para la línea 1 del chancador primario Colón. Este sistema debe reemplazar el control actualmente implementado en un sistema PLC. El cambio del sistema requiere diseñar un panel de conexiones especiales para los elementos tecnológicos DCS.

En este capítulo, se describirán las características de los sistemas DCS, los cuales se compararán con los sistemas PLC/SCADA, con tal de notar la superioridad de los sistemas DCS.

2.1 Descripción de sistemas de control generales

La división El Teniente, de la empresa Codelco, es una parte que está netamente enfocada a la producción de un producto de cobre de calidad. La operación de la empresa se basa en administrar, mantener y crear nuevos sistemas de procesamiento y control industrial eficientes, para realizar las importantes tareas que le son encomendadas.

En la Figura 2-1 se muestra el diagrama general de todas las empresas que implementan sistemas de procesamiento y control.

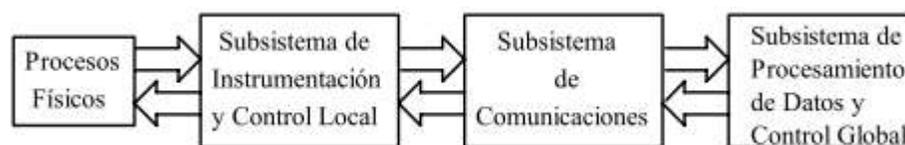


Figura 2-1. Diagrama general de los sistemas de procesamiento y control (Fuente: [2])

De la Figura 2-1 se puede observar que se tiene una primera etapa de los procesos físicos, las cuales comprenden la adquisición de las variables físicas a medir; como voltaje, temperatura, humedad, corriente eléctrica, u otra necesaria para hacer control y seguimiento a un proceso físico importante, tal como el chancador. Luego se observa un subsistema de comunicaciones, el cual está encargado de enviar los datos del subsistema de instrumentación y controla al subsistema de procesamiento de datos, a través de medios físicos como cables y ondas electromagnéticas. Por último, se tiene el subsistema de procesamiento de datos y control global, en donde los operarios pueden observar y corregir las variables físicas de interés. Cabe mencionar que los subsistemas presentados pueden estar muy separados físicamente.

2.2 Sistemas de control implementados con PLC/HMI/SCADA

El chancador de la línea 1 Colón está implementado con un sistema SCADA que maneja o supervisa los datos adquiridos por un PLC, el cual se muestra en una sala de control. Se describirá primero los elementos del control actual de la línea 1 de la chancadora Colón.

2.2.1 Controladores Lógicos Programables (PLC)

Los controladores lógicos programables (PLC en inglés) son los encargados, mayormente, de implementar el subsistema de instrumentación y del control local de los procesos físicos de alguna máquina. El PLC es una máquina electrónica desarrollada en la década del 60, la cual es usada para desarrollar procesos o secuencias industriales con una gran robustez. Estos procesos industriales se realizan en base a una serie de tareas comunes para los PLC's como: conversión serie/paralelo, temporizadores, conteos y muchas otras más. El PLC puede verse como una caja negra que puede ser programada, con moderada facilidad, para realizar procesos industriales. La Figura 2-2 describe el diagrama de bloques de un PLC tipo.

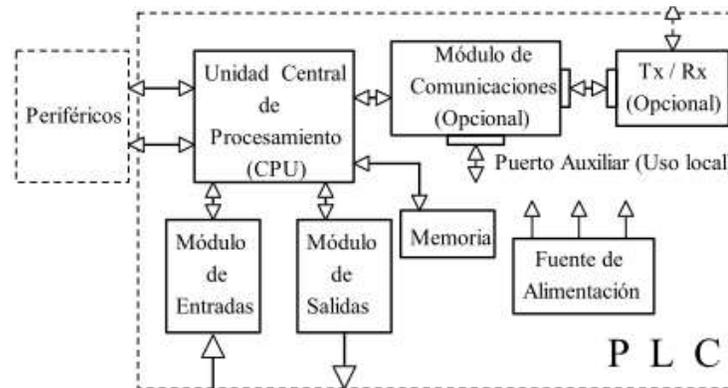


Figura 2-2. Diagrama de bloques de un PLC tipo (fuente: [2]).

En la Figura 2-2 se muestra que todo PLC tiene una unidad central de procesamiento, la cual ejecuta las tareas matemáticas que indica el programa cargado anteriormente. También se nota en dicha figura que posee una memoria interna donde se guardan las variables importantes del proceso informático, así como la dirección física y/o virtual del componente.

Los PLC's tienen, normalmente, módulos de salidas, los cuales sirven para que el PLC comande procesos físicos, y módulos de entradas, los cuales permiten adquirir valores importantes de los procesos físicos. Los módulos periféricos de los PLC's deben costearse de forma separada.

En la Figura 2-2 también se nota la inclusión de periféricos que no son módulos de entrada/salidas, sino que pueden ser sensores o memorias externas, entre muchos otros. Esto aumenta la posibilidad de uso de los PLC's.

También se puede observar que existe un módulo de comunicaciones, el cual se encarga de enviar los datos adquiridos o calculados por el PLC hacia el subsistema de procesamiento de datos y control global (ver Figura 2-1).

Los sistemas SCADA o Sistema de Control Supervisor y Adquisición de Datos, son sistemas que permiten obtener y procesar información de procesos industriales normalmente remotos, dispersos o inaccesibles hacia una sala de control o centro de control. El sistema SCADA permite controlar y procesar una gran cantidad de procesos, los cuales tienen, a veces, PLC's conectados entre ellos. El sistema SCADA conecta distintos elementos para una administración del proceso general.

Un diagrama general del sistema SCADA se presenta en la Figura 2-3. En esta figura, se puede observar los elementos conectados en el sistema, el cual permite administrarlos correctamente. Nótese que se tiene una red Ethernet física que conecta los dispositivos de forma bidireccional. También se puede conectar directamente a la red, sistemas de PLC's y sensores directamente con un cierto protocolo. El sistema SCADA también tiene la capacidad de conexión inalámbrica para enviar los datos a dispositivos muy remotos o inaccesibles.

Una parte importante de los sistemas SCADA es el manejo de las bases de datos, tal como lo mostrado en la parte superior de la Figura 2-3. En esta base de datos se guardan las variables importantes de los procesos, pero también las direcciones digitales de los elementos que están conectados. El manejo de estas direcciones, así como su mantenimiento ante el cambio o inclusión de los elementos nuevos de la red SCADA, es muy engorroso y problemático por las razones que se mencionaron en la sección 1.2.2, lo cual motivó a realizar el cambio al sistema de control DCS, el cual será explicado en la siguiente subsección.

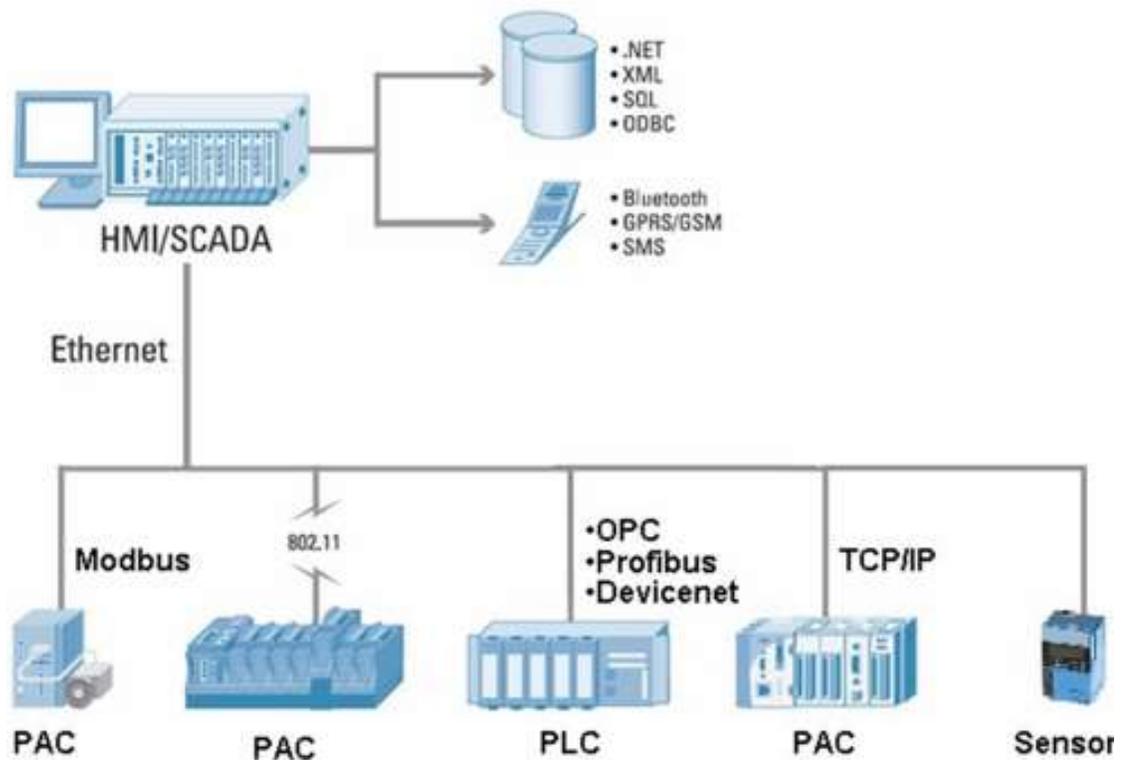


Figura 2-3. Diagrama general del sistema SCADA.

2.3 Descripción de los sistemas DCS

Los sistemas distribuidos están destinados a funcionar teniendo múltiples controladores, cada uno responsable de un grupo de lazos PID, distribuidos por las instalaciones y enlazados para compartir información entre ellas y con las consolas de operación. Por este motivo, ya no existe la preocupación de tener todos los lazos, o comandos, en un solo computador. La distribución de los computadores o controladores también fomenta el orden del cableado de señales, dado que ahora cientos o miles de cables de instrumentos sólo tienen que llegar hasta los nodos distribuidos, y no todo el camino hasta llegar la sala de control centralizada. Solo los cables de la red tienen que estar enlazando a los controladores, representando una drástica reducción de cableado necesario. El control distribuido introdujo el concepto de "redundancia" en los sistemas de control industrial; en donde la adquisición de señales digitales y las unidades de procesamiento estaban equipadas con un "spare" o "repuesto" para que automáticamente tomen el control de todas las funciones críticas en caso de ocurra una falla primaria.

Una descripción general del sistema DCS se muestra en la Figura 2-4. Se tiene un típico diagrama de un sistema DCS, el cual se basa en el cableado distribuido de los elementos que lo componen. En la configuración de la Figura 2-4, cualquiera de los elementos inferiores puede ser comandado por cualquier controlador primario y secundario, independiente si existe un cableado directo entre ellos.

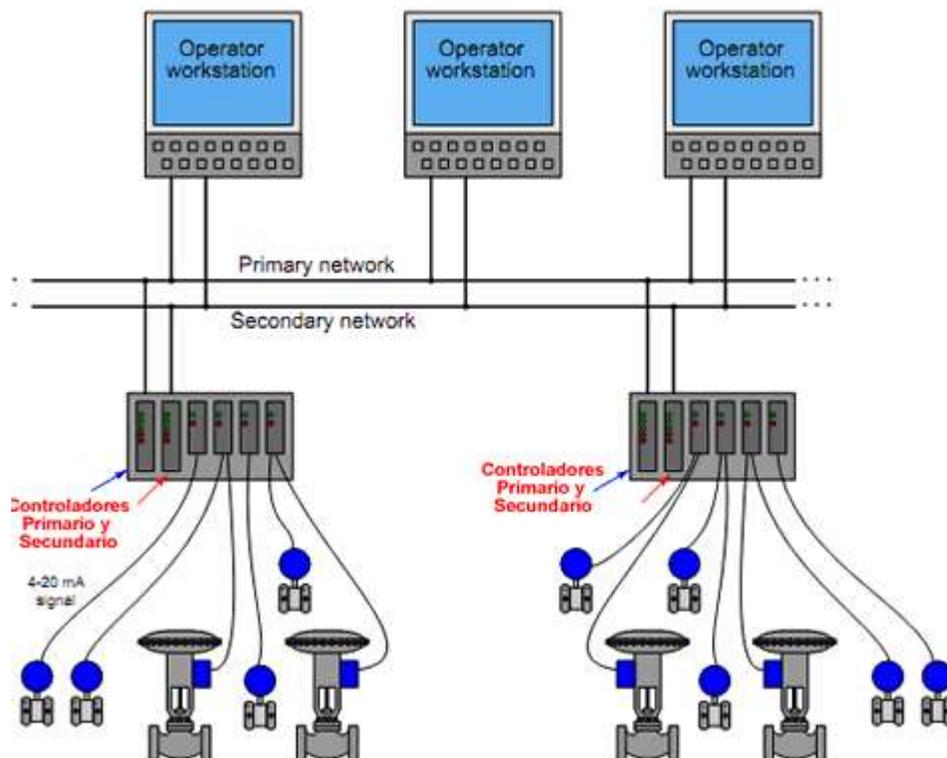


Figura 2-4. Diagrama general de los sistemas DCS.

2.4 Comparaciones entre sistemas PLC/SCADA con los sistemas DCS

Se describe a continuación algunos ejemplos de cómo el flujo de trabajo con un sistema DCS permitirá ahorrar y reducir drásticamente el tiempo de implementación y mantenimiento de las típicas aplicaciones de control y monitoreo, comparado con sistemas que involucran PLC/SCADA.

2.4.1 Comparación por diseño del Sistema

Los ingenieros o técnicos que utilizan PLC/SCADA deben planificar la integración del sistema con el HMI (Interfaz Humano-Máquina), sistema de alarmas, comunicación con el controlador y los demás controladores para cada nuevo proyecto. Cada variable de control, debe ser manualmente asignada para cada parte, y además en la documentación de ingeniería de todo el proyecto. Este proceso manual consume mucho tiempo y sobre todo, está expuesto a errores humanos. Los ingenieros también deben aprender múltiples programas de software, que podría tomar semanas de tiempo de adaptación.

En un sistema DCS, conforme se implementa la lógica diseñada, el sistema de alarmas, el HMI, y los sistemas de comunicación son automáticamente configurados. Generalmente, sólo se necesita un único software de configuración para actualizar una única base de datos usada para todos los componentes del sistema. A medida que el ingeniero de control diseña la lógica de control, el resto del sistema también lo hace en paralelo. La forma sencilla de este proceso y su entorno permite a los ingenieros adaptarse y entender el entorno de desarrollo en pocos días. En consecuencia, se produce un ahorro del HMI.

2.4.2 Comparación por programación del sistema

La lógica de control, el sistema de comunicación y HMI en sistemas PLC/SCADA son programadas independientemente. Los ingenieros de control son los responsables de la integración/enlace de las múltiples bases de datos que se crean en el sistema. Los ítems deben ser manualmente duplicados en cada elemento del sistema: escalamiento de los datos, niveles de alarma, y localización de tags (direccionamiento). Solamente está disponible un control básico. Para extender las funcionalidades, se requiere de programación en cada aplicación, por ejemplo, feedforward, tracking, self-tuning, etc. Esto conlleva a tener aplicaciones no estándar, tediosas para operar y mantener. La redundancia es usada muy poco o muy simple en los PLC. Una de las razones es la dificultad en configurar y administrar la redundancia para la aplicación.

