

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**"DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA
VENTILACIÓN DE UNA MINA SUBTERRÁNEA USANDO
UN CONTROLADOR AC800M"**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECATRÓNICO**

VÍCTOR HUGO RODRÍGUEZ DELGADO

**PROMOCIÓN
2008-I**

**LIMA - PERÚ
2010**

*Dedicado a las personas que amo,
que día a día me alentaron y apoyaron
en cada etapa de mi vida;
mi padre Juan Rodríguez, mi madre Evelina Delgado,
mi hermano Emerson,
mis hermanas Milagritos e Ivon y
amigos queridos.*

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
----------------------	---

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN	4
---------------------------	---

1.1. Antecedentes.....	5
1.2. Justificación.....	7
1.3. Objetivos.....	8
1.4. Planteamiento del problema.....	9
1.5. Alcance.....	10

CAPÍTULO II

CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL SISTEMA DE

VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA	11
--------------------------------------	----

2.1. Nomenclatura y terminología.....	11
2.2. Características de la mina subterránea.....	14
2.3. Códigos y normas aplicables.....	16
2.4. Valores permisibles en actividades mineras.....	17

CAPÍTULO III

FUNDAMENTO TEÓRICO	19
---------------------------------	----

3.1. Teoría de ventilación.....	19
3.1.1. Tipos de Ventilación.....	20
3.1.2. Ventilador.....	21
3.1.3. Cálculo de caudal requerido.....	28

3.1.4.	Cálculo de la diferencia de presión.....	31
3.1.5.	Cálculo de la potencia para la selección del ventilador.....	35
3.2.	Control del proceso.....	36
3.2.1.	Controlador AC800M.....	36
3.2.2.	Estrategia de control.....	40
3.3.	Sintonía de parámetros del control PID en la Industria.....	44
3.3.1.	Método de Ziegler-Nichols en lazo abierto o curva de reacción	45
3.3.2.	Método de Ziegler-Nichols en lazo cerrado o de ganancia límite.....	47
3.3.3.	Método del relé.....	49
3.4.	Accionamiento.....	52
3.4.1.	Variador de frecuencia – VDF.....	52
3.4.2.	Ventajas de usar un VDF.....	54
3.5.	Filosofía de control.....	55
3.6.	Teoría de programación.....	59

CAPÍTULO IV

EQUIPOS, INSTRUMENTACIÓN Y PROTOCOLOS DEL SISTEMA DE CONTROL.....	64
4.1. Criterios de selección de equipos e instrumentación.....	64
4.2. Medición de variables de proceso.....	66
4.2.1. Sensor de temperatura RTD.....	66
4.2.2. Sensor de flujo ultrasónico.....	69
4.2.3. Sensor de vibración piezoeléctrico.....	72
4.2.4. Sensor de presión diferencial.....	77

4.2.5.	Sensor de velocidad inductivo.....	81
4.3.	Red industrial	84
4.3.1.	Topologías de redes.....	84
4.3.2.	Clasificación de redes.....	86
4.4.	Protocolos de comunicación.....	88
4.4.1.	Profibus.....	88
4.4.2.	Modbus.....	89
4.4.3.	HART.....	90
4.4.4.	Fibra Óptica F.O.....	90
4.4.5.	MMS.....	91

CAPÍTULO V

DISEÑO	93	
5.1.	Arquitectura de comunicación.....	93
5.2.	Diagrama P&ID para el Proceso de Ventilación.....	98
5.3.	Lista de señales I/O.....	102
5.4.	Programación.....	103

CAPÍTULO VI

ESTUDIO ECONÓMICO	121	
6.1.	Criterios para la evaluación económica.....	121
6.2.	Descripción de inversiones y costos.....	121
6.3.	Evaluación económica.....	124

CONCLUSIONES.....127

BIBLIOGRAFÍA.....128

ANEXOS

A.1. Equipos propuestos para el proceso de ventilación.....130

A.2. Instrumentación propuesta para el control y monitoreo del proceso.....133

PRÓLOGO

El presente trabajo es una respuesta a la necesidad del requerimiento de un Sistema de Control que asegure la ventilación apropiada de una mina subterránea, cumpliendo con las normas establecidas para dicho proceso minero en el país. Para lo cual se plantea una solución proponiendo un diseño que sea capaz de cumplir con los requerimientos que a su vez están ligados a las condiciones y características dadas de la mina subterránea.

En lo que respecta a las unidades a utilizar se considera tanto el Sistema Internacional de Unidades como el Sistema Inglés, este último debido a que la información técnica de los equipos se encuentran en dicho sistema.

La tesis consta de 6 capítulos en los que se desarrollará:

Capítulo I. Se realizará una introducción al tema, dando a conocer los antecedentes del sistema de ventilación de la mina subterránea a tratar, justificando y mostrando los objetivos que se cumplirán. Se explicará también el planteamiento del problema y el alcance del trabajo.

Capítulo II. Se detallará la nomenclatura y terminología a utilizar a lo largo del presente trabajo, al igual que las características de la mina, los códigos y normas aplicables.

Capítulo III. En este capítulo se mostrará la teoría necesaria para el desarrollo del tema, así como también los cálculos que ayudarán a la selección de los equipos involucrados en el Sistema de Control del proceso de ventilación.

Capítulo IV. Se explicarán los principios de funcionamiento de la instrumentación a utilizar en el Sistema de Control, la topología de la red y los protocolos de comunicación que estarán presentes.

Capítulo V. Se mostrará el diseño propuesto del Sistema de Control del proceso de ventilación, donde se incluyen diagramas del proceso, la arquitectura de comunicación, la programación la cual desarrollada con el software Control Builder M Professional.

Capítulo VI. En este capítulo se detallará los costos de implementación para el Sistema de Control y la evaluación económica entre el ventilador propuesto y el mencionado en los antecedentes de la mina.

Finalmente se presentan las conclusiones del presente trabajo, seguidamente se muestra en los anexos las características de los equipos e instrumentos propuestos, los cuales están disponibles en el mercado.

Debo hacer constar mi agradecimiento a mis colegas de trabajo, del área de Ingeniería de la división de Process Automation de la compañía ABB Perú por su apoyo incondicional.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La ventilación en minas subterráneas es necesaria para asegurar un contenido mínimo de oxígeno en la atmósfera permitiendo la respiración de las personas que trabajan en su interior, ya que en ella se desprenden diferentes tipos de gases, según el mineral a explotar y la maquinaria utilizada. Estos gases pueden ser tóxicos, asfixiantes y/o explosivos, por lo que es necesario diluirlos.

A medida que aumenta la profundidad de la mina la temperatura aumenta. El gradiente geotérmico medio es de 1° cada 33m, adicionalmente los equipos y máquinas presentes en el interior contribuyen a elevar la temperatura del aire. En este caso la ventilación es necesaria para la climatización de la mina.

La ventilación subterránea consiste en hacer circular por el interior de la mina el aire necesario para asegurar una atmósfera respirable y segura, mediante el uso de ventiladores, que son turbomáquinas que se caracterizan por impulsar un fluido compresible, en este caso aire.

1.1. Antecedentes

En los últimos años, el tema de la ventilación en la minería subterránea ha ido evolucionando debido a los diferentes factores que se han ido generando, tales como los cambios en los métodos de explotación, lejanía entre los portales de ventilación y los puntos finales de consumo del aire en interior mina, operación de equipos diesel, implicando este último un incremento en la concentración de los contaminantes altamente tóxicos para la vida humana.

La mina con las características que mencionaremos adelante, al igual que otras en nuestro país, en sus inicios inyectaba el aire fresco hasta el nivel de producción mediante chimeneas de inyección principal conectadas directamente al nivel de producción utilizando ventiladores axiales de baja capacidad (40 HP ó 50 HP), que suministran un caudal máximo aproximado de 25000 CFM y la distribución del aire fresco al interior se hacía por medio de mangas o ductos, que no garantizaban su buen manejo y distribución en las áreas demandantes de este recurso.

En la figura 1.1 se puede apreciar unas fotos de los ventiladores de baja capacidad que se usaban en unos inicios, en las que además se pueden apreciar las condiciones en las que operaban, expuestos al medio ambiente y con un desordenado tendido de cables. En la figura 1.2 se aprecia la ubicación en donde estaban instalados estos motores y su conexión con las chimeneas de ventilación.

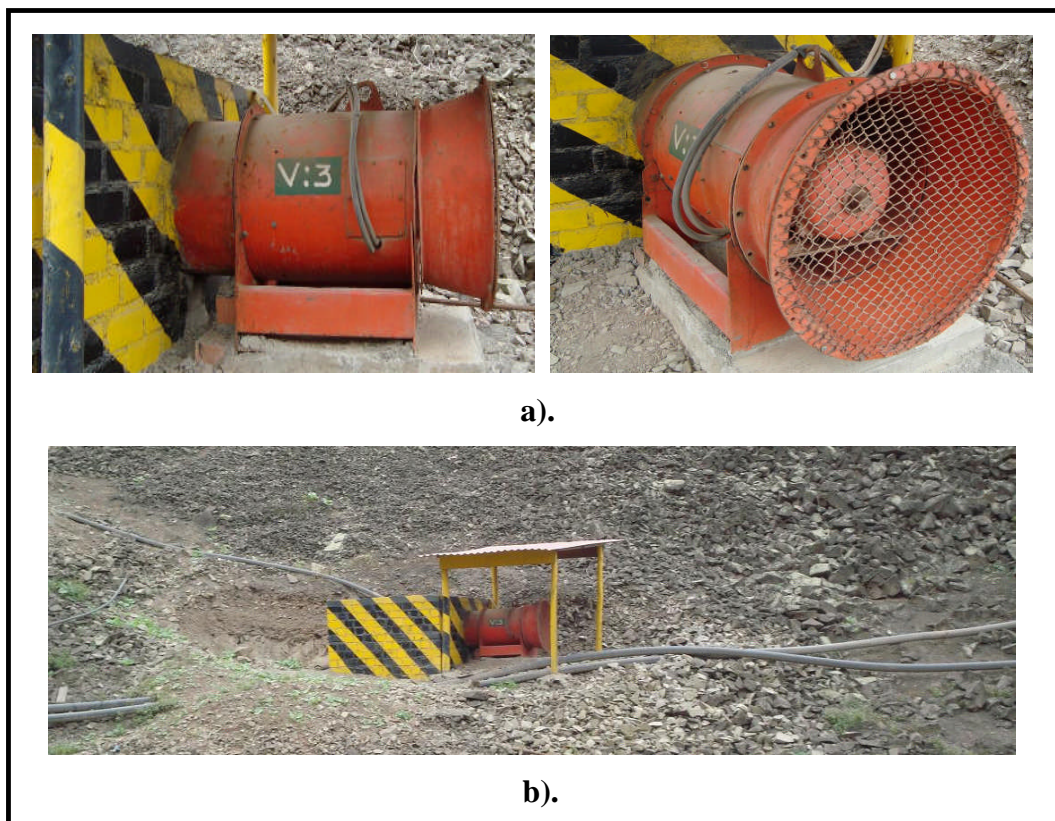


Figura 1.1. a) Vistas del motor de baja capacidad. b) Vista de motor y su conexión a chimenea de ventilación en sus inicios.



Figura 1.2. Ubicación inicial de un ventilador de baja potencia en la mina subterránea.

Hace unos años se ha introducido el concepto de SNV (Sub-Niveles de Ventilación), que están conformados por galerías de inyección y extracción, desarrolladas para el manejo exclusivo del aire fresco y el aire contaminado, incluyendo esta vez tanto chimeneas de inyección como también de extracción. La implementación de los SNV mejoró la distribución del aire al interior ya que no existían obstrucciones por tránsito de personal o de equipos, ya que son galerías independientes conectadas solo por chimeneas a los niveles de mayor demanda.

Actualmente debido a factores de crecimiento en la producción que implica un aumento de personal, aumento de equipos accionados por motores diesel o ya sea por el método de explotación, el requerimiento de ventilación subterránea es mayor en términos de incremento del caudal de aire para lograr diluir o extraer los gases tóxicos, por lo que se requiere el uso de ventiladores de mayor capacidad y asegurar las cantidades de caudal de aire requeridas por lo cual lo más recomendable es implementar un sistema de control.

1.2. Justificación

Debido a la necesidad de un mayor requerimiento de caudal de aire para el proceso de ventilación en la mina subterránea, el presente trabajo propone un diseño para la implementación de un sistema de control con el fin de administrar eficientemente la operación del equipo, por medio de estrategias de control entre los diferentes instrumentos, dando a conocer criterios para su selección, conocimientos

sobre sus principios de funcionamiento y sus protocolos de comunicación. Aportando también con la elección de equipos/instrumentos existentes en el mercado recomendables por sus características.

El sistema de control que se propondrá pretende ser flexible a nuevas propuestas o mejoras en lo que respecta a la presentación futura de nuevas tecnologías, como es el caso de los medidores de flujo por ultrasonido, que van evolucionando para mejorar su performance en la exactitud de su medición.

1.3. Objetivos

Objetivo general

- Diseñar un sistema de control de ventilación centralizado en un proceso de inyección de aire para asegurar una atmósfera respirable y segura dentro de la mina subterránea.

Objetivos específicos

- Controlar el caudal de aire en el túnel de salida del ventilador mediante un variador de frecuencia (VDF).
- Plantear estrategia para monitorear las variables del sistema de ventilación en plena operación como son presión diferencial, nivel de vibración en los

descansos del motor y rodamientos del ventilador, temperatura de devanados del motor, velocidad del ventilador y el estado de las puertas batientes del ventilador.

1.4. Planteamiento del problema

El funcionamiento de este sistema consiste en la variación de la velocidad de rotación (RPM) del motor del ventilador en plena operación mediante el uso de un dispositivo electrónico, denominado variador de frecuencia (VDF), así también el monitoreo de las diferentes variables al interior del sistema de ventilación.

La variable a controlar es el caudal de aire Q (m^3/s), la cual será leída por un sensor a la salida del inyector, la salida del sensor es una señal analógica 4-20mA (HART), la cual será procesada por el controlador AC800M, el cual aplicará una estrategia de control por retroalimentación, cuya salida irá hacia el VDF, este último se encargará del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor controlando así la velocidad rotacional del motor por consiguiente el caudal de aire.

La variable caudal Q , al igual que las demás variables como temperatura, vibración, presión diferencial, velocidad, serán monitoreadas y clasificadas en niveles de severidad de acuerdo a las especificaciones de diseño del ventilador y normas aplicables. Toda la instrumentación de control para estas variables tendrán salida HART y serán leídas por los módulos de entrada analógica del controlador AC800M.

El monitoreo de las variables podrá ser realizada por una interfaz de operador, como un panel de operador, la cual se encontrará instalada cerca del proceso de inyección. Se tendrá una estación de monitoreo remoto la cual será ubicada en la sala de control de la mina, la cual se encontrará a una distancia larga, para lo cual utilizaremos fibra óptica.

1.5. Alcance

Diseño de la arquitectura de control, estrategia para lectura de las variables del proceso y programación del sistema de ventilación alrededor de un punto de operación de caudal de aire de 440000 CFM que cumpla con las normas peruanas aplicables a ventilación en operaciones mineras, usando un controlador AC800M-PM856 con sus interfaces de comunicación, entradas y salidas, integradas a un sistema de control distribuído.

CAPÍTULO II

CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL SISTEMA DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA

El presente capítulo en un principio lista la nomenclatura a utilizarse tanto para los cálculos como para las lecturas de hojas técnicas, para los cuales se considera el Sistema Internacional de Unidades SI y el Sistema Inglés. Así también se muestra una serie de definiciones de términos que se considera apropiados y que serán usados en la extensión de la presente tesis.

Es necesario conocer características importantes del entorno del proceso (ya sea geográficas, ambientales o eléctricas) y tener presente las normas y parámetros que son ponderantes para el análisis.

2.1. Nomenclatura y Terminología

Nomenclatura

- **CFM:** Pies cúbicos por minuto (Cubic Feet per minute). Indica el flujo de aire que pasa por un punto estacionario en un minuto.

- m^3/s : Metros cúbicos por minuto. Indica el flujo de aire, que pasa por un punto estacionario en un segundo.

$$1 CFM = 0.000472 m^3/s$$

- **HP** : Caballaje de fuerza (Horse Power). Potencia desarrollada por el motor.
- **rpm**: Revoluciones por minuto. Medida de la cantidad de vueltas que genera el motor en el lapso de un minuto.
- **Hz** : Hertz. Medida de la frecuencia que se repite una onda en un segundo.
- **V** : Voltio. Mide el potencial eléctrico.
- **dB** : Decibelio. Nivel de intensidad del sonido.
- **mA** : Miliamperio. Unidad de intensidad de corriente eléctrica.
- **bps** : Número de bits que se transmite por unidad de tiempo a través de un sistema de transmisión digital, llamada velocidad de transferencia de datos.

Terminología

- **Aplicación crítica:** Proceso en el cual la calidad, rendimiento o rentabilidad no tolera una suspensión. Es también aquel proceso en el cual una falla puede producir la pérdida de vidas humanas o enormes pérdidas materiales.
- **Monitoreo:** Es la revisión frecuente de los parámetros de operación de un proceso con el objetivo de confirmar que las operaciones se realizan dentro de lo esperado. El monitoreo incluye la recolección de datos y su evaluación estadística

- **Supervisión:** Es la observación de las operaciones en planta para la determinación de estrategias que deben aplicarse en diferentes circunstancias tomando en cuenta el planeamiento del proceso.
- **Workstation:** Es el nombre común de un ordenador con el software asociado, utilizado para la edición y la compilación de programas de control.
- **Caudal:** Es la cantidad de fluido que pasa por determinado elemento en la unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por una área dada en la unidad de tiempo.
- **Vibración:** Es el movimiento oscilante que hace una partícula alrededor de un punto fijo. Este movimiento puede ser regular en dirección, frecuencia y/o intensidad; o aleatorio.
- **Presión atmosférica:** Es la presión ejercida por el aire en cualquier punto de la atmósfera.
- **Presión diferencial:** Es la diferencia en magnitud entre el valor de una presión y el valor de otra tomada como referencia.
- **Piezo-resistencia:** Es un sensor cuya resistencia varía en relación a la fuerza que se le aplica. Un sensor piezo-resistente, recibe un voltaje constante de referencia y devuelve una variable con relación a su resistencia variada.
- **Piezo-electricidad:** Es el efecto presentado por determinados cristales, que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial en su superficie.
- **Transductor:** Es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada en otra diferente a la salida, por

ejemplo electromecánica, transforma una señal eléctrica en mecánica o viceversa.

- **Tag:** Es una marca o etiqueta con las que se delimitan equipos o instrumentos.
- **Cojinete DE:** Acrónimo de Driving End, cojinete de lado de acople.
- **Cojinete NDE:** Acrónimo de Non-driving End, cojinete de lado opuesto al acople.
- **Repetibilidad:** Es una medida estadística que muestra la capacidad de obtener resultados consistentes al medir la misma pieza con el mismo instrumento de medición.
- **HMI:** (Human Machine Interface) es la interfaz de usuario, el medio con que el usuario puede comunicarse con una máquina, un equipo o una computadora, y comprende todos los puntos de contacto entre el usuario y el equipo, normalmente suelen ser fáciles de entender y fáciles de accionar.

2.2. Características de la mina subterránea

A continuación se menciona las características (geográficas, eléctricas, físicas) del entorno de la mina subterránea.

a) Ubicación de la mina

- Altura geográfica (msnm): 4700
- Número de personas que laboran por turno: 150
- Número de equipos diesel por turno: 16

b) Características de la energía eléctrica

A continuación se indica los parámetros del sistema eléctrico de la mina en
mención:

Sistema Primario

- Voltaje nominal: 4.16 kV
- Voltaje de servicio: 4.0kV
- Fases: 3
- Frecuencia: 60 Hz
- Conexión: Estrella, neutro aterrizado
- Clase de aislamiento: 7.2 kV

Sistema de Fuerza

- Voltaje nominal: 480 V
- Voltaje de servicio: 460 V
- Fases: 3
- Frecuencia: 60 Hz
- Conexión: Estrella, neutro aterrizado
- Clase de aislamiento: 600 V

Control

- Voltaje de control: 120 V AC, monofásico

Instrumentación

- Voltajes de instrumentación: 120 V AC, monofásico y 24 VDC

c) Características físicas

- Densidad del aire: $0.8558 \frac{kg}{m^3}$
- Presión atmosférica: 520 mm Hg (69,3 Kpa)

d) Características de los SNV

- Área transversal del SNV : $14.7 m^2$ (4.2m x 3.5m aprox. rectangular).
- Longitud aproximada del SNV: $365 m$.

2.3. Códigos y normas aplicables

El diseño del sistema de control y la especificación de equipos principales, está de acuerdo con las normas y/o reglamentos publicados por las siguientes organizaciones, según sean aplicables:

- DS 046-2001-EM Reglamento de seguridad e higiene minera
- ISO International Standard Organization
- ISA International Society of Automation
- IEC International Electrotechnical Commission
- ANSI American National Standards Institute

- IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers
- NEMA National Electrical Manufacturers Association
- ASTM American Society for Testing and Materials
- ICEA Insulated Cables Engineers Association
- MSHA Mining Safety and Health Administration

2.4. Valores permisibles en actividades mineras

Los parámetros permisibles para caudal de aire en minas subterráneas están dados en el reglamento de seguridad e higiene minera DS N° 046-2001-EM, del Ministerio de Energía y Minas del Perú (ver tabla 2.1).

Oxígeno	Mínimo 19.5 %
Caudal de aire por hombre	6 m ³ / min (sobre los 4000 m.s.n.m)
Caudal de aire por cada HP de equipos diesel	No menor a 3 m ³ / min
Rango de velocidad del aire	Mayor a 20 y menor a 250 m/min

Tabla 2.1. Valores según reglamento de seguridad e higiene minera peruana.

Para la supervisión de nivel de vibraciones, tomamos como referencia las severidades dadas por la ISO 10816-2 (ver tabla 2.2).

Verde: Zona A. Valores de vibración de máquinas recién puestas en funcionamiento.

Amarillo: Zona B. Máquinas pueden funcionar en operación continua sin restricciones.

Naranja: Zona C. Indican que la condición de la máquina no es conveniente para una operación continua, sino solamente para un período de tiempo limitado. Medidas de corrección deberían ser tomadas en la siguiente oportunidad.

Rojo: Zona D. Valores de vibración peligrosos, la máquina puede sufrir daños.

			D					11	0.43
			C					7.1	0.28
								4.5	0.16
			B					3.5	0.14
								2.8	0.11
								2.3	0.09
								1.4	0.06
			A					0.71	0.03
								mm/s rms	inch/s rms
rigid	flexible	rigid	flexible	rigid	flexible	rigid	flexible	Foundation	
pumps > 15 kW radial, axial, mixed flow				medium sized machines 15 kW < P ≤ 300 kW		large machines 300 kW < P < 50 MW		Machine Type	
Group 4		Group 3		Group 2		Group 1		Group	

- A New machine condition
- B Unlimited long-term operation allowable
- C Short-term operation allowable
- D Vibration causes damage

Tabla 2.2. Niveles de vibraciones permisibles para motores según su potencia dados por la ISO 10816-2

CAPÍTULO III

FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1. Teoría de ventilación

El movimiento del aire se produce debido a una alteración del equilibrio, diferencia de presiones entre la entrada y la salida de un dúcto y en la medida que se mantenga esa diferencia se produce un proceso continuo de circulación de aire.

La ventilación en una mina subterránea es un proceso en el cual se hace circular por el interior de la misma el aire necesario para asegurar una atmósfera respirable y segura para el desarrollo de los trabajos (ver figura 3.1).

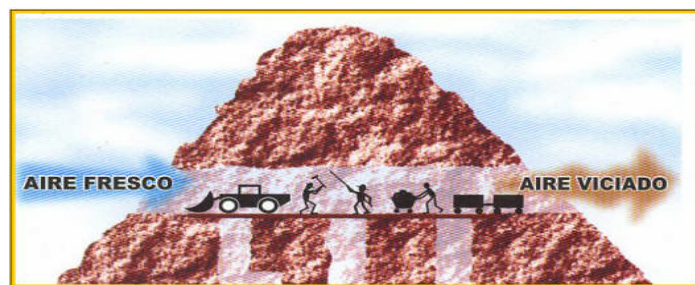


Figura 3.1. Circulación de Entrada de aire fresco y salida del aire viciado dentro de una mina subterránea

La ventilación puede ser natural o mecánica, para el caso de ventilación de minas subterráneas se hará extensivo el tema de ventilación mecánica.

3.1.1. Tipos de ventilación

La ventilación en una mina puede ser de 3 tipos:

- **Exhaustor:** Aspirando gas a una presión inferior a la atmosférica y comprimiéndola hasta la presión atmosférica. (ver figura 3.2 (a)).
- **Soplante:** Aspirando gas a la presión atmosférica y comprimiéndola a mayor presión (ver figura 3.2 (b)).
- **Soplante y Exhaustor:** Trabaja al mismo tiempo como las dos anteriores, llamado también COMBINADO (ver figura 3.2 (c)).

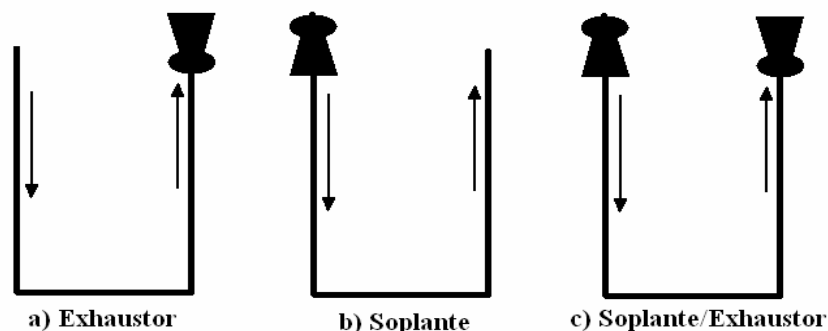


Figura 3.2. Esquemas de los tipos de ventilación

3.1.2. Ventilador

Es una turbomáquina cuyo elemento principal es un rotor a través del cual pasa un fluido de forma continua, cambiando este su cantidad de movimiento, proporcionándole un incremento de presión. Los ventiladores se usan principalmente para producir flujo de gases de un punto a otro, también en muchos casos, el gas actúa sólo como medio de transporte de calor, humedad, ó de material sólido como cenizas, polvos, etc. Las curvas típicas del comportamiento de las variables de un ventilador se muestran en la figura 3.3.

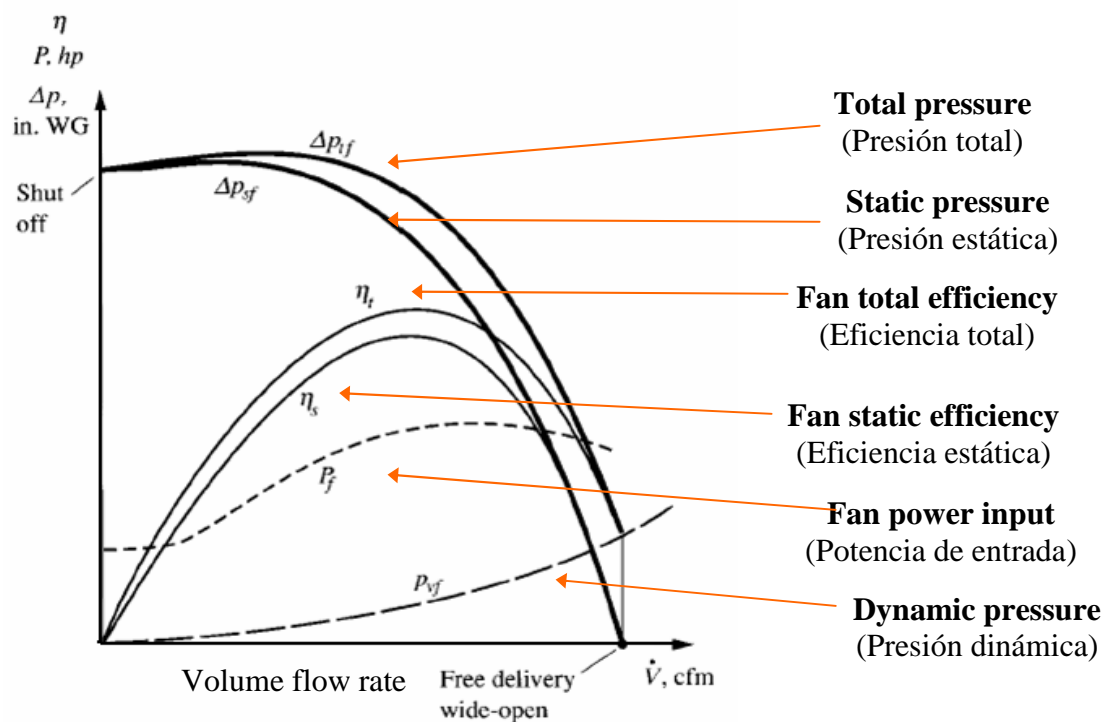


Figura 3.3. Curvas típicas de un ventilador

Tipos de ventiladores

- Ventilador Centrífugo
- Ventilador Axial

A) Ventilador centrífugo

Consiste en un rotor encerrado en un envolvente de forma espiral, el aire que entra a través del ojo del rotor paralelo a la flecha del ventilador es succionado y se acelera debido a la fuerza centrífuga y es arrojado contra la envolvente y se descarga por la salida en un ángulo recto a la flecha (ver figura 3.4).

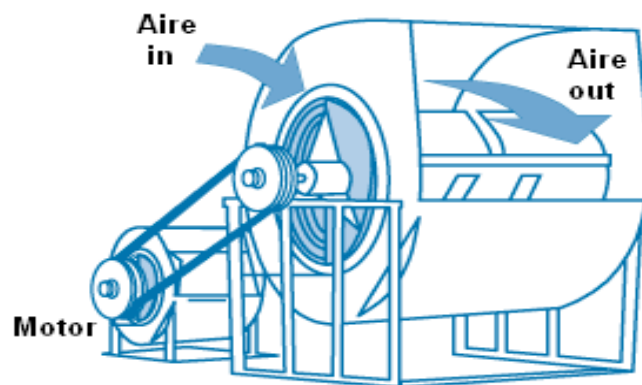


Figura 3.4. Esquema de un ventilador Centrífugo

Tipos de ventiladores centrífugos

- **Ventilador con álabes curvados hacia adelante:** Estos ventiladores se caracterizan por su gran número de álabes, tienen un rendimiento bajo, son empleados por el bajo nivel de ruido que presentan.
- **Ventilador con álabes curvados hacia atrás:** A diferencia de los anteriores tienen mejor rendimiento y el nivel de ruido es bajo.

- **Ventilador con álabes radiales:** Son mayormente usados por la facilidad con que son eliminados los depósitos sólidos, ya que son menos sensibles a la acumulación de sólidos en las cuchillas.

A continuación se muestra en la figura 3.5 los esquemas de los tipos de ventiladores centrífugos: a) ventilador con álabes curvados hacia adelante, b) ventilador con álabes curvados hacia atrás, c) ventilador con álabes radiales. Y en la figura 3.6 las performances típicas para cada tipo de ventilador centrífugo.

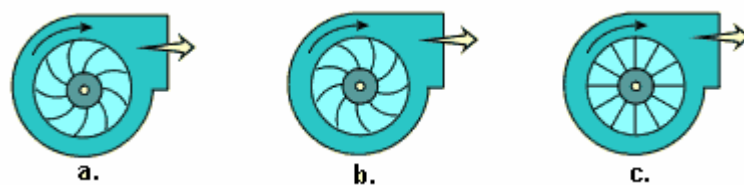


Figura 3.5. Tipos de ventiladores centrífugos

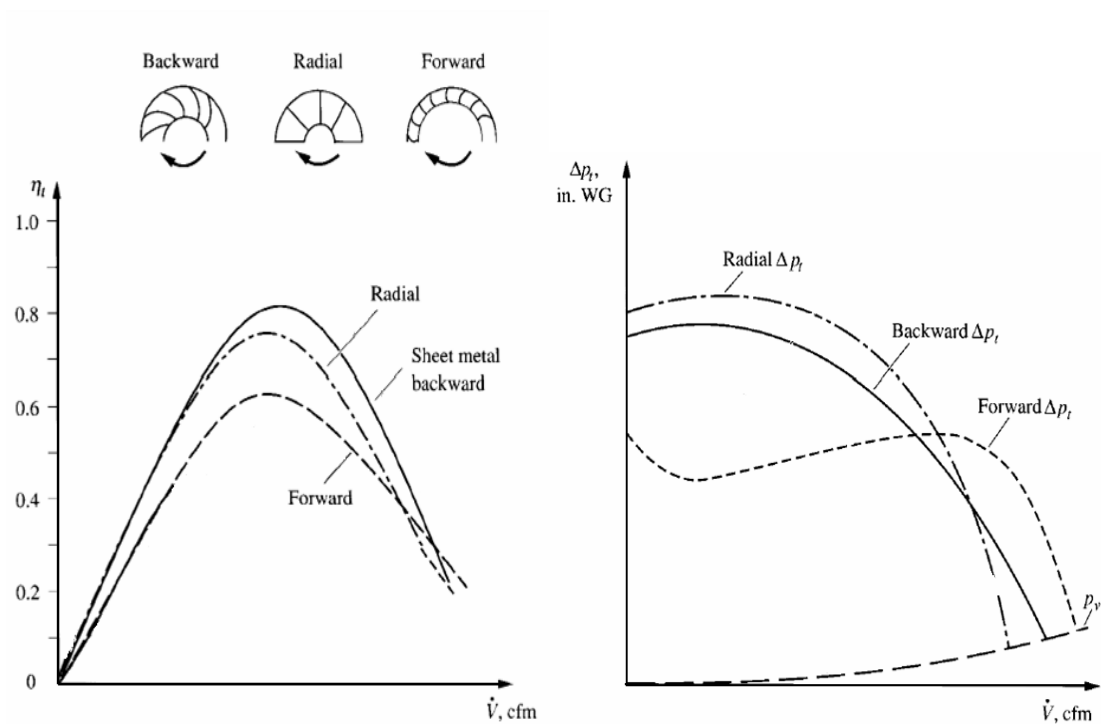


Figura 3.6. Curvas típicas para los tipos de ventiladores centrífugos

B) Ventilador axial

Este de tipo de ventilador consiste esencialmente en una hélice encerrada en una envolvente cilíndrica. Mueven el aire en dirección paralela al eje sobre el que giran las hélices (ver figura 3.7).

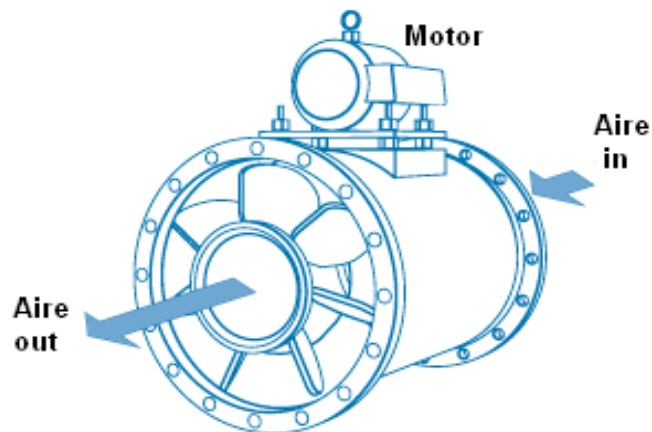


Figura 3.7. Esquema de un Ventilador Axial

Tipos de ventiladores axiales

- **Ventilador de hélice:** Consiste en una hélice (impulsor) dentro de un anillo o marco de montaje. La dirección de corriente de aire es paralela a la flecha del ventilador.
- **Ventilador tube-axial:** El impulsor se encuentra dentro de un tubo para orientar el flujo de aire y mejorar el rendimiento.

- **Ventilador vane-axial:** Al igual que el tube-axial excepto por la incorporación de veletas ya sea hacia arriba o abajo del impulsor, se utiliza para reducir la turbulencia y mejorar el rendimiento.

A continuación se muestra en la figura 3.8 los esquemas de los tipos de ventiladores axiales: a) ventilador helicoidal, b) ventilador tube-axial, c) ventilador vane-axial. Y en la figura 3.9 tenemos las performances típicas para cada tipo de ventilador axial.

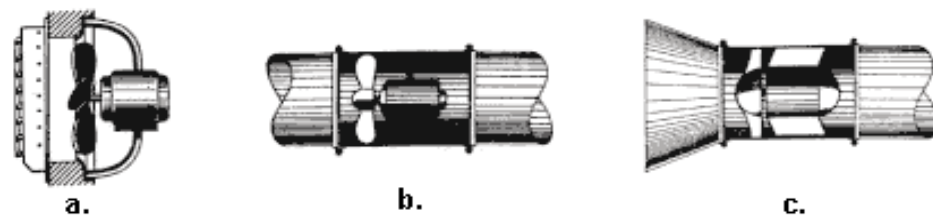


Figura 3.8. Tipos de ventiladores axiales

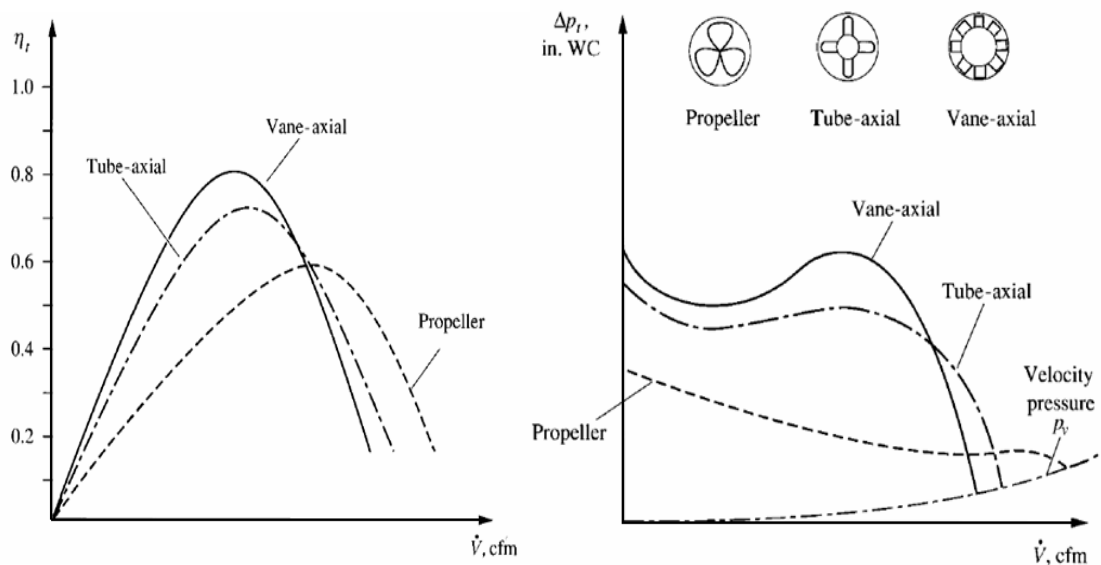


Figura 3.9. Curvas típicas para los tipos de ventiladores axiales

C) Los problemas más comunes de los ventiladores y sus posibles causas

Capacidades y presión abajo de las nominales

Causas:

- La resistencia total del sistema es más alta que la calculada.
- La velocidad es demasiado baja.
- Las compuertas y aspas radiales de entrada no ajustan adecuadamente.
- Condiciones insuficientes de entrada o salida.
- Filtraciones de aire en el sistema.
- Rotor dañado.
- Sentido incorrecto de rotación.
- Rotor montado al revés en la flecha.

Vibraciones y ruido

Causas:

- Mal alineamiento del rotor.
- Base de cimentación inestable.
- Materiales extraños sobre el rotor que causan desequilibrio.
- Rotor o motor dañados.
- Pernos o tornillos fijos, rotos o sueltos.
- Rotor o motor desequilibrados.
- El ventilador entrega más de la capacidad nominal.

- Compuertas o aletas radiales de entrada flojas.
- Velocidad demasiado alta o el ventilador gira en dirección errónea.
- Vibración transmitida al ventilador desde otro punto o fuente.

Sobrecarga de la fuente motriz

Causas:

- Velocidad demasiada alta.
- Descarga que sobrepasa la capacidad, debido a que la resistencia existente del sistema es más baja que la original nominal.
- Densidad del gas por encima del valor de diseño.
- Empaque demasiado apretado o defectuoso.
- Sentido de rotación erróneo.
- Mal alineamiento.
- El rotor pega o roza contra la envolvente.
- Bobinado del motor defectuoso.

D) Comparación entre tipos de ventiladores

A continuación se muestran las principales ventajas y desventajas entre los tipos de ventiladores centrífugos y axiales (ver tabla 3.1).

Comparison between Various Types of Fans

	Backward, airfoil centrifugal fan	Forward-curved centrifugal fan	Vane-axial	Propeller fan
Fan total pressure Δp_f	Higher Δp_t	Comparatively lower Δp_t	Higher Δp_t	Low Δp_t
Flow rate	All flow rates	Larger flow rate	All flow rates	Larger flow rate
Fan power input	Nonoverloading	Overloading	Nonoverloading	Nonoverloading
Fan modulation	Inlet vanes AC inverter	Inlet vanes AC inverter	Controllable pitch AC inverter	
Fan total efficiency	0.7 to 0.86	0.6 to 0.75	0.7 to 0.88	0.45 to 0.6
Sound power level	Lower, higher L_w at low frequencies	Medium, higher L_w at low frequencies	Medium, difference of L_w values is small at various Hz	Higher, higher L_w at high frequencies
Airflow direction	90° turn	90° turn	Parallel to axle	Parallel to axle
Volume and weight	Greater	Less	Greater	Medium volume and lower weight
Initial cost	Higher	Medium	Higher	Low
Applications	Large HVAC&R systems	Lower pressure, small HVAC&R systems	Large HVAC&R systems	Low-pressure, high-volume flow exhaust systems

Tabla 3.1. Comparación entre varios tipos de ventiladores

Por las características y ventajas que ofrece el ventilador axial tipo Vane-axial es el recomendado para el proceso de ventilación minera, por lo cual el proceso de selección del ventilador estará enfocado en este.

3.1.3. Cálculo del caudal requerido

Las necesidades del aire al interior de la mina deben ser determinadas en base al personal y el número de equipos que se encuentran trabajando. El cálculo de las necesidades, permitirá ventilar las labores mineras en forma eficiente, mediante el control de flujo de inyección de aire fresco el cual a su vez expulsará el aire viciado.

Datos requeridos:

- Número de personas que laboran por turno: 250.
- Número de equipos diesel por turno: 16
- Superficie transversal del SNV: 15.5 m^2 .
- Longitud Aproximada del SNV: 365 m .

Con fines de estimar el caudal requerido Q_{Req} para el sistema de ventilación presento a continuación los criterios de cálculo:

Caudal requerido por el número de personas:

$$Q_{N_p} = (N_p) * (F_p)$$

De la **tabla 2.1**.

$F_p = 6 \text{ m}^3/\text{min}$. (Mínimo caudal de aire por hombre sobre los 4000 m.s.n.m)

$$Q_{N_p} = (150) * \left(6 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right)$$

$$Q_{N_p} = \left(900 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right)$$

Caudal requerido por el número de equipos Diesel:

$$Q_{EDiesel} = (N_{HP}) * (F_{Diesel})$$

De la **tabla 2.1**. $F_{Diesel} > 3 \text{ m}^3/\text{min}$.

De los 16 equipos diesel por turno

Asumiendo:

- 7 Cargadores frontales (cada uno de 160 HP).

$$T_{HPCF} = (160HP) * (7)$$

$$\underline{T_{HPCF} = (1120HP)}$$

- 7 Camiones (cada uno de 140 HP).

$$T_{HPC} = (140HP) * (7)$$

$$\underline{T_{HPC} = (980HP)}$$

- 2 Perforadoras jumbo (cada uno de 110 HP)

$$T_{HPJ} = (110HP) * (2)$$

$$\underline{T_{HPJ} = (220HP)}$$

El total de HP será:

$$N_{HP} = T_{HPC} + T_{HPCF} + T_{HPJ}$$

$$\underline{N_{HP} = 2320HP}$$

Y el caudal por equipos Diesel:

$$Q_{EDiesel} = (2320HP) * \left(3.2 \frac{m^3}{min} \right)$$

$$\underline{Q_{EDiesel} = \left(7424 \frac{m^3}{min} \right)}$$

El caudal requerido según el número de personas y equipos para la ventilación de la mina será:

$$Q_{Req} = Q_{EDiesel} + Q_{N_p}$$

$$\underline{Q_{Req} = 8324 \left(\frac{m^3}{min} \right)}$$

Por concepto de fugas y filtraciones se agrega un 15% adicional a este caudal.

Caudal por filtraciones o fugas:

$$Q_{Filt / Fugas} = 15\% * (Q_{Req})$$

$$Q_{Filt / Fugas} = 1248.6 \left(\frac{m^3}{min} \right)$$

Así tenemos que el caudal necesario requerido final, para cumplir con el reglamento de seguridad e higiene minera peruana establecida será:

$$Q_{Requerido} = Q_{Req} + Q_{Fil / Fug}$$

$$Q_{Requerido} = 9572.6 \left(\frac{m^3}{min} \right)$$

$$Q_{Requerido} = 338015 (CFM)$$

Siendo este, el caudal de operación necesario para el sistema de ventilación.

Los fabricantes de ventiladores recomiendan que para la selección de un ventilador se escoja un caudal entre 1.3 a 2 veces el caudal requerido. Es así que tendríamos:

$$Q_{Final} = 439419 (CFM)$$

Asegurando con este caudal una atmósfera respirable y segura en interior mina.

3.1.4. Cálculo de la diferencia de presión

La diferencia de presión entre dos áreas de un mismo dúcto está dada por la ecuación de Atkinson.

$$P_D = \frac{K * C * L * V^2}{A}$$

Ecuación de Atkinson

Donde:

P_D : Caída de presión (Pa)

K: Factor de fricción ($\frac{N * s^2}{m^4}$)

C: Perímetro SNV (m)

L: Longitud SNV (m)

V: Velocidad ($\frac{m}{s}$)

A: Área (m^2)

Sabiendo que:

$$Q = V * A$$

La fórmula anterior se puede expresar como:

$$P_D = \frac{K * C * L * Q^2}{A^3}$$

Para el factor de fricción K, usaremos tablas para valores de K estándar basada en un peso específico del aire de $w = 0.0750 \frac{lb}{ft^3}$ (ver tabla 3.2).

El valor obtenido debe ser corregido por el cambio del peso específico del aire de la mina, es así que:

$$k_{\text{corregido}} = k_{\text{tabla}} * \left(\frac{w_{\text{msnm}}}{1.201} \right)$$

Donde:

W_{msm} : Peso específico del aire a una altura sobre el nivel del mar.

k_{tabla} : Factor de fricción obtenido de tabla.

Para encontrar el factor de fricción en la tabla, nos ponemos en la situación mas crítica que se puede encontrar en la geología del las vías de ventilación ó SNV, que sería de roca ígnea, la cual tiene factores de fricción mas altos tal como se muestra en la tabla 3.2. Entonces tenemos que el valor de k:

$$k_{tabla} = 160 * 10^{-10} \text{ lb} - \text{min}^2 / \text{ft}^4$$

En el SI:

$$k_{tabla} = 0.0296 \text{ N.s}^2 / \text{m}^4$$

$$k_{corregido} = 0.0296 * \left(\frac{0.8558}{1.201} \right) \text{ N.s}^2 / \text{m}^4$$

$$\underline{k_{corregido} = 0.021 \text{ N.s}^2 / \text{m}^4}$$

De los resultados anteriores:

$$Q_{Final} = 439419 \text{ CFM} = 207.4 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Reemplazando datos obtenemos:

$$P_D = \frac{0.021 * (15.4) * (365) * (207.4)^2}{(14.7)^3}$$

$$P_D = 1598.4 \text{ (Pa)}$$

$$\underline{P_D = 6.4 \text{ (pulg Agua)}}$$

TABLE 5.1 Friction Factor *K* for Noncoal Mine Airways and Openings

Values of $K \times 10^{10}$ ^a

Type of Airway	Straight						Sinuous or Curved									
	Irregularities of Surfaces, Areas, and Alignment			Clean (Basic Values)			Slightly Obstructed			Moderately Obstructed			High Degree Obstructed			
	Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average	Maximum	Clean	Slightly Obstructed	Moderately Obstructed	Clean	Slightly Obstructed	Moderately Obstructed	Clean	Slightly Obstructed	Moderately Obstructed	
Smooth lined	10	15	20	25	30	35	20	25	30	35	40	25	30	35	40	50
Sedimentary rock	15	20	25	30	35	40	25	30	35	40	45	30	35	40	45	55
	20	25	30	35	40	45	30	35	40	45	50	35	40	45	50	60
	30	35	40	45	50	55	40	45	50	55	60	45	50	55	60	70
Timbered (5-ft centers)	55	60	70	80	85	90	65	70	75	80	85	70	75	80	85	95
	70	75	80	85	90	95	80	85	90	95	100	85	90	95	100	110
	80	85	90	95	100	105	90	95	100	105	110	95	100	105	110	120
Igneous rock	95	100	105	110	115	120	105	110	115	120	125	110	115	120	125	135
	105	110	115	120	125	130	115	120	125	130	135	120	125	130	135	145
	90	95	100	105	110	115	100	105	110	115	120	105	110	115	120	130
Average	145	150	160	165	170	175	155	160	165	170	175	160	165	170	175	195
Maximum	195	200	205	210	215	220	205	210	215	220	225	210	215	220	225	235

Source: McElroy (1935).

^a To provide correct values of *K*, the numerical values obtained from the table are multiplied by 10⁻¹⁰ and units of lb·min²/ft⁴ attached. *K* is based on standard air specific weight ($w = 0.0750$ lb/ft³). Recommended values are in italics. To convert *K* to SI units (kg/m³), multiply table values by 1.855 × 10⁶.

Tabla 3.2. Factores de fricción para vías de ventilación de una mina

3.1.5. Cálculo de la potencia para la selección del ventilador

Para el cálculo de la potencia de un ventilador en kW tenemos:

$$P = \frac{Q * P_D}{1000 * \eta}$$

Donde:

P_D : Caída de presión (Pa)

Q : Caudal que se requiere. ($\frac{m^3}{s}$)

η : Eficiencia

Considerando un arreglo del ventilador con acople directo y tomando una eficiencia del motor entre 85% y 95% tenemos:

$$P = \frac{207.4 * 1598.4}{1000 * 0.85}$$

$$P = 390.00 \text{ (kW)}$$

$$P = \underline{522.80 \text{ (HP)}}$$

Con el cálculo de la potencia, el caudal y la caída de presión obtendríamos los datos necesarios para la selección del ventilador.

Punto de operación = (Q, P_D)

Punto de operación = (439419 CFM, 6.4 pulg. Agua)

3.2. Control del proceso

El ventilador será accionado mediante un motor con variador de velocidad, lo que permitirá controlar el caudal de aire, el mismo que será continuamente monitoreado por un sensor de caudal, que a su vez será el elemento de realimentación para el sistema de lazo cerrado. Logrando así que el proceso de ventilación sea más eficiente. A continuación se muestra un diagrama de bloques para el control del proceso de ventilación (ver figura 3.10).

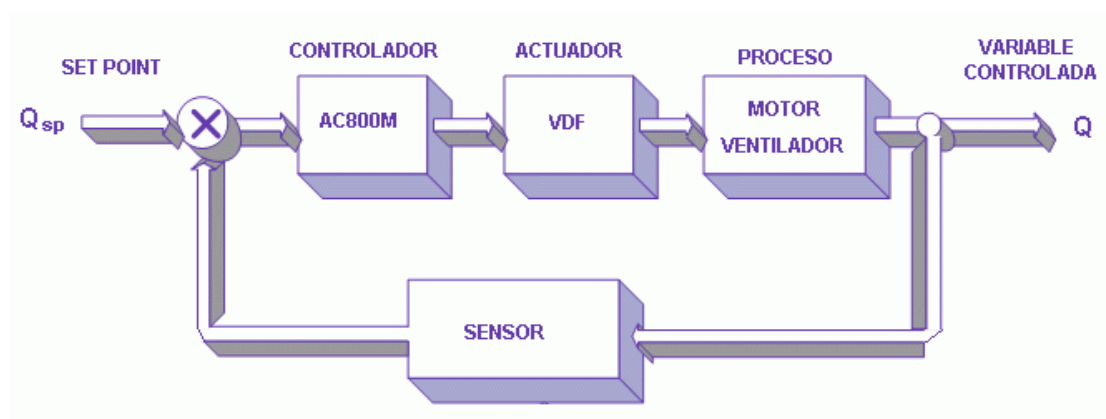


Figura 3.10. Diagrama de bloques para el control del caudal.

3.2.1. Controlador AC800M

Este controlador AC800M tiene el siguiente proceso de ejecución de programas:

Inicialmente el controlador copia a la RAM los estados de las señales de entrada conectadas (Input copy), ejecuta el código escrito por el programador, y

finalmente copia los resultados de la ejecución a las señales de salida (Output copy). El esquema de la figura 3.11 muestra lo mencionado.

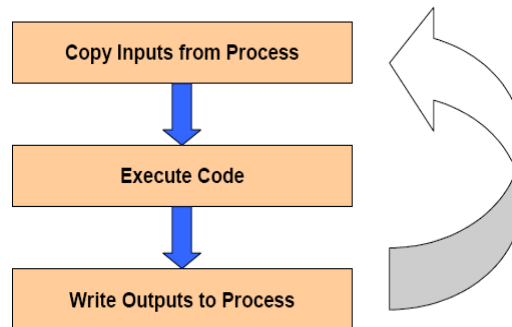


Figura 3.11. Secuencia de proceso de ejecución de controlador AC800M

Mientras que el controlador está en ejecución, el ciclo se repite a intervalos regulares determinados por el intervalo de la tarea. El tiempo de intervalo durante el cual se ejecuta el programa puede ser cambiado en cualquier momento. Para una tarea de tiempo crítico, el intervalo de tiempo puede llegar hasta 1 ms.

Características principales del controlador AC800M

- Soporte para FOUNDATION Fieldbus.
- Soporte para PROFIBUS DP-V0 Y DP-V1.
- Soporte para conexión módulos I/O.
- Soporte para la conexión a MasterBus 300.
- Soporte para unidades a través de PROFIBUS PA, ModuleBus y DriveBus.
- Rápida y sencilla búsqueda de averías con la ayuda de los LED's en cada unidad.

- Soporte para RS232C.
- Soporte para ETHERNET.
- Cuenta con baterías back-up internas y/o externas.

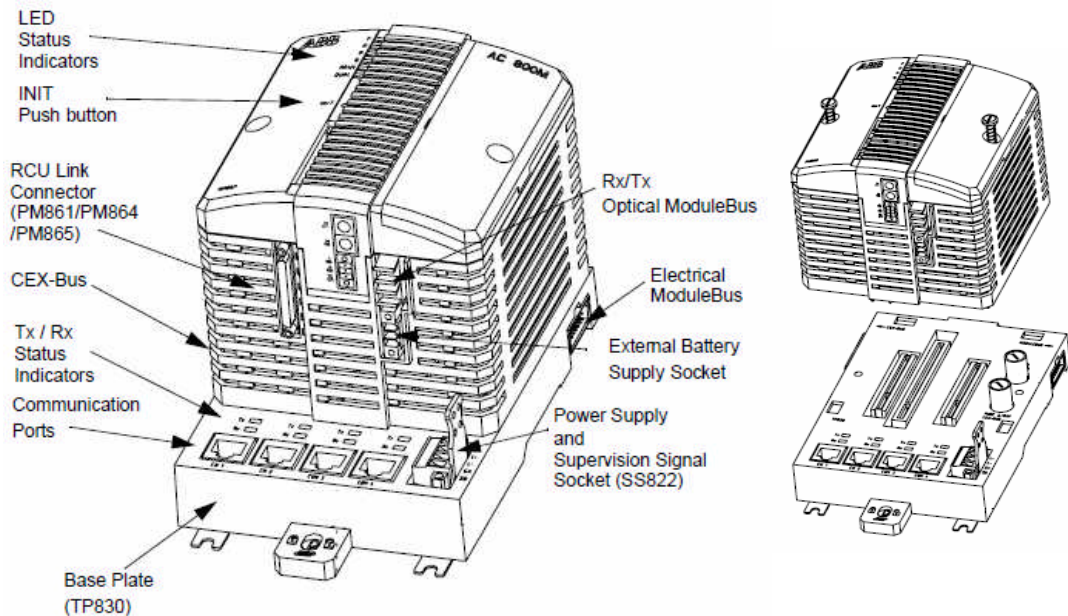


Figura 3.12. Vista general de la configuración física de un controlador AC800M

Físicamente el controlador AC800M consiste en 2 partes básicas como se ve en la figura 3.12, la unidad del procesador y la plataforma con terminales para la unidad de procesador.

En la plataforma o base es donde se encuentran la mayor cantidad de conexiones externas, Aquí se encuentran las borneras para la alimentación de 24 Vdc, los puertos RJ45 para el control de redes y el puerto serial, un conector para el bus de módulos eléctricos I/O denominado MODULE BUS, uno para el bus de interfaces de comunicación denominado CEX-BUS y en la unidad del procesador se encuentra el bus por fibra óptica.