En un sistema DCS, cuando la lógica de control es desarrollada, los overlays o faceplates HMI, alarmas y sistema de comunicación son automáticamente configurados. Los faceplates automáticamente aparecen con los niveles de alarma y escalamiento de la lógica de control. Estos elementos que contienen datos críticos en el sistema son configurados sólo una vez en el sistema. Eso es análogo a tener el calendario en el escritorio y que el teléfono automáticamente se sincroniza en vez de tener que volver a escribir todas las citas en ambos dispositivos. La redundancia es configurada en el software rápida y fácilmente, casi con apretar un botón.

2.4.3 Comparación por comisionamiento y puesta en marcha

Probar un sistema PLC/HMI normalmente se lleva a cabo con trabajos en la planta después de que todo el cableado se haya completado y el jefe de operación, o el encargado, pregunta por el estado de marcha del sistema. La simulación es poco práctica y, si se requiere, lleva un gran esfuerzo de programación para escribir código que simule la aplicación que se está controlando. Esto se hace raramente, debido a los altos costos y una programación compleja de la planta.

El beneficio de un DCS es que provee la capacidad para simular el proceso basado en la lógica, HMI y alarmado que va a ser usado por el operador de planta. En algunos casos se utiliza un software especial para modelar la planta completa y tener una experiencia casi exacta de todo el proceso, incluyendo la posibilidad de recorridos virtuales para entrenamiento de operadores. Esto ahorra tiempo significativo, dado que la programación puede ser comprobada antes de que el cableado empiece. El ahorro potencial es notorio, y dependiente de la complejidad de la puesta en marcha y del comisionamiento del proyecto.

2.4.4 Comparación por solución de problemas

Un sistema PLC/SCADA ofrece excelentes herramientas para solucionar problemas. Por ejemplo, si una entrada o salida es conectada al sistema, la lógica de control será programada utilizando dicho punto sin problemas. Sin embargo, cuando este punto es actualizado, el HMI no actualiza este punto también, y las alarmas no han sido reconfiguradas. La programación de la lógica es raramente mostrada al operador, puesto que todo es un software diferente y nunca intuitivo para que el operador entienda.

En un sistema DCS, toda la información está automáticamente disponible para el operador respecto a la lógica que se está ejecutando en los controladores. Esto reduce enormemente el tiempo que toma identificar problemas y poner el sistema en marcha nuevamente. El diagnóstico de dispositivos de campo (HART o FieldBus) está disponible desde las consolas de operación. Esto ahorra mucho tiempo, el cual depende del tamaño del HMI.

2.4.5 Capacidad de cambiar para cumplir requerimientos del proceso

En un sistema PLC/SCADA, el cambio en la lógica de control para cumplir con requerimientos de la aplicación es relativamente fácil. El problema ocurre cuando estos requisitos adicionales o nuevas funcionalidades deben ser integradas en las estaciones de operación. Nuevamente, si se cambia una entrada en una nueva dirección, el cambio debe ser realizado manualmente en todo el sistema.

En un sistema DCS, agregar o cambiar la lógica en el sistema es también fácil. En muchos casos incluso más fácil cuando se ha implementado la lógica basándose en plantillas o modelos. Cuando estos cambios se efectúan, los datos en la lógica de control son actualizados automáticamente a todos los aspectos del sistema. Esto significa mucho menos errores en todo el sistema, con apenas un solo cambio en la lógica. El ahorro potencial de tiempo es importante, lo que afecta directamente a la mejora continua de los programas.

2.4.6 Comparación por documentación del sistema

La documentación de un sistema PLC/SCADA se basa en realizarla para cada parte del sistema en general. A medida que exista un cambio en algún elemento, la documentación se debe actualizar por cada uno de ellos y así tenerla actualizada. Esto rara vez se realiza en la práctica, causando muchos inconvenientes con los cambios y resolución de problemas futuros.

En un sistema DCS, cuando la lógica de control es modificada, la documentación de todos los aspectos del sistema, se crea o actualiza automáticamente. Esto puede ahorrar una gran cantidad de tiempo y esfuerzo de actualización de información, dependiendo de la naturaleza de donde el sistema está instalado. Esos ahorros minimizarán directamente el tiempo de inactividad.

2.5 Elementos de un sistema DCS

Un sistema DCS se basa en sus componentes o elementos, que pueden ser físicos o virtuales, para realizar sus tareas. En esta subsección, se describen los componentes para el sistema DCS particular que se implementará en la sección chancador Colón de la minera El Teniente.

En la Figura 2-5 se muestra un diagrama general que describe los componentes y la forma de conexión de un sistema DCS. Los dispositivos de campo (sensores y actuadores), se conectan mediante buses de campo a una red Ethernet de forma segura. La red Ethernet se conecta con computadores o servidores, donde se procesa, muestra, guarda, etc., la información proporcionada por los dispositivos de campo. Toda la conexión se hace mediante la lógica del control distribuido, en donde el control de los elementos de campo, se puede hacer mediante múltiples controladores, incluso sin conexión directa entre ellos.

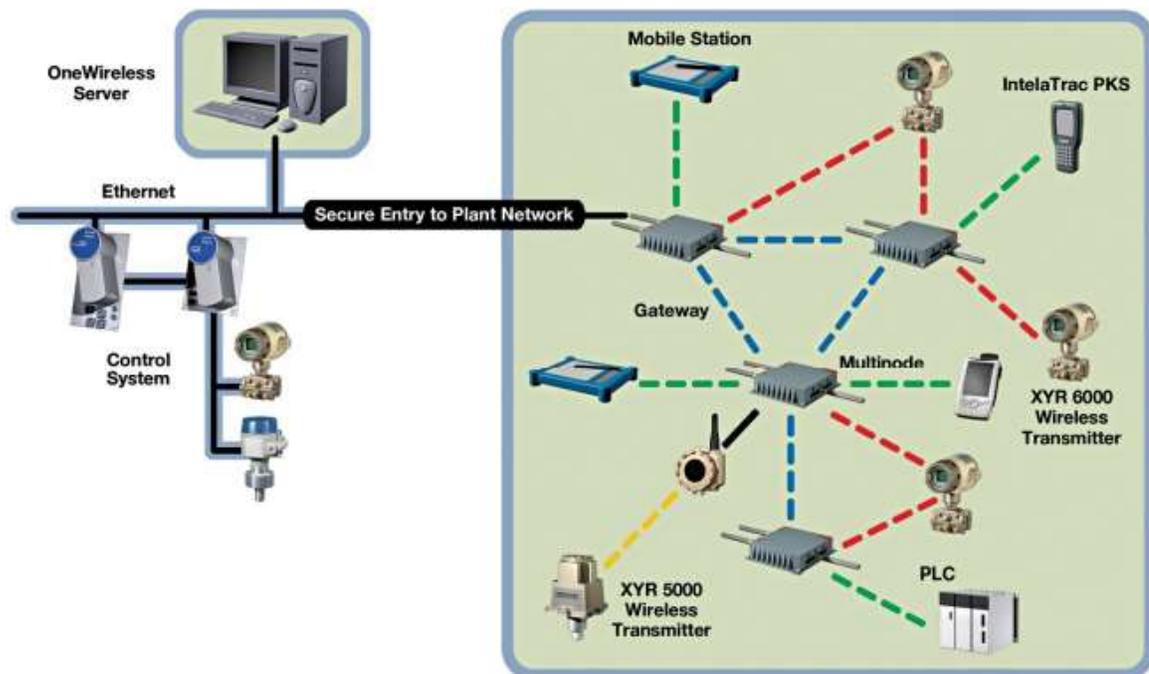


Figura 2-5. Diagrama general de un sistema DCS (Fuente: www.honeywellprocess.com).

2.5.1 Control Distribuido

La característica de un sistema de control distribuido es la comunicación entre cada controlador de proceso. En caso de falla o sobrecarga de trabajo, será posible transferir todo o parte de las tareas a otras unidades cercanas (o no) que funcione correctamente dentro de la misma red.

Jerarquía entre los Niveles de Comunicación

A continuación, se muestra una clasificación jerárquica de las redes locales industriales según el entorno donde van a ser instaladas. En la Figura 2-6, se muestra un esquema de esto en la pirámide de la automatización. Se aprecia que actualmente existen niveles de comunicación, cada uno de ellos con diferentes necesidades. Deben usarse protocolos abiertos, disponibles por toda la comunidad de fabricantes y usuarios, este aspecto es básico para conseguir que equipos de diferentes fabricantes puedan trabajar en conjunto en una misma red.

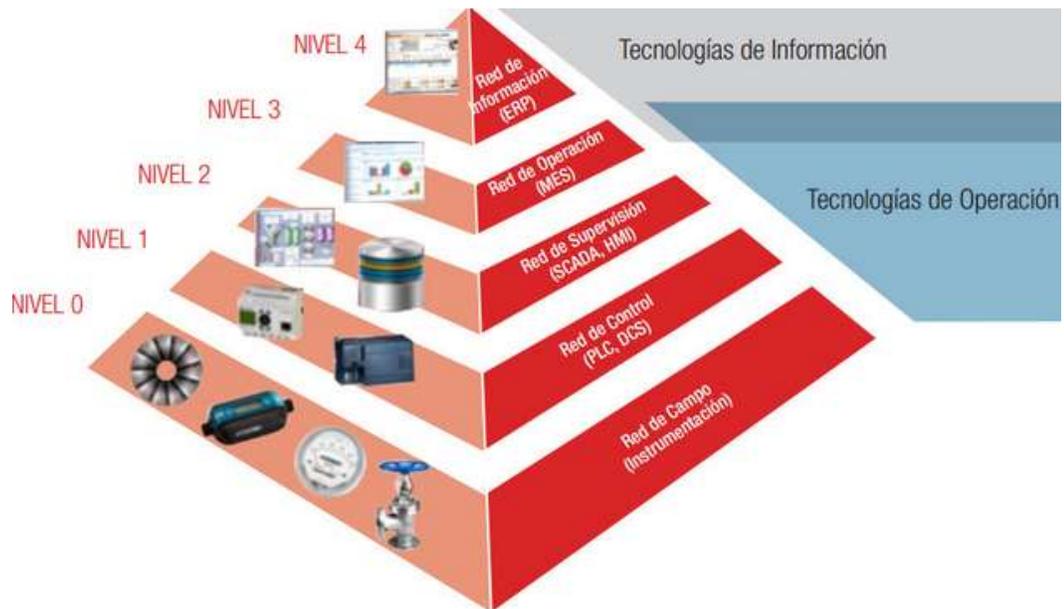


Figura 2-6. Pirámide de la automatización (Fuente: <https://blog.segu-info.com.ar>)

La protección frente a fallos juega un papel muy importante, debido a que se debe evitar a toda costa que este hecho afecte negativamente a la planta. Por ejemplo, los sistemas de refrigeración de una central nuclear no pueden bloquearse porque la interfaz de comunicaciones de un nodo de la red sufra desperfectos. Para ello es fundamental que los nodos puedan detectar si la red está funcionando correctamente o no, y en caso de avería, pasar a un algoritmo de control que mantenga la planta en un punto seguro. Si el sistema es crítico, se deben incluir equipos redundantes, que reemplacen al averiado de forma automática en caso de avería para salvaguardar el proceso completo.

La necesidad de buenas herramientas de mantenimiento y administración de la red son vitales, porque en las redes de control las operaciones de reconfiguración y actualización son frecuentes.

2.5.2 Tarjetas Análogas y digitales de Entrada-Salida

Estos dispositivos electrónicos son encargados de recibir y emitir información, por ejemplo, una tarjeta de entrada análoga tiene como función recibir información de los elementos de campo, como un sensor de temperatura. La función de una tarjeta de salida análoga consiste en emitir información hacia un actuador (por ejemplo, un variador de frecuencia). La tarjeta de entrada digital tiene como función detectar un estado discreto, como por ejemplo un nivel de presión. La tarjeta de salida digital tiene como función, por ejemplo, parar o accionar un motor mediante un comando digital en un actuador digital que inicie la partida del motor.

En la Figura 2-7 se muestran tarjetas digitales de la empresa Honeywell, similares a las que serán ocupadas en este proyecto, las cuales serán descritas en el siguiente capítulo.



Figura 2-7. Ejemplos de tarjetas digitales Honeywell (Fuente: www.honeywellprocess.com)

2.5.3 Bus de Campo (Field bus)

Un bus de campo es un término genérico que describe un conjunto de redes de comunicación para uso industrial, cuyo objetivo es sustituir las conexiones punto a punto entre los elementos de campo y el equipo de control a través del tradicional bucle de corriente de 4-20 [mA]. Típicamente son redes digitales, bidireccionales, multipunto, montadas sobre un bus serie, que conectan dispositivos de campo como PLC, transductores, actuadores y sensores. Cada dispositivo de campo incorpora cierta capacidad de proceso, que lo convierte en un dispositivo inteligente, manteniendo siempre un bajo costo. Cada uno de estos elementos será capaz de

ejecutar funciones simples de autodiagnóstico, control o mantenimiento, así como comunicarse bidireccionalmente a través del bus.

El objetivo del bus de campo es reemplazar los sistemas de control centralizados por redes para control distribuido con las que se mejorara la calidad del producto, reducir costos y mejorar la eficiencia. Para ello se basa en que la información que envían y reciben los dispositivos de campo es digital, lo que resulta mucho más preciso que si se recurre a métodos analógicos. Además cada dispositivo de campo es un dispositivo inteligente y puede llevar a cabo funciones propias de control, mantenimiento y diagnóstico. De esta forma, cada nodo de la red puede informar en caso de fallo del dispositivo asociado, y en general sobre cualquier anomalía asociada al dispositivo. Esta monitorización permite aumentar la eficiencia del sistema y reducir la cantidad de horas de mantenimiento necesarias.

La principal ventaja que ofrecen los buses de campo, y la que los hace más atractivos a los usuarios finales, es la reducción de costos. El ahorro proviene fundamentalmente de tres fuentes: ahorro en costos de instalación, ahorro en costo de mantenimiento y ahorros derivados de la mejora del funcionamiento del sistema.

Una de las principales características de los buses de campo es una significativa reducción en el cableado necesario para el control de una instalación. Cada célula del proceso sólo requiere un cable para la conexión de los diversos nodos. Se estima que puede ofrecer una reducción de 5 a 1 en los costos de cableado.

En la Figura 2-8 se presenta un bus de campo de la empresa Honeywell, similar al que será usado en este proyecto. Nótese como el bus de campo presentado en la Figura 2-8 se muestra también en la Figura 2-5.



Figura 2-8. Bus de campo e interfaz Honeywell (Fuente: www.ebay.co.uk).