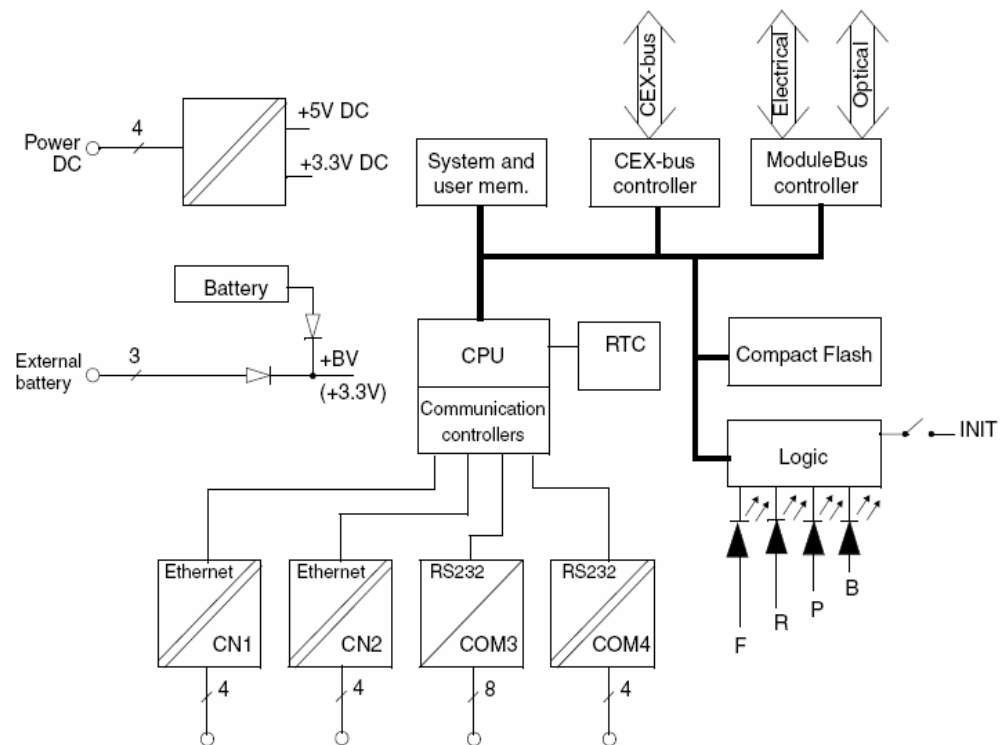
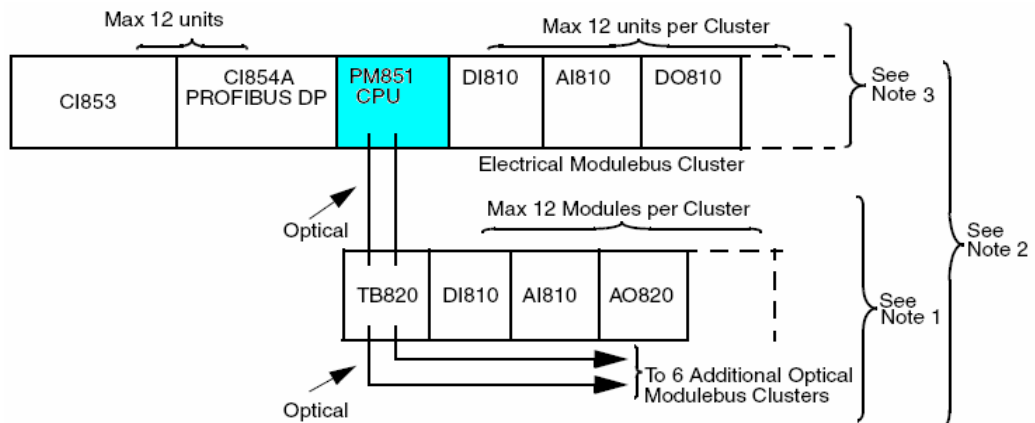


Figura 3.13. Diagrama de bloques funcional

En la figura 3.13 se muestra el diagrama de bloques funcional del controlador, el bloque del CPU contiene al microprocesador, la memoria RAM, controladores para las interfaces de comunicación, Real-Time Clock (RTC), led's indicadores, botón de reset. De la alimentación de 24Vdc se genera voltajes de +5Vdc y +3.3Vdc para el CPU, las interfaces de comunicación y unidades de entrada y salida.

El número máximo de módulos I/O por MODULE BUS es de 12 unidades, se puede extender el número usando el bus de fibra óptica del controlador hacia un total de 7 interfaces de fibra que pueden contener máximo 12 unidades de módulos I/O por interfaz, es así que podemos tener un máximo de 96 módulos

I/O. El bus de interfaces de comunicación nos permite tener un máximo de 12 interfaces soportadas por el controlador (ver figura 3.14).



Note 1 – Maximum 7 clusters (1 optical cluster for PM851).
Max 200 m between clusters.
Restrictions apply, see I/O documentation.

Note 2 – Central S800 I/O. Max. 96 units.

Note 3 – Maximum one CEX-module for PM851.

Figura 3.14. Distribución de interfaces y módulos I/O del controlador AC800M

3.2.2. Estrategia de control

El esquema mostrado en la figura 3.10 propone un sistema de lazo cerrado con realimentación del elemento sensor del caudal de ventilación, para este sistema el controlador debe ejecutar una acción de control PID, a continuación se explica el control PID.

Control PID

Consideremos un lazo de control de una entrada y una salida (SISO) de un grado de libertad tal como muestra la figura 3.15.

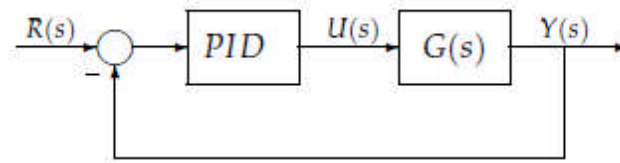


Figura 3.15. Control PID de una planta

Los controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID.

- **P: Acción de control proporcional;** da una salida del controlador que es proporcional al error, cuya señal de control es:

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

Función de transferencia:

$$C_p(s) = K_p$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

- **I: Acción de control integral;** da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento. Su señal de control es:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d(\tau)$$

Función de transferencia:

$$C_I(s) = \frac{K_I}{s}$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

- **PI: Acción de control proporcional-integral;** se define mediante la señal de control:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d(\tau)$$

Donde T_i se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

Función de transferencia :

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right)$$

- **PD: Acción de control proporcional-derivativa;** se define mediante la señal de control:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Donde T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de

control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador.

La acción de control derivativa nunca se utiliza por si sola, debido a que sólo es eficaz durante períodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

Función de transferencia :

$$C_{PD}(s) = K_p + s \cdot K_p \cdot T_d$$

- **PID: Acción de control proporcional-integral-derivativa;** esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

Señal de control:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Función de transferencia:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad \text{Ecuación 3.1.}$$

3.3. Sintonía de parámetros del control PID en la industria

En las primeras aplicaciones del control PID, el ajuste se basaba únicamente en la propia experiencia del operador de planta. En procesos lentos, cada prueba de sintonía puede emplear horas o incluso días, por lo que la realización de varios ensayos podría conllevar un tiempo excesivo. Para solucionar estos aspectos, Ziegler y Nichols propusieron técnicas empíricas para la sintonía de controladores PID, obtenidas tras numerosas pruebas y sin presuponer ningún conocimiento de la planta a controlar.

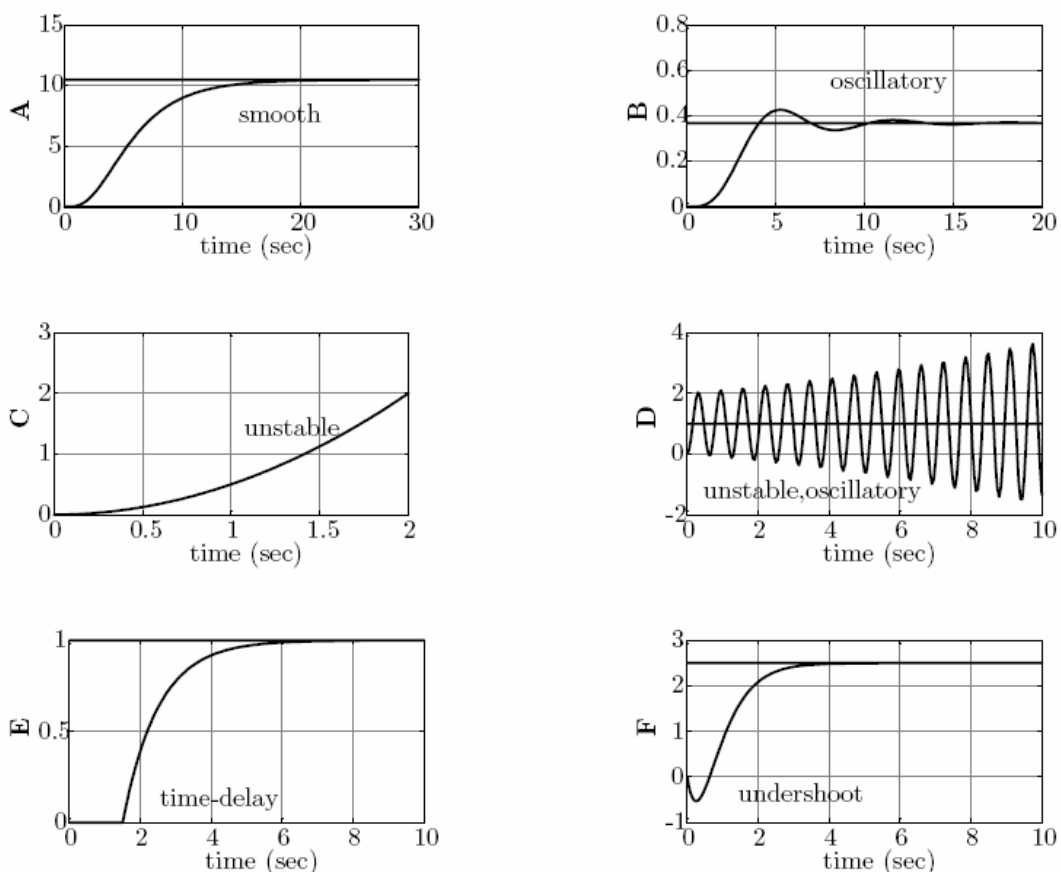


Figura 3.16. Seis posibles respuestas a un escalón

En la figura 3.16 se tiene seis posibles respuestas a un escalón; las reglas de tuning fueron desarrolladas, esencialmente para las respuestas escalón de tipo A. Las reglas, sin embargo, pueden funcionar con respuestas de tipo B, E y F.

Existen 2 métodos de Ziegler-Nichols:

- Método de Ziegler-Nichols en lazo abierto ó de Curva de Reacción.
- Método de Ziegler-Nichols en lazo cerrado ó de Ganancia Límite.

En este capítulo también se describirá el método usado por el controlador AC800M que es el **Método del relé**.

Estos métodos permiten calcular los parámetros del control, sin conocer el modelo matemático de la planta.

3.3.1. Método de Ziegler-Nichols en lazo abierto ó curva de reacción

El procedimiento general consiste en abrir el lazo cerrado de control, es decir, operar directamente el actuador con el controlador en manual y crear un pequeño y rápido cambio en escalón en el proceso de entrada. La respuesta obtenida se introduce en un registrador con el mayor tamaño posible del gráfico para obtener la mayor exactitud. En la figura 3.17 se ve la configuración en lazo abierto.

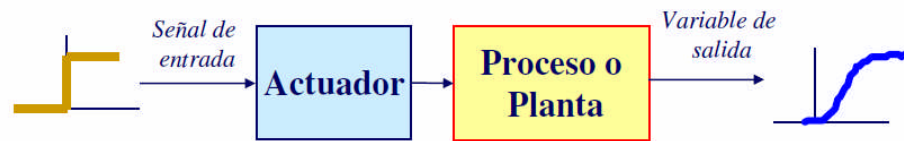


Figura 3.17. Configuración Ziegler-Nichols-lazo abierto

Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S (ver figura 3.18). Si la respuesta del sistema no tuviese esta forma, este método no sería aplicable.

Ziegler y Nichols obtuvieron la curva de respuesta de los sistemas probados, a un cambio escalón en la entrada, denominada curva de reacción. Trazando una recta tangente al punto de inflexión de dicha respuesta, como se observa en la figura 3.18, determinaron el retraso L del sistema y su razón de reacción R (pendiente de la recta)

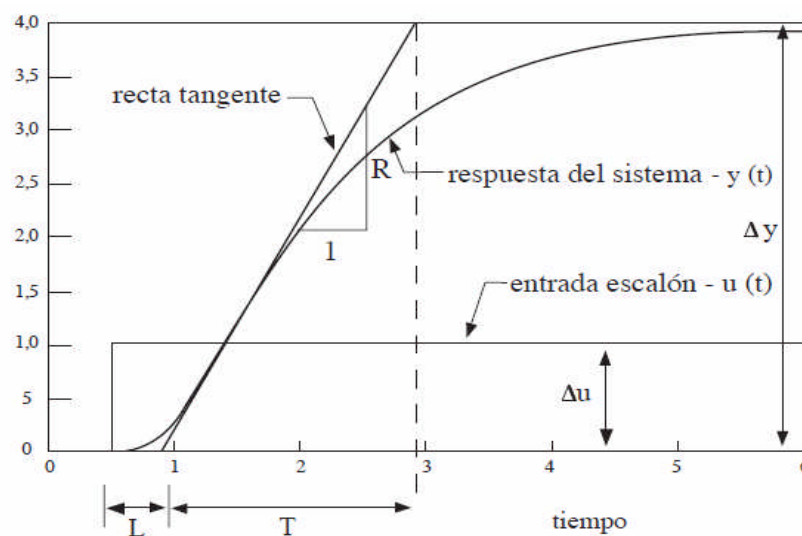


Figura 3.18. Curva de respuesta en forma de S

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que aparece en la tabla 3.3, para luego ser reemplazadas en la ecuación 3.1.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	2L	0.5L

Tabla 3.3. Tabla de parámetros para sintonía Ziegler-Nichols-lazo abierto

Para este caso es muy frecuente encontrar que las ecuaciones de sintonización de Ziegler y Nichols de lazo abierto, se empleen con los parámetros de un modelo de primer orden de la forma:

$$G_p(s) = \frac{K_p * e^{-Ls}}{Ts + 1}$$

Donde K_p es la ganancia estática, T la constante de tiempo y L el tiempo muerto.

3.3.2. Método de Ziegler-Nichols en lazo cerrado ó de ganancia límite

Este método fue desarrollado por Ziegler y Nichols y permite calcular los tres términos de ajuste del controlador a partir de los datos obtenidos en una prueba rápida de características del bucle cerrado del control. El método se basa en aumentar gradualmente la ganancia con los ajustes de integral y derivada en su

valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empieza a oscilar de modo continuo. Este valor de la ganancia se denomina "Ganancia Límite" (K_u). Se anota el período del ciclo de las oscilaciones (T_u) en minutos, y la ganancia K_u .

Se puede citar 3 pasos para este método:

Paso 1; con el sistema en lazo cerrado, utilizar un control únicamente proporcional (de la ecuación 3.1, haciendo $T_i = \infty$ y $T_d = 0$) e ir incrementando la ganancia K_p desde 0 hasta un valor crítico en el que el sistema presenta una oscilación mantenida. Este valor de la ganancia será la ganancia crítica K_u . En el caso de que el sistema no presente oscilaciones mantenidas para ningún valor de la ganancia K_p , este método no sería aplicable (ver figura 3.19).

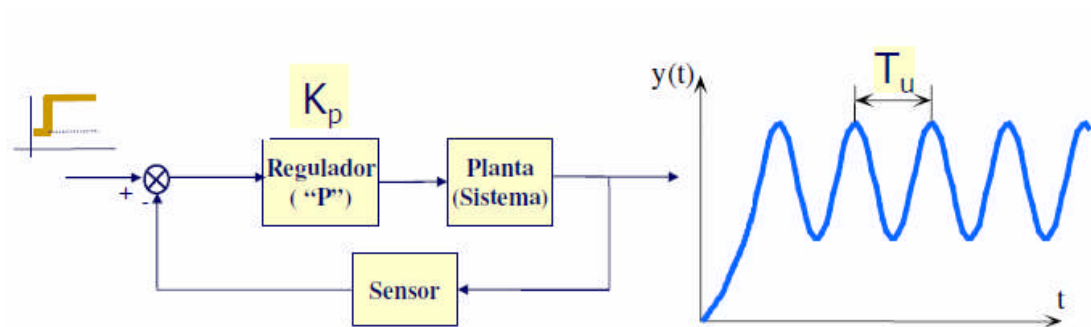


Figura 3.19. Configuración Ziegler-Nichols-lazo cerrado

Paso 2; para esta respuesta oscilatoria, se determina gráficamente el valor del período de dichas oscilaciones, T_u .

Paso 3; Con los valores de estos parámetros K_u y T_u , sintonizar el PID con los valores recomendados por las fórmulas de Ziegler-Nichols (ver tabla 3.4).

Regulador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$		
PI	$0.4 K_u$	$0.8 T_u$	
PID	$0.6 K_u$	$0.5 T_u$	$0.125 T_u$

Tabla 3.4. Tabla de parámetros para sintonía Ziegler-Nichols-lazo cerrado

Este método se denomina también de “lazo cerrado” pues el controlador trabaja en todo momento en posición de “automático”. El método de Ziegler-Nichols en bucle cerrado generalmente es arriesgado, ya que fuerza a la planta a operar cerca de la inestabilidad. También, es difícil mantener la amplitud constante (importante por seguridad).

3.3.3. Método del relé

El procedimiento de retroalimentación de relé es una técnica simple pero eficaz para la estimación de parámetros el mismo que ha sido adoptado en los controladores de procesos industriales.

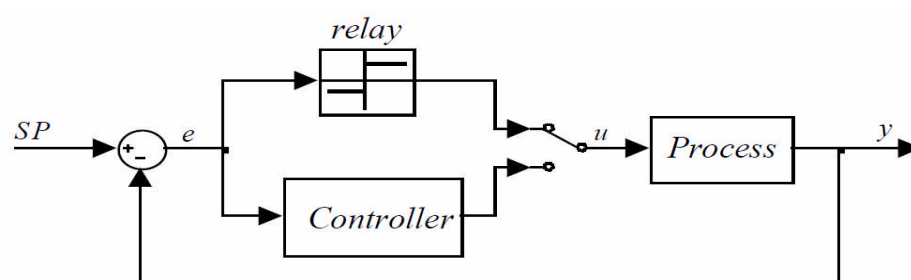


Figura 3.20. Sistema convencional de relé por realimentación

Es una variante del método mencionado anteriormente, está basada en el diagrama de la figura 3.20. En este método, se utiliza un relé para conseguir los

valores de la ganancia final K_u y del periodo final T_u . Posteriormente se aplica la misma tabla de sintonía que en Ziegler-Nichols en lazo cerrado.

El Relé es de la forma:

$$u(t) = \begin{cases} h, & e(t) \geq 0 \\ -h, & e(t) < 0 \end{cases}$$

Para identificar los parámetros, el controlador temporalmente deshabilita su algoritmo PID y lo reemplaza con un relé que fuerza a la variable de proceso a oscilar. Cada vez que la variable de proceso pase por el set-point el esfuerzo de control se invierte. Para empezar con el test del Relé, solo los límites superior e inferior del relé deberían ser manipulados. La salida del sistema será una señal oscilatoria de período T_u y de amplitud a (ver figura 3.21).

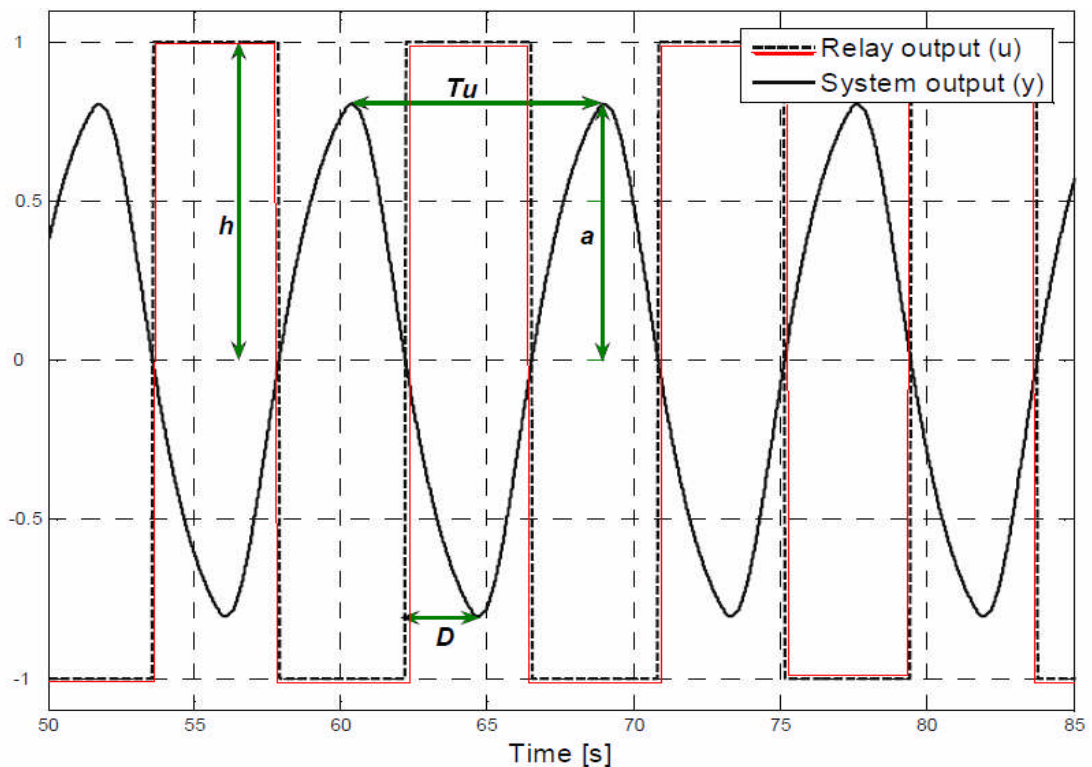


Figura 3.21. Ciclo límite de oscilación para un sistema con ganancia positiva

En este caso, se obtiene la ganancia última mediante la fórmula:

$$K_u = \frac{4 * h}{\pi * a}$$

Debe tenerse en consideración también, que como con cualquier regla de sintonización, los parámetros calculados deben considerarse solo una primera aproximación de los valores requeridos, los que usualmente requieren de un afinamiento posterior, para lograr el comportamiento deseado del sistema de control con el proceso real.

Para nuestro caso tenemos herramientas del software del controlador AC800M que nos permitirá realizar el proceso de sintonía de los lazos de control, el cual como mencionamos utiliza el método del Relé (ver figura 3.22).

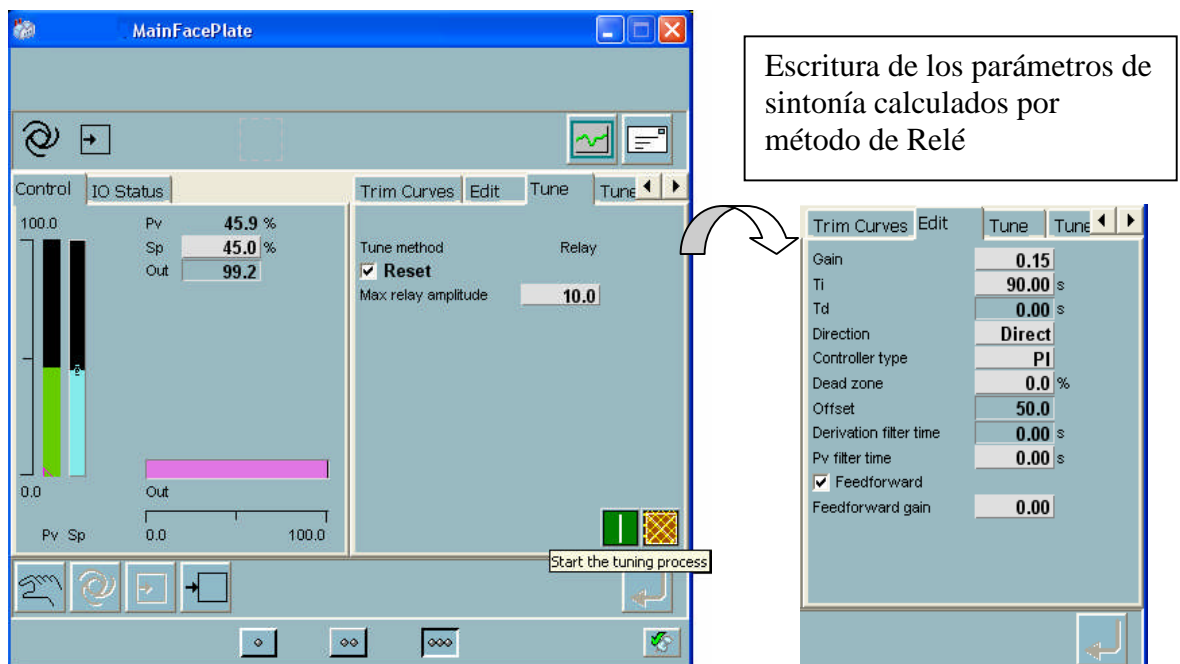


Figura 3.22. Opción de autosintonía por método de relé en el controlador AC800M

Cuando la oscilación es estable, es decir la amplitud alcanza las condiciones de equilibrio en la oscilación. Las constantes de sintonía serán calculadas y presentadas, el sintonizador cambiará el tipo de controlador PI o PID basado en las características encontradas del proceso. La selección más común es un PID.

Durante la sesión de autosintonía la variable de proceso es supervisada y si su tendencia o amplitud están fuera de los valores definidos, el controlador interrumpe la sesión.

3.4. Accionamiento

Para esta etapa se utilizará un Variador de Frecuencia (VDF) el cual es un equipo electrónico que permite regular la velocidad de los motores de inducción de corriente alterna trifásica.

3.4.1. Variador de frecuencia – VDF

Los VDF son de tres tipos: Voltaje de entrada variable (VVI), entrada de fuente de corriente (CSI) y modulación por ancho de pulso (PWM).

Al permitir un arranque suave y parada suave, eliminan las elevadas corrientes generadas con otros métodos de arranque, reduciendo los esfuerzos mecánicos en los sistemas de transmisión y los eléctricos en los cables e instalación en general.

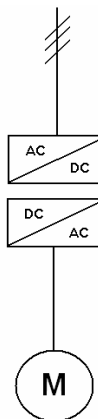


Figura 3.23. Diagrama unifilar del VDF ACS1000

Un variador de frecuencia VDF, consta principalmente de tres partes, un circuito rectificador que convierte AC a DC, un circuito intermedio y un circuito inversor que convierte DC a AC, pero con la frecuencia variable de cero a la frecuencia de línea de entrada. La velocidad del motor depende de la frecuencia, para motores de inducción es posible controlar la velocidad del motor variando la frecuencia de variador, lo cual permite regular la velocidad del motor en funcionamiento continuo.

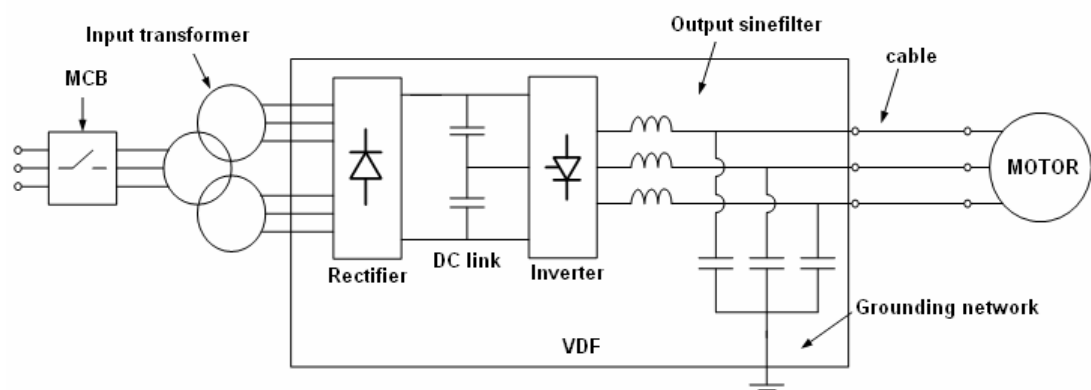


Figura 3.24. Circuito interno de un variador de frecuencia ACS1000

En la figura 3.24 se notan las partes principales del VDF, La primera es un rectificador de onda completa formado por diodos o SCR y convierte el voltaje

de línea AC a voltaje DC. La segunda parte consiste en un filtro formado por un condensador para lograr un valor DC estable. Luego del filtro, el voltaje DC entra a la tercera parte del circuito, el inversor, aquí el voltaje es modulado por ancho de pulso para variar el voltaje efectivo entregado al motor. Pese a la modulación la forma de onda de la corriente es cercana a una onda sinusoidal logrando un control de torque fino. Generalmente esta etapa de potencia utiliza transistores de potencia IGBT's.

El circuito de control del inversor comanda la conmutación de los IGBT's a frecuencias altas (orden de Khz), cuyo inconveniente es la generación de armónicos devueltos a la línea. Por esta razón es común instalar un filtro junto con el variador (ver figura 3.25).