2.5.4 Protocolo Ethernet Industrial

El protocolo Ethernet Industrial, es una solución abierta estándar para la interconexión de redes industriales que aprovecha los medios físicos y los chips de comunicaciones Ethernet comerciales. Si se tiene en cuenta que la tecnología Ethernet se utiliza desde mediados de los años setenta y su gran aceptación del mundo, no es de extrañar que Ethernet brinde la mayor comunidad de proveedores del mundo. Al utilizar Ethernet, no sólo se sigue con una tendencia tecnológica actual, sino que además se posibilita obtener acceso a datos en el nivel de dispositivos de control mediante Internet.

Con la introducción de la tecnología de conmutación de Ethernet y transmisión de datos full-Dúplex, se minimizan las colisiones de datos y el rendimiento en la red aumenta drásticamente.

Ethernet Industrial permite cubrir grandes distancias, ya sea a un nivel de una LAN; con tecnología de switching, o bien, extendiéndose a una WAN, en todo el mundo mediante protocolo TCP-IP.

Una red con protocolo Ethernet se muestra como la red que conecta a los dispositivos con la sala de control, en la Figura 2-5.

2.5.5 PROFIBUS

Es un estándar de comunicación para buses de campo. PROFIBUS es actualmente el líder de los sistemas basados en buses de campo en Europa y goza de una aceptación mundial. Sus áreas de aplicación incluyen manufacturación, automatización y generación de procesos. PROFIBUS es un bus de campo normalizado internacional que fue estandarizado bajo la norma EN 50 170 [3]. Esta norma asegura una protección óptima tanto a los clientes como a los vendedores y asegura la independencia de estos últimos. Hoy en día, todos los fabricantes líderes de tecnología de automatización ofrecen interfaces PROFIBUS para sus dispositivos.

2.6 Alimentadores de bandeja Apron 120-1, 120-2 y Apron 72-1, 72-2

Los alimentadores de bandeja consisten principalmente en dos hebras de cadena de tractor sin fin, ya sea con el manganoso de fundición o bandejas de acero fabricados (vuelos) atornillados a un vínculo común de cada hebra.

Las cadenas son accionadas por piñones que se montan a un eje motor. Las bandejas se desplazan con la cadena y se articulan en los piñones de motor para descargar el material minero a una línea del chancador primario Colón.

El movimiento se realiza mediante un sistema hidráulico, que consiste en una bomba de pistones y un motor hidráulico, el que regula la velocidad del alimentador Apron, la cual es operada por el operador de control planta, el cual dictamina valores en porcentaje de velocidad generando valores de tonelaje del proceso.

En la Figura 2-9 se muestra un tipo de alimentador (feeder) de la marca Apron.



Figura 2-9. Alimentador de bandeja Apron (Fuente: <http://www.primeprecisions.com>)

A continuación se muestra una tabla comparativa entre las tecnologías DCS y PLC (tabla 2-1).

Tabla 2-1 Comparación DCS vs PLC (fuente: <https://es.scribd.com>)

Característica	PLC	DCS
Año de introducción al mercado	En los 60s	1975
En remplazo de...	Relés electromagnéticos	Controladores neumáticos y de un lazo de control
Aplicación clásica	Industria automotriz	Refinería
Tipo de control	Discreto	Regulatorio (analógico)
Capacidad de redundancia	Si, con desafíos	Si
Aproximación ingenieril	Programación	Configuración
Interface del operador	Gráficos simples	Gráficos sofisticados
Tamaño / Layout	Compacto	Grande
Costo inicial	\$\$	\$\$\$

Tipo de sistema	“Abierto”	“Cerrado”(propietario)
HMI asociada	Necesita aplicaciones de terceros	Integrada en la base de datos única del sistema
Manejo de alarmas y mensajes	Deben ser configuradas. Se necesitan aplicaciones de terceros, en ocasiones	Sistema optimizado para la presentación de alarmas, mensajes y diagnósticos
Cambios o modificaciones en el programa	Si, en offline	Si, offline y online
Lenguaje / Método de programación	Sencillo	Mediana complejidad
Requerimientos de mantenimiento (correctivo y preventivo)	Casi nulo	Casi nulo
Necesidad de capacitación para diagnóstico y mantenimiento	Mediana	Alta
Capacidad de almacenamiento de registros e históricos	Si, con la ayuda de periféricos	Si
Redes de comunicación asociadas	Redes industriales. A veces, propietarias (Fielbus, Modbus, CAN, HART, etc.)	LAN, Ethernet
Tipos de sensores / actuadores asociados	Simples	Inteligentes

3 Desarrollo del proyecto

El desarrollo mismo del proyecto consiste en el estudio, propuesta y análisis para el cambio de un sistema PLC en un sistema DCS. Para entender mejor el desarrollo de este proyecto, es que se hará una descripción detallada de los componentes que se usarán en el mismo.

3.1 Descripción de componentes del sistema DCS

El sistema a desarrollar, implica la conexión de elementos con tecnología DCS, en un gabinete especializado llamado Marshalling Panel. De esto, se puede deducir que todos los elementos considerados, y su conexión, deben ser lo más segura y confiable posible. Además de mencionar que el ambiente en donde se instalará este sistema, es un ambiente minero.

Se deben realizar las conexiones entre los componentes del mismo, siguiendo las más estrictas normas de seguridad y confiabilidad posibles.

3.1.1 Marshalling Panel

Es un tablero mecánico de puntos de conexiones, agrupación de entradas y salidas. Se utiliza como interfaz entre los dispositivos de campo y el panel de control DCS, este se muestra en la Figura 3-1.



Figura 3-1. Marshalling Panel, vista exterior e interior (fuente: www.indiamart.com).

En el panel se puede identificar fácilmente las entradas o las salidas. Un diagnóstico fácil se puede hacer en caso de hallazgo de fallas.

Una razón más práctica para usar un panel de Marshalling, se hace aparente si se imagina un cable múltiple que viene del campo (bus de campo o planta industrial) y que está conectado directamente a las tarjetas de Entrada-Salida de un DCS. Siempre que se deba realizar algún tipo de mantenimiento, prueba, verificación; hay que pensar en el riesgo de interferir directamente en una tarjeta Entrada-Salida simplemente para abrir un circuito de bucle. Existiría el riesgo para tocar otra entrada, perder un tornillo y muchas otras situaciones que podrían poner en peligro la integridad de toda la tarjeta de Entrada-Salida.

Una vez que las conexiones entre todas las tarjetas de Entrada-Salida y un panel de Marshalling se realizan, se comprueban e identifican, no se tendrá que lidiar nuevamente con el panel Entrada-Salida, lo que significa menos riesgo y un lugar adecuado para realizar tareas de mantenimiento y prueba. Habrá conectores, fusibles, aisladores y todo lo que el proyecto especifique.

Las funciones del Marshalling panel se especifican a continuación:

- Acondicionamiento de señal
- Terminación
- Aislamiento de señal
- Fuente de Alimentación de dispositivos de campo

Los beneficios de este panel son:

- Menos riesgo
- Mayor Flexibilidad
- Capacidades para cambiar Entradas-Salidas tardías con poco esfuerzo
- Menos cableado e instalación más sencilla

Desde el panel Marshalling las señales de E / S son comunicadas al sistema CPU / Controladores a través de acondicionadores de aislamiento de señal. En el panel de Marshalling se puede identificar fácilmente la entrada o salida y se puede hacer un fácil diagnóstico en caso de hallazgo de falla. Este panel ahorra mucho costo de cable y es fácil para el personal de mantenimiento rastrear el enrutamiento del cable y encontrar fallas.

En la Figura 3-2, se muestra la conexión general simbólica del Marshalling Panel, y como éste comunica sus resultados al mundo exterior mediante el soporte físico que brinda. Nótese de la Figura 3-2, que la primera etapa de este sistema es la interfaz hombre-máquina; la cual consiste en la interacción de las personas con el sistema, a través de pantallas, teclados o dispositivos de comunicación. Estas acciones son observadas e interpretadas por el controlador que comanda acciones de entrada de información hacia las personas, o salidas de datos hacia los actuadores de campo.

Los actuadores de campo son comandados por tarjetas electrónicas especiales las cuales se montan en el panel DCS.

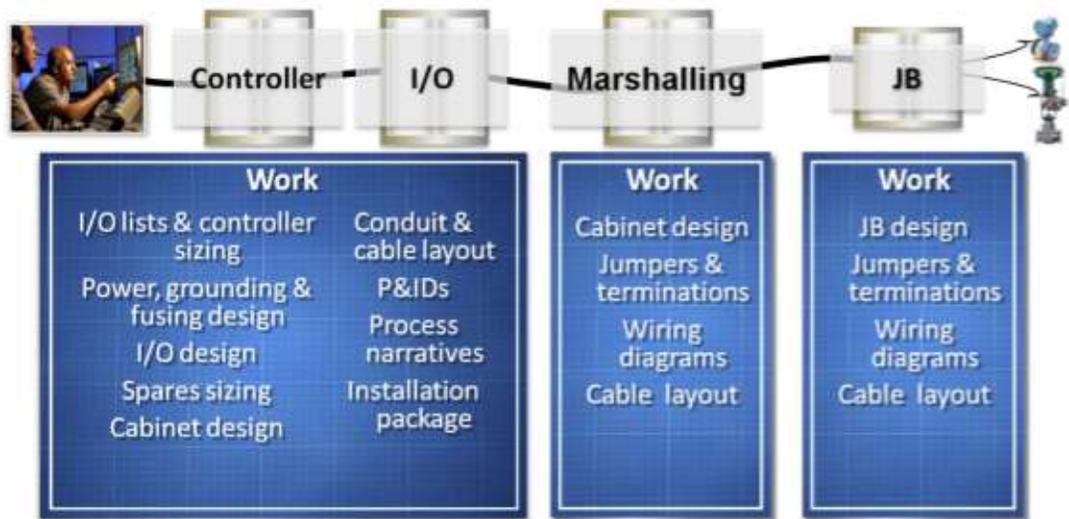


Figura 3-2. Diagrama general simbólico de conexión del Marshalling panel ([4]).

3.1.2 Tarjeta de salida digital modelo CC-SDOR01

Es una tarjeta digital de salida que extiende la aplicación de otras salidas digitales mediante el uso de relés electromecánicos en miniatura. Esta tarjeta se muestra en la Figura 3-3.



Figura 3-3. Tarjeta CC-SDOR01 (Fuente: www.ebay.com).

Esta tarjeta envía una señal digital de comando al dispositivo de campo, la cual puede accionar o apagar un dispositivo como un motor, luz, accionamiento, etc. La tarjeta de salida digital consta de 32 canales separados en dos bloques (16 canales respectivamente), lo cual le permite comandar o accionar, de forma independiente, hasta 32 dispositivos diferentes. Cabe notar que el funcionamiento de la tarjeta se provee con protección contra altos voltajes, y de aislamiento galvánico entre las etapas de control y de accionamiento.

En la Figura 3-4, presentada en la página siguiente, se muestra el diagrama general de esta tarjeta.

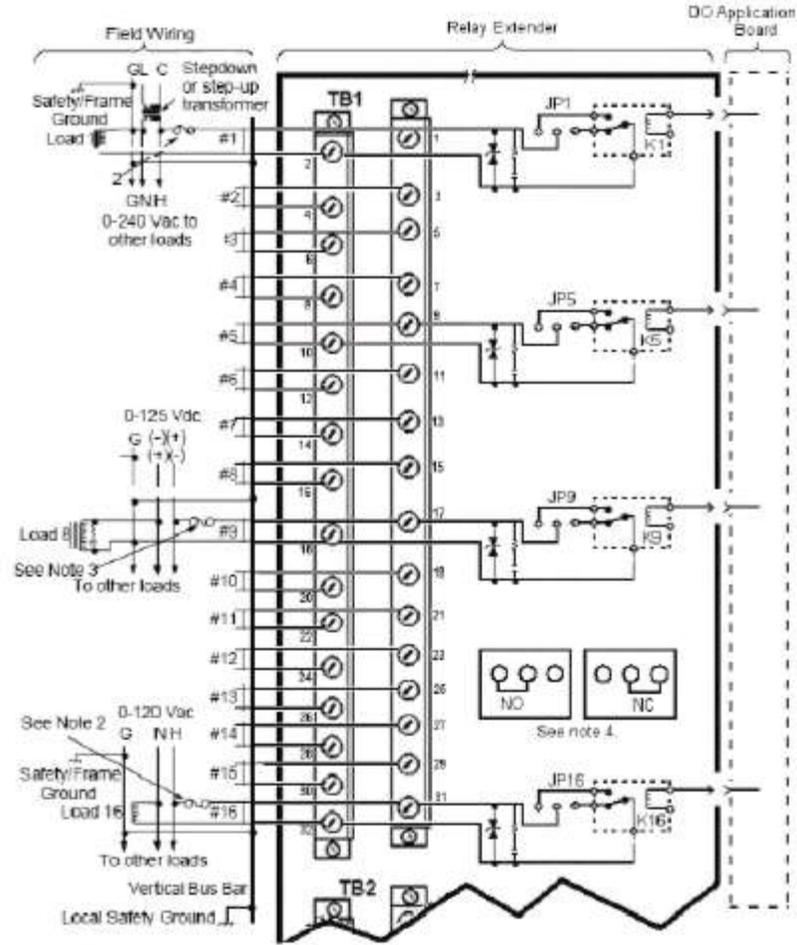


Figura 3-4. Diagrama general simbólico de la tarjeta CC-SDOR01 ([5]).

Nótese de la Figura 3-4 que la tarjeta puede comandar señales con voltajes desde 0[V] a 250[V], y estos voltajes pueden ser en corriente directa o alterna.

En la Figura 3-5 se muestra el diagrama simbólico de la conexión de las borneras de salida para la tarjeta digital CC-SDOR01. Nótese como la carga, y el sistema DCS se conecta a la tarjeta.

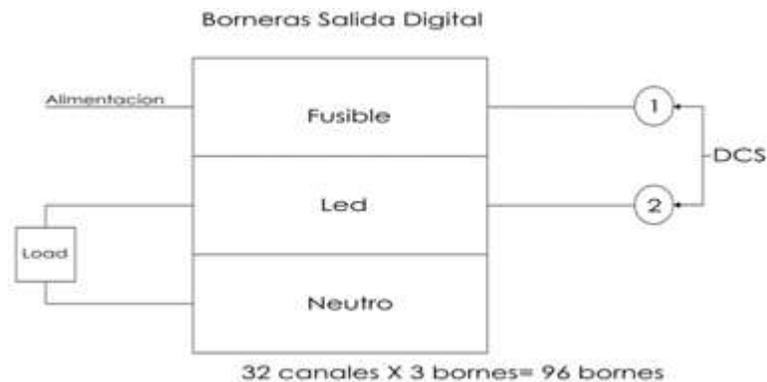


Figura 3-5. Conexión simbólica de la tarjeta CC-SDOR01.

3.1.3 Tarjeta de entrada digital modelo CC-TDI110, CC-TDI120, CC-TDI220

La tarjeta de entrada digital consta de 32 canales separados en dos bloques (16 canales respectivamente). La señal digital es emitida del dispositivo de campo a la tarjeta, un ejemplo de esto es una alarma de temperatura. En la Figura 3-6 se muestra esta tarjeta.