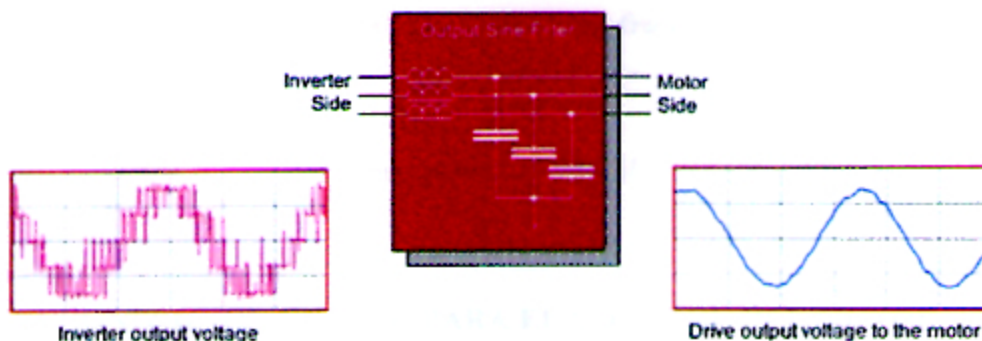


Figura 3.25. Entrada y salida de de la señal de voltaje por el filtro

A. CONTROL DEL INVERSOR DEL VDF

La elección del ventilador es acuerdo a los cálculos realizados de caudal, presión diferencial y potencia en HP, así entonces tenemos los siguientes valores:

$$P_D = 6.4(\text{pulg Agua})$$
$$P = 522.80 \text{ (HP)}$$
$$Q_{total} = 439\,419 \text{ (CFM)}$$

Entonces el Ventilador seleccionado es:

$$Q. \text{ máx.} = 460\,000 \text{ CFM}$$
$$\text{Potencia Motor} = 700 \text{ HP}$$
$$\text{Alimen. Motor} = 4000 \text{ Vac}$$

El motor es un motor de inducción con rotor del tipo bobinado y con conexión del tipo estrella para el control. El control del motor seleccionado se efectúa por modulación de ancho de pulso PWM basada en PORTADORA.

Para nuestro caso el VDF a utilizar tiene una frecuencia de conmutación para los tiristores IGCT de:

$$f \text{ conmutación} \geq 20 \text{ KHz}$$

SINCRONIZACION DE PWM PARA EL CONTROL DEL MOTOR

A continuación cada tiristor en el inversor es modelado como un interruptor y el correspondiente modelo circuital del inversor se muestra en la figura siguiente.

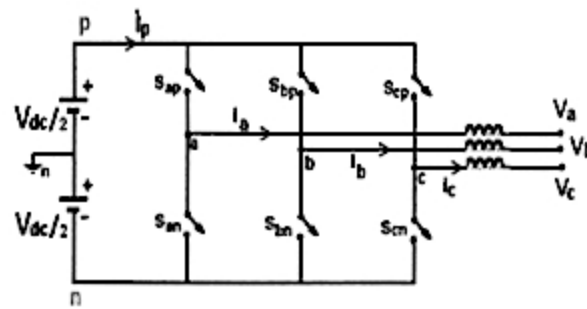


Figura 3.26. Diagrama circuital para el inversor de IGBT's

La sincronización de los interruptores superior e inferior respectivamente, se obtienen mediante la comparación entre las amplitudes de una señal de alta frecuencia denominada portadora y una señal de baja frecuencia denominada moduladora o de referencia y se generan en el instante en que sus amplitudes son iguales.

LA SEÑAL PORTADORA

En este caso cuando la portadora es triangular, lo que indica que en cada período de portadora se generan 2 intersecciones con la moduladora, permitiendo el control tanto del flanco de subida como del flanco de bajada de los pulsos resultantes.

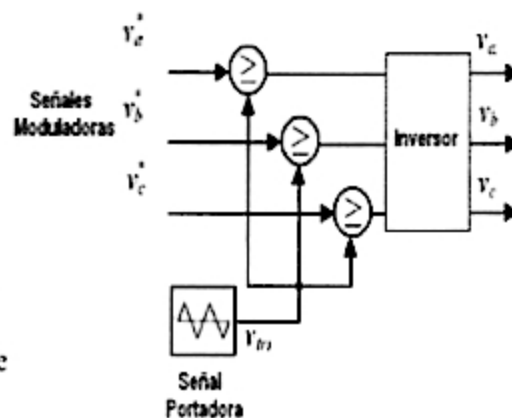


Figura 3.27. Diagrama Inversor

LA SEÑAL MODULADORA

La señal moduladora contiene la información de amplitud, frecuencia y fase deseada y por esta razón se conoce también como señal de referencia. Para este

caso se utiliza señales moduladoras sinusoidales encargadas de configurar la amplitud, frecuencia y fase a la salida del inversor y vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}v_a^*(t) &= A \cdot \sin(\omega_m t) \\v_b^*(t) &= A \cdot \sin(\omega_m t - \frac{2\pi}{3}) \\v_c^*(t) &= A \cdot \sin(\omega_m t - \frac{4\pi}{3}) \\v_a^*(t) + v_b^*(t) + v_c^*(t) &= 0 \quad \text{Señales desfasadas } 120^\circ\end{aligned}$$

Por lo tanto teniendo en cuenta que la señal moduladora será una sinusoidal podemos

calcular el índice de la modulación de la amplitud que viene dada por:

$$M = \frac{A}{v_m} = \frac{A}{V_{DC}/2}$$

Donde A es la amplitud de la señal moduladora y V_m es la máxima amplitud de la portadora. Entonces para este caso con una $A = V_{DC}/2$ tenemos.

$$M=1$$

El valor de índice de modulación igual a 1 nos indica el máximo nivel de utilización del Bus DC.

Calculamos los parámetros para nuestra señal portadora, sabiendo que:

$$p = \frac{f_c}{2 * f_r}$$

Donde: f_c = Frecuencia de la señal portadora

f_r = Frecuencia de la señal de referencia

p = cantidad de pulsos

Para un variador de 6 pulsos

Para un variador de 12 pulsos

$$f_c = (6)(2)(60)$$

$$f_c = 720 \text{ Hz}$$

$$f_c = (12)(2)(60)$$

$$f_c = 1440 \text{ Hz}$$

Por lo tanto:

Frecuencia de la onda triangular = 720 Hz (Para un variador de 6 pulsos)

Amplitud de la onda triangular = Vdc

Obteniéndose como voltajes de línea:

$$v_{ab}(t) = v_{an} - v_{bn} = \sqrt{3}A.\sin(\omega_m t + \frac{\pi}{6})$$

$$v_{bc}(t) = v_{bn} - v_{cn} = \sqrt{3}A.\sin(\omega_m t - \frac{\pi}{2})$$

$$v_{ca}(t) = v_{cn} - v_{an} = \sqrt{3}A.\sin(\omega_m t + \frac{\pi}{2})$$

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL INVERSOR - PWM

BASADA EN PORTADORA

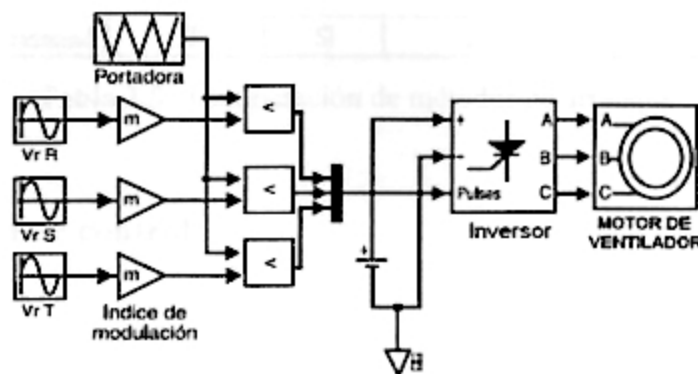


Figura 3.28. Diagrama de bloques del control del Inversor

3.4.2. Ventajas de usar un VDF

- Control de velocidad variable ahorra una considerable cantidad de energía
- Mayor calidad a través de un mejor control del proceso.
- Se reduce el desgaste del equipo de proceso.
- Reduce el ruido en muchos casos.
- Los recursos naturales son optimizados mientras los procesos de eficiencia se mejoran.
- Un arranque y parada suave reduce las pérdidas y ahorra materia prima.

En la tabla 3.5 se muestra una tabla de comparación de métodos de arranque de motores.

Tipo de problema	MÉTODO DE ARRANQUE				
	Arranque directo	Y - Δ	Auto-Transformador	VDF	SoftStarter Arrancador suave
Deterioro en cojinetes	SI	MEDIO	MEDIO	NO	NO
Alta corriente de arranque	SI	MEDIO	NO	NO	NO
Alto desgaste en la transmisión	SI	SI	SI	NO	NO

Tabla 3.5. Comparación de métodos de arranque

3.5. Filosofía de control

Operación deseada

El ventilador tendrá tres modos de operación los que serán seleccionados mediante un selector de tres posiciones con llave ubicado en el panel local:

- **Prueba:** Este modo será utilizado para efectuar los ajustes como verificación de sentido de giro, operación de las puertas de mariposa, estado de las vibraciones, operación del freno, corriente, señalización local, etc.

En este caso el ventilador quedará protegido solo por las protecciones eléctricas del Relé 469. La partida se permitirá solo si el selector de desbloqueo de freno está en posición desbloqueo y la partida se efectuará mediante la botonera ubicada junto al equipo la cual deberá mantenerse presionada durante todo el tiempo en que se desea operar el equipo.

- **Local:** En este modo de operación el ventilador puede ser operado desde el panel local. La parada puede efectuarse desde cualquier lugar (Local o remoto).

En el panel local el ventilador puede ser operado desde la pantalla touch screen o mediante la botonera ubicada en el panel. En este modo el Controlador AC800M espera todas las condiciones necesarias para permitir una partida siguiendo la secuencia lógica establecida en el programa de control.

- **Remoto:** En este modo de operación el ventilador puede ser operado desde cualquiera de las dos consolas de operación remotas: La parada puede efectuarse desde cualquier lugar (Local o remoto).

Secuencia de partida local-remota

Antes de indicar que el ventilador está listo para partir, el Controlador AC800M maestro verificará lo siguiente:

- Si el contactor de alimentación al transformador se encuentra cerrado.
- Chequeará que la protección 469 se encuentre normal.
- Verificará que el Variador no indique alarmas o fallas.
- Que no existe ninguna parada de emergencia activada y que el selector local este en la posición de operación deseada (Local/Remoto).
- Que las puertas de batientes se encuentran cerradas, el freno activado. Además el ventilador debe estar detenido.
- Verificar que en el sistema de control del controlador AC800M no haya ninguna falla o alarma activada.
- En el caso que exista alguna falla o alarma activada se deberá reponer reconociendo las alarmas respectivas o efectuando un reset remoto del dispositivo con falla. En el caso que la situación persista deberá revisarse localmente el equipo con problema.

Con la señal de ventilador listo para partir, el Controlador AC800M esperará la señal de partida desde los botones habilitados para este efecto:

- Con la señal de partir, el controlador AC800M local habilitará la baliza y la bocina durante 30 segundos.
- Completados los 30 segundos se deberá desenergizar el freno y luego

verificar que las puertas batientes se encuentren completamente abiertas.

- Luego dar la orden de partir al VDF. Al Cabo de 45 segundos deberá verificarse que el ventilador está operando a velocidad nominal.
- Si no se cumple lo anterior o aparece alguna alarma durante la secuencia de partida, deberá abortarse la partida e indicar la alarma correspondiente. Si la partida es exitosa deberá desenergizarse la baliza y alarma y señalar que el ventilador está funcionando.
- Cada vez que se aborte una partida o se detenga el ventilador en forma normal o de emergencia, deberá volverse a energizar el freno, una vez que la velocidad del ventilador sea menor que el 10 % de la velocidad nominal.
- Una vez que el ventilador este funcionando podrá regularse la velocidad para obtener el caudal deseado.

Secuencia de parada local-remota

Con la señal de parada, del Controlador AC800M comandará y verificará lo siguiente:

- Dar la orden de parar al VDF y activar la luz de ventilador detenido cuando este se encuentre detenido.
- Activar el freno cuando la velocidad sea menor que un 10% de la velocidad nominal.
- Verificar que el ventilador se detenga completamente después de 3

minutos.

- Verificar que las puertas batientes se cierren completamente.
- Activar la luz de listo para partir si corresponde.

3.6. Teoría de programación

El software a utilizar se llama Control Builder M Profesional, que pertenece al paquete de software de programación Industrial IT SYSTEM 800xA SP1 del controlador AC800M desarrollado por ABB Industrial IT.

Este software contiene soporte para los 5 lenguajes de programación de IEC 61131-3:

- Texto estructurado. (ST)
- Lista de instrucciones (IL)
- Diagrama de bloque de funciones (FBD)
- Diagrama Ladder (LD)
- Secuencia de funciones Chart (SFC)

El usuario puede elegir el lenguaje de programación con el cual se sienta más familiarizado, para el caso de la programación del sistema de control ventilación se usará los FBD. Para fines de entender mejor el uso del software mencionado y del lenguaje de programación que se usará, detallo brevemente el uso de los mismos:

Entorno de Control Builder M Profesional

Los primeros pasos para la programación en este entorno son definir los siguientes directorios:

- **Controllers:** Se define la arquitectura de comunicación que tendrá el controlador con sus interfaces de comunicación y módulos de entrada y salida.
- **Libraries:** Las librerías son definidas por el programador de acuerdo al lenguaje de programación a usar, contienen objetos básicos para la programación hasta objetos con funciones avanzadas para facilitar la programación de acuerdo a aplicaciones determinadas.
- **Applications:** En este directorio se asigna el área a donde pertenecerán las hojas de programación.

Definidos los tres primeros pasos, se procede a la programación, teniendo en cuenta los tipos de datos que maneja el software, que a continuación se mencionan.

Tipo de datos

Un tipo de dato (Data Type) define la característica de un tipo de variable. Control Builder M maneja dos tipos de datos: Simples y estructurados. Una variable de tipo de dato simple contiene un solo valor en cambio una variable estructurada contiene un número de componentes de variables simples o estructuradas (ver tablas 3.6 y 3.7).

Data type	Description	Bytes allocated by variable	Initial value (default)
bool	Boolean	4	False, 0
dint	Double integer	4	0
int	Integer	4	0
uint	Unsigned integer	4	0
string	Character string ⁽¹⁾	10 bytes + string length [n]	“
word	Bit string	4	0
dword	Bit string	4	0
time	Duration	8	T#0s
date_and_time	Date and time of day	8	1979-12-31-00:00:00
real	Real number	4	0.0

Tabla 3.6. Tipo de dato simple

Data Type	Componente	Data Type
BoolIO	Value	Bool
	IOvalue	Bool
	Forced	Bool
	Status	Dword

Data Type	Componente	Data Type	Componente	Data Type
RealIO	Value	Bool		
	IOvalue	Bool		
	Forced	Bool		
	Status	Dword		
	Parameters	SignalPar	Max	Real
			Min	Real
			Inverted	Bool
			Fraction	dint
			Unit	String[10]

Tabla 3.7. Tipo de dato estructurado

Diagrama de bloque de funciones (FBD)

Es un lenguaje de programación a nivel gráfico, este lenguaje describe el programa en términos de procesamiento de elementos y flujo de señales, similar a los diagramas de circuitos electrónicos, están representados por símbolos gráficos (bloques) en donde sus parámetros de entradas y salidas son pines.

Cada bloque de función esta representado como un rectángulo con entradas por el lado izquierdo y sus salidas por el lado derecho. Todos lo bloques tienen un algoritmo para calcular los valores de salida basado en el estado de las entradas. En un programa de bloques de funciones el flujo normal de señales es de izquierda a derecha.

El estándar IEC 61131-3, define un pequeño repertorio de tipos de bloques de funciones estándar. Estos están predefinidos en muchos de los controladores programables de hoy en día. Los bloques de función estándar son frecuentemente usados para construir bloques de función definidos por el usuario. Los bloques comúnmente mas usados son:

- Condiciones Binarias como AND, OR, XOR y NOT.
- Bistables (SR,RS).
- Detectores de flanco.
- Temporizadores.
- Contadores.

Control Builder M Profesional tiene bloques predefinidos para aplicaciones determinadas como, bloques de control de motores, bloques para válvulas, conversores de tipo, alarmas (ver figuras 3.26 y 3.27).

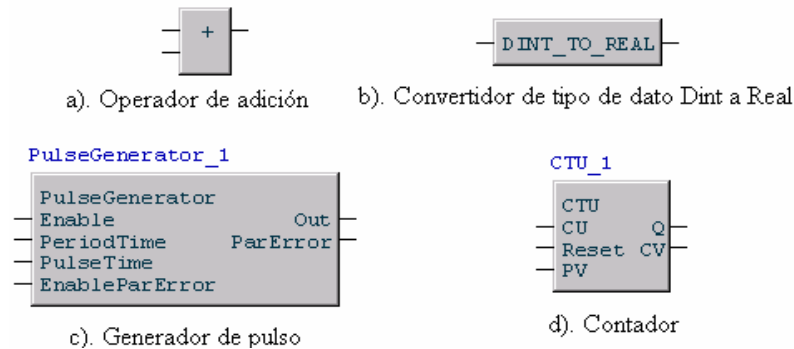


Figura 3.26. Bloques de función básicas para programación en control builder



Figura 3.27. Bloques con funciones avanzadas para programación en control builder

La programación para el sistema de control de ventilación se realizará por diagrama de bloques (ver en el capítulo V).

CAPÍTULO IV

EQUIPOS, INSTRUMENTACIÓN Y PROTOCOLOS DEL SISTEMA DE CONTROL

4.1. Criterios para selección de equipos e instrumentación

Para la selección ya sea de equipos o instrumentación, debemos tener presente ciertos criterios tanto de las características físicas del proceso, diseño y análisis del equipo/instrumento, consideraciones del sistema de datos, fuente de alimentación, disponibilidad y coste. A continuación algunos criterios a tomar en cuenta:

Criterios del análisis del equipo/instrumento

- Magnitud que se va a analizar.
- Rango de valores de análisis.
- Exactitud requerida y si debe ser igual en todo el rango o no.
- Características físicas y químicas del objeto de análisis.
- Condiciones ambientales a las que se someterá el instrumento.

Criterios del sistema de datos y fuente de alimentación

- Sistema analógico – sistema digital.
- Tipo de tensión de excitación o alimentación.

Criterios del diseño del instrumento

- Restricciones en peso, configuración, potencia.
- Tipo de salida de resultados.
- Tiempo de operación (ciclo de vida).

Si la medida se realiza en fluídos:

- Efectos que provocará sobre el instrumento. (¿afectará la medición a la magnitud analizada hasta el punto de dar resultados erróneos?).
- Mínimo nivel de conocimientos para manejar, instalar, mantener el instrumento y sus métodos de calibración.

Factores de disponibilidad

¿Cumple el instrumento todos los requisitos sin necesidad de modificación?

Si no es así:

- ¿Bastará un mínimo rediseño de un instrumento existente, o será necesario un esfuerzo de desarrollo mayor?
- ¿Cuántos instrumentos de esas características serán necesarias tanto ahora como en el futuro?
- ¿Qué fabricante construye instrumentos similares al requerido?

- ¿Qué relación existe con la empresa fabricante?

Factores de coste

- Relación función de análisis del instrumento/precio.
- Costes adicionales por calibración periódica, instalación y mantenimiento.
- ¿Cuál es el requisito del instrumento que provoca el mayor coste?

4.1. Medición de variables de proceso

Las variables de proceso son medidas por diversos medios que producen siempre señales analógicas. Las señales analógicas pueden ser: mA, mV, V, ohms, psig, pulsos, etc. Para el control del proceso de ventilación las variables involucradas son: Temperatura, presión diferencial, flujo, vibración y velocidad. Seguidamente se dará a conocer los principios de funcionamiento de los instrumentos que medirán las variables de este proceso.

4.1.1. Sensor de temperatura RTD

Existen diferentes sensores a la hora de realizar mediciones de temperatura, de todos ellos se eligieron los **RTD's (resistance temperature detectors)** sensores de temperatura resistivo, considerados una buena alternativa por las ventajas que

presentan. A continuación la tabla 4.1 muestra la comparación del RTD con otros sensores de temperatura.

Atributo	Termocupla	RTD	Termistor
Costo	Bajo	Alto	Bajo
Rango de temperatura	-180°C a 1700°C Muy amplio	-270°C a 600 °C Amplio	-40 °C a 260 °C Mediano
Exactitud	Media	Excelente	Media
Repetibilidad	Regular	Buena	Regular
Respuesta	Mediana a rápida	Mediana	Mediana a rápida
Linealidad	Regular	Alta	Baja

Tabla 4.1. Comparación de sensores de temperatura

Los RTD's son los sensores de temperatura de mayor costo en el mercado. Sin embargo el proceso de ventilación minera subterránea es considerado una aplicación crítica, para lo cual requiere de instrumentos de medición que ofrezcan las garantías de una buena lectura para alcanzar un estado seguro del equipo (ventilador) y cumplir con un sistema de operación segura.

Principio de funcionamiento

Los RTD's de platino son los más usados en la industria. Para este tipo de sensores la resistencia eléctrica aumenta con el incremento de la temperatura, la relación entre resistencia y temperatura la describe la ecuación de CALLENDAR-VAN DUSEN.

$$R = R_o \left(1 + A.T + B.T^2 - 100C.T^3 + C.T^4 \right)$$

Donde:

R : Es la resistencia a una temperatura de T °C.

Ro : Es la resistencia a 0 °C.

T : Es la temperatura.

Los coeficientes A, B y C dependen de tipo de material y su pureza. Estos coeficientes están contemplados en la norma IEC 751. El efecto de la ecuación de Callendar-Van Dusen suele aproximarse a un sistema de primer o segundo orden para facilitar los cálculos. Para los siguientes casos.

Para $T > 0^{\circ}\text{C}$ el coeficiente $C = 0$, entonces la ecuación es:

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2)$$

Para un modelo lineal la ecuación es:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$

Donde:

α = coeficiente de temperatura ($1/^{\circ}\text{C}$).

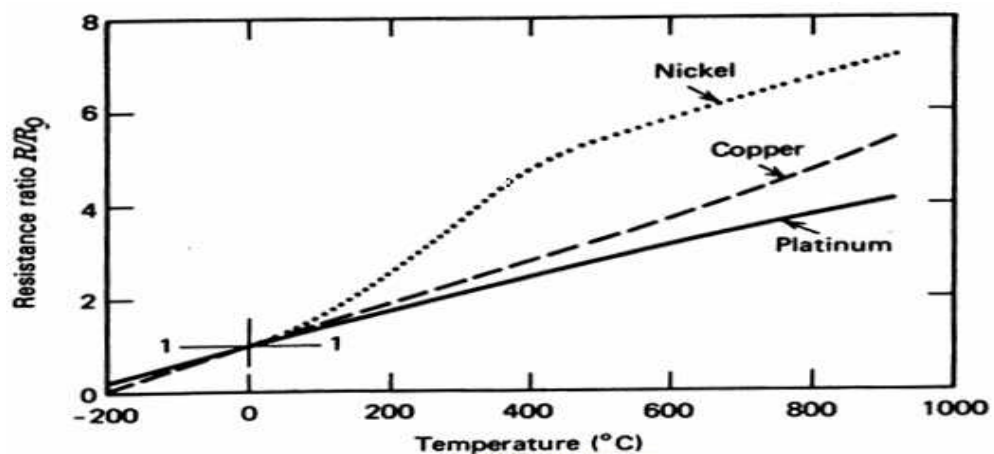


Figura 4.1. Comparación de RTD's de diferentes materiales

En la figura 4.1 se muestra una comparación gráfica de los materiales más comunes de fabricación de RTD's y en la tabla 4.2 las ventajas y rangos que se tiene al usarlos con estos materiales.

Material	Coefficiente de temperatura (1/°C)	Rango	Descripción
Platino	0.00385 - 0.00392	-270 a 600 °C	Mejor precisión y estabilidad, zona lineal más grande, mayor resistividad.
Niquel	0.0067	-40 a 300 °C	Coefficiente de temperatura más alto
Cobre	0.0043	-73 a 149 °C	Más lineal pero en una zona menor, resistividad baja

Tabla 4.2. Ventajas y rangos de RTD's diseñados con diferentes materiales

4.1.2. Sensor de flujo ultrasónico

A continuación describiré el principio de funcionamiento del medidor de flujo que usaremos, como es el caso del medidor de flujo ultrasónico, que se basa en el tiempo de viaje de la onda de ultrasonido.

P : Distancia que recorrerá la señal ultrasónica.

V : Velocidad del flujo de aire.

θ : Ángulo entre la dirección del ultrasonido y la velocidad del flujo.

t_{up} : Time-upstream, tiempo que toma la señal ultrasónica en viajar en contra del flujo.

t_{dn} : Time-downstream, tiempo que toma la señal en viajar siguiendo al flujo.

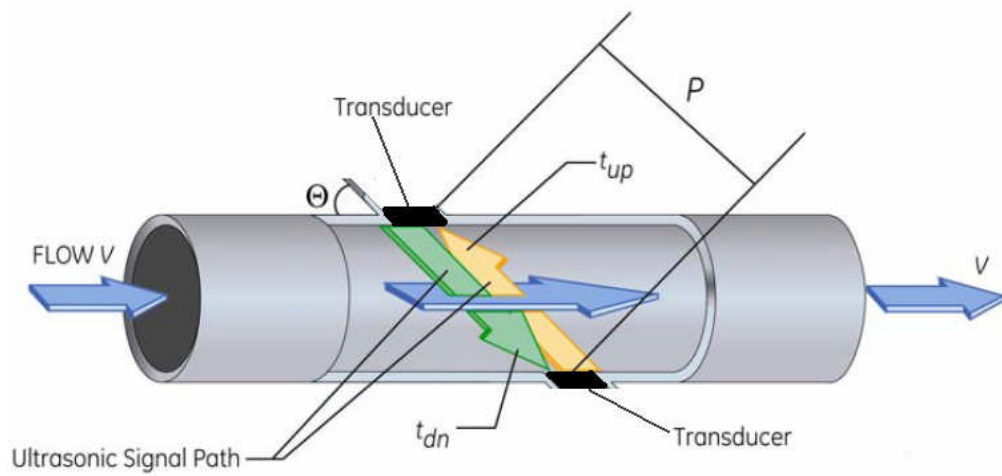


Figura 4.2. Esquema de funcionamiento de sensor de flujo ultrasónico

El Sonido se propaga en aire estable a una velocidad de C_0 , cuando el aire esta en movimiento a una velocidad V , el sonido es desplazado a una velocidad. (ver figura 4.2).

$$C = C_0 + V$$

La velocidad de la onda del sonido es influenciada por la velocidad del aire, para un espacio dado si conocemos sus dimensiones del dúcto o túnel, entonces será posible deducir el flujo volumétrico del aire circulante.

Para más detalle ilustramos la figura 4.2 en el siguiente esquema:

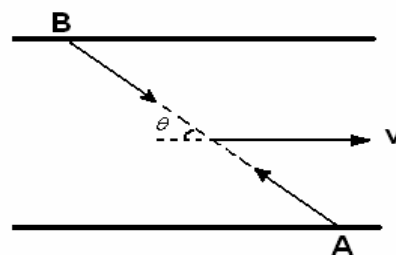


Figura 4.3. Ondas de sonido bi-direccionales

Si el sonido recorre la distancia, pasando de A hacia B (ver figura 4.3), a través de un flujo de aire dado, la velocidad resultante es obtenida desde la siguiente ecuación.

$$C_{AB} = C_0 - V * \cos(\theta)$$

Pasando de B hacia A:

$$C_{BA} = C_0 + V * \cos(\theta)$$

Los tiempos t_{up} y t_{dn} necesarios para que el sonido recorra la distancia desde el punto A hasta el punto B y viceversa son expresados de la siguiente forma:

$$t_{up} = \frac{P}{C_0 - V * \cos(\theta)} \qquad t_{dn} = \frac{P}{C_0 + V * \cos(\theta)}$$

Combinando estas relaciones se puede expresar a la velocidad del aire con siguientes términos:

$$V = \frac{P}{2 \cdot \cos \theta} \left(\frac{1}{t_{dn}} - \frac{1}{t_{up}} \right)$$

$$V = \frac{P}{2 \cdot \cos \theta} \left(\frac{\Delta t}{t_{dn} \cdot t_{up}} \right)$$

Así notamos que la velocidad esta en función de t_{up} y t_{dn}

$$V = f(t_{dn}, t_{up})$$

Es así que conocidas la velocidad del aire y la superficie del dúcto o túnel se puede calcular el caudal de aire.

$$Q = V * A$$

Donde A es el área del dúcto.

4.1.3. Sensor de vibración piezoeléctrico

Para la medida de las vibraciones se usa el principio de los acelerómetros, para este caso el acelerómetro piezoeléctrico, el cual puede ser representado en un modelo eléctrico como una capacitancia C con carga Q y voltaje V y un modelo mecánico como un sistema masa-resorte-amortiguador con una entrada de aceleración a y como salida la deformación ε . Estos dos modelos son enlazados por el efecto piezoeléctrico del transductor con un esfuerzo de entrada σ y como salida un campo eléctrico.

El material piezoeléctrico está conectado a la parte rígida de la base del sensor y una masa m llamada también masa sísmica es colocada al otro lado del material. Cuando el material es sometido a vibración, una fuerza se genera la cual actúa en el elemento piezoeléctrico. De acuerdo a la segunda ley de Newton esta fuerza es igual al producto de la aceleración y la masa m . Por efecto piezoeléctrico se produce una señal de salida de carga proporcional a la fuerza aplicada. Ya que la masa sísmica es constante la señal de salida de la carga es proporcional a la aceleración de la masa (ver figura 4.4).