La Figura 3-6 derecha muestra la conexión que deben realizar los dispositivos de campo con salidas digitales a esta tarjeta. Nótese que el voltaje permitido de entrada puede ser tan alto como 220 [Vrms]. Este voltaje se reduce mediante resistencias externas, para luego ser enviadas de forma segura a la red de datos del sistema DCS, mediante un optoacoplador de salida, el cual brinda aislación galvánica total.

La conexión hacia la red de datos del sistema DCS, la cual es normalmente una red Ethernet, se realiza por los típicos conectores RJ-45, las cuales se observan en la zona inferior izquierda de la Figura 3-6.

Nótese de la Figura 3-6 izquierda, que la tarjeta de CC-TDI110 está diseñada para insertarse en ella, o recibir entradas digitales de un dispositivo de campo. Cuando se conecta el dispositivo de campo, este se ve de forma similar a lo mostrado en la Figura 2-7 del capítulo anterior.

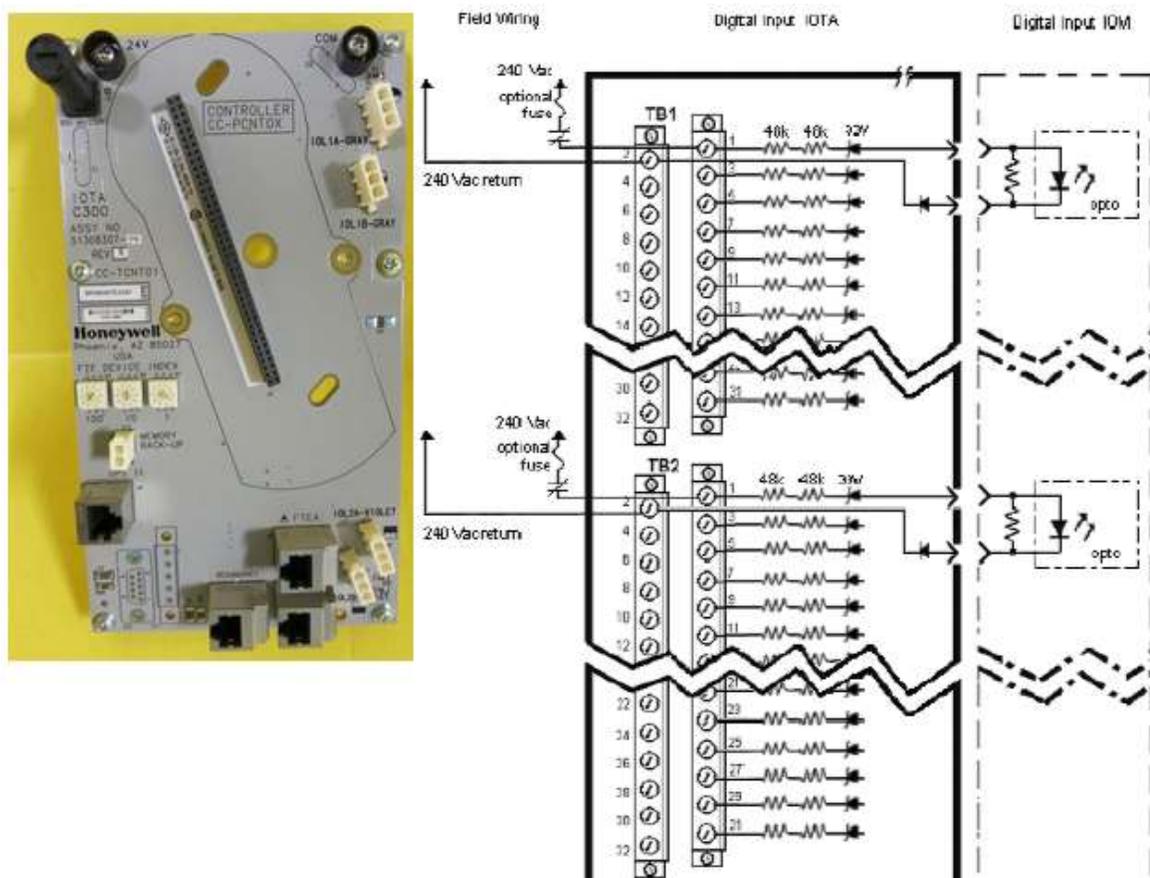


Figura 3-6. Tarjeta de entrada digital CC-TDI110, izquierda real, derecha diagrama[5].

En la Figura 3-7 se muestra la conexión general que debe hacerse para obtener la entrada digital de forma correcta para esta tarjeta.



Figura 3-7. Conexión general de la tarjeta CC-TDI110.

3.1.4 Tarjeta de entrada análoga modelo CC-TAIX01, CC-TAIX11

La Tarjeta de entrada análoga consta de 16 canales. Los canales 1 al 12 no requiere alimentación externa, y los canales 13 al 16 requiere alimentación externa. Esta tarjeta, por ejemplo, recibe información de un transmisor o sensor de presión analógico. En la figura 3-8 se muestra esta tarjeta.

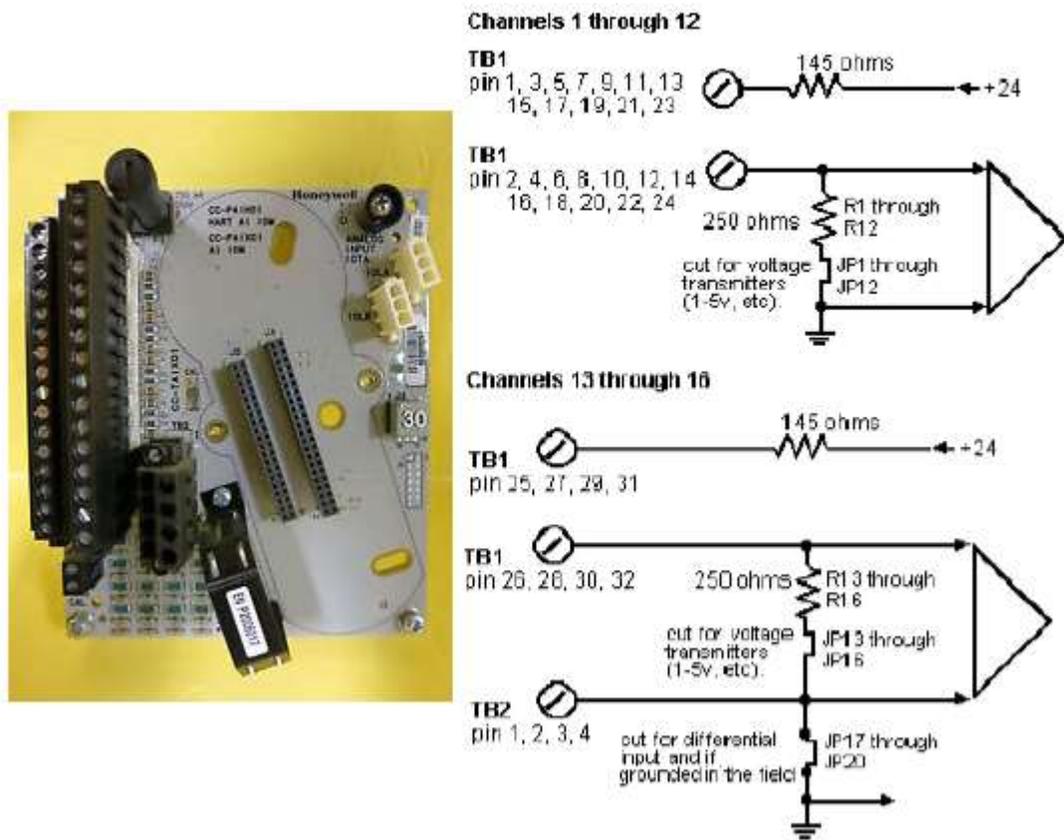


Figura 3-8. Tarjeta CC-TAIX01, izquierda vista física, derecha diagrama de conexión[5].

La parte derecha de la Figura 3-8 muestra el diagrama eléctrico de conexión típica para cada entrada analógica. Nótese la separación entre los diferentes tipos de canales.

Los canales 1 al 12 ocupan 3 bornes por canal en el Marshalling panel y los canales 13 al 16 ocupan 4 bornes por canal en el Gabinete, debido al hilo adicional para la alimentación de la entrada análoga. En la Figura 3-9 se muestra la situación para este caso.

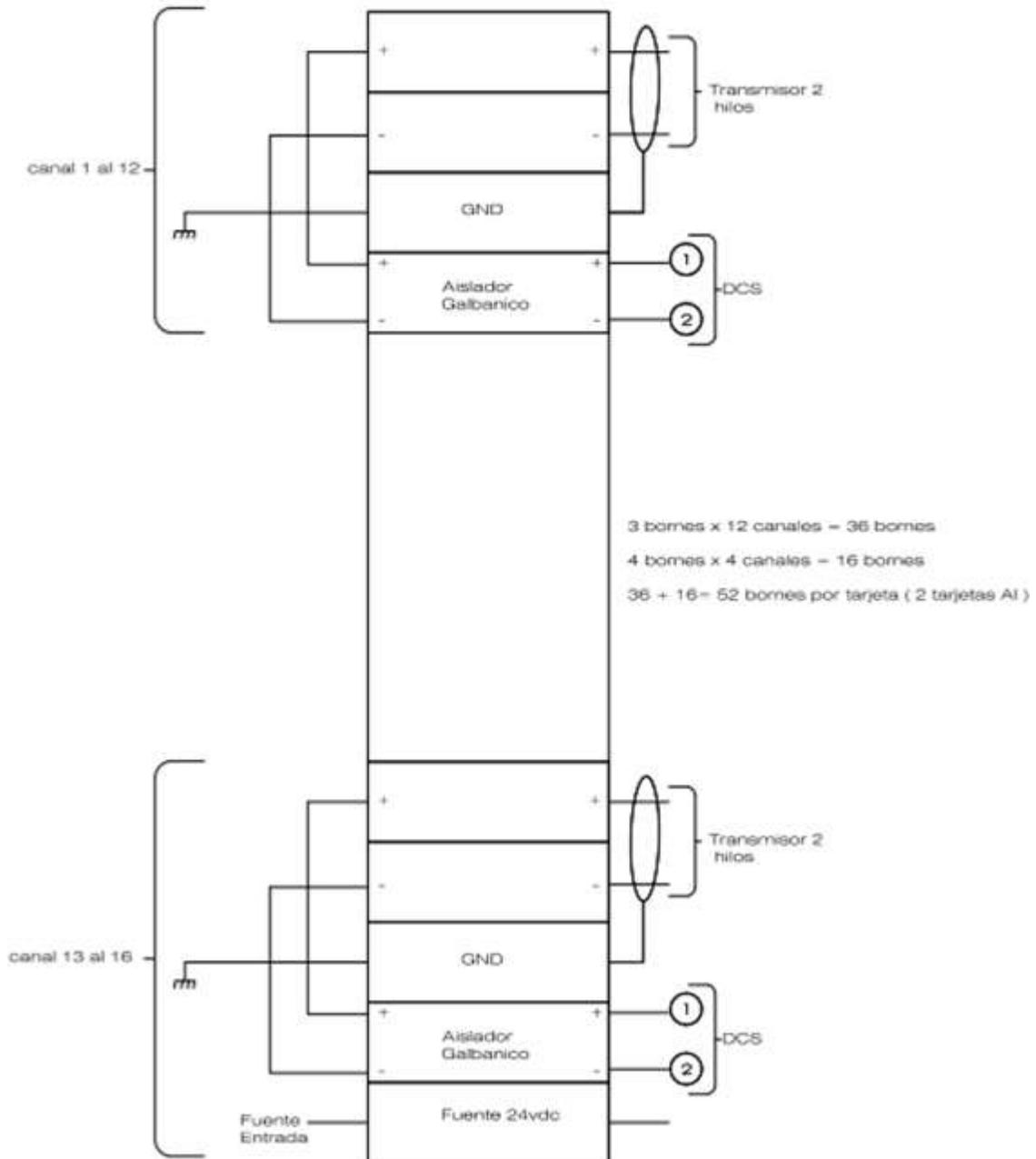


Figura 3-9. Diagrama de bornes de conexión de la tarjeta CC-TAIX01 al panel.

Nótese de la Figura 3-9 que la conexión a los dispositivos de campo está hecha en el lado derecho de la figura por los terminales de los transmisores 1 y 2 que se conectan al panel. Los terminales 1 y 2 se conectan a la red DCS por medio de aisladores que los protegen de voltajes dañinos.

3.1.5 Tarjeta de salida análoga modelo CC-TAOX01, CC-TAOX11, CC-TAON01

La tarjeta de salida análoga consta de 16 canales. Esta tarjeta envía una señal de mando análoga a un dispositivo de campo, un ejemplo de esto podría ser variar la frecuencia analógica de un motor. En la Figura 3-10 se muestra la conexión general.

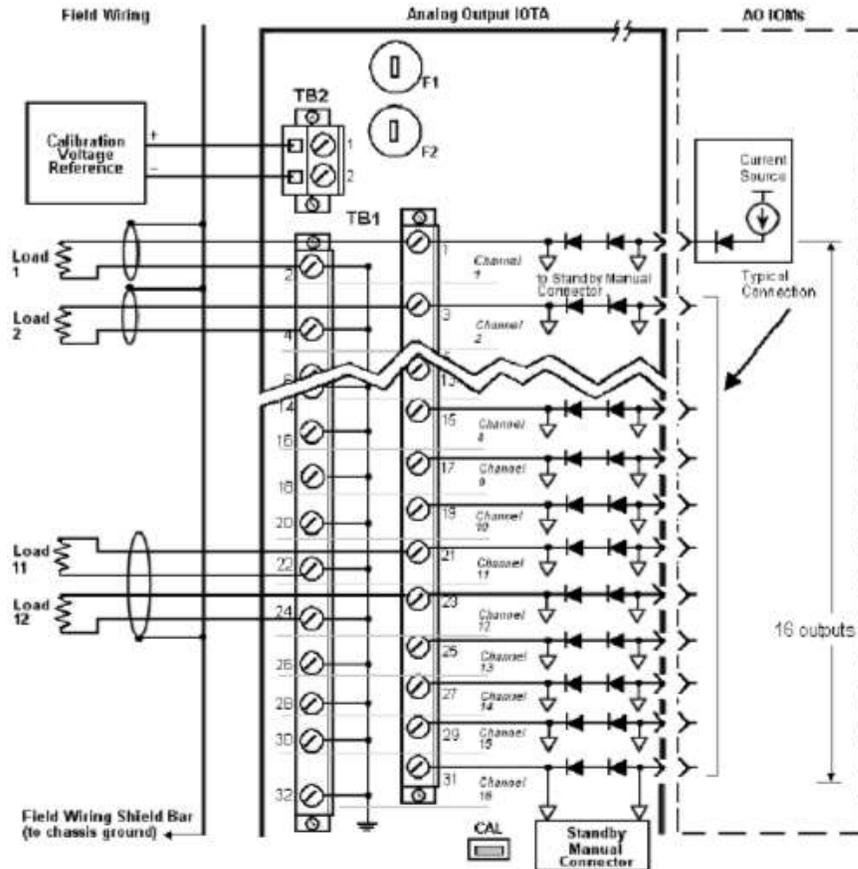


Figura 3-10. Diagramas de conexión de la tarjeta CC-TAOX01 [5].