A continuación se explica cada uno de los enlaces de modelos de este acelerómetro.

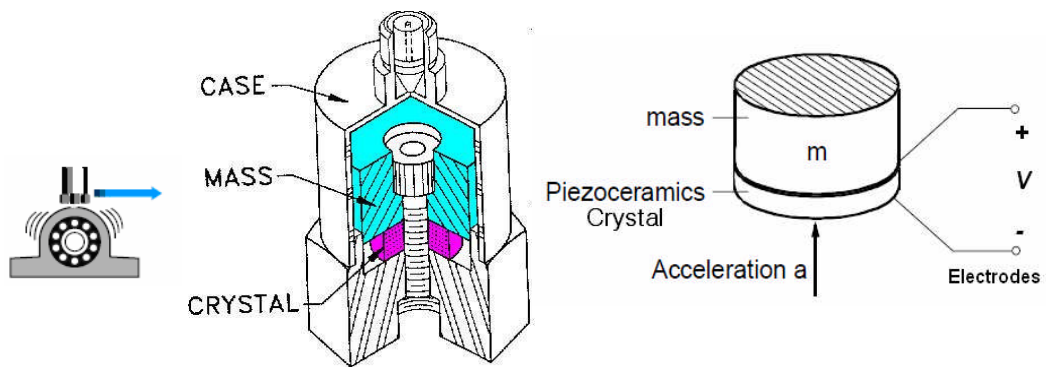


Figura 4.4. Esquema de acelerómetro piezoeléctrico

Modelo eléctrico del transductor piezoeléctrico

Los electrodos del cristal actúan como un condensador de placas paralelas, en donde el campo eléctrico producido es V/L donde L es el espesor del cristal piezoeléctrico. Otro punto a tomar en cuenta es la deformación que tendrá el cristal debido al esfuerzo de compresión $\sigma = E * \varepsilon$ a la que estará sometida donde E es el módulo de elasticidad y la deformación esta dada por $\varepsilon = \Delta L / L$ (ver figura 4.5).

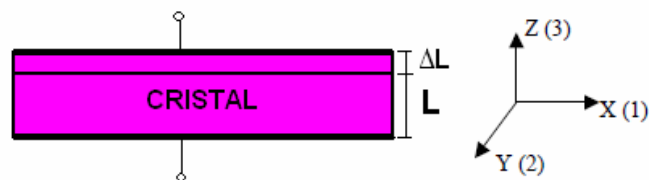


Figura 4.5. Representación del cristal en un condensador de placas paralelas

El material piezoeléctrico, tiene una constante piezoeléctrica en la dirección 3 dada por:

$$g_{33} = \frac{V/L}{\sigma_3} = \frac{\text{campo electrico producido en la direcci3n 3 } [V/m]}{\text{esfuerzo aplicado en la direcci3n 3 } [N/m^2]}$$

De la fórmula anterior despejamos **V**:

$$V = g_{33} \cdot \sigma_3 \cdot L = g_{33} \cdot E \cdot \Delta L$$

Dada las relaciones:

$$Q = C \cdot V \quad C = \frac{c' \cdot A}{L}$$

Donde:

c' : Permitividad eléctrica o constante dieléctrica.

A : Área de las placas paralelas.

Reemplazando términos tenemos:

$$Q = c' \cdot A \cdot g_{33} \cdot E \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

Así aplicando transformada de Laplace obtenemos la siguiente función de transferencia mostrada en el siguiente diagrama de bloques (ver figura 4.6).

$$\frac{Q(s)}{\frac{\Delta L(s)}{L}} = c' \cdot A \cdot g_{33} \cdot E$$

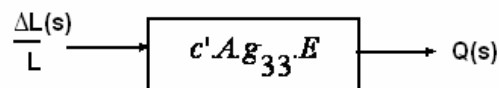


Figura 4.6. Diagrama de bloques del modelamiento eléctrico

Modelo mecánico

Mecánicamente el modelo del acelerómetro contiene una masa equivalente m y un resorte k en paralelo a un amortiguador b (donde k es constante del resorte

o de rigidez y b es el coeficiente de amortiguación del cristal piezoeléctrico). El modelo está sujeto a una aceleración externa a . El movimiento relativo de m con respecto a la base está dado por $x - u = \Delta L$ (ver figura 4.7).

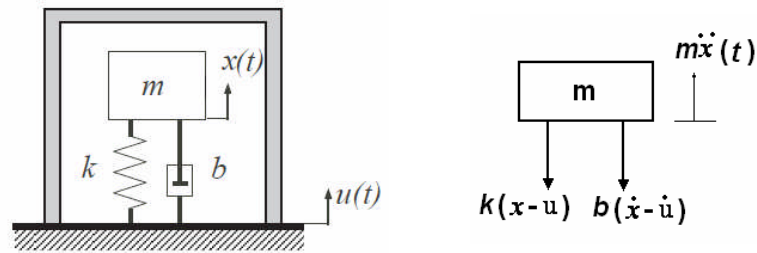


Figura 4.7. Modelo mecánico del sensor piezoeléctrico

De la segunda ley de Newton:

$$m \cdot \frac{d^2}{dt^2} x = -k(x - u) - b \cdot \frac{d}{dt} (x - u)$$

Dado que $x - u = \Delta L$ y $\frac{d^2}{dt^2} u = a$, se deduce:

$$a = \frac{d^2}{dt^2} x - \frac{d^2}{dt^2} \Delta L$$

Reemplazando la segunda ley de Newton en la ecuación anterior tenemos:

$$a = - \left(\frac{d^2}{dt^2} \Delta L + \left(\frac{b}{m} \right) \cdot \frac{d}{dt} \Delta L + \left(\frac{k}{m} \right) \cdot \Delta L \right)$$

Aplicando transformada de Laplace:

$$a(s) = - \left(s^2 + \left(\frac{b}{m} \right) \cdot s + \left(\frac{k}{m} \right) \right) \Delta L(s)$$

$$\frac{\Delta L(s) / L}{a(s)} = - \left(\frac{1/L}{s^2 + \left(\frac{b}{m} \right) \cdot s + \left(\frac{k}{m} \right)} \right)$$

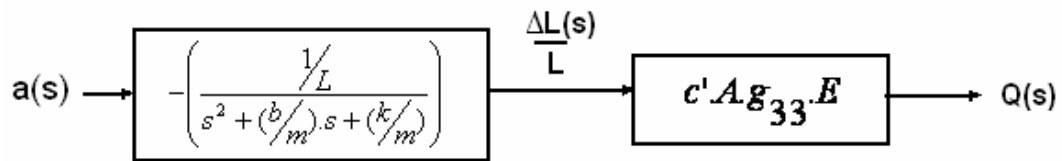


Figura 4.8. Diagrama de bloques del modelamiento eléctrico y mecánico

Amplificador de la carga

La salida del sensor, la carga Q , tiene que ser convertida en un voltaje proporcional, más fácil de medir. Para convertir la carga Q en una salida de voltaje V , se utiliza un circuito de acondicionamiento de señal, en este caso un amplificador operacional. Donde la corriente de entrada viene del sensor piezoeléctrico, representado por su Capacitancia equivalente C . Una resistencia R_c en paralelo con un capacitancia C_c forma la retroalimentación del amplificador operacional.

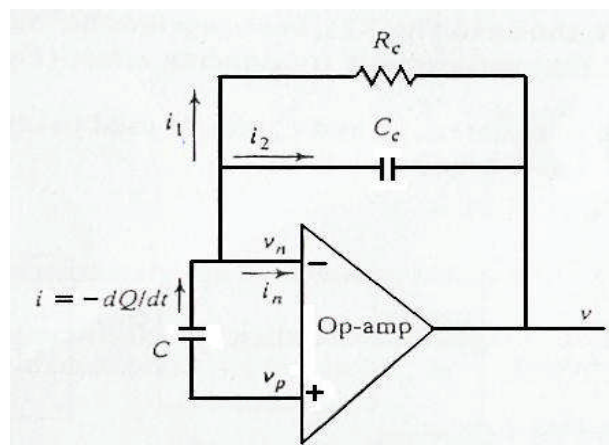


Figura 4.9. Esquema de la fase de amplificación

La corriente de entrada en el amplificador es:

$$i(t) = -\frac{d}{dt}Q(t)$$

Donde Q, es la carga del sensor piezoeléctrico. Aplicando por la primera ley de Kirchhoff a las corrientes, ver figura 4.9, tenemos:

$$i = i_1 + i_2 + i_n$$

Dado que, por el diseño del amplificador operacional $i_n = 0$, la ecuación previa pasará a ser:

$$i = i_1 + i_2 = -\frac{dQ(t)}{dt}$$

Las corrientes i_1 y i_2 pasan por R_c y C_c respectivamente, de tal manera que:

$$i = i_1 + i_2 = -\frac{v}{R_c} - C_c \cdot \frac{d}{dt} v$$

Aplicando transformada de Laplace tenemos la siguiente función de transferencia.

$$\frac{v(s)}{Q(s)} = \frac{s \cdot R_c}{1 + s \cdot C_c \cdot R_c}$$

Así entonces tendríamos el siguiente diagrama de bloques para el sensor de vibración (ver figura 4.10).

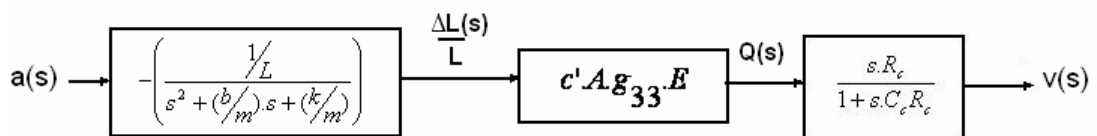


Figura 4.10. Diagrama de bloques del modelamiento del sensor piezoeléctrico

4.1.4. Sensor de presión diferencial

El sensor de presión diferencial con el que trabajaremos esta basado en una galga de extensión, tal como lo muestra la figura 4.11.

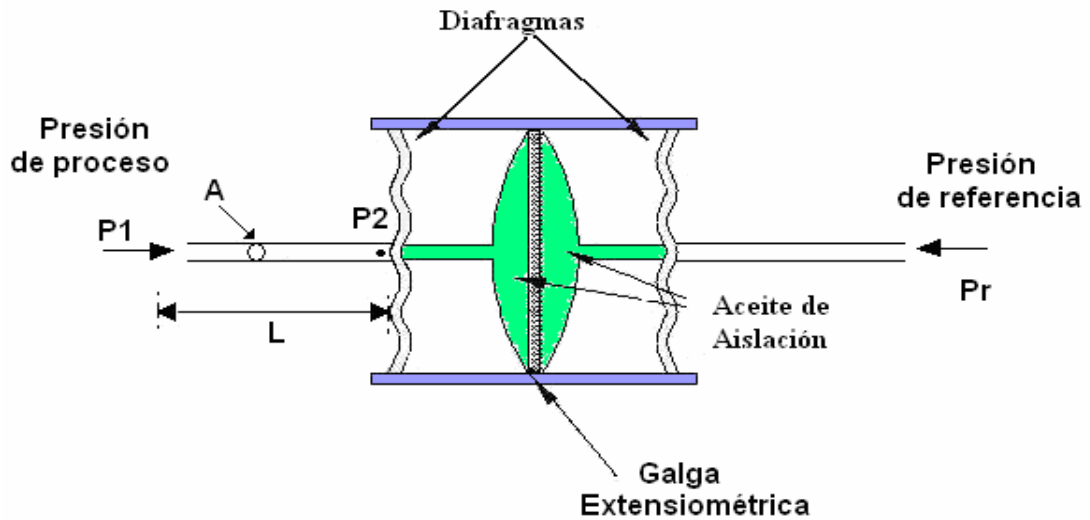


Figura 4.11. Representación del sensor diferencial

Las señales de presión, P_1 y P_r , se entregan a dos diafragmas aislantes, que impiden que el fluido ingrese a la cámara sensible. La presión es transmitida a la sección sensible (la galga propiamente tal) mediante capilares, que están llenos de un fluido adecuado (usualmente aceite de silicona). Existen dos cámaras separadas por la galga en el centro, conocida como el diafragma sensor, cuyo único requisito es que impida el paso del fluido interno de un lado hacia el otro.

Uno de los diafragmas de aislamiento puede ser sujeto a una presión constante de referencia, de modo que la posición del diafragma de referencia será una función de la presión aplicada en un sólo lado. Similarmente, se pueden aplicar dos presiones y la posición del diafragma sensor será una función de la presión diferencial. Para el análisis del comportamiento dinámico de este sensor, se considerará que un lado está a presión constante, de referencia, denotado P_r .

De acuerdo con de la figura, un cambio en la presión P1 (en algún punto del proceso) producirá un cambio en la presión P2, al final del tubo capilar (serán idénticos en estado estacionario). El análisis consiste en aplicar la ley de Newton a la “masa” de gas en el tubo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Fuerza de la presión P1} \\ \text{sobre la entrada del capilar} \\ \text{de conexión al sensor} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Fuerza de la presión P2} \\ \text{sobre el final del capilar} \end{array} \right\} = \text{masa} * \text{aceleración}$$

$$(P_1 * A) - (P_2 * A) = A * L * \rho * \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right)$$

Donde:

A: Área del tubo capilar.

L: Longitud del tubo capilar.

x : Desplazamiento del fluido o desplazamiento del diafragma de aislación.

ρ : Densidad del gas en el tubo.

La fuerza sobre el diafragma de aislación, establece un segundo equilibrio de fuerzas:

$$P_2 * A = \left\{ \begin{array}{l} \text{Efecto resorte} \\ \text{de la galga} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Fuerza viscosa} \\ \text{del fluido} \end{array} \right\}$$

$$P_2 * A = k * x + C \frac{dx}{dt}$$

Donde:

k: Constante de Hooke de la galga.

C: Coeficiente de amortiguamiento del líquido viscoso.

Reemplazando las ecuaciones tenemos:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{C}{A.L.\rho} * \frac{dx}{dt} + \frac{K}{A.L.\rho} * x = \frac{P_1.A}{A.L.\rho}$$

Aplicando transformada de Laplace tenemos la siguiente función de transferencia:

$$\frac{X(s)}{P_1(s)} = \frac{1/L.\rho}{s^2 + (C/A.L.\rho).s + (K/A.L.\rho)}$$

El detector de presión del sensor que estamos tratando es del tipo diafragma con extensómetro en forma de roseta tal como se muestra la figura 4.12.

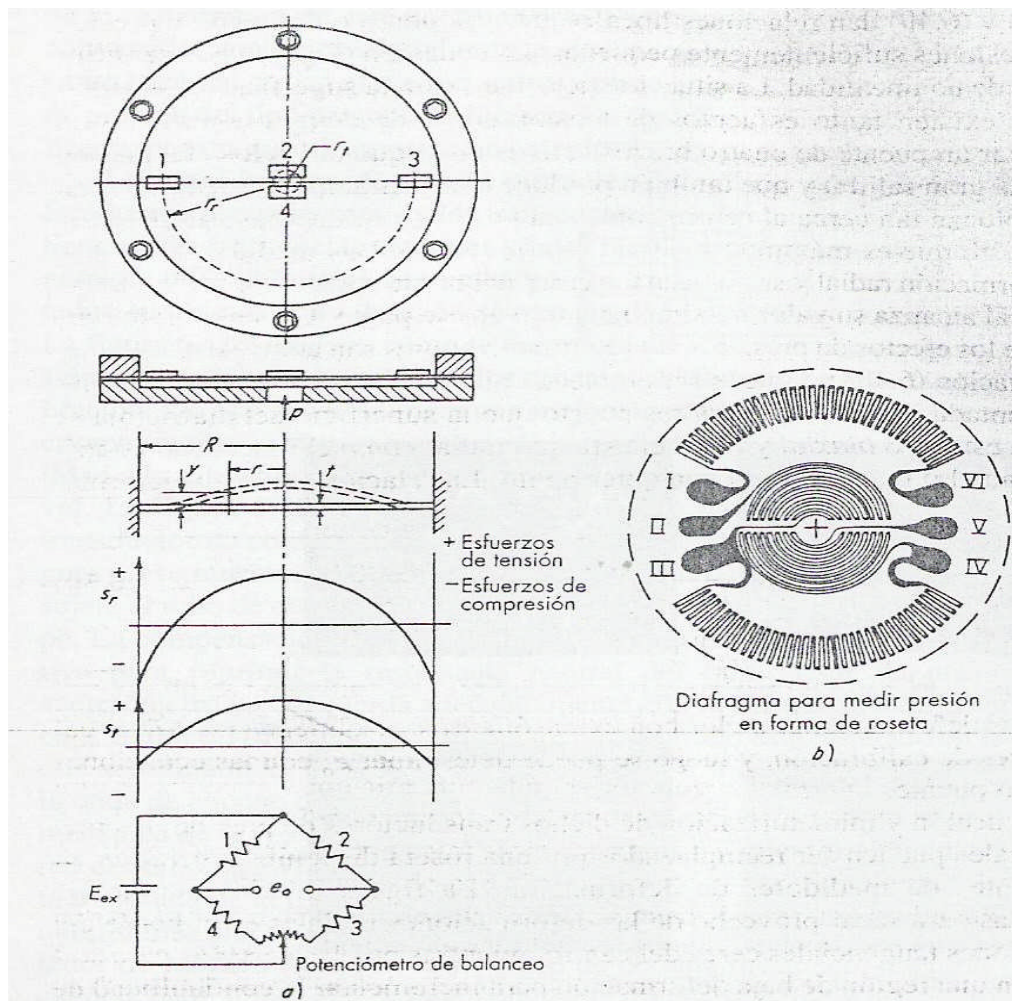


Figura 4.12. Detector de presión tipo diafragma con extensómetro.

De la figura 4.12 para la roseta referida, el fabricante proporciona la siguiente fórmula de diseño:

$$\frac{e_0}{E_{ex}} = 820 * \frac{p \cdot R^2 (1 - \nu^2)}{E \cdot t^2} \quad \frac{\text{mV}}{\text{V}}$$

Donde:

t: Espesor del diafragma.

E: Módulo de elasticidad.

ν : Relación de Poisson.

4.1.5. Sensor de velocidad inductivo

El sensor inductivo se basa en la tensión generada en la bobina cuando se la somete a una variación de un campo magnético. Al estar la bobina arrollada en el imán queda bajo un campo magnético fijo y para variarlo se acerca al imán una pieza de material ferromagnético. Las líneas de fuerza del imán son desviadas por el material ferromagnético y el campo magnético varía. Estos sensores también son llamados de reluctancia variable. La variación del campo magnético crea una tensión alterna en la bobina. Mientras la pieza ferromagnética se acerca al sensor, la tensión disminuye y cuando la pieza se aleja, la tensión aumenta (ver figura 4.13).

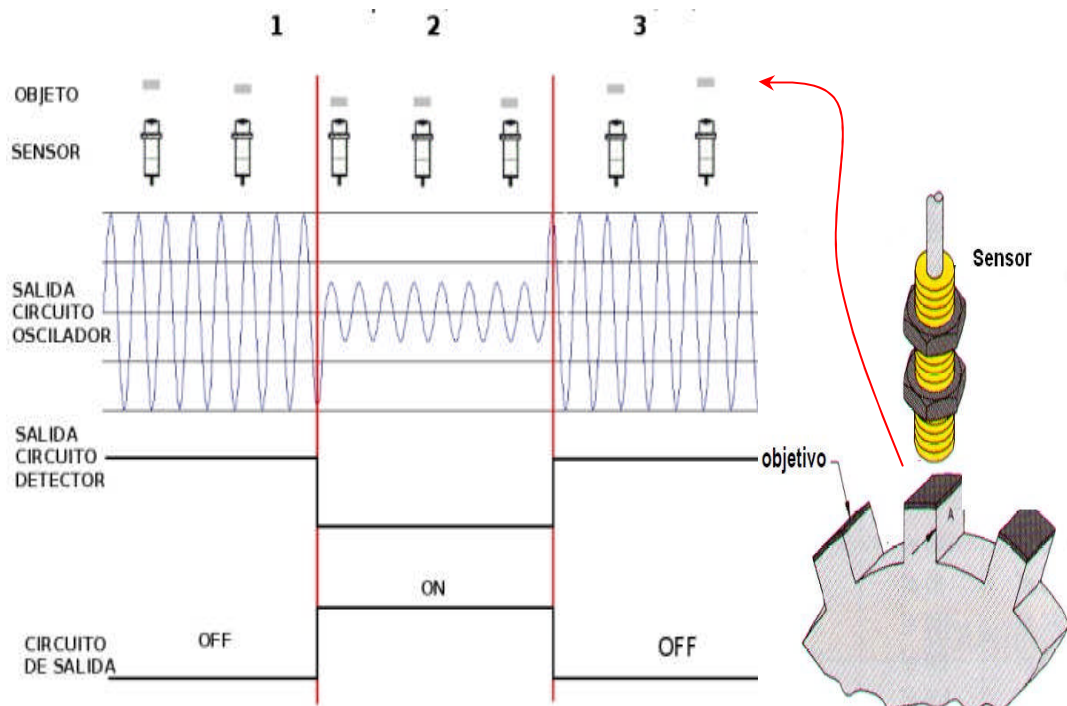


Figura 4.13. Representación del funcionamiento del sensor de velocidad inductivo

La pieza de material ferromagnético se coloca en el elemento en movimiento y sirve para detectar su paso cerca del sensor. Esta pieza tiene la forma de rueda dentada.

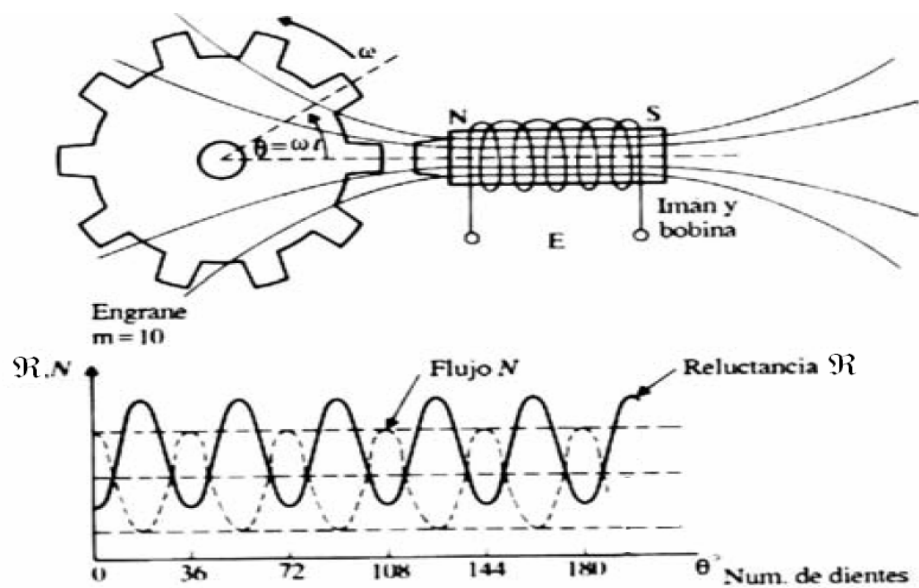


Figura 4.14. Sensor de velocidad angular de reluctancia variable

La rueda se mueve cerca del polo de la bobina, produciendo que el flujo de la bobina cambie con el tiempo, lo cual induce una fuerza electromotriz en la bobina (fem) que de acuerdo a la ley de Faraday viene dada por:

$$E = -\frac{dN}{dt} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde N es el flujo magnético que atraviesa la bobina. La figura 4.14 muestra la naturaleza alterna del flujo, el cual será máximo cuando la reluctancia \mathfrak{R} entre la bobina y la rueda dentada sea mínima, lo cual ocurre cuando un diente de la rueda está frente al polo de la bobina y disminuirá cuando el diente de la rueda se aleja del polo, ya que aumenta la reluctancia del circuito. De lo dicho anteriormente se tiene que el flujo en la bobina puede aproximarse por la relación:

$$N = a + b.\cos(m\theta) \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

a: Flujo medio.

b: Es la amplitud de la variación de flujo.

m: Es el número de dientes de la rueda dentada.

De la ecuación 4.1 tenemos que:

$$E = -\frac{dN}{dt} = -\frac{dN}{d\theta} * \frac{d\theta}{dt}$$

De la ecuación 4.2 tenemos:

$$\frac{dN}{d\theta} = -b.m.\text{sen}(m\theta) \quad ; \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

Teniendo en cuenta que $\theta = \omega.t$

$$E = b.m.\omega.\text{sen}(m.\omega.t)$$

La fuerza electromotriz E es una señal cuya amplitud y frecuencia son proporcionales a la velocidad angular (ω) de la rueda. La amplitud ω puede ser obtenida de la amplitud o de la frecuencia de la señal.

4.2. Red Industrial

Una red industrial es la colección de dispositivos que pueden almacenar y manipular datos que están interconectados entre si, con el propósito de lograr una operación eficiente y segura de una planta industrial.

4.2.1. Topologías de redes

Topología tipo árbol: Cada nodo se encarga del control de la red debajo de e, permitiendo también conectar más dispositivos.



Figura 4.15. Topología tipo árbol

Topología tipo estrella: El nodo central controla toda la red, todas las comunicaciones han de hacerse necesariamente a través de este.

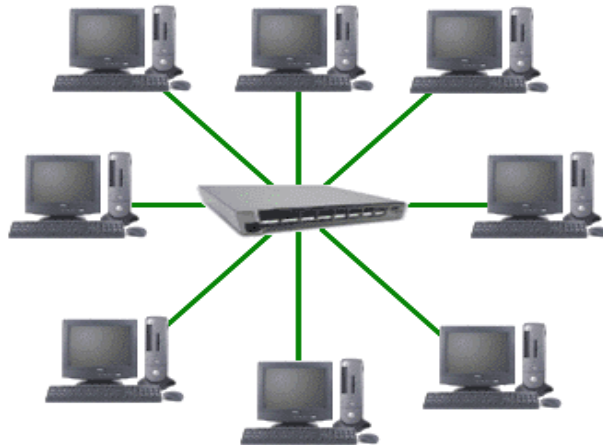


Figura 4.16. Topología tipo estrella

Topología tipo anillo: Un nodo retransmite los datos al siguiente en un flujo circular, cada estación esta conectada a la siguiente y la última esta conectada a la primera.

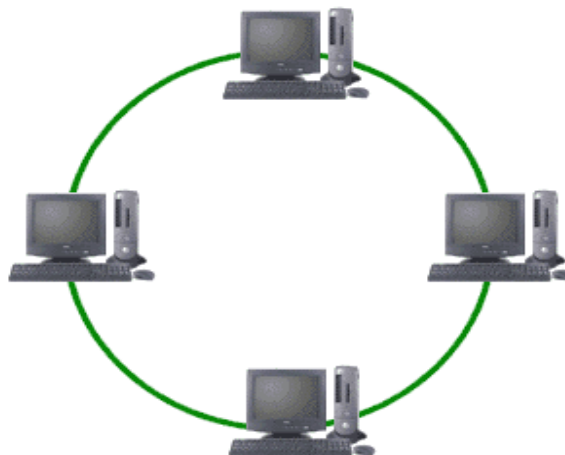


Figura 4.17. Topología tipo anillo

Topología tipo bus: Todos los nodos pueden recibir y transmitir a la vez.

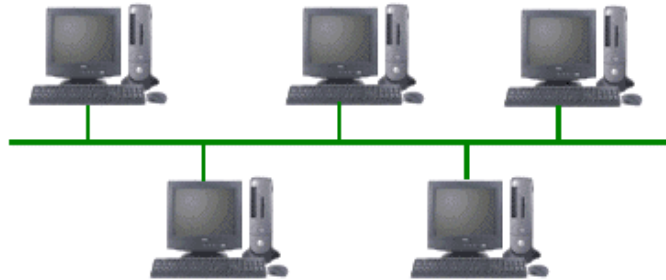


Figura 4.18. Topología tipo bus

Para el diseño del sistema de control del proceso de ventilación de la mina, la elección más adecuada para la red de control es la topología tipo bus, para que así todos los dispositivos compartan el mismo canal para comunicarse entre sí y ante una eventual falla de cualquier nodo, no impida que la red siga funcionando.

4.2.2. Clasificación de redes

Existen diferentes tipos de redes para diferentes tipos de aplicaciones y requerimientos, que corresponden a diferentes niveles de automatización. A continuación se menciona las características más resaltantes de estas redes:

Redes de conexión serial

- Proveen un bajo costo de enlace.
- Reducido volumen de datos.
- Diseñadas normalmente para distancias pequeñas.

Redes a nivel de sensor

- Interconectan sensores y dispositivos.
- Reducido volumen de datos a transmitir.
- Diagnóstico y configuración.
- Diseñadas normalmente para distancias pequeñas.

Redes de I/O

- Interconectan dispositivos de campo y controles para manejo de I/O.
- Alta velocidad.
- Bajo volumen de datos.
- Distancias variables.
- Transmiten comandos y estados.

Redes de inter-controles

- Interconectan controles y dispositivos inteligentes a alta velocidad.
- El volumen de datos y la distancia a transmitir puede ser grande o pequeño.
- Transmiten comandos, estados y datos.