En la Figura 3-11 se muestra la conexión al gabinete de cada elemento de salida analógica, junto a la vista física de la placa.

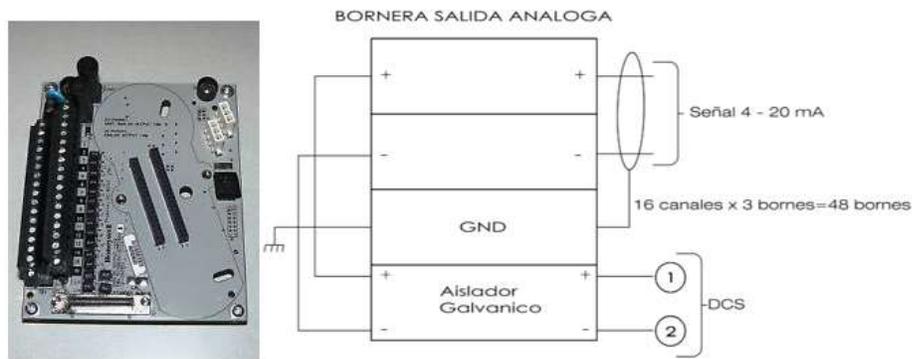


Figura 3-11. Diagramas de conexión digital de la tarjeta CC-TAOX01 (fuente: ebay.com).

3.2 Conexión general de componentes

En la subsección anterior se describieron los componentes a utilizar en la conexión del sistema, los cuales incluyen al Marshalling Panel y a las tarjetas electrónicas que se conectan, de forma física, al panel. Estas tarjetas electrónicas son de entrada y de salida, y digitales y análogas, juntando un total de 4 tipos, los cuales, no han sido descritos aún en su conexión.

En esta sección se describe la conexión general de los componentes, y la manera especial y correcta de conexionado.

3.2.1 Cableado estructurado

El método de cableado estructurado introduce la idea de organizar en forma sencilla, modular, lógica y sistemática, todas las conexiones físicas y lógicas de las redes de comunicaciones. Implica contar con instalaciones de comunicaciones de los edificios, en las que todos los cables, terminales y accesorios (gabinetes, rosetas, paneles de interconexión, distribuidores, etc.) cumplen con los estándares fijados por la industria. Integra en una misma instalación física la infraestructura de soporte de los diversos servicios de comunicaciones y de control propios de un edificio o campus, tales como telefonía, transmisión de datos, audio, telecontrol, video, videoconferencia.

El sistema de cableado estructurado garantiza que la instalación integral reúne los requisitos de ancho banda, inmunidad al ruido, distorsión, interferencia y confiabilidad que requieren los diversos servicios.

Las características del cableado estructurado son:

- Maneja redes de datos con diversidad de topologías y protocolos, y facilita la reubicación de usuarios.
- Reduce los costos de mantenimiento de la red.
- Posee gran flexibilidad para la expansión de la red.
- Permite instalar diversos servicios de manera integral: voz, datos, audio, control, vídeo.
- Es modular y puede reconfigurarse fácilmente de acuerdo con las necesidades cambiantes de la empresa o institución.
- Es sencillo de administrar y configurar por medio de software de administración de redes.
- Facilita la conectividad de equipos y tecnologías.

Comparación del Cableado Estructurado con el Tradicional

Las instalaciones de cableado tradicionales se ejecutan en una aplicación específica. Un tendido de cable en los ductos usualmente corresponde a la instalación de un solo servicio. Los cables diseñados para transmitir las señales de un determinado tipo de servicio, usualmente no son adecuados para transmitir las señales de otro tipo de servicio diferente.

El cableado tradicional tiene poca flexibilidad de migración y reubicación de usuarios y los servicios digitales de alta velocidad no toleran los empalmes, o uniones entre alambrados.

Cada nueva aplicación o nueva expansión normalmente requiere nuevos tendidos de cable, específicos para una sola tarea.

En la Figura 3-12 se muestra un ejemplo de cableado no estructurado. En la Figura 3-13 se muestra un ejemplo del uso del sistema de cableado estructurado.

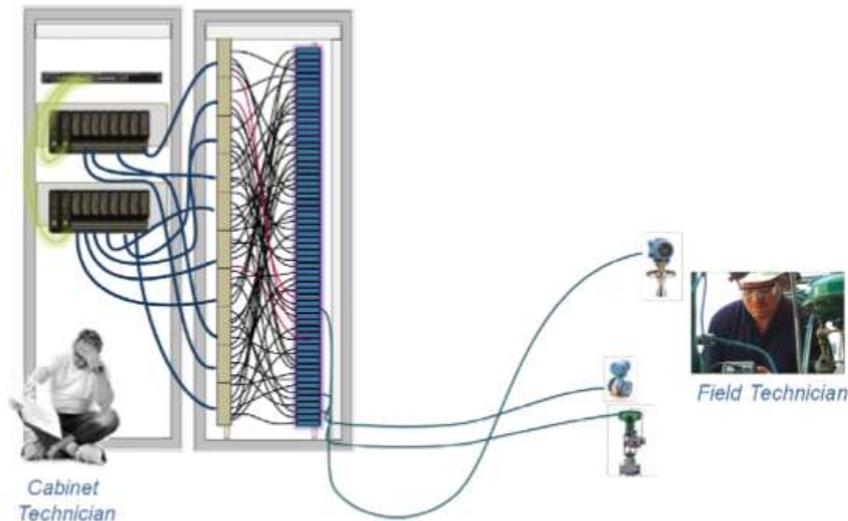


Figura 3-12. Ejemplo del cableado no estructurado ([4]).

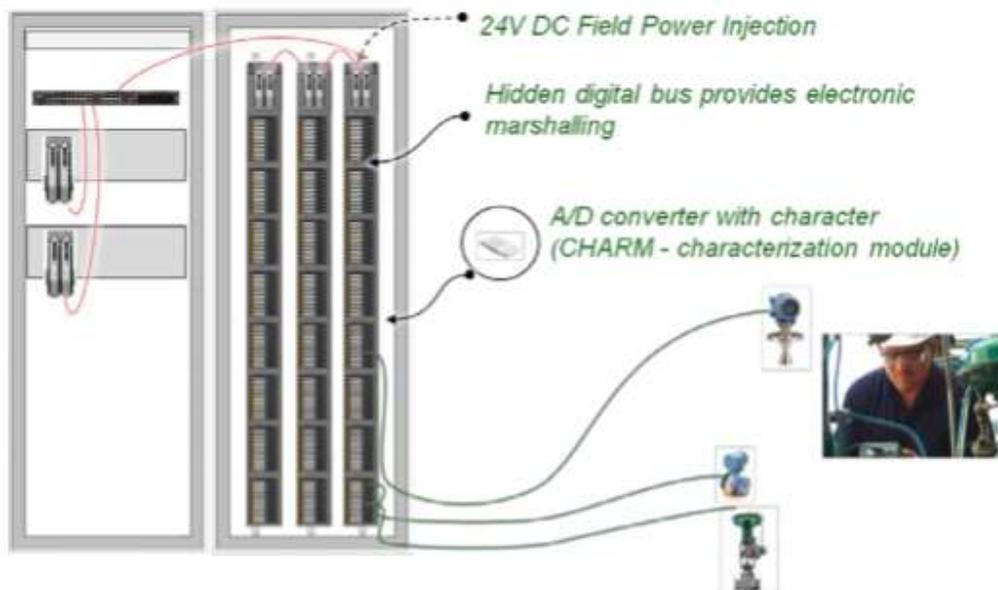


Figura 3-13. Ejemplo del uso del sistema de cableado estructurado ([4]).

Principales ventajas del cableado estructurado

Usar un único tipo de cable para todos los servicios de comunicaciones, abarata los costos y facilita la reubicación dinámica de los usuarios, ya que las nuevas conexiones se pueden configurar en unos minutos. Además, el costo de mantenimiento y de reubicación es mucho menor que en los cableados tradicionales, en los que además dicho costo aumenta con el tiempo de vida del cableado. También, al conectar nuevos equipos no se deben realizar nuevas instalaciones de cables.

En la Figura 3-14 se muestra una relación gráfica del costo de mantener diferentes tipos de cableados.

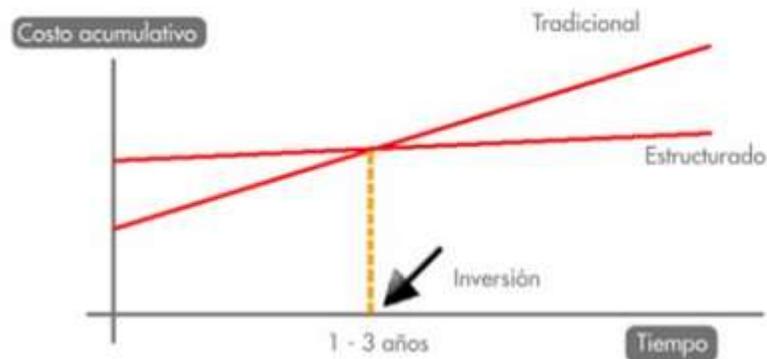


Figura 3-14. Relación de costos futuros de tipos de cableado (fuente: es.slideshare.net)

En la Tabla 3-1 se muestra los tiempos de vida de varios equipos con relación al cableado que se emplea en ellos. Nótese que el cableado tiene una duración del orden de 2 a 3 veces que el resto de los componentes, por lo tanto, es muy importante realizar un adecuado sistema de cableado, idealmente solo una vez. El sistema de cableado estructurado debe seguir normas para su implementación.

Tabla 3-1. Tiempo de vida de cableados y equipo.

Componente	Tiempo de vida
Cableado	18-25 años
PBX, Enrutador, Teléfono	7-12 años
Computadores maxi/mini	5-8 años
PC, PC-Notebook, Terminal	3-6 años
Software	1-3 años

3.2.2 Norma ISA

El conocimiento que se tiene sobre la instrumentación de un proceso se vierte en el plano llamado “diagrama de proceso e instrumentación”. En Chile se usa de facto la simbología de la norma ISA para construir dicho plano.

En general, al realizar un plano de instrumentación, a cada instrumento, se le asigna un icono consistente en un círculo que contiene un código alfanumérico llamado “TAG NUMBER”.

Identificación Funcional del Instrumento [6]:

- Todas las letras de la Identificación funcional son mayúsculas.
- Las letras a emplear no deben ser más de cinco.
- La primera letra es para designar la variable bajo medida, y una o más letras que permiten establecer la función que ejecuta el instrumento.

En las siguientes dos figuras se presentarán la forma en que se construye la sigla que identifica a los elementos en un diagrama de proceso e instrumentación. Esta información está agrupada en la Figura 3-15 en esta página, y en la Figura 3-16, en la siguiente página.

PRIMERA LETRA		LETRAS SIGUIENTES		
VARIABLE MEDIDA O INICIO DE INFORMACIÓN	LETRA MODIFICANTE	FUNCION DE LECTURA PASIVA	FUNCION DE SALIDA	LETRA MODIFICANTE
A	ANALISIS	ALARMA		
B	FLAMA O QUEMADOR	LIBRE	LIBRE	LIBRE
C	CONDUCTIVIDAD (ELÉCTRICA)		CONTROL	
D	DENSIDAD O PESO ESPECÍFICO	DIFERENCIAL		
E	VOLTAJE	ELEMENTO PRIMARIO (SENSOR)		
F	FLUJO	RAZÓN, FRACCIÓN		
G	CALIBRE (ESPESOR)	VISOR		
H	MANUAL			ALTO
I	CORRIENTE	INDICACION		
J	POTENCIA	EXPLORACIÓN (SCAN)		
K	TIEMPO		ESTACIÓN DE CONTROL	
L	NIVEL	LUZ PILOTO		BAJO
M	HUMEDAD			MEDIO O INTERMEDIO

Figura 3-15. Construcción de siglas para un elemento, parte 1 [6].

N	LIBRE		LIBRE	LIBRE	LIBRE
O	LIBRE		ORIFICIO / RESTRICCIÓN		
P	PRESION O VACÍO		PUNTO DE PRUEBA		
Q	CANTIDAD	INTEGRAR O TOTALIZAR			
R	RADIACTIVIDAD		REGISTRAR		
S	VELOCIDAD O FRECUENCIA	SEGURIDAD		INTERRUPTOR	
T	TEMPERATURA			TRANSMISOR	
U	MULTIVARIABLE		MULTIFUNCIÓN	MULTIFUNCIÓN	MULTIFUNCIÓN
V	VISCOSIDAD			VÁLVULA	
W	PESO O FUERZA		TERMOPOZO (RTD, TERMOCUPLA, ETC)		
X	SIN CLASIFICAR		SIN CLASIFICAR	SIN CLASIFICAR	SIN CLASIFICAR
Y	LIBRE			(12 RELÉ, CONVERSION, COMPUTADOR)	
Z	POSICIÓN			ACTUAR, OPERAR O ELEMENTO FINAL DE CONTROL	

Figura 3-16. Construcción de siglas para un elemento, parte 2[6].

En las figuras siguientes, se hará notar sobre casos puntuales de siglas de acuerdo al número de letras que lleva su nombre. En la Figura 3-17 se muestra el caso particular de 2 letras.

TT	Transmisor de temperatura.
LC	Control de nivel
FI	Indicador de flujo
GR	Registrador de espesor
ME	Elemento primario de humedad
KS	Switch por tiempo

Figura 3-17. Siglas de elementos de 2 letras de la norma ISA[6].

En la Figura 3-18 se muestra el caso particular de siglas de 3 letras.

LIC	Caso (a)	Controlador e indicador de nivel
ZRK	Caso (a)	Estación de control y registrador de posición
TDI	Caso (b)	Indicador de diferencial de temperatura
JSH	Caso (c)	Switch valor alto de potencia
JSL	Caso (c)	Switch valor bajo de potencia

Figura 3-18. Siglas de elementos de 3 letras norma ISA[6].

En la Figura 3-19 se muestra el caso particular de siglas de 4 letras.

PDIC	Caso (ii)	Controlador, e indicador de presión diferencial
TDET	Caso (ii)	Transmisor con elemento primario de diferencial de temperatura
JISH	Caso (iii)	Switch por nivel alto e indicador de potencia
PDAL	Caso (iv)	Alarma de nivel bajo de presión diferencial

Figura 3-19. Siglas de elementos de 4 letras en norma ISA[6].

En la Figura 3-20 se muestra el caso particular de siglas de 5 letras.

PDIAM	Alarma de nivel medio e indicador de presión diferencial
TDASH	Switch por nivel alto y alarma de diferencial de temperatura
FQRAL	Alarma de nivel bajo y registrador de totalizado de flujo

Figura 3-20. Siglas de elementos de 5 letras[6].

3.3 Diagrama de conexión general del sistema DCS

El diagrama de conexión general combina o conecta los elementos descritos en la sección 3.1. Esta conexión puede ser eléctrica o electrónica y permite entender los comandos y dependencias entre componentes. Esta conexión también puede entenderse a través de un diagrama físico, el cual permite entender las relaciones de distancias relativas de los componentes que se conectan, de forma lejana; como desde el operador hasta el actuador más alejado de él, o de forma cercana; como por ejemplo la conexión entre tarjetas electrónicas en el interior del Marshalling Panel.

En la Figura 3-21 se muestra la conexión general actual (hasta la fecha de finalización de informe), entre los dispositivos del sistema de comunicación.

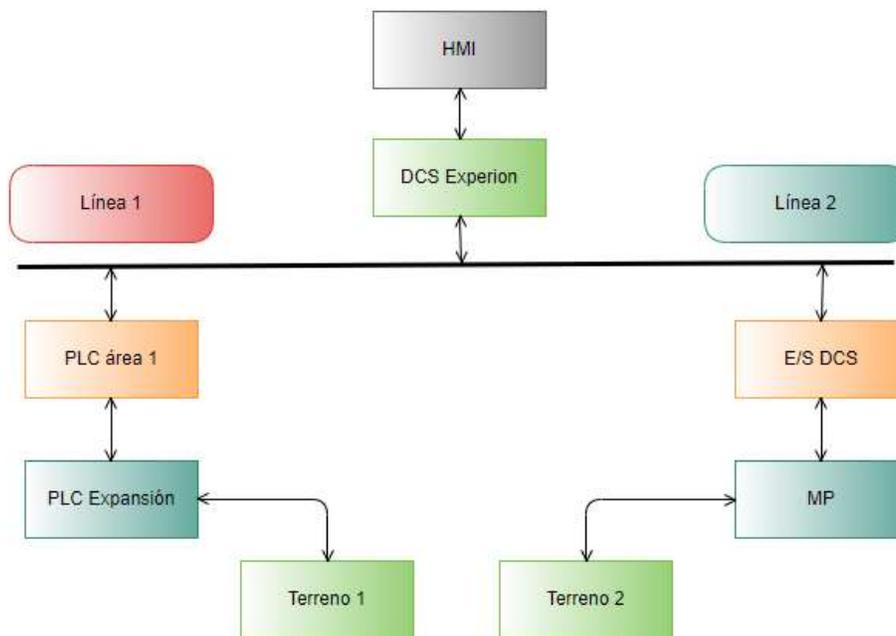


Figura 3-21. Diagrama general de la conexión actual para las líneas del chancador Colón.

Nótese de la Figura 3-21, que se tienen 2 clases de conexiones (hasta el momento de realización de este informe) en el chancador Colón. Una conexión en base a PLC's en una línea de chancado, y otra conexión en base entradas y salidas (E/S) desde un sistema DCS en la otra línea de chancado. Nótese también la existencia de un interfaz humano –máquina (HMI en inglés), la cual se comunica con los dispositivos de campo, que son los dispositivos que existen en la faena minera misma, mediante un controlador llamado DCS Experion, el cual se comunica mediante una línea de datos general, marcada con color negro.

Cabe mencionar que los sistemas DCS tienen incorporado sistemas de redundancia los cuales permiten ejecutar procesos desde más de un procesador, en caso que se requiera, así en caso de falla, un procesador en buen estado responderá a los requerimientos de otro averiado.

Lo que se presenta en la Figura 3-21 es la conexión actual de los componentes del chancador Colón. Lo que se requiere; el cambio de sistema PLC a sistema DCS en la línea 1 se muestra en la Figura 3-22, en ella se presenta la conexión esperada de los elementos cuando el sistema esté conectado.

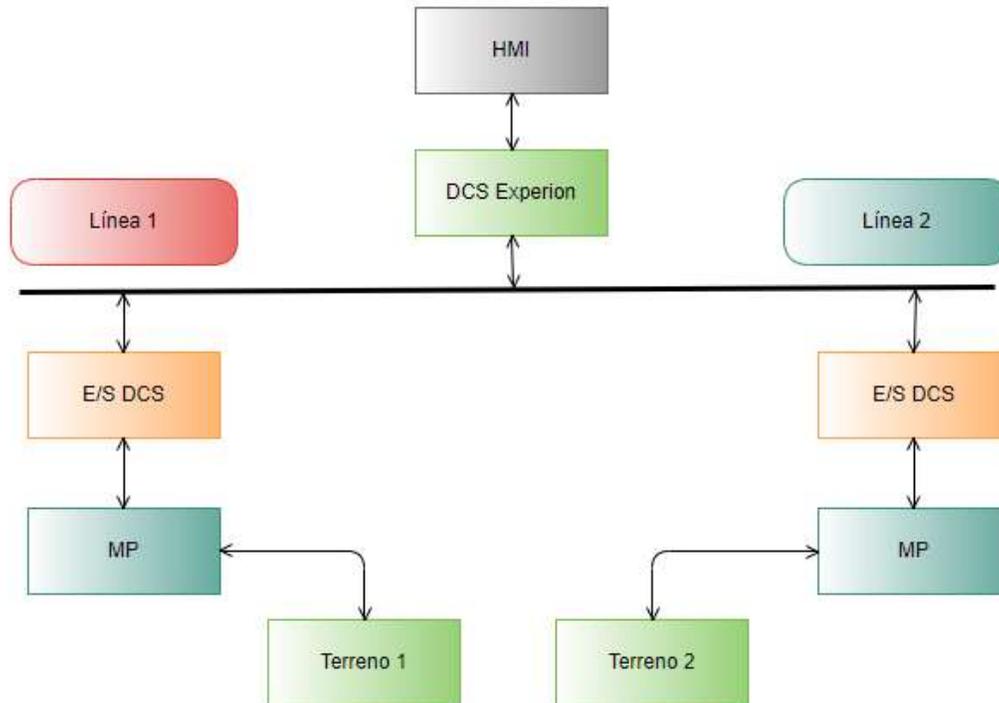


Figura 3-22. Diagrama general de la conexión esperada para las líneas del chancador Colón.

Nótese de la Figura 3-22, que se tiene un sistema DCS en la línea 1, similar al mostrado en la línea 2, el cual se implementa y se soporta en el gabinete Marshalling, y se conecta a través del sistema de control unificado Experion de la empresa Honeywell. Este sistema DCS para la línea 1, es el que se construirá. En las siguientes secciones, se describirán las conexiones futuras de los elementos presentados en este capítulo, y que se deben desarrollar para implementar el sistema DCS en la línea 1 del chancador Colón.

3.3.1 Diagrama de conexión de las tarjetas analógicas

Este tipo de conexión agrupa a las tarjetas de campo analógicas, las cuales son normalmente los sensores que entregan un nivel de voltaje o de corriente en relación con la variable física que miden, y las tarjetas marca Honeywell (ver sección 3.1), y al Marshalling Panel. Todo sistema robusto debe contar con medidores de elementos análogos.

Los elementos analógicos pueden ser del tipo de bucle de voltaje, donde el valor del elementos o sensor de campo a medir entrega un nivel de voltaje, entre 0 voltios y el voltaje de alimentación, y que guarda relación con el valor de la variable física medida. También pueden ser del tipo bucle

de corriente, donde normalmente el sensor está en un valor de corriente entre los 0 y 20 mili Amperes, cuya amplitud depende de la variable física a medir.

Se ve en la Figura 3-23, una parte del circuito de interconexión de la tarjeta entrada analoga AI-CC-TAIX01, la cual consta de 16 canales. Para el caso particular de esta figura, solo se muestran 8 canales solamente, los cuales reciben entradas analógicas de 5 dispositivos de campo. Nótese de la Figura 3-23 que la conexión se hace a través del panel Marshalling, el cual da soporte electro-mecánico a la conexión.

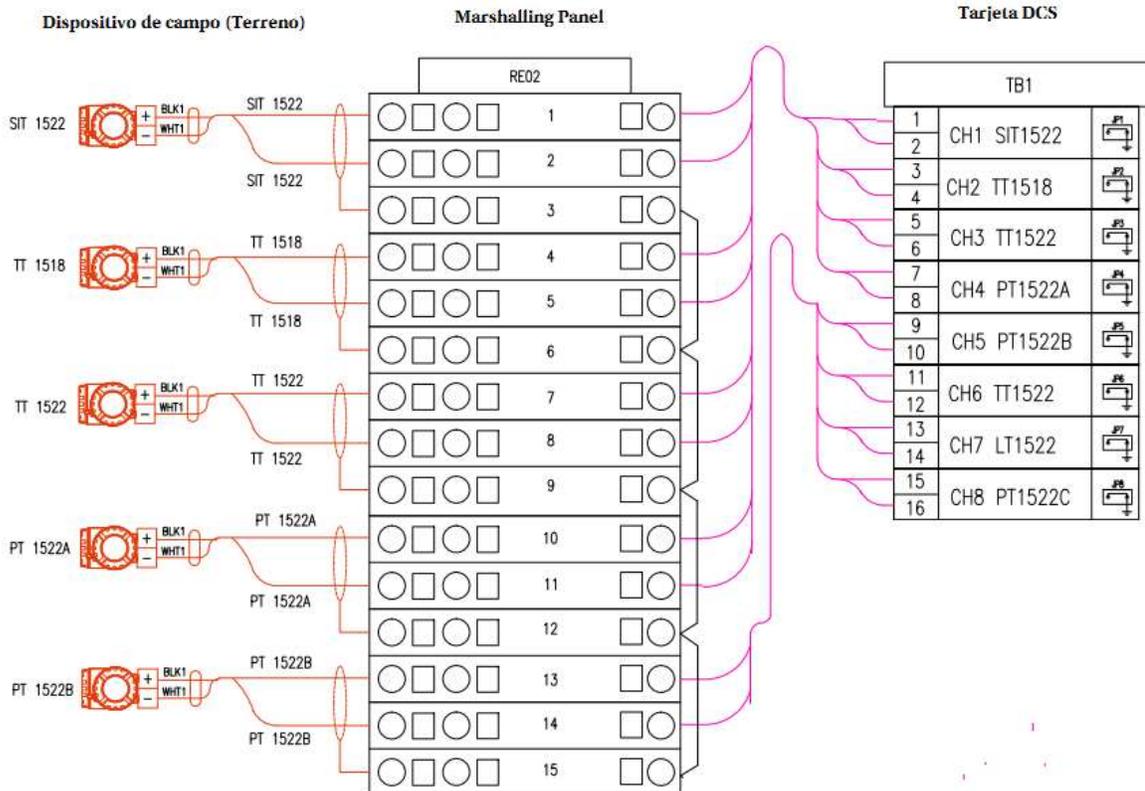


Figura 3-23. Parte del interconexión de la tarjeta AI-CC-TAIX01.

El interconexión presentado en la Figura 3-23 utiliza cable apantallado analógico, de 4 pares y calibre 18 AWG de instrumentación. Nótese, de la parte izquierda y central de la Figura 3-23, que estos cables son protegidos contra el ruido exterior mediante una conexión común del apantallado de los cables, a la tierra de protección eléctrica.

Para el diagrama de la Figura 3-23, se utilizan los siguientes indicadores:

- SIT 1522: Transmisor indicación de velocidad o frecuencia.
- TT 1518: Transmisor de temperatura.
- TT 1522: Transmisor de temperatura.
- PT 1522A: Transmisor de presión o vacío.
- PT 1522B: Transmisor de presión o vacío.

Existen otros sensores de salida analógica en el sistema de la línea 1, ya que existen 16 canales disponibles en esta tarjeta de salida análoga.

El sistema de interconexión de entrada analógica está compuesto, en su más baja categoría, por los dispositivos de campo, los cuales pueden ser sensores o transmisores analógicos. Después se cuenta con una interfaz común de conexión, al Marshalling Panel, y finalmente en su más alta categoría al sistema DCS, que en la Figura 3-23 es la tarjeta de entrada analógica.

A continuación se muestra el circuito de interconexión de la tarjeta salida analógica AO-CC-TAOX01 en la Figura 3-24. Esta consta de 16 canales, para 16 dispositivos diferentes. Para el caso particular de este proyecto, se tiene solamente un dispositivo de campo controlado análogamente, este se conecta al canal 1 de la tarjeta DCS. Los otros canales de la tarjeta AO-CC-TAOX01 se conectarán de forma mecánica al panel Marshalling para su posible utilización futura.

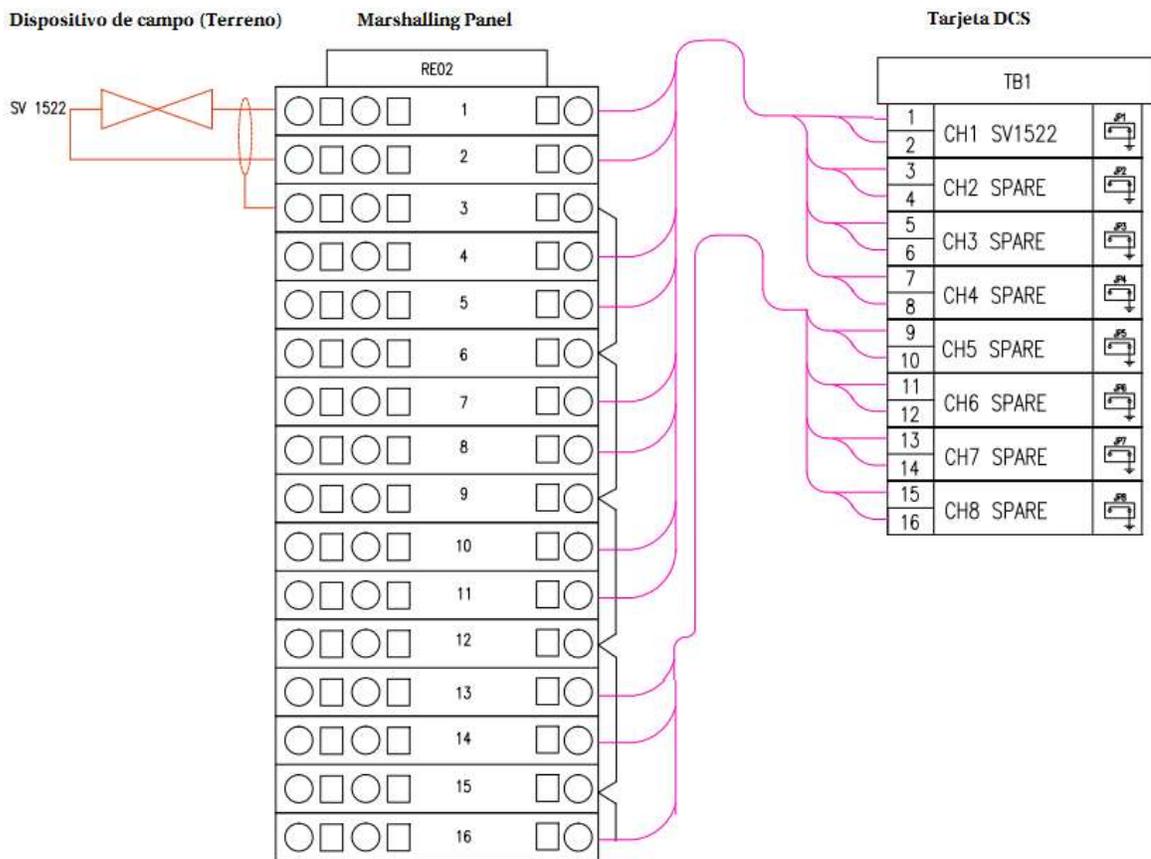


Figura 3-24. Parte del interconexión de la tarjeta salida analógica AO-CC-TAOX01.