Redes de nivel supervisor

- Gran cantidad de controles y equipos inteligentes a alta velocidad.
- Alto volumen de datos a gran distancia.
- Colección de datos, carga y descarga de programas.

4.3. Protocolos de comunicación

Es necesario definir los protocolos que se utilizaran en el sistema de control distribuido ya que estos permitirán el flujo de información entre los equipos que estarán conectados a la red.

4.3.1. Profibus

(Process field bus) es un estándar de bus de campo, opera bajo el esquema maestro-esclavo, especialmente diseñado para la comunicación entre equipos del sistema y del proceso, con profibus los dispositivos de diferentes fabricas pueden comunicarse sin la necesidad de una interfaz, es empleado para la interconexión de dispositivos de campo de entrada/salida simples con PLC's y PC's, usado para transmisión de datos a alta velocidad.

- **Profibus DP**

(Process field bus - decentralized peripheral) esta basado en el estándar europeo EN 50170, a partir de la norma alemana DIN 19-245. Profibus DP es específica para automatización de planta, por su alta velocidad, eficiencia, comunicación con sistemas de control y entradas/salidas distribuidas a nivel de dispositivo.

Características Profibus DP

- Velocidades de transmisión: 9.6 Kbps a 12 Mbps.
- Medio de transmisión: Par trenzado apantallado.

4.3.2. Modbus

Es un protocolo de transmisión desarrollado para sistemas de control y supervisión de procesos con control centralizado.

- **Modbus RTU**

RTU (Unidad de Terminal Remota) Es un modo de transmisión del modbus para intercambiar datos normalmente usado en las comunicaciones entre equipos de control, es también conocido como Modbus-B (por modbus binario), Esta diseñado para transferir datos de forma segura por cada byte de control, así como el mensaje de errores de transmisión.

Características Modbus RTU

- Velocidades de transmisión: 1200 a 19200 bps.
- Interfaces de capa física: RS-232D, RS-485, o de lazo 4 – 20mA.
- Medios de transmisión: Par trenzado, cable coaxial, radio.

4.3.3. HART

El protocolo HART (High way-Addressable-Remote-Transducer) agrupa la información digital sobre la señal analógica típica de 4 a 20 mA DC. La señal digital usa dos frecuencias individuales de 1200 y 2200 Hz, que representan los dígitos 1 y 0 respectivamente y que en conjunto forman una onda sinusoidal que se superpone al lazo de corriente de 4-20 mA.

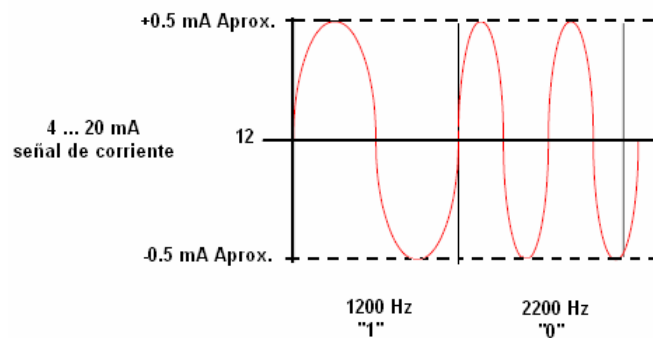


Figura 4.19. Representación de funcionamiento de protocolo HART

4.3.4. Fibra Óptica F.O.

Es uno de los medios más versátiles para la transmisión de información, utilizando luz en un medio óptico para este propósito. Para la transmisión, la fibra óptica utiliza el principio de la reflexión interna total.

Existe la fibra Monomodo y la Multimodo. La primera tiene un centro muy pequeño de manera que sólo puede transmitir un haz de luz, soportando velocidades de transmisión del orden de los Gbps a distancias mayores a 100km sin requerir repetidores.

La fibra multimodo por su parte soporta un ancho de banda menor que la fibra monomodo, generando varios pulsos de luz que viajan a diferentes ángulos. Se emplean en redes con distancias cortas por su facilidad de montaje e instalación. Para distancias grandes, la fibra monomodo es la mejor opción.

4.3.5. MMS

Especificación de Mensajes de Fabricación (Manufacturing message specification), fue desarrollado específicamente para aplicaciones industriales; está especificado según ISO 9506 y sirve para el intercambio de datos en ambientes de producción. Normalizado para el intercambio de datos en tiempo real e información de control supervisorio entre dispositivos de red y/o aplicaciones de computadoras de una manera que es independiente de:

- La función de la aplicación que la realiza.
- El fabricante del dispositivo o aplicación.

En tabla 4.3 se muestra las principales características de algunos protocolos de comunicación.

Nombre	Topología	Soporte	Velocidad de transmisión (bps)	Comunicación
Profibus DP	Estrella, anillo	Par trenzado, fibra óptica	9.6 K a 12 M	Mater/Slave Punto a punto
Profibus PA	Estrella, anillo	Par trenzado, fibra óptica	31.5 K	Mater/Slave Punto a punto
Foundation fieldbus HSE	Estrella	Par trenzado, fibra óptica	100 M	Single/Multi Master
Foundation fieldbus H1	Estrella, bus	Par trenzado, fibra óptica	31.25 K	Single/Multi Master
Modbus RTU	Estrella, árbol	Par trenzado, coaxial, radio	1.2 K a 115.2 K	Mater/Slave
Ethernet	Estrella, bus	Par trenzado, coaxial, fibra óptica	10 M, 100M	Mater/Slave Punto a punto
HART	Bus	Par trenzado	1.2 K	Master/Slave

Tabla 4.3. Comparación de características entre protocolos

CAPÍTULO V

DISEÑO

Tal como se mencionó en el capítulo IV, la topología para la red de control que se usará para el diseño es del tipo BUS, por la necesidad que todos los nodos puedan recibir y transmitir a la vez. El controlador AC800M aprovecha las características que ofrece esta topología proporcionando un bus para los módulos eléctricos I/O (Module Bus) y un bus para interfaces de comunicación extendida (CEX bus).

Este diseño considera que la sala de control donde está ubicada la estación de monitoreo remoto, se encuentra a una larga distancia.

5.1. Arquitectura de comunicación

Previamente definiremos algunos términos para el mejor entendimiento de la arquitectura propuesta.

Servidor de aspectos: Contiene la información de los objetos manejados en la aplicación, detalles de los tags, en general la información con la que trabaja el

sistema para la interacción con el usuario (aspectos). En este servidor se almacenan las librerías para las ventanas de interacción de los actuadores, la definición de los bloques de control, el acceso a campos de las variables tipo estructuradas, etc.

Servidor de conectividad: Soporta las comunicaciones del sistema y como su nombre lo indica, la conectividad, mediante el software OPC correspondiente. Este puede utilizar un computador convencional para las aplicaciones en incluso, el servidor de conectividad puede ser el mismo que el de aspectos.

Estaciones de Ingeniería: Son computadores dedicados a tareas de ingeniería como creación o modificación de la lógica implementada, ingreso de parámetros de control, creación de alarmas o establecer niveles de severidad.

Estaciones de Operación: Son computadores dedicados a las tareas operativas para el funcionamiento del sistema. Permiten el mando remoto de actuadores, el reconocimiento y desactivación de alarmas. De acuerdo a la complejidad del proceso se define la cantidad de estaciones de operación.

Red Cliente Servidor: Se utiliza para la comunicación entre servidores y estaciones cliente (ingeniería, operación, aplicación, etc)

Red de Control: Es una red de área local (LAN), se basa en ethernet empleando protocolo MMS. Para sistemas pequeños la red de control y de cliente/servidor pueden ser combinadas en una sola red de sistema de automatización.

El diseño propone tener un solo servidor de aspectos y conectividad, con una sola red de control y cliente/servidor combinadas, tal como se muestra en la figura 5.1.



Figura 5.1. Red de control y cliente/servidor combinadas

En lo que respecta la arquitectura de interfaces y módulos I/O del controlador tenemos que: Por el CEX bus, se usará una interfaz de comunicación profibus CI854A para la integración del variador de velocidad ACS1000, ocupando esta la posición 1 en el controlador, de esta interfaz solo se usará un puerto o canal que servirá de enlace con el bus del variador. Juntamente en la posición 2 del controlador estará una interfaz de comunicación CI853 para el estándar RS232C, del cual se usará los dos canales uno para comunicación con el panel de operador y el otro para el bus del relé.

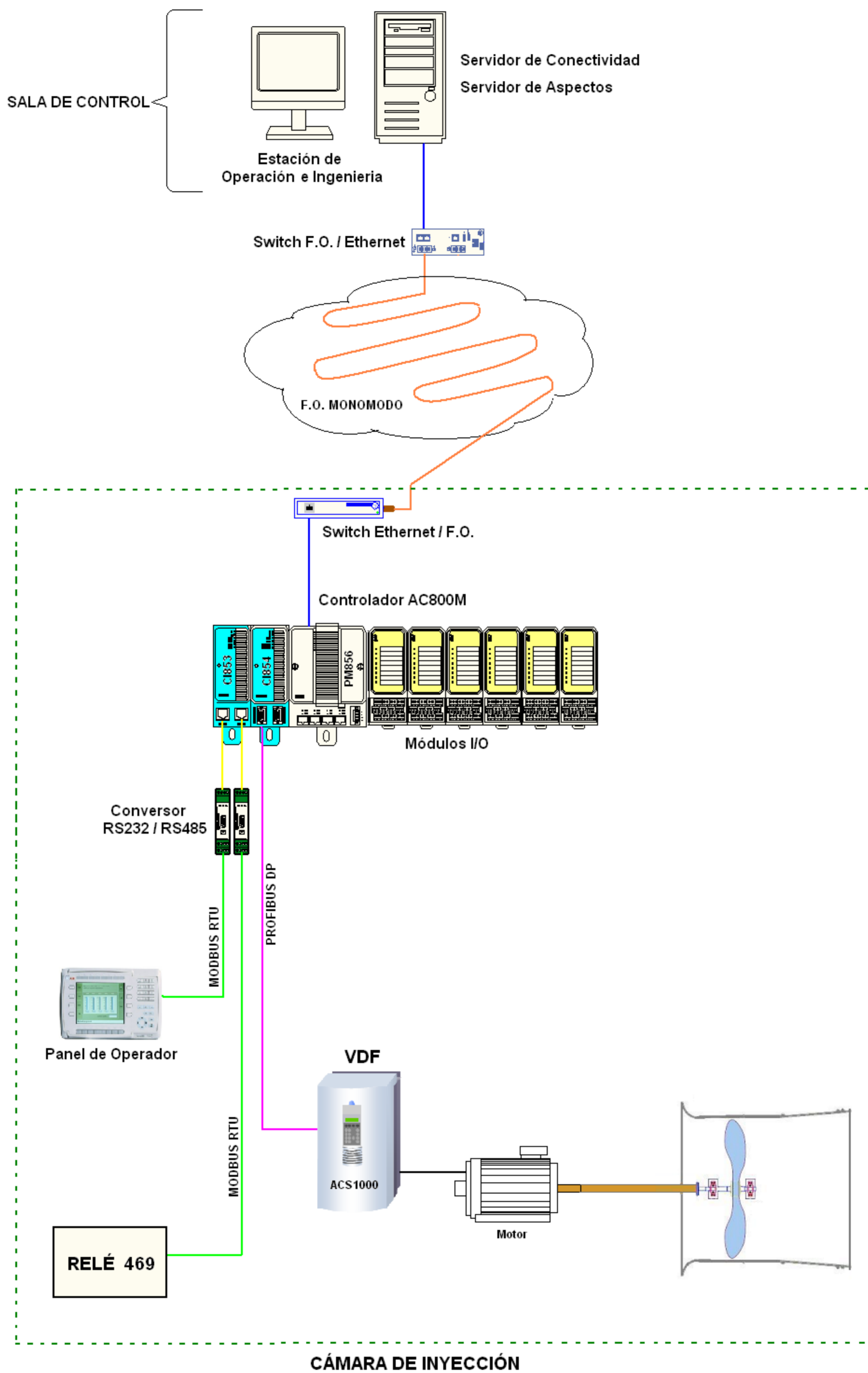
Los módulos I/O se colocarán en el Module Bus, que en total son 6 módulos para el controlador.

- (2) DI820. (Módulo de entrada digital)
- (1) DO820. (Módulo de salida digital)
- (3) AI845. (Módulo de entrada análoga)

Debido a la distancia de la estación remota, los controladores se comunicaran con el servidor de conectividad por fibra óptica monomodo debido a sus ventajas de físicas y de comunicación frente a grandes distancias, con la ayuda de switches de ETHERNET a fibra óptica en el lado del controlador y de Fibra a ETHERNET en el lado del servidor.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado en este capítulo, se muestra en la figura 5.2 la arquitectura de comunicaciones del sistema de control de ventilación usando el controlador AC800M.

ARQUITECTURA DE COMUNICACIÓN



LEYENDA

COLORES	DESCRIPCIÓN
	Fibra óptica Multimodo
	Cable RS-485 (2 hilos)
	Cable Profibus
	Cable STP
	Cable RS-232

Figura 5.2. Arquitectura de comunicaciones - camara de inyección

5.2. Diagrama P&ID para proceso de ventilación

P&ID (Process and Instrumentation Diagram), El diagrama de proceso e instrumentación, es un diagrama que muestra el flujo del proceso así como también los instrumentos instalados. Para su mejor entendimiento se describirán los componentes del diagrama, según la Norma ISA S5.1.

Líneas de Instrumentación: Se dibujan más finas que las del proceso.

—————	Conexión a proceso, o enlace mecánico o alimentación de instrumentos
-//-//-//	Señal neumática
- - - - -	Señal eléctrica
-///-///-///	Señal eléctrica (alternativo)
-X-X-X-	Tubo capilar
~~~~~	Señal sonora o electromagnética guiada (incluye calor, radio, nuclear, luz)
~~~~~	Señal sonora o electromagnética no guiada
—○—○—	Conexión de software o datos
—●—●—	Conexión mecánica
—└—└—└	Señal hidráulica

Figura 5.3. Líneas que representan los tipos de señal y conexiones en el P&ID

Designación de instrumentos por círculos: Dará conocer la relación gráfica con la ubicación del instrumento.

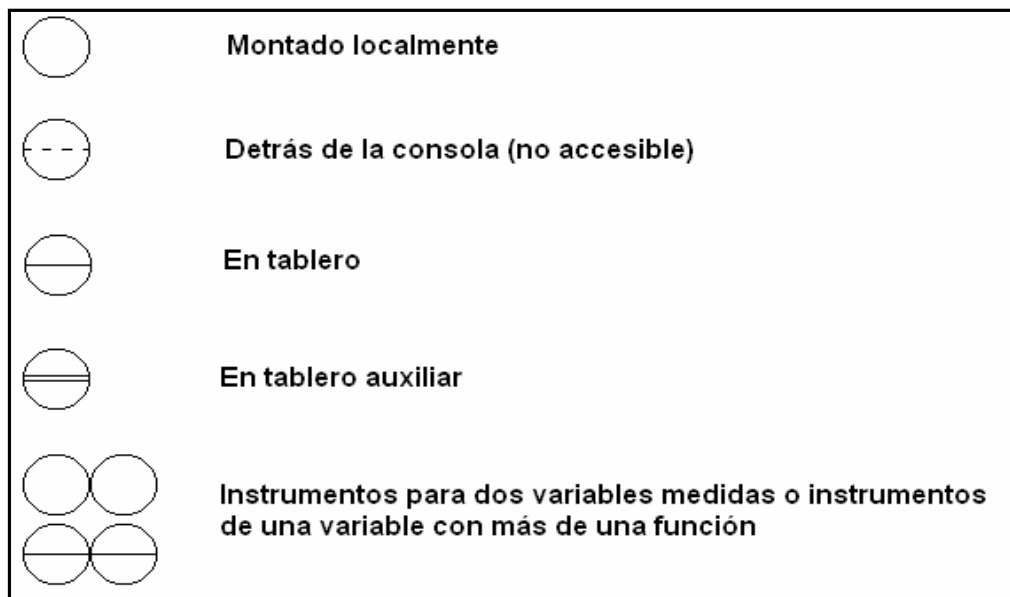


Figura 5.4. Relación entre los círculos y la ubicación y/o función del instrumento.

Simbología usada en el control digital y distribuido:

A. Accesible al operador

- ✓ Visualización compartida
- ✓ Visualización y control compartidos
- ✓ Acceso a la red de comunicaciones
- ✓ Interfase del operador en la red de comunicaciones



B. Interfase auxiliar

- ✓ Montado en panel
- ✓ Estación manual



C. No accesible normalmente al operador

- ✓ Controlador
- ✓ Visualización compartida instalada en campo
- ✓ Cálculo, acondicionamiento de señal en controlador compartido



Simbología para control lógico y secuencial:

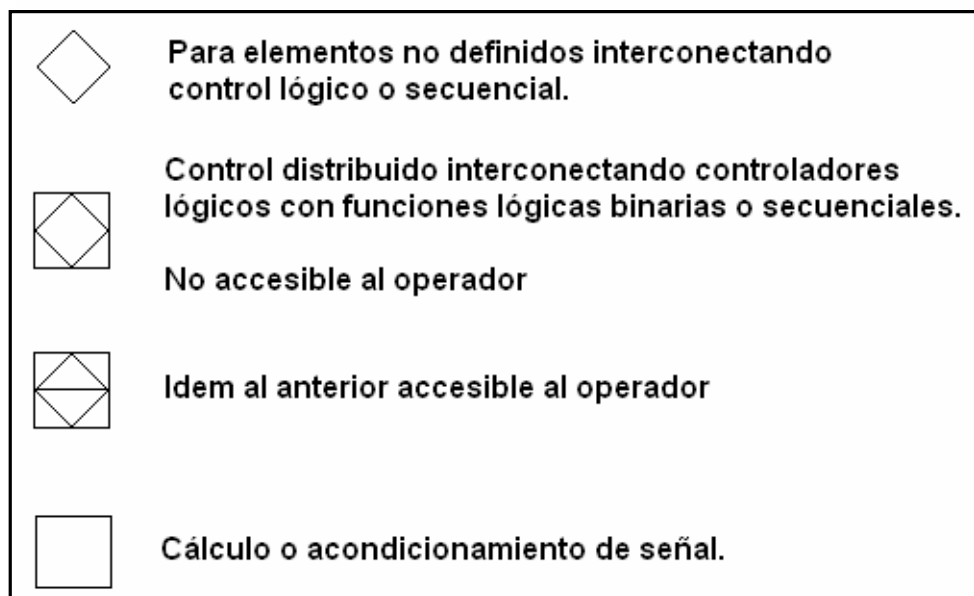


Figura 5.5. Símbolos de control lógico del proceso

Teniendo en cuenta la simbología mencionada, en el **plano 5.1** que se muestra a continuación se encuentra el diagrama P&ID para el control del proceso de ventilación con el controlador AC800M.

La siguiente tabla nos muestra todas las señales que se encuentran en el MODULE BUS del controlador AC800M, que provienen de los instrumentos del proceso, las botoneras y las salidas van a los elementos de indicación visual y sonora.

LISTA DE SEÑALES DE ENTRADAS Y SALIDAS PARA EL PROCESO DE VENTILACIÓN				
N°	MÓDULO	TAG	TIPO DE SEÑAL	DESCRIPCIÓN
1	AI845 (1)	PDI-0001	Entrada Analógica	Presión diferencial de la cámara
2		FI-0001	Entrada Analógica	Flujo de aire del Ventilador
3		SI-0001	Entrada Analógica	Velocidad del Ventilador
4		VMotIN-0001	Entrada Analógica	Vibración en "DE" del motor
5		VMotIN-0002	Entrada Analógica	Vibración en "NDE" del motor
6		VVentIN-0001	Entrada Analógica	Vibración en Rodamiento 1 del Ventilador
7		VVentIN-0002	Entrada Analógica	Vibración en Rodamiento 2 del Ventilador
8		TMotIN-0001	Entrada Analógica	Temperatura en "DE" del motor
9	AI845 (2)	TMotIN-0002	Entrada Analógica	Temperatura en "NDE" del motor
10		TMotDevIN-0001	Entrada Analógica	Temperatura Devanado A del motor
11		TMotDevIN-0002	Entrada Analógica	Temperatura Devanado B del motor
12		TMotDevIN-0003	Entrada Analógica	Temperatura Devanado C del motor
13		TMotDevIN-0004	Entrada Analógica	Temperatura Devanado D del motor
14		TMotDevIN-0005	Entrada Analógica	Temperatura Devanado E del motor
15		TMotDevIN-0006	Entrada Analógica	Temperatura Devanado F del motor
16		TVentIN-0001	Entrada Analógica	Temperatura en Rodamiento 1 del Ventilador
17	AI845 (3)	TVentIN-0002	Entrada Analógica	Temperatura en Rodamiento 2 del Ventilador
18		TAmbiente-0001	Entrada Analógica	Temperatura ambiente de la caverna
19		Reserva	Entrada Analógica	Reserva
20		Reserva	Entrada Analógica	Reserva
21		Reserva	Entrada Analógica	Reserva
22		Reserva	Entrada Analógica	Reserva
23		Reserva	Entrada Analógica	Reserva
24		Reserva	Entrada Analógica	Reserva
25	DI820 (4)	PMarDVentIN-0001	Entrada Digital	Indicación de puerta mariposa derecha abierta
26		PMarDVentIN-0002	Entrada Digital	Indicación de puerta mariposa derecha cerrada
27		PMarIVentIN-0003	Entrada Digital	Indicación de puerta mariposa izquierda abierta
28		PMarIVentIN-0004	Entrada Digital	Indicación de puerta mariposa izquierda cerrada
29		FMotIN-0001	Entrada Digital	Indicación de freno abierto
30		FMotIN-0002	Entrada Digital	Indicación de freno cerrado
31		FDesbloqIN	Entrada Digital	Indicacion de freno Desbloqueado
32		PartirVentIN	Entrada Digital	Partir Ventilador
33	DI820 (5)	PararVentIN	Entrada Digital	Parar Ventilador
34		PararEmergVentIN	Entrada Digital	Parada de Emergencia
35		Reserva	Entrada Digital	Reserva
36		Reserva	Entrada Digital	Reserva
37		Reserva	Entrada Digital	Reserva
38		Reserva	Entrada Digital	Reserva
39		Reserva	Entrada Digital	Reserva
40		Reserva	Entrada Digital	Reserva
41	DO820 (6)	ONBalizaIN	Salida Digital	Encender Baliza
42		ONBocinaIN	Salida Digital	Encender Bocina
43		LuzVentINStop	Salida Digital	Luz de indicación de ventilador detenido
44		LuzVentINStart	Salida Digital	Luz de indicación de ventilador en marcha
45		LuzAlarm	Salida Digital	Luz de indicación falla alarma ventilador
46		BocinaAlarm	Salida Digital	Bocina de indicación alarma ventilador
47		EnergFreno	Salida Digital	Energizar freno
48		LuzFreno	Salida Digital	Luz de indicacion freno abierto

Tabla 5.1. Listado de señales de entradas y salidas para cada módulo

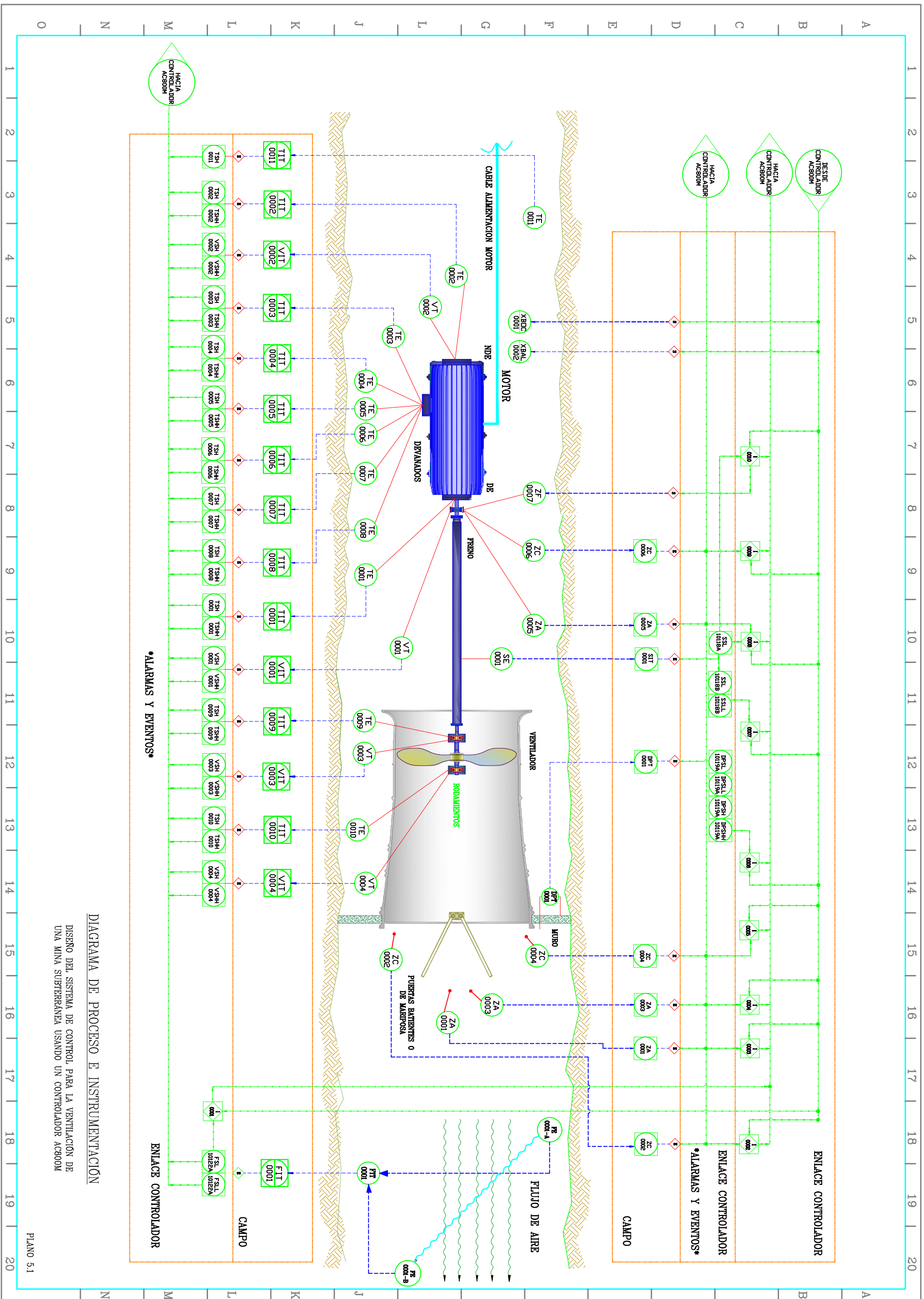


DIAGRAMA DE PROCESO E INSTRUMENTACIÓN

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA VENTILACIÓN DE UNA MINA SUBTERRÁNEA USANDO UN CONTROLADOR AC800M

5.4. Programación

Con fines de facilitar la programación se presenta un diagrama de flujo donde se muestra la secuencia en que se realiza el proceso en base a condiciones dadas.

a) Diagrama de Flujo

A continuación se describe cada una de las siglas utilizadas en el diagrama de flujo.