Este interconexión utiliza el mismo tipo de cable apantallado análogo 4 pares 18 AWG, al igual que la tarjeta de entrada análoga presentada en la Figura 3-23. Utiliza el identificador SV 1522, el cual es un válvula de velocidad o frecuencia. El Sistema de interconexión de salida análoga esta compuesta, en su más baja categoría, por los dispositivos de campo, los que pueden ser actuadores. Luego, se tiene como interfaz común de conexión, al panel Marshalling y finalmente en su más alta categoría al sistema DCS.

3.3.2 Diagrama de conexión de las tarjetas digitales

En la Figura 3-25, se muestra parte de la conexión de la tarjeta de salida digital DO1-CC-SDOR01.

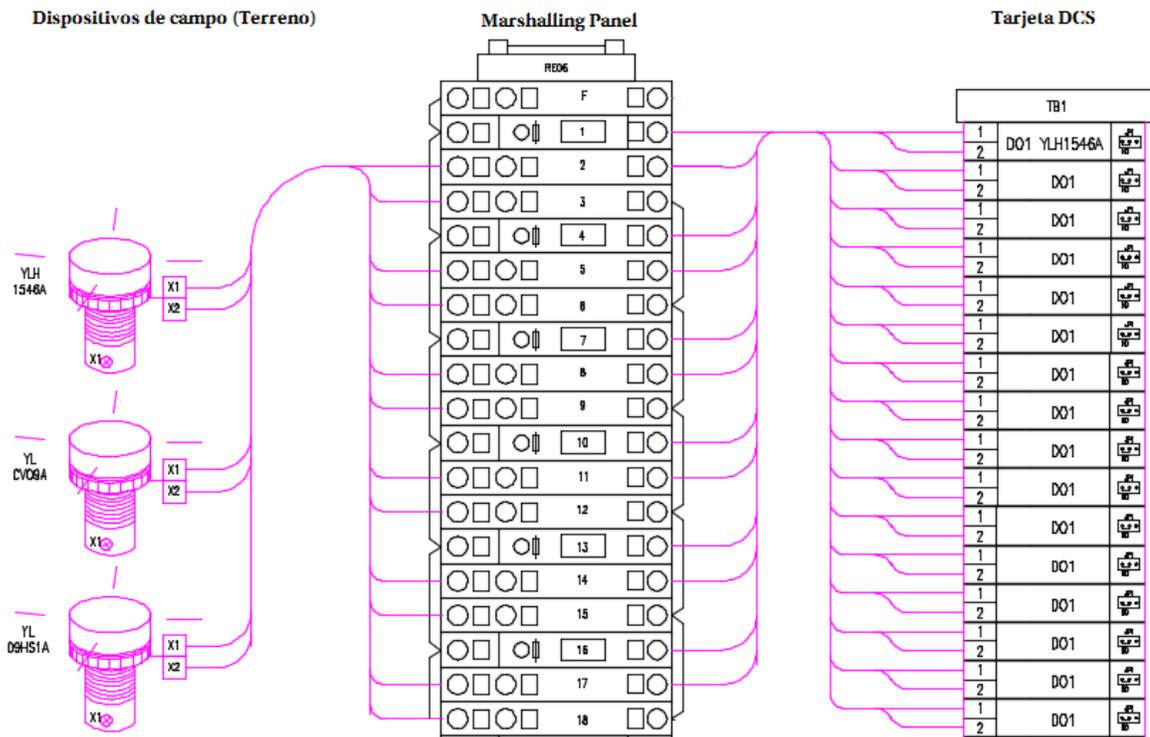


Figura 3-25. Parte del interconexión de la Tarjeta de Salida Digital DO1-CC-SDOR01.

En la Figura 3-26 se muestra el interconexión de la Tarjeta de Entrada Digital DI-CC-TDII10.

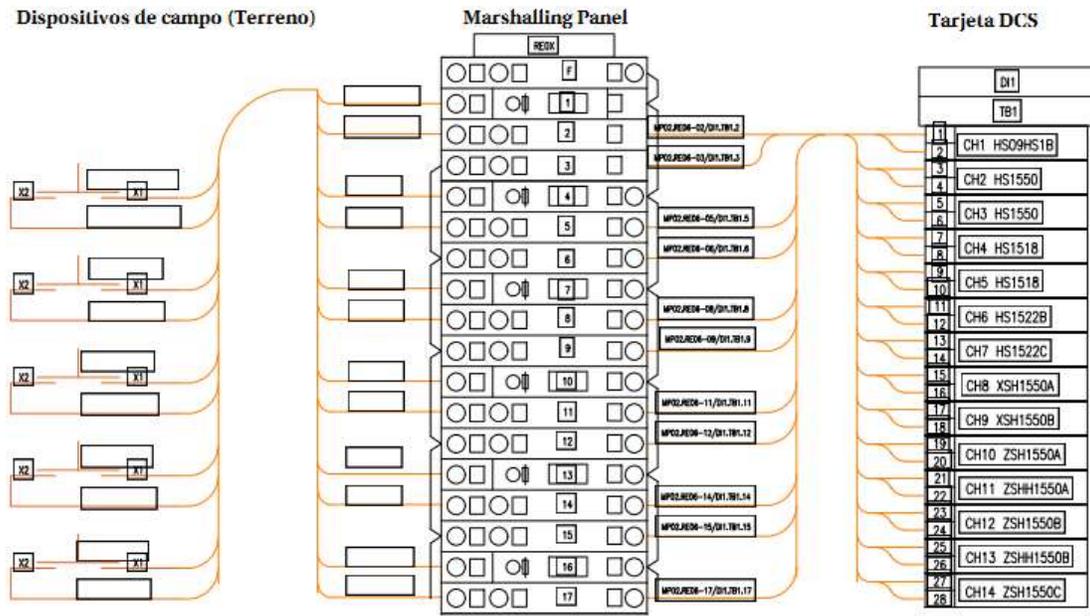


Figura 3-26. Parte de interconexionado de la Tarjeta de Entrada Digital DI-CC-TDI110.

4 Análisis económico del proyecto

El proyecto de la migración del sistema de control de la línea 1, mediante tecnología PLC a tecnología DCS, implica, de todas formas, una ganancia en la operación del chancador de la mina El Teniente. Este proyecto debe ser desarrollado con los mejores materiales disponibles del mercado, y con el cuidado que solo la mano de obra especializada puede brindar. Todo esto implica un desembolso no menor de capital.

La descripción de las tareas o elementos, cuya consecución impliquen un desembolso de dinero, junto con su respectivo análisis económico, es el objetivo de este capítulo.

4.1 Descripción del análisis económico

El análisis económico agrupa los conceptos a los elementos, físicos o de servicios, que implican un desembolso de dinero, y que se hace con el fin último de aprobar o descartar una inversión para este proyecto. Este análisis no es antojadizo, sino cuidadoso. Se basa en pasos secuenciales que son presentados en la Figura 4-1.

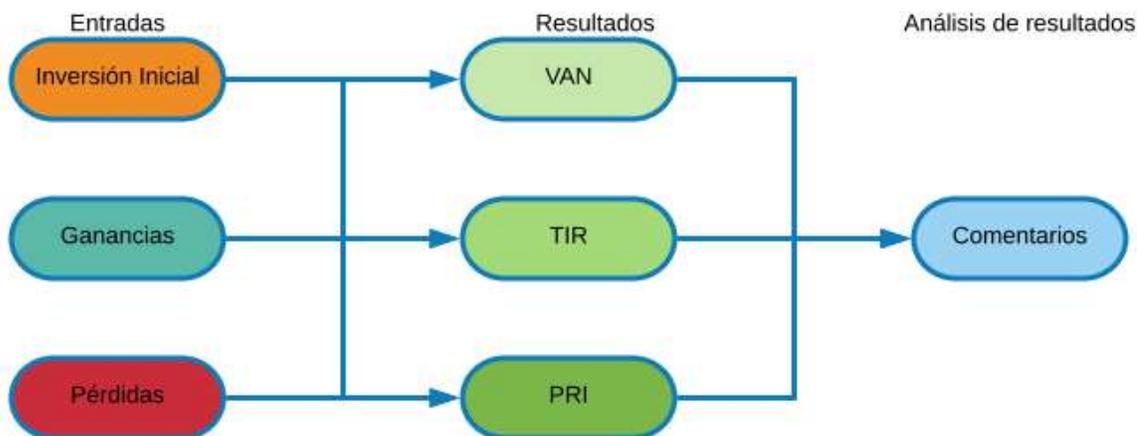


Figura 4-1. Diagrama de flujo del análisis económico.

Tal como se indica en la Figura 4-1, el análisis económico a desarrollar inicia con las descripciones de las entradas importantes del mismo, para luego obtener resultados importantes mediante herramientas económicas, y, por último, concluir y comentar estos resultados.

4.2 Descripción de las entradas del análisis económico

Las entradas son las variables económicas que sirven para realizar los siguientes análisis. Estas variables se pueden agrupar en inversión inicial, ganancias y pérdidas.

4.2.1 Inversión Inicial

La inversión inicial agrupa a los desembolsos de dinero que la empresa, CODELCO EL teniente, tendrá que desembolsar para dejar operativo la migración del sistema de control del chancador de la línea 1, basado en tecnología PLC, a tecnología DCS. La inversión inicial se compone de 2 ítems: Materiales para la migración al sistema DCS, y gasto en mano de obra calificada.

Materiales para la migración a un sistema de control basado en DCS

Los materiales para la migración a un sistema DCS se presentan en la Tabla 4-1

Tabla 4-1. Lista de materiales 1 para la migración al sistema DCS, usados en el gabinete.

Cantidad	Descripción	Precio en \$USD
2	Series C Dual Cabinet	\$1240
2	Pallet, RITTAL, 1-BAY	\$3000
8	Nameplate, RITTAK	\$280
1	PWR DistributionSystem	\$1171
2	Label, Series C System,	\$3000
4	Fan Assembly Kit	\$3092
4	Cable Strap	\$124
1	TS8 Series C Cabinet	\$4986
16	Carrier cannel assy	\$12096
2	FTA MTG CHANNEL	\$1184
2	SHPNG CRATE	\$604
2	Ship Crate-IMH-AR-NPK-48x48x52	\$296
2	POWER SUPPLY ASSY, RED 20A	\$24806
	Total Materiales	\$USD 55879

La Tabla 4-1 sólo muestra los valores o los elementos que son componentes del gabinete de conexiones del Marshalling panel.

En la Tabla 4-2 se muestran los materiales correspondientes a las tarjetas de electrónicas tipo DCS, presentadas en la sección 3.1, y que se deben usar para la migración.

Tabla 4-2. Materiales correspondientes a las tarjetas electrónicas DCS compradas.

Cantidad	Descripción	Uso en	Precio en \$USD
3	Digital Output 24V Bussed	Digital Output	\$14055
3	DO Relay IOTA, (32)	Digital Output	\$7761
3	DO RelayExtension IOTA	Digital Output	\$8658
3	CABLE, DO RELAY EXTENSION	Digital Output	\$489
6	Analog Input Module, High Level	Analog Input	\$16434
6	Analog Input IOTA, (16)	Analog Input	\$7182
2	HART Analog Output Module	Analog Output	\$16030
2	Analog Output IOTA, (16)	Analog Output	\$2792
6	Digital Input Module	Digital Input	\$22722
6	Digital Input 110V IOTA (32)	Digital Input	\$16764
Totales			\$ USD 112887

En la Tabla 4-3 se muestran los materiales correspondientes a los elementos no agrupados en las Tablas 4-1 y 4-2.

Tabla 4-3. Materiales varios para la migración a DCS.

Cantidad	Descripción	Precio en \$USD
1800 [m]	Cable Control 34C 18 AWG	\$11520
1800 [m]	Cable Instrumentación 4Pares 18 AWG	\$17568
2	Gabinete Marshalling Panel	\$37000
Totales		\$USD 66088

Por lo tanto, de la Tabla 4-1, de la 4-2 y la Tabla 4-3, el monto total a desembolsar en los materiales de para la migración del sistema de comando y control de la línea 1 de chancado de la mina El Teniente, es de **\$USD 234854**.

Mano de obra calificada para la migración a un sistema de control basado en DCS

La mano de obra que desmantelará el sistema actual de control y monitoreo, basado en PLC, e instalará el nuevo sistema basado en DCS, debe ser calificada, por las altas pérdidas económicas que se puede incurrir si el sistema funciona defectuosamente.

La descripción de las actividades que debe realizar la mano de obra, junto con el monto presupuestado, se muestran en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4. Monto presupuestado para la mano de obra del proyecto.

Ejecutor	Descripción	H/H	Valor H. \$USD	Total \$USD
Contratista	Tendido de Cable	240	\$45,59	\$10941,6
Codelco	Armado Gabinete	80	\$38,41	\$3072,8
Codelco	Instalación sensores	200	\$38,41	\$7682
Codelco	Conexionado Tablero	160	\$38,41	\$6145,6
Codelco	Pruebas de Verificación:FAT	40	\$38,41	\$1536,4
Codelco	Pruebas de Verificación: SAT	40	\$38,41	\$1536,4
Codelco	Programación	24	\$38,41	\$921,8
Codelco	Puesta en marcha	8	\$38,41	\$307,28
			Totales	\$USD 32144

4.2.2 Datos para el cálculo de ganancias y pérdidas en la implementación del proyecto

El cálculo de entradas, salidas, ganancias o pérdidas asociadas con el desarrollo de la implementación de este proyecto, depende de la obtención de cada uno de esos datos de forma numérica. La obtención fidedigna de estos datos es muy importante para obtener un análisis económico confiable, tal como se verá en las siguientes subsecciones.

Los datos se consiguen de forma directa con la empresa CODELCO, división EL Teniente, a través de información interna que no pudo ser sometida a análisis. Esta información se considera verídica para todos los usos posteriores. La información obtenida se agrupa en la Tabla 4-5 y 4-6.

Tabla 4-5. Datos relevantes por línea chancadora.

Datos	Sistema PLC (Línea 1)	Sistema DCS (Línea 2)
Horas de detención por fallas al mes	8	4
Horas de mantención mecánica reactiva al mes	36	8
Horas de mantención eléctrica reactiva al mes	8	18

Nótese de la Tabla 4-5 que las horas de detención por fallas, para cada chancador, son diferentes, debido al sistema de control más robusto de la línea 2 (DCS), lo cual implica que este sistema tiene horas de detención de la mitad del valor que el otro chancador de la línea 1. También nótese de esta misma Tabla 4-5, que existen horas de mantención reactivas a cada línea chancadora de material, donde el procedimiento de mantención reactiva detiene a las líneas.