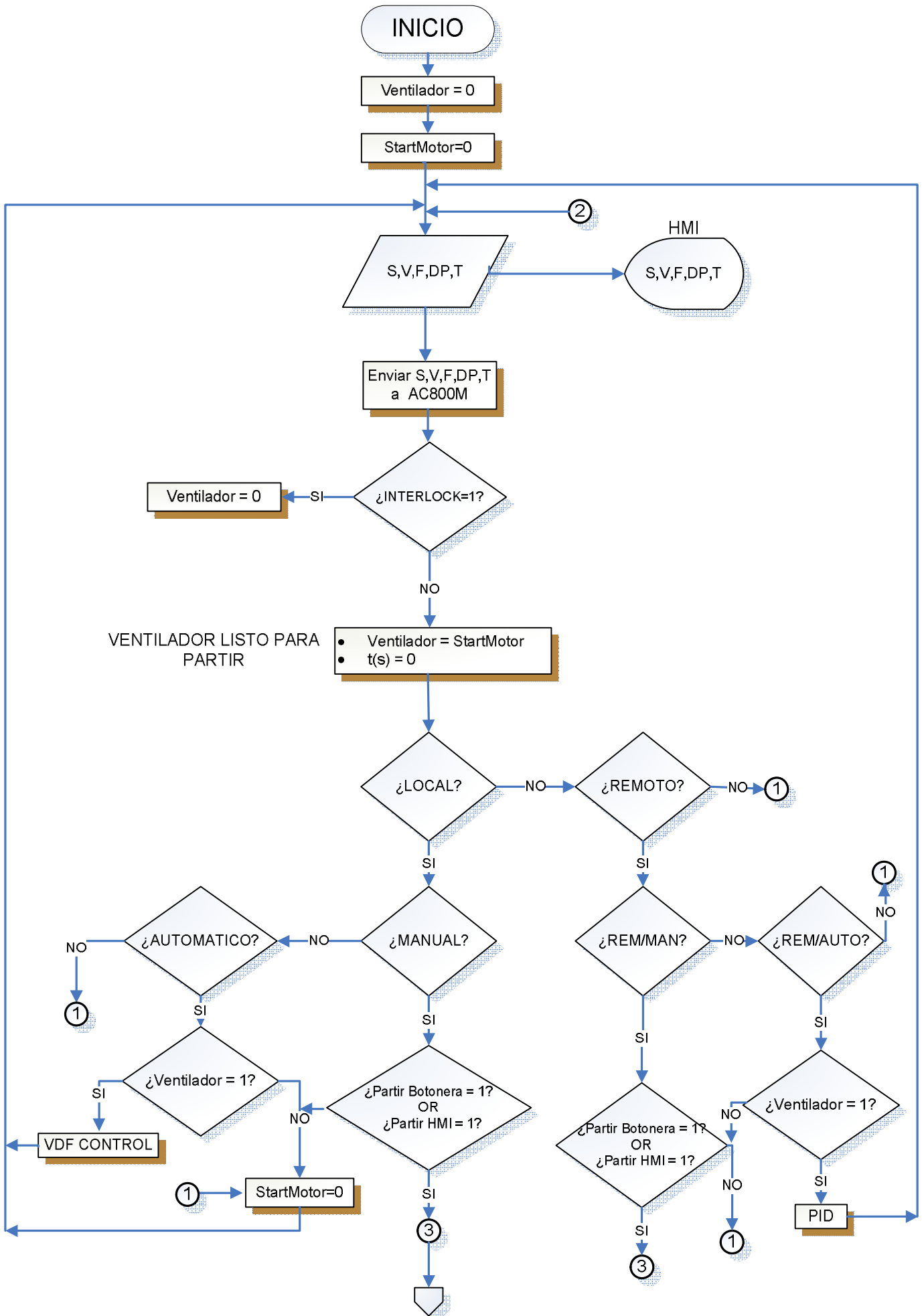
- StartMotor: Comando de Arranque de motor .
- S: Speed (Velocidad en rpm).
- F: Flow (Flujo de aire) .
- DP: Differential Pressure (Presión diferencial).
- V: Vibration (Vibración).
- T: Temperatura.
- INTERLOCK : Enclavamientos.
- t: Tiempo.
- VDF CONTROL: Lógica de control desde el variador de frecuencia en automático.
- PID: Estrategia de control desde el DCS.
- NS: Nominal Speed (Velocidad nominal).
- Speed Vent.: Velocidad del Ventilador.

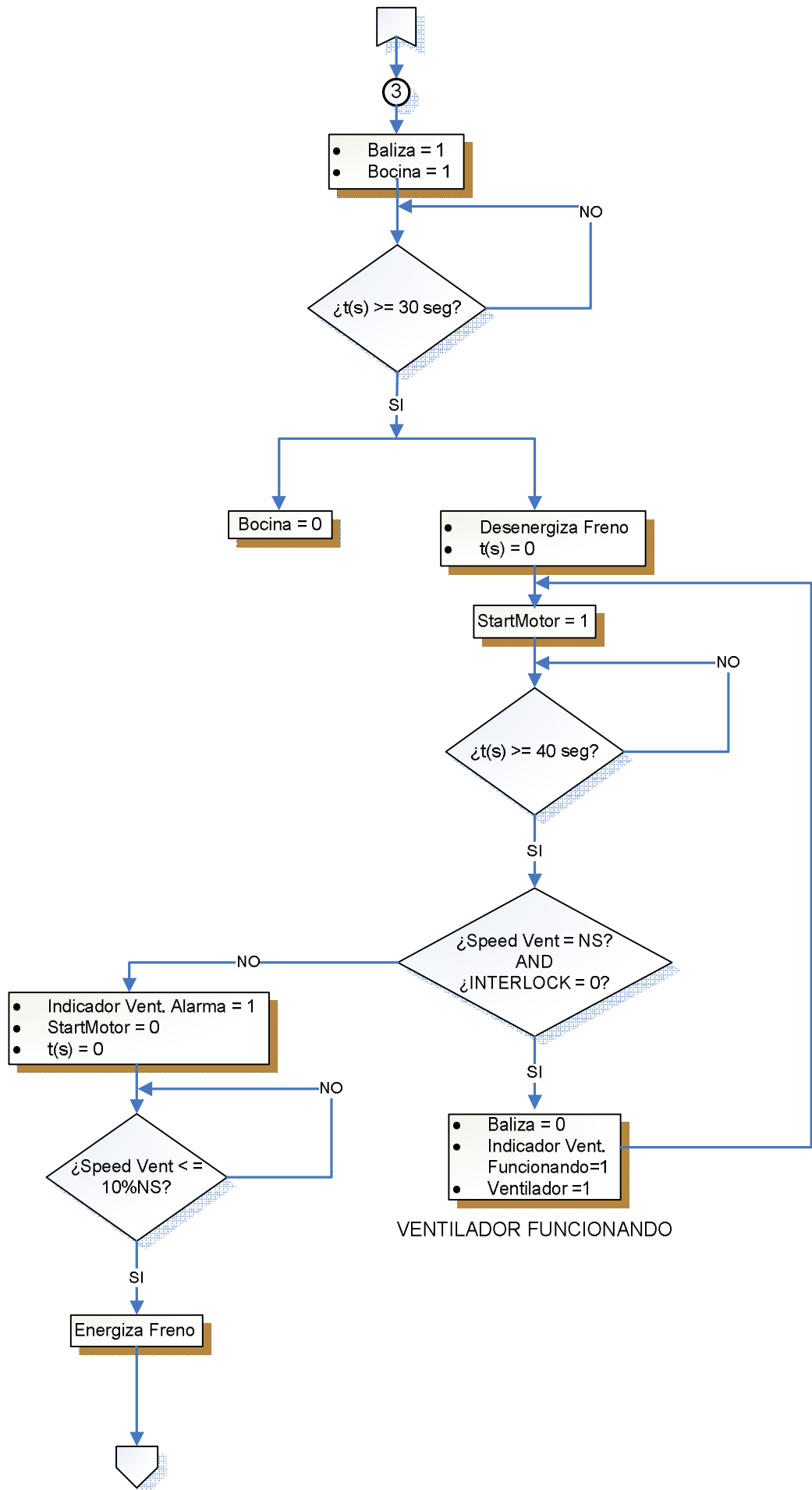
El controlador iniciará testeando y confirmando el estado de reposo del ventilador, luego testea las variables S, V, F, DP y T que a la vez son registradas en el HMI, luego de ser testeadas las variables entran a los interlocks o enclavamientos del programa del

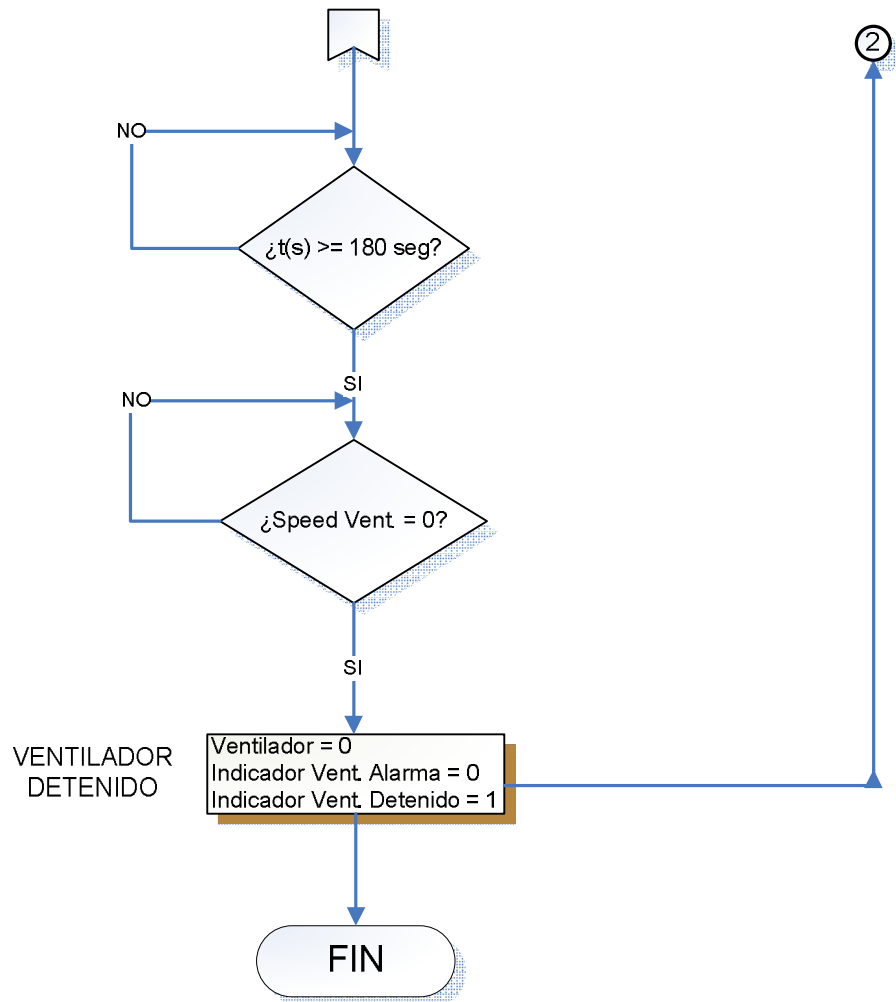
controlador, al cumplir con las condiciones espera la confirmación de arranque del motor, estado local o remoto y confirmación manual o automático según corresponda, luego debe cumplirse la filosofía de control propuesta en el capítulo 3.5.

A continuación se muestra el diagrama de flujo y la programación del sistema de control del proceso.

DIAGRAMA DE FLUJO







STANDARD USED

ISA-5.2-1976 (R1992) / Formerly ANSI/ISA-5.2-1976 (R1992)	Binary Logic Diagrams for Process Operations
ISA-5.5-1985 Formerly ISA-S5.5-1985	Graphic Symbols for Process Displays
ISA-5.3-1983 Formerly ISA-S5.3-1983	Graphic Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems
ISA-5.1-1984 (R1992) Formerly ANSI/ISA-5.1-1984 (R1992)	Instrumentation Symbols and Identification

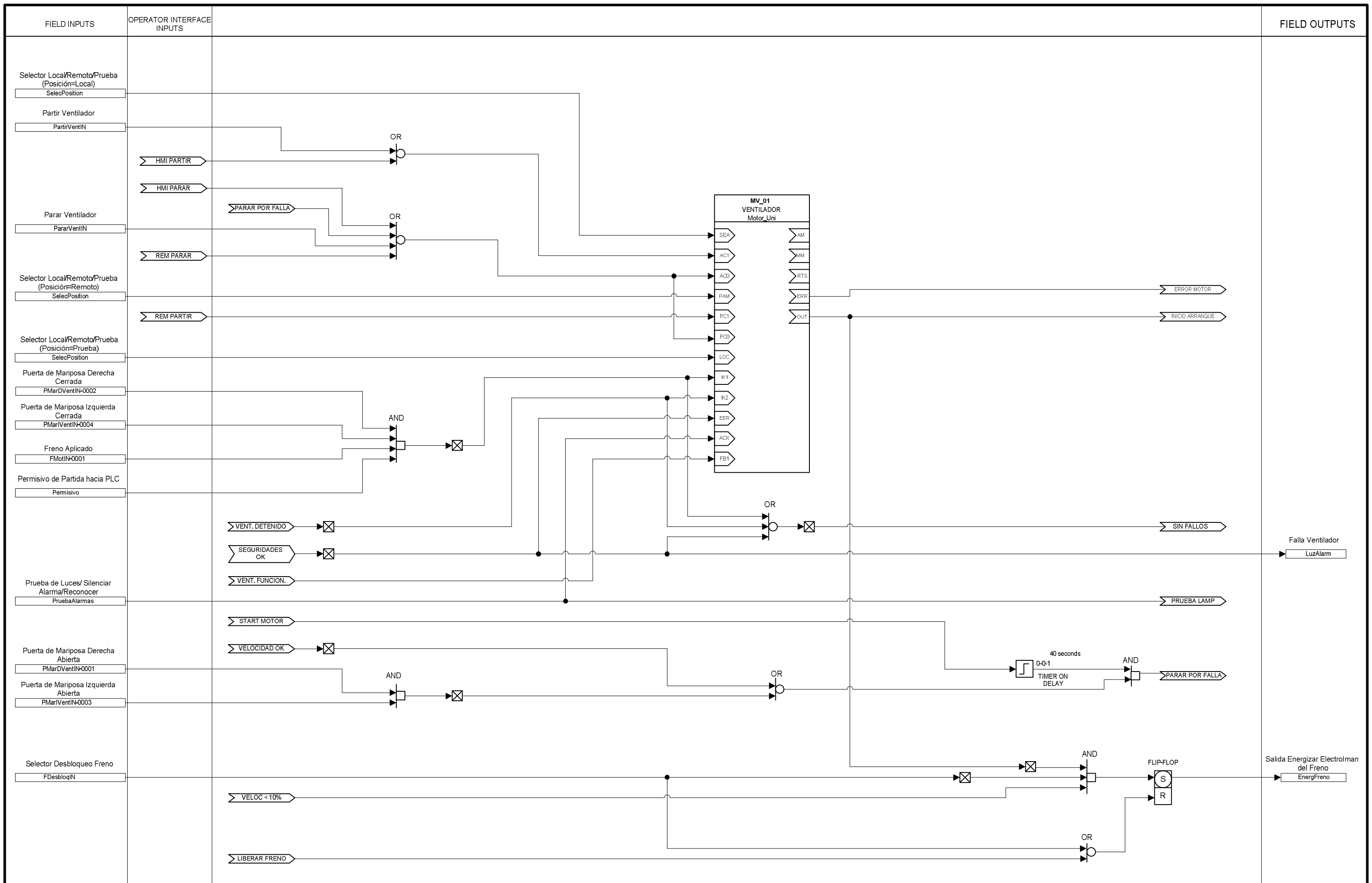
LIST OF LOGIC SYMBOLS USED

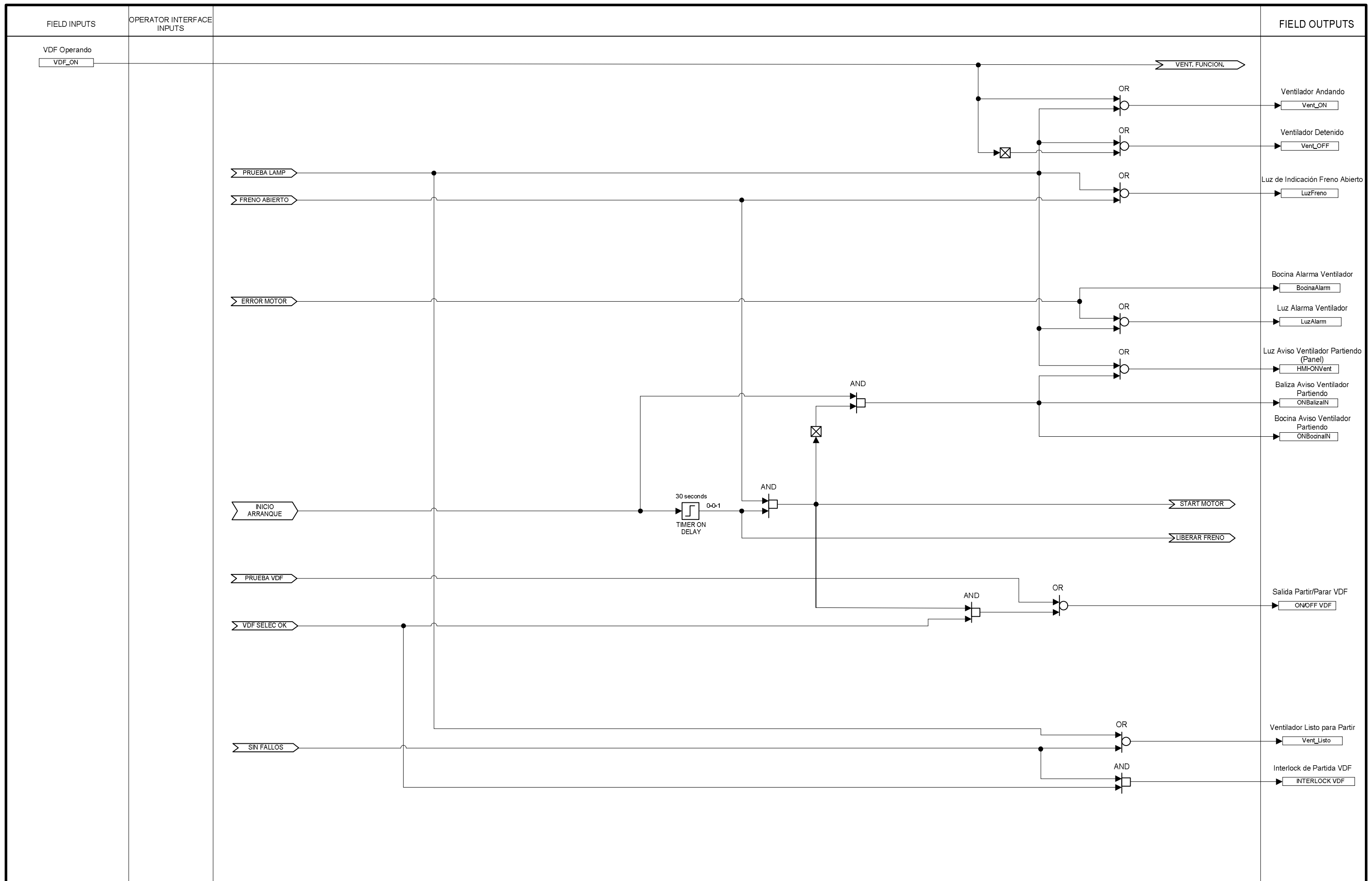
	Not (Output is true when input is false and vice versa)
	"OR" gate (Output is true when any input is true)
	"AND" gate (Output is true when all inputs are true)
	Intra sheet connector
	Input Logical Signal to function block
	Output Logical Signal from function block
	Input changes to start timer 0-1
	Input changes to start timer 1-0
	Input changes to start timer 0-1
	Input changes to start timer 1-0
	ELAPSED TIMER H R 0=hold 0=run 1=release 1=reset
	An input at "A" sets the output "S" An input at "B" resets (turn off) S Simultaneous signals at "A" & "B" will reset S (priority R)
	An input at "A" sets the output "S" An input at "B" resets (turn off) S Simultaneous signals at "A" & "B" will not reset S (priority S)
	Alarm To DCS alarm list ACK: Acknowledge rule
	Event To DCS event list
	Label in Operator interface N: Type of label Type 1: text color (, ,) Background color (, ,) Type 2: text color (, ,) Background color (, ,)
	Constant
	Var name

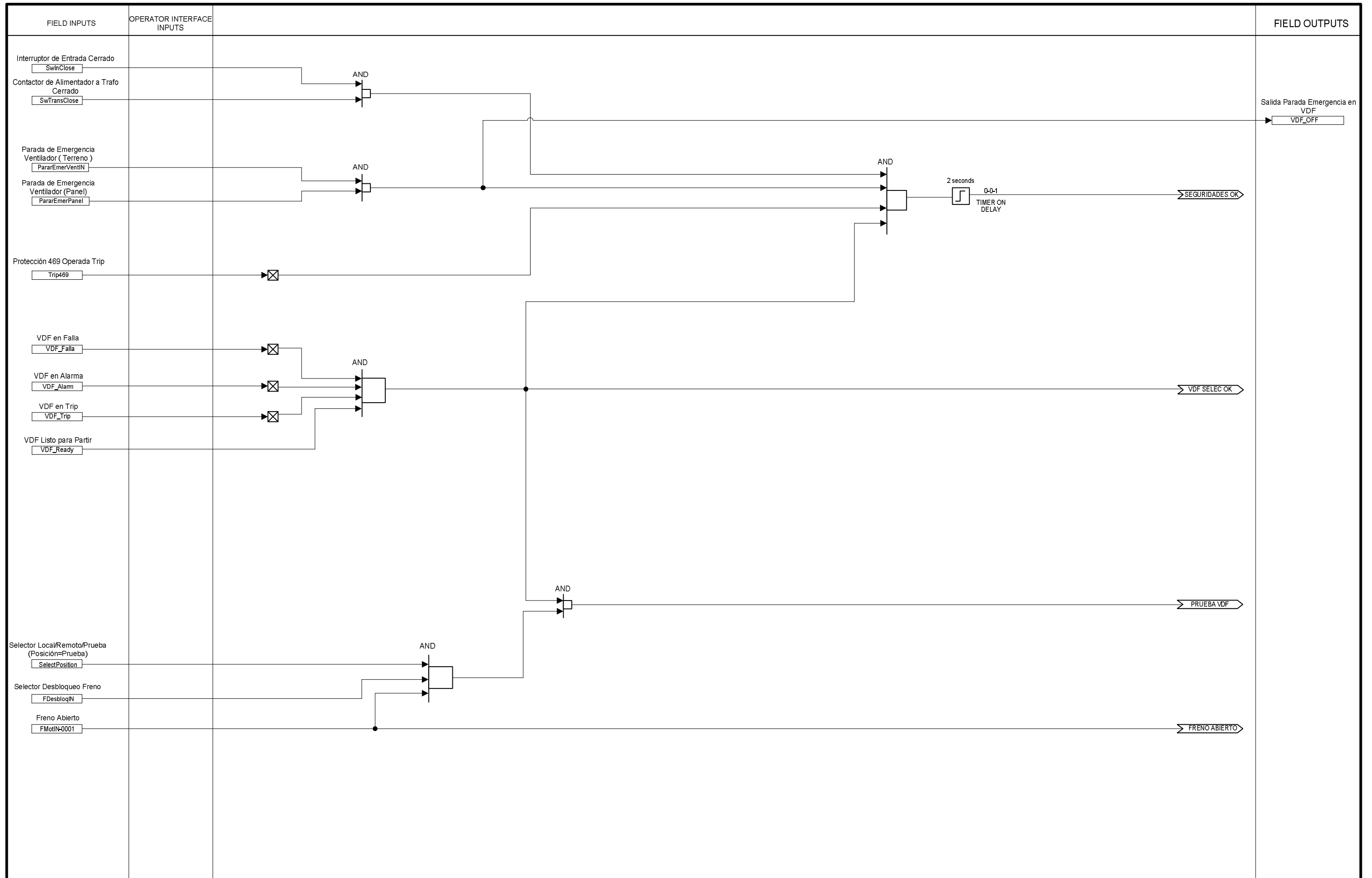
DEVICE STATUS

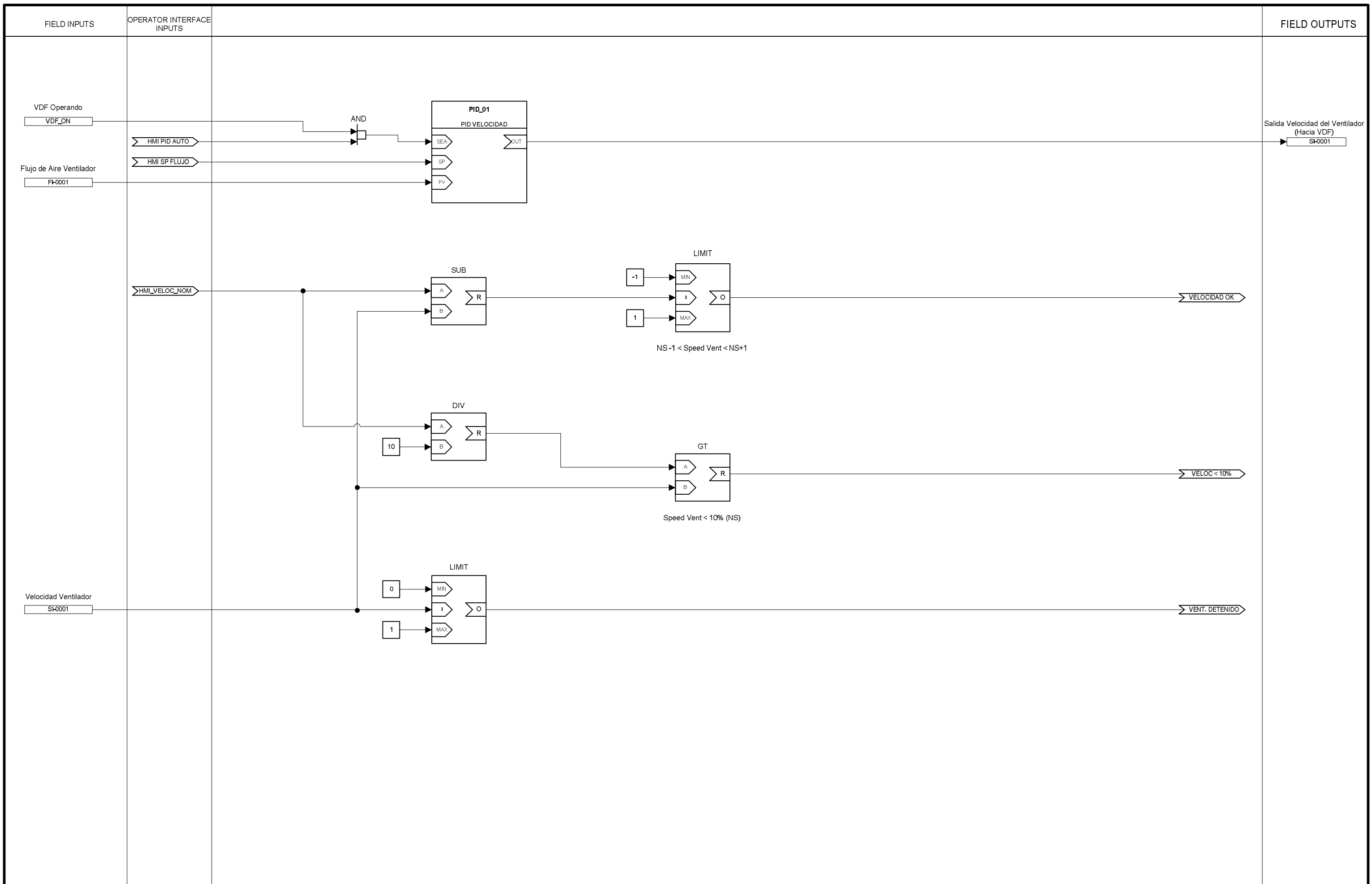
	Name input to function block (data type: string)
	Description input to function block (data type: string)
	Set Auto Mode when input is true from control logic (data type: bool)
	Auto Command 1 (data type: bool) In Auto Mode AC1 starts device on positive edge
	Auto Command 0 (data type: bool) In Auto Mode AC0 stops device on positive edge
	Set Panel Mode when input is true from control logic (data type: bool)
	Panel Command 1 (data type: bool) In Panel Mode PC1 starts device on positive edge
	Panel Command 0 (data type: bool) In Panel Mode PC0 stops device on positive edge
	Local Mode (data type: bool) When LOC is true, command from wks is inhibited
	Interlock 1 (data type: bool) prevents start of device when input is true
	Interlock 2 (data type: bool) prevents start of device when input is true
	External Error (data type: bool) Stops and prevents start of device when input is true
	Alarm Acknowledge (data type bool) In positive edge Acknowledge all alarms in the device
	Feedback (data type bool) Main contactor or feedback input
	Alarm & Event configuration type for High High Level (data type: dint)
	Alarm & Event configuration type for High Level (data type: dint)
	Alarm & Event configuration type for Low Level (data type: dint)
	Alarm & Event configuration type for Low Low Level (data type: dint)
	Condition name for High High Level (data type: string)
	Condition name for High Level (data type: string)
	Condition name for Low Level (data type: string)
	Condition name for Low Low Level (data type: string)
	Input signal for SignalInReal function block (data type: realIO)
	Alarm & Event config error (data type: dint)
	AutoMode activated, when is true device is in Automatic Mode
	ManMode activated, when is true device is in Manual Mode
	Ready to Start device
	Error activated in device