En la Tabla 4-6 se muestran los datos económicos de costos relevantes de las acciones que se realizan en las líneas, sin separación entre las líneas que pueden incluir en estos gastos.

Tabla 4-6. Costos relevantes de la producción en el chancador Colon.

Costos de hora/hombre por mantención mecánica	\$USD 81,56
Costos de hora/hombre por mantención eléctrica	\$USD 45,59
Producción de material bruto por línea de chancado	2083,3 toneladas métricas por hora
Producción de material fino por línea de chancado	20,81 toneladas métricas por hora
Valor de la libra de cobre @ 27/11/2017	\$USD 2,92 la libra
Relación entre 1 tonelada y 1 libra	1 tonelada métrica es 2204,62 libras
Ganancia de producción por hora por línea	\$USD 133.964,17 por hora por línea

El valor de ítem de ganancia por producción por hora se obtiene multiplicando el ítem producción de material fino por hora, por el valor de la libra de cobre.

4.2.3 Cálculo de ganancias del proyecto

Para realizar un análisis económico del proyecto que se pretende implementar, se deben conocer las entradas del mismo, las cuales son: la inversión inicial, y las ganancias y pérdidas, para cada período de interés. En esta subsección se verá el concepto del cálculo de ganancia económica asociada a la implementación del proyecto.

Los proyectos económicos se evalúan generalmente en base al ingreso esperado del mismo, comparándolo con las pérdidas en el mismo período, pero no es así para este proyecto. Para el caso particular de este proyecto, la ganancia esperada es el ahorro de una parte de las pérdidas del sistema completo basado en PLC, cuando se implementa el sistema completo basado en DCS. El cálculo de ganancias del proyecto completo está asociado a las pérdidas del sistema anterior.

La ganancia de este proyecto es dada por el ahorro de dinero al disminuir las horas de detención de las líneas de chancado, lo cual implica mayor producción del mineral en el tiempo.

Las horas de detención disminuidas se obtiene de la Tabla 4-5, al considerar que la diferencia de las horas de detención al mes, entre cada línea, es de 4 horas. Esto indica que las horas de detención ahorradas al usar un sistema DCS, con relación a un sistema PLC, es de 4 horas de detención al mes.

Como la ganancia de cada línea al operar por cada hora es de **\$USD 133.964,17 por hora** (Ver Tabla 2-6), el total es **\$USD 4x133.964,17 por hora= \$USD 533.856,7 mensuales**. El valor anterior es mensual debido a que sólo ocurren unas cuantas horas de detención al mes para cada línea de chancador, para la línea 1 ocurren 8 horas, y para la línea 2 ocurren 4 horas (ver Tabla 4-5).

Existe otra ganancia, de valor monetario mucho menor, la cual es debida al ahorro de los costos de mantención mecánica reactiva que se incurren en la migración de un sistema de control basado en PLC, en uno basado en DCS (ver Tabla 4-5). Según la Tabla 4-5, las horas de mantención reactivas para el sistema basado en PLC (línea 1) son de 36 horas mensuales, y las del sistema basado en DCS (línea 2) son de 8 horas mensuales, por lo tanto, el ahorro de horas es la resta: 28 horas de mantención mecánica reactiva.

Según la Tabla 4-6, el valor de la hora-hombre de los mecánicos encargados de realizar las mantenciones es de \$USD 81,56. El ahorro monetario de implementar el sistema DCS, en relación de las mantenciones mecánicas reactivas es de **\$USD 81,56 x 28 horas=\$USD 2.283,7**. Este valor es el ahorrado, o ganado, por mes al implementar la migración. Este valor es mensual debido a que las horas de mantención son un conteo mensual.

La ganancia total para el período de un mes de la implementación de este proyecto es entonces: de **\$USD 533.856,7 mensuales + \$USD 2.283,7 mensuales = \$USD 536.140,4**.

No existe un ahorro, o ganancia en el período mensual, debido a la mantención eléctrica de la migración al sistema DCS, ya que según la Tabla 4-6 se ocupan más horas de mantención para este sistema que en el sistema PLC, lo cual incluye una pérdida que debe ser calculada.

4.2.4 Cálculos de las pérdidas del proyecto

Las pérdidas del proyecto vienen asociadas con los valores monetarios que deben desprenderse para cada período, y que están ligados al sistema DCS para que éste pueda funcionar. Las pérdidas del sistema, cuando este se encuentre en funcionamiento serán dadas por: el valor de las mantenciones reactivas mensuales que deben hacerse para mantener el correcto funcionamiento del sistema. Estas mantenciones son mecánicas y eléctricas.

Según la Tabla 4-5, cuando el sistema esté implementado como DCS se incurrirá en un total de 18 horas de mantenciones eléctricas, pero según la Tabla 4-5 en el sistema PLC se realizan un total de 8 horas de mantención eléctrica al mes, por lo tanto, la pérdida neta es la resta: 10 horas de mantención eléctrica. Según la Tabla 4-6, el valor de la hora-hombre de mantención eléctrica reactiva es de \$USD 45,59. El valor de las pérdidas debido a las mantenciones eléctricas reactivas es de **\$USD 10 x 45,59 = \$USD 455,9 mensuales.**

La pérdida total para el período de un mes de la implementación de este proyecto es entonces de: **\$USD 455,9 mensuales.**

4.3 Análisis económico

El análisis económico reúne a los datos proporcionados por las secciones 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 y 4.2.4, y los procesa siguiendo el diagrama de flujo presente en la Figura 4.1.

Todos los análisis económicos que se realizarán se basarán en la tabla de ingresos/egresos de los periodos considerados para el desarrollo de este proyecto, tal como se muestra en la Figura 4-2.

Periodo Inicial	Periodo 1	Periodo 2	...	Periodo n
-Inversión Inicial	+Ganancias -Pérdidas	+Ganancias -Pérdidas	...	+Ganancias -Pérdidas
	Resultado periodo 1	Resultado periodo 2	...	Resultado periodo n

Figura 4-2. Tabla de ingresos o egresos para el periodo de un proyecto.

Como se puede observar en la Figura 4-2, la tabla de ingresos agrupa todos los egresos o ingresos, y resultados para todo el periodo de vida del proyecto. La tabla comienza con la inversión inicial, y como es un egreso, su resultado es negativo o una pérdida para el periodo 0. Luego, para todos los periodos de duración del proyecto, se define los ingresos o ganancias de dinero y se le restan los egreso o pérdidas de ese periodo particular, obteniéndose el resultado del mismo como la suma de los anteriores.

Los análisis económicos que se realizaron en esta sección, dependerán de una serie de parámetros iniciales particulares para el proyecto. Los parámetros son:

- **Periodo:** El periodo es el tiempo de duración esperado del proyecto. Para el caso particular de este proyecto; el periodo es de 20 años debido a la calidad y robustez de los elementos físicos y de software que conforman al sistema DCS. También se puede interpretar al periodo como la separación de todos los momentos o estados de tiempo de interés del proyecto. En este caso especial, el periodo de interés es de un mes, por lo tanto, el proyecto total tiene una duración de 20 años o 240 periodos o meses, contando desde su mes de funcionamiento como periodo 1. El periodo 0 corresponde al tiempo en el cual se ingresaron las inversiones iniciales. El periodo 0 es el único que puede durar un valor diferente del mes debido a que la inversión inicial puede no ser hecha en un único periodo simétrico de tiempo.
- **Tasa de retorno esperada del proyecto:** Es el porcentaje de retorno de dinero, con respecto a la inversión inicial, que se espera recibir del proyecto al final del periodo de duración del mismo. Por ejemplo; si un proyecto dura 1 año, y se invirtió en el \$USD 1000 porque el proyecto tiene una tasa de retorno de 20%, se espera entonces, tener un monto de \$USD 1200 al finalizar el año. Para este proyecto en particular se decidió una tasa de retorno de 10 % mínima.

Una vez definidos estos parámetros se pueden realizar los análisis económicos, pero antes se debe definir los egresos/ingresos de todos los periodos.

4.3.1 Flujo de caja esperado del proyecto

Los ingresos o egresos de todos los periodos del proyecto se muestran en la Figura 4-3.

MES 0	MES 1	MES 2	...	MES 240
-\$USD 266.998	+\$USD 536.140,4-\$USD 459,9	+\$USD 536.140,4-\$USD 459,9	...	+\$USD 536.140,4-\$USD 459,9
	+\$USD 535.680,5	+\$USD 535.680,5	...	+\$USD 535.680,5

Figura 4-3. Flujo de caja esperado del proyecto.

Los datos de la Figura 4-3 se obtuvieron mediante el uso de los datos presentados en las secciones de este capítulo. Nótese de esta figura, que se tiene un valor de inversión inicial negativo (como corresponde) un valor positivo para todos los periodos, que son iguales a un mes, hasta alcanzar el mes 240 ó los 20 años presupuestados del proyecto.

Para desarrollar los datos de la Figura 4-3 se simplificaron los ingresos o egresos de cada mes como si fueran iguales. Esta apreciación es razonable debido a que, si el valor de cobre es constante, los resultados de los periodos solo dependen de la producción, que es prácticamente constante.

4.3.2 Análisis VAN

Es el método más conocido, mejor y más generalmente aceptado por los evaluadores de proyectos. Mide la rentabilidad deseada después de recuperar toda la inversión. Para ello, calcula el valor actual de todos los flujos futuros de caja, proyectados a partir del primer período de operación, y le resta la inversión total expresada en el momento cero[7].

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Vt}{(1+k)^t} - I_0$$

Si el resultado es mayor que cero, mostrará cuánto se gana con el proyecto, después de recuperar la inversión, por sobre la tasa i que se exigía de retorno al proyecto; si el resultado es igual a cero, indica que el proyecto reporta exactamente la tasa que se quería obtener después de recuperar el capital invertido; y si el resultado es negativo, muestra el monto que falta para ganar la tasa que se deseaba obtener después de recuperada la inversión.

Para el caso particular de este proyecto, con el fin de obtener el análisis VAN del proyecto, se tiene que:

- I_0 =inversión inicial es de \$USD 266.998
- Vt = Es el resultado del periodo t , que es igual a \$USD 535.680,5
- K = Es la tasa o porcentaje de retorno esperado, la cual es 10% ó 0.1
- n = Es el número de periodos o meses a considerar, el cual es de 240.

El cálculo del VAN se realizó con los datos anteriores, y se obtuvo un valor de **VAN= \$USD 3.024.527**. El VAN positivo indica que el proyecto es rentable en el periodo a considerar y que tiene una tasa de rentabilidad superior a la esperada. La tasa de rentabilidad se obtendrá mediante el análisis TIR.

4.3.3 Análisis TIR

Un segundo criterio de evaluación lo constituye la tasa interna de retorno, TIR, que mide la rentabilidad como porcentaje[7].

$$TIR = \frac{-I + \sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n i * F_i}$$

La ecuación anterior entrega el valor máximo de rentabilidad del proyecto, cuando en ella se ingresan los mismos datos que para en análisis VAN.

Para el caso particular de este proyecto, los resultados fueron de una tasa interna de retorno igual a **TIR= 200,63%**, lo cual es muy buena y superior a la esperada. Este valor indica que el proyecto en sí mismo es más rentable de lo que se le exige, en particular con una rentabilidad del 200,25% en el periodo de duración del proyecto.

Conclusiones

La minería chilena es muy importante, no solo por la cantidad de producción que posee cada año y por la cantidad de trabajadores que contrata, sino también por los procesos eficientes y vanguardistas con los que efectúa sus faenas. La minería chilena está constantemente actualizándose para tener siempre la mejor eficiencia. Esto justifica las mejoras de la línea 1 del chancador Colón, más aún cuando es justificable económicamente.

Los procesos de control tipo DCS y PLC son funcionales, y similares en su contenido. La diferencia entre ellos está en la forma en que desarrollan sus tareas, demostrándose que los sistemas tipo DCS son superiores con respecto a los PLC, y aunque puedan ser considerados más caros que los tipos PLC, resultan más baratos en el transcurso del tiempo debido a su menor posibilidad de falla del proceso que controlan, el cual, como en el chancado de la mina El Teniente, resulta ser muy lucrativo funcionando, y muy costoso cuando está detenido en caso de falla.

Cabe mencionar que en el tiempo en que se obtuvieron los datos de adquisición de los materiales, estos ya habían sido comprados. Debido a esto es que no se pudo tener acceso a los proveedores, ni hacer comparaciones entre los mismos. Además, en el tiempo en que se desarrolló este trabajo, tampoco se tuvo acceso a las cotizaciones de mano de obra para el desmantelamiento instalación del nuevo sistema DCS, debido a que esto se realizó mediante procedimientos internos privados.

Todos los análisis económicos hechos dan resultados muy favorables para el proyecto, y a pesar que la consecución del mismo está asegurada de antemano por la minera El Teniente, se recomienda de todas formas la implementación de este proyecto.

Las tarjetas electrónicas se utilizan de tal forma que tienen la capacidad de obtener información y comandar procesos/sistemas. Es por lo anterior que en este informe se hicieron referencia a cuatro tarjetas diferentes; estas fueron las tarjetas análogas de entrada, análogas de salida, digitales de entrada y digitales de salida.

La mayor diferencia entre los sistemas PLC y DCS, esta que con la tecnología DCS se puede tener mayor información del proceso, como históricos, alarmas, tendencias y eventos. Esta capacidad nos hace anticiparnos a posibles fallas, y mejorar la producción. Luego del Análisis financiero se justifica la expansión al sistema DCS, ya que con él se tiene menos horas de detención por fallas.

Bibliografía

- [1] Codelco, «El Teniente, Minería de futuro,» [En línea]. Available: https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20140520/asocfile/20140520183026/el_teniente_mineria_de_futuro.pdf. [Último acceso: Octubre 2017].
- [2] M. Briceño y José, «Comunicaciones Industriales,» de *Transmisión de datos*, Mérida, 2003, pp. 223-317.
- [3] Siemens, «PROFIBUS según IEC 61158/EN 50170,» 2004. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4298/Profibus.pdf?sequence=10>.
- [4] EMERSON, «Electronic Marshaling Overview,» Junio 2013. [En línea]. Available: <https://www.emerson.com/documents/automation/electronic-marshaling-overview-en-57838.pdf>.
- [5] Honeywell, «Series C I/O User's Guide,» Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/Series-C-IO-User-Guide-EPDOC--X126-en-430.pdf>.
- [6] O. P. Rivera, «Norma ISA,» [En línea]. Available: http://www.automaticausach.cl/asignaturas/controlautind/304_Norma_ISA_PID.pdf.
- [7] R. S. C. Nassir Sapag Chain, *Preparación y Evaluación de Proyectos*, Bogotá. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, 2008.
- [8] C. K. Alexander y M. Sadiku, *Circuits, Fundamentals of Electric*, McGraw-Hill College, 2003.
- [9] O. Leon y Alejandro, «Sistemas de Control Distribuido DCS,» 17 Marzo 2011. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/alleonchile/sistemas-de-control-distribuido-dcs-7298975>. [Último acceso: Octubre 2017].