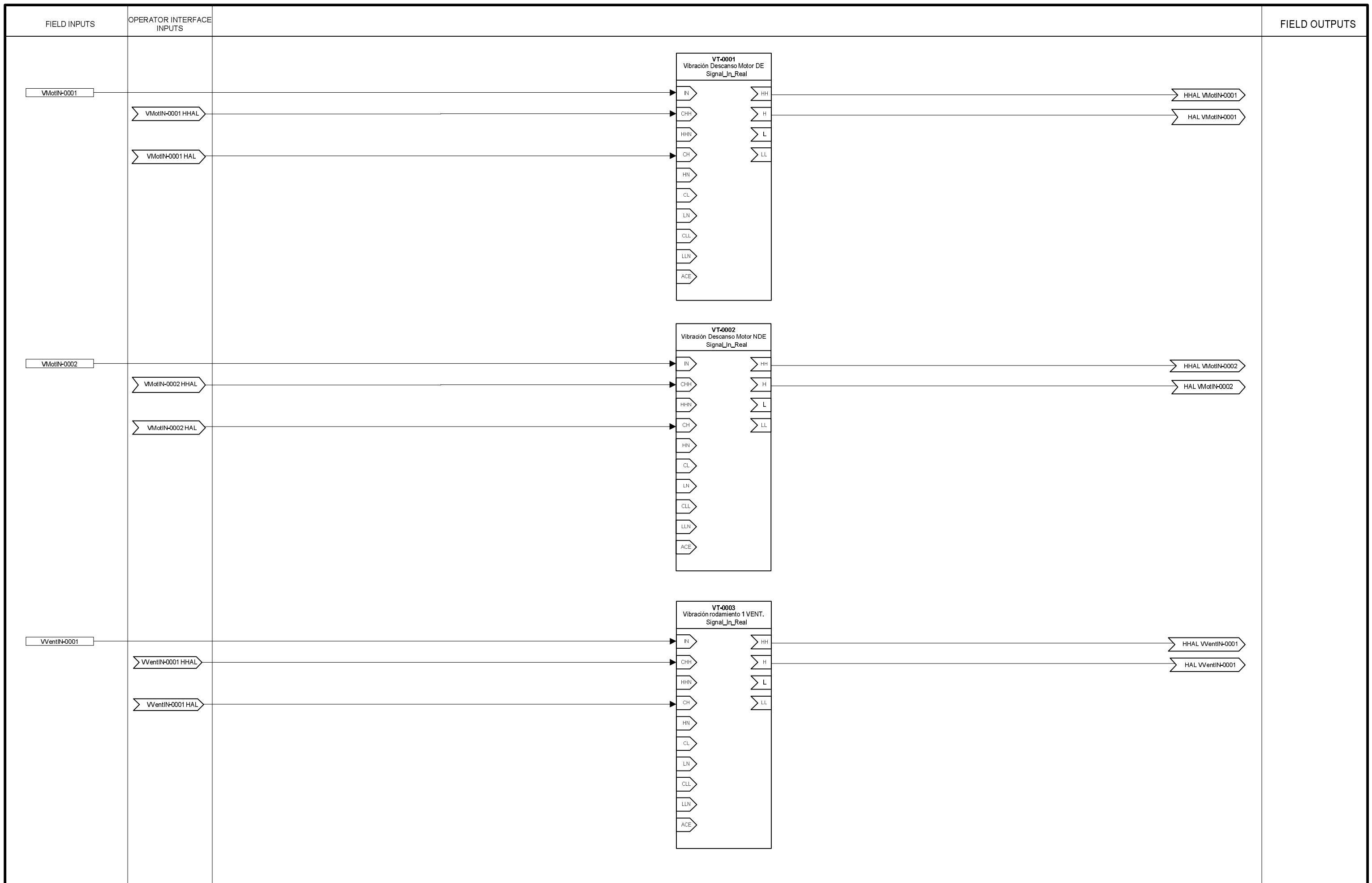


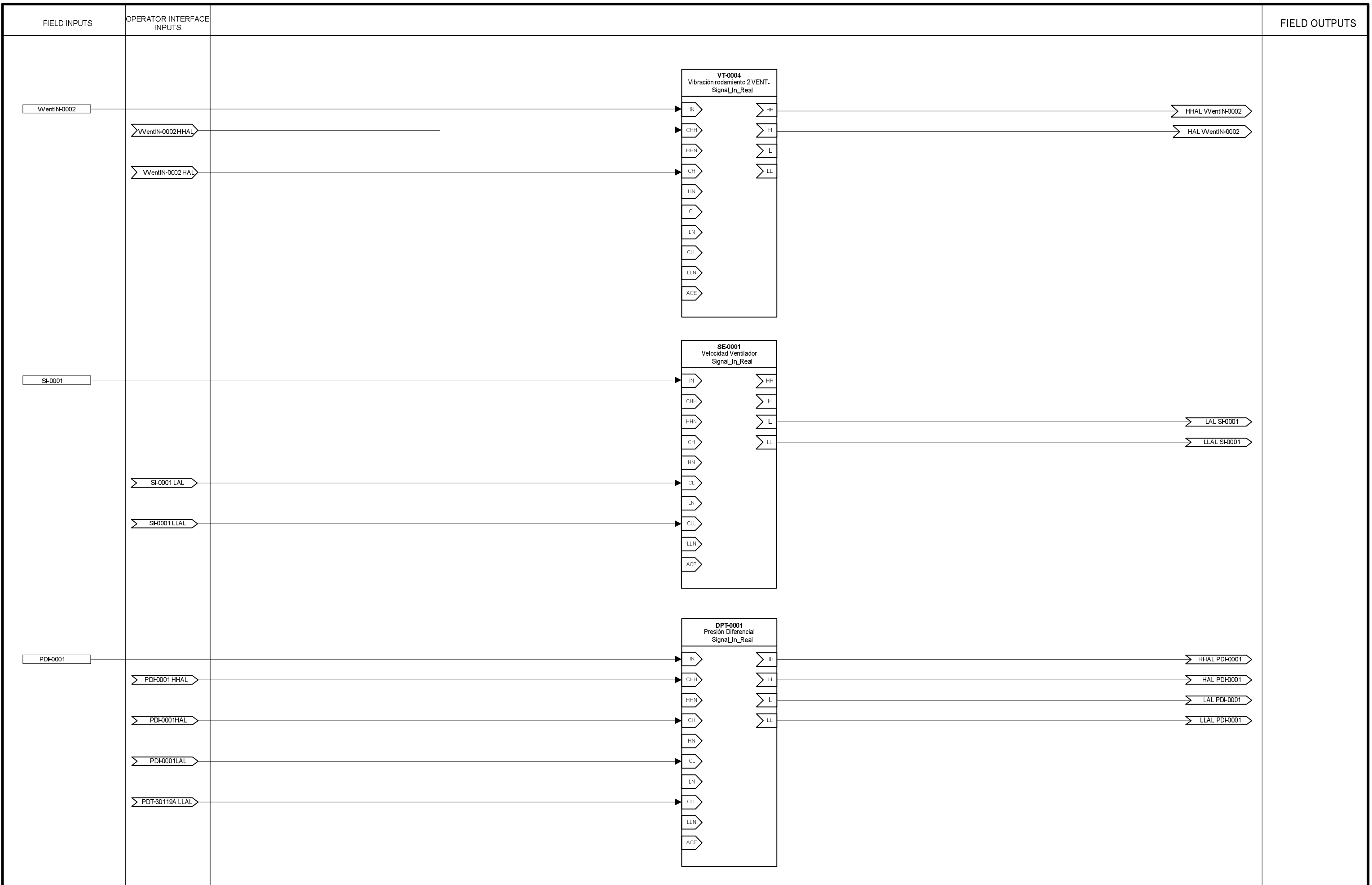


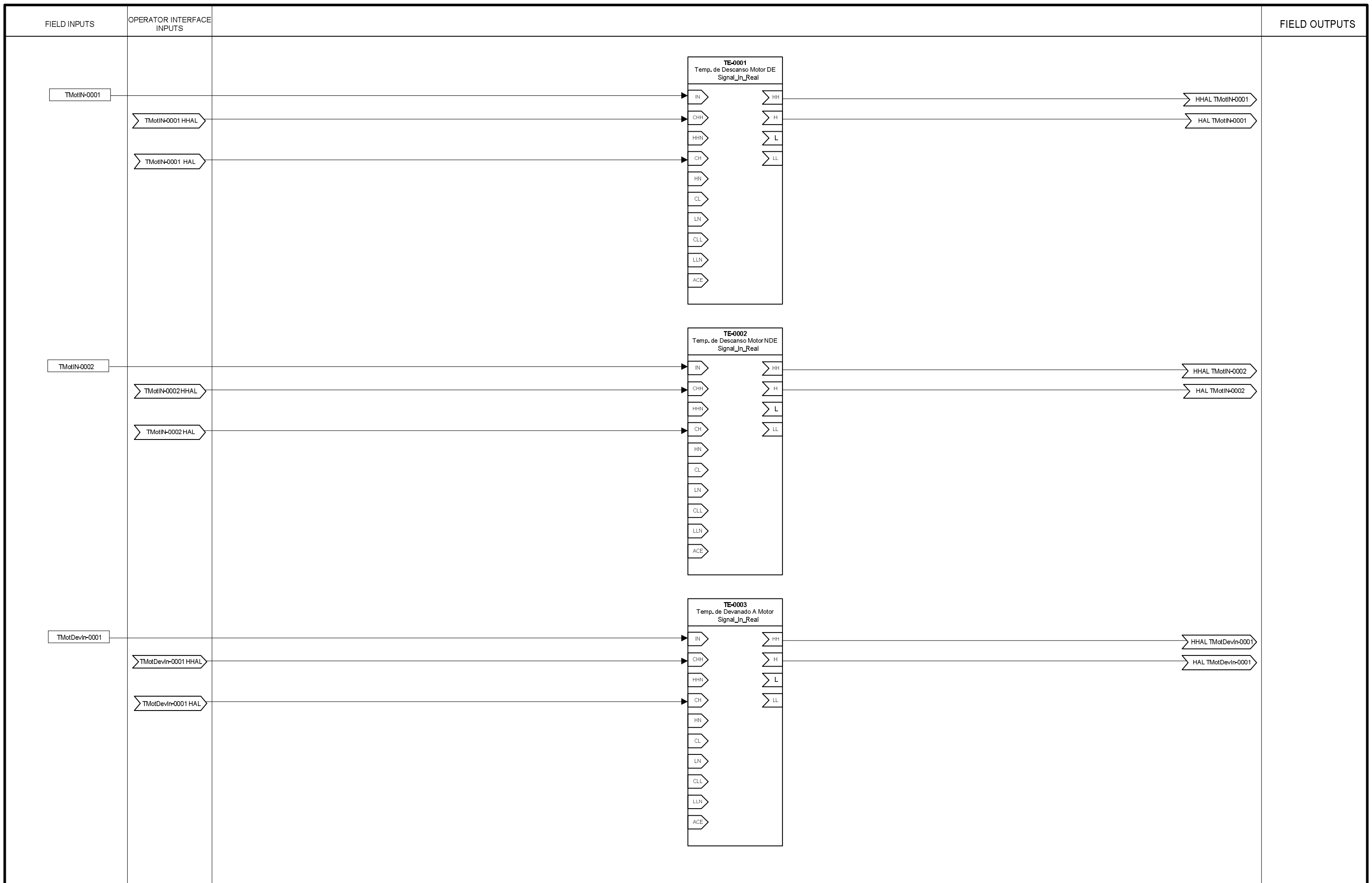


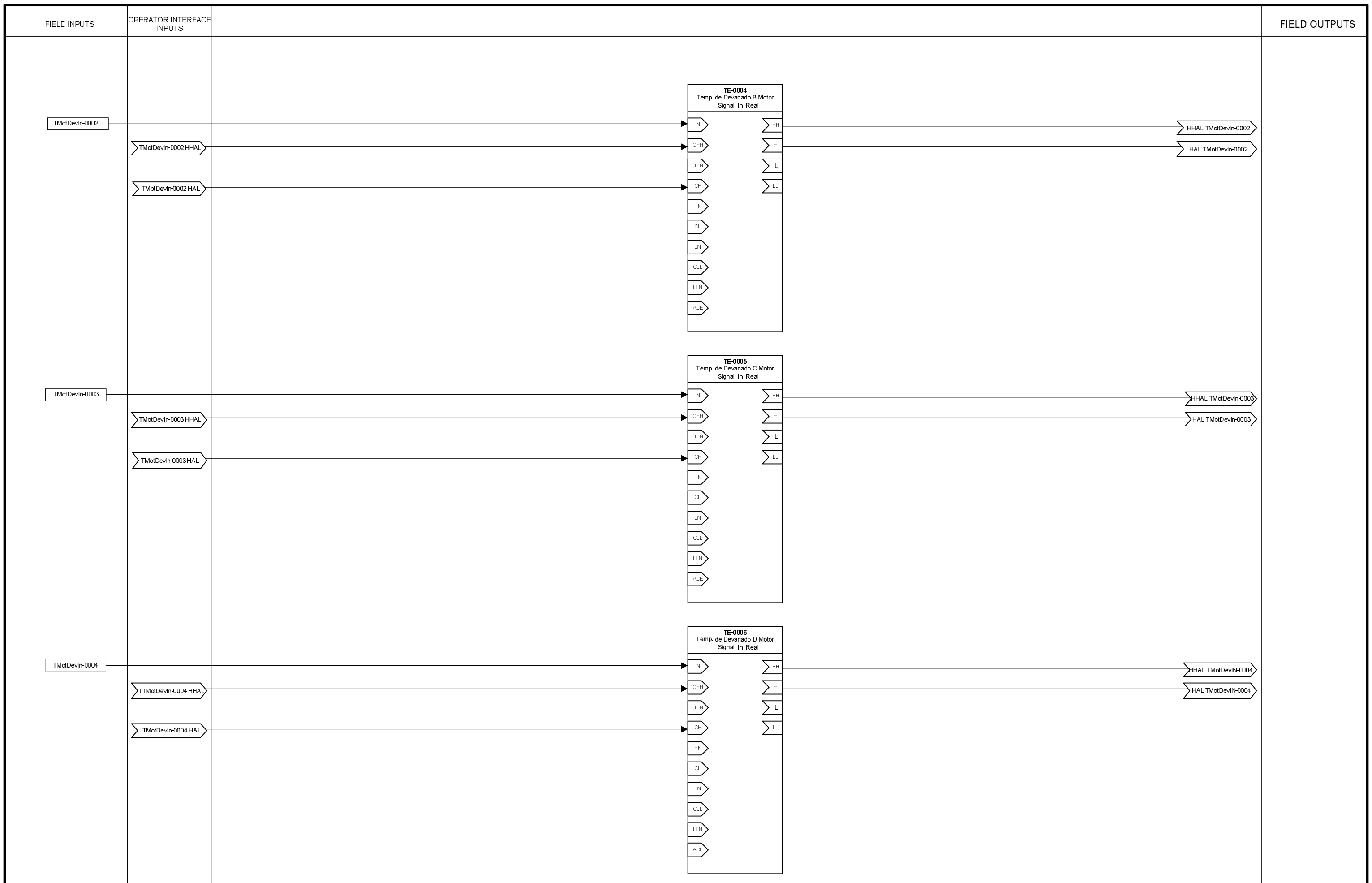
FIELD INPUTS	OPERATOR INTERFACE INPUTS		FIELD OUTPUTS
469		Temperatura de Descanso Motor DE	TMotIN-0001
469		Temperatura de Descanso Motor NDE	TMotIN-0002
469		Temperatura de Devanado A Motor	TMotDevIN-0001
469		Temperatura de Devanado B Motor	TMotDevIN-0002
469		Temperatura de Devanado C Motor	TMotDevIN-0003
469		Temperatura de Devanado D Motor	TMotDevIN-0004
469		Temperatura de Devanado E Motor	TMotDevIN-0005
469		Temperatura de Devanado F Motor	TMotDevIN-0006
469		Temperatura rodamiento 1 Ventilador	TVentIN-0001
469		Temperatura rodamiento 2 Ventilador	TVentIN-0002
469		Temperatura Ambiente Caverna Ventilador	TAmbiente-0001
469		Voltaje del Motor	VoltMotor
469		Corriente del Motor	CurrMotor
469		Potencia del Motor	PowMotor
469		Registros de la protección 469	Reg469
469		Factor de Potencia	FacPow
469		Energía del Motor	EnerMotor
VDF		Registros del VDF	RegVDF

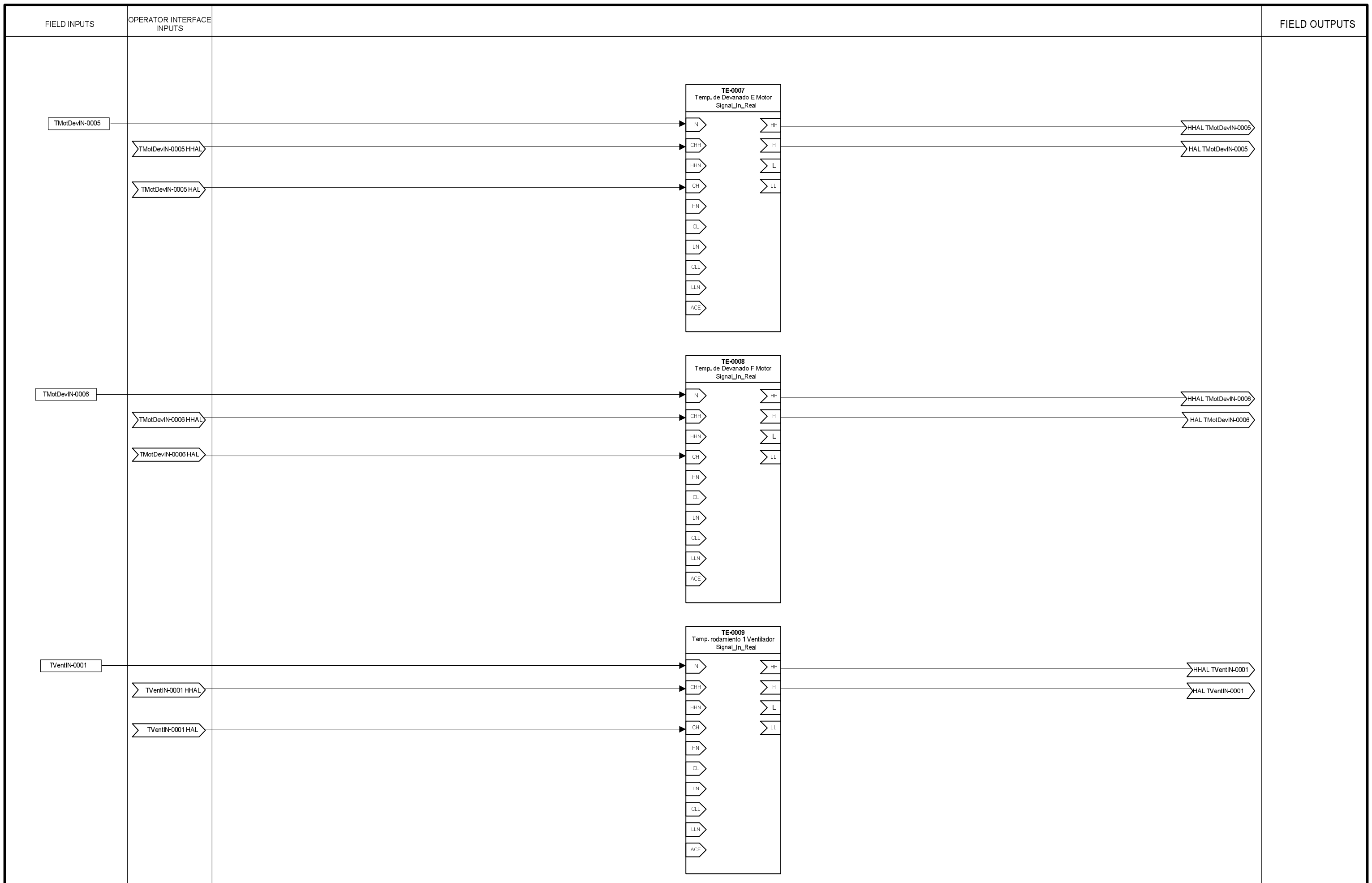


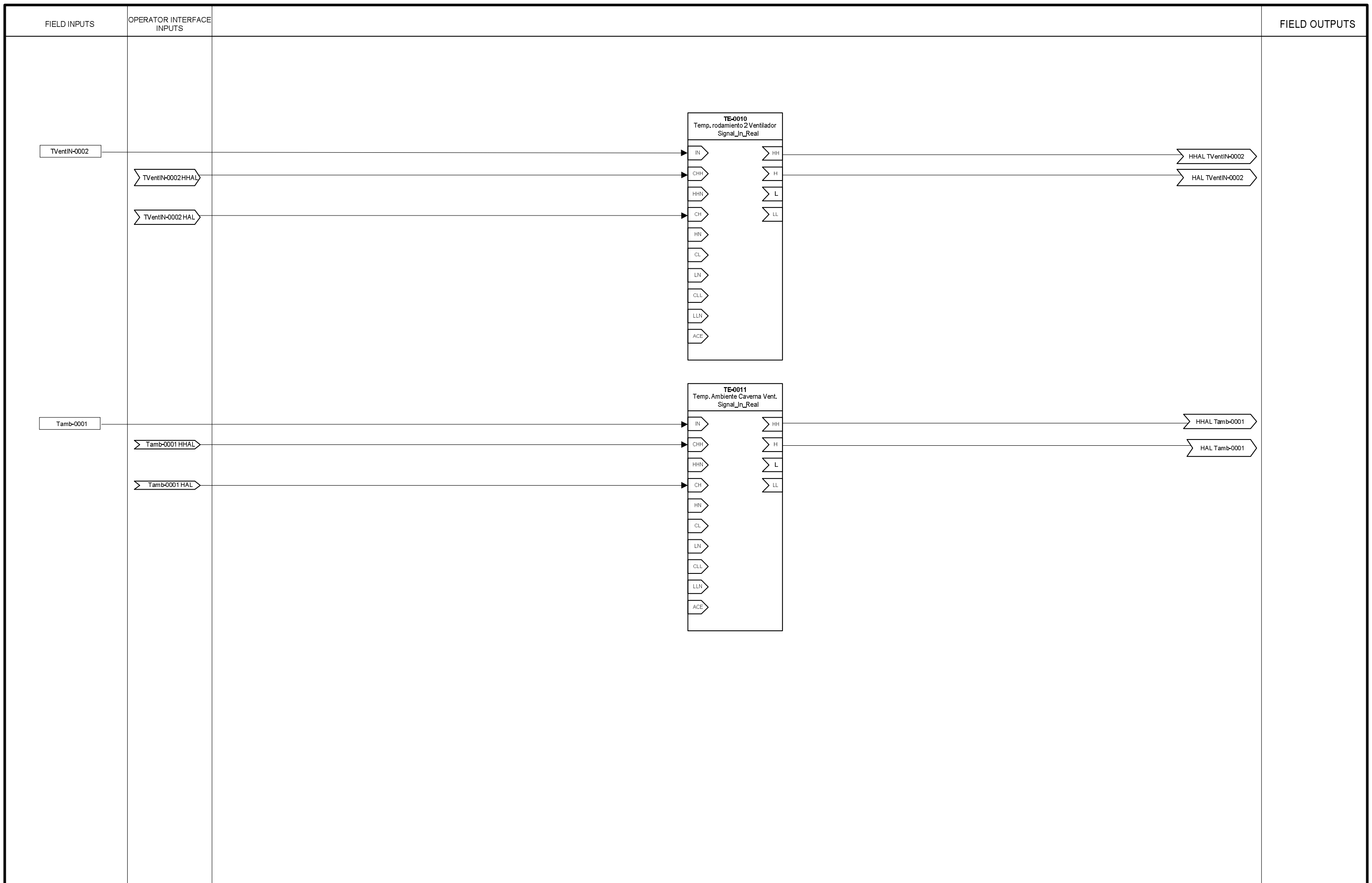


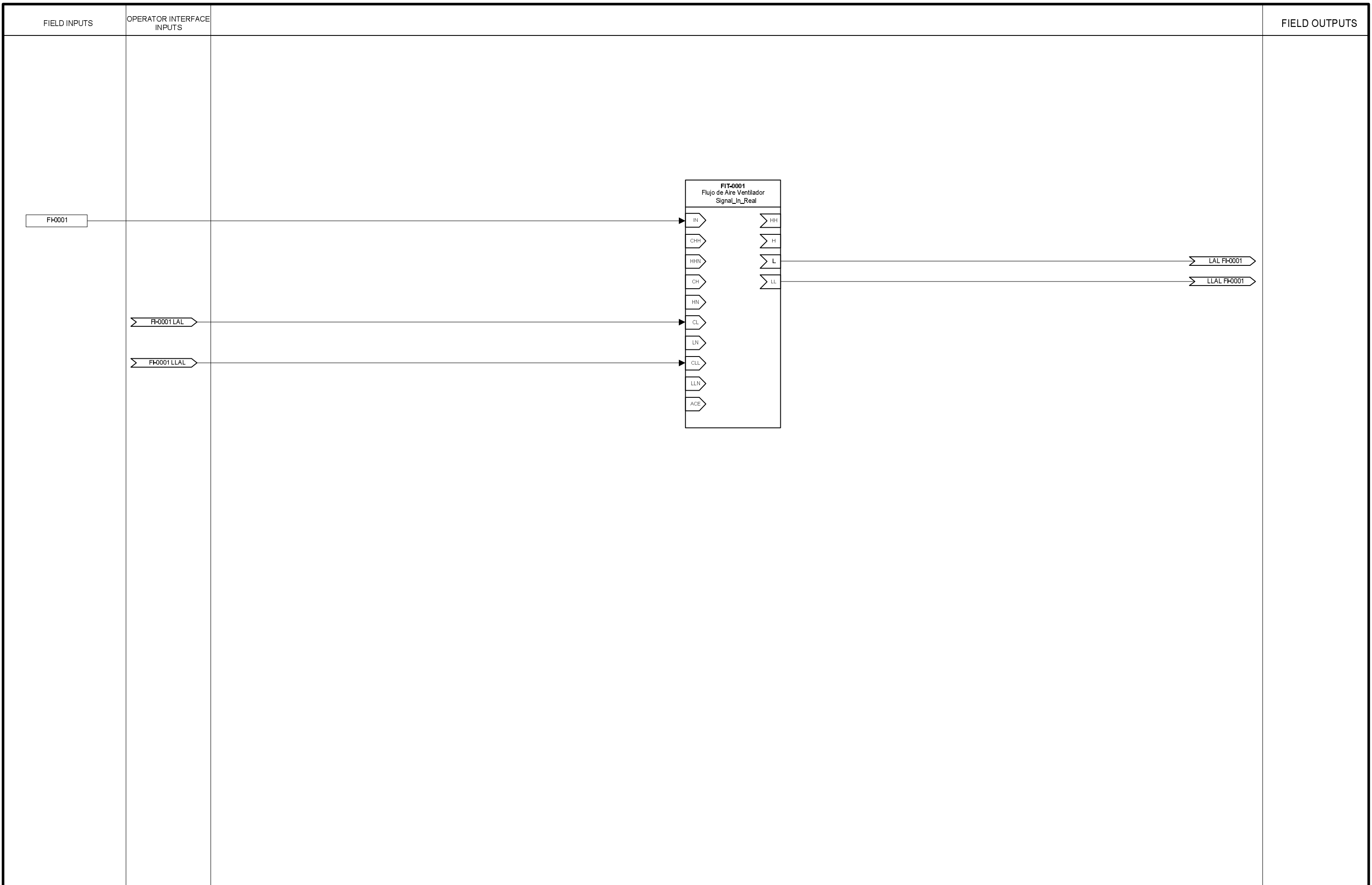












CAPÍTULO VI

ESTUDIO ECONÓMICO

6.1. Criterios para la evaluación económica

A continuación se realiza una breve descripción de los conceptos utilizados:

INVERSIÓN: Lista los principales componentes requeridos para la implementación del sistema de control, detallando los costos de inversión respectivos.

COSTOS: Estima los costos mensuales asociados a la operación y mantenimiento del sistema de control.

6.2. Descripción de inversiones y costos

En cada uno de los puntos en la medida que lo amerite se especifican las características particulares.

a) **Inversiones:** La inversión para la cámara de inyección se muestra a detalle en la tabla 6.1.

EQUIPOS	TOTAL EQUIPOS	COSTO UNITARIO (US\$)	COSTO TOTAL (US\$)
Controlador			
Controlador AC800M -PM856	1	5600.00	5600.00
Sensores			
Sensor de presión	1	2033.00	2033.00
Sensor de flujo	1	2500.00	2500.00
Sensor de velocidad	1	167.00	167.00
Sensor de vibración	4	360.00	1440.00
Sensor de temperatura	11	280.00	3080.00
Limit switch	6	81.00	486.00
Panel de operador			
Panel de Operador 800	1	2149.00	2149.00
Relé de protección			
Relé de protección 469	1	4100.00	4100.00
Interfaces de comunicación			
Interfaz Profibus DP/ CI854A	1	1283.00	1283.00
Interfaz RS232-C / CI853	1	935.00	935.00
Switches			
Switch FO/ETHERNET	1	1460.00	1460.00
Switch ETHERNET/FO	1	310.00	310.00
Módulos I/O			
Salida Digital DO820	1	167.50	167.50
Entrada Analógica AI845	3	645.00	1935.00
Entrada Digital DI820	2	139.50	279.00
Actuadores			
VDF ACS1000	1	117600.00	117600.00
Ventilador VANE-AXIAL 700HP	1	53550.00	53550.00
Estación de operación e ingeniería			
CPU (Workstation)	1	863.50	863.50
Monitor	1	196.40	196.40
TOTAL EQUIPOS	41		200134.40

Tabla 6.1. Resumen de inversiones en equipos

MOTIVO	COSTO (US\$)
Programación del controlador	1500.00
Instalación y puesta en marcha	3500.00
Entrenamiento del operador	120.00
TOTAL	5120.00

Total de inversión (US\$) = 205 254.40

Tabla 6.2. Resumen de servicios

Los precios de los equipos considerados son reales y actuales en el mercado.

b) Costos:

Los costos han sido evaluados de acuerdo a la mano de obra promedio en el mercado peruano.

- **Costo de operación.** Para operar el sistema de control de ventilación de la mina subterránea se requiere personal capacitado.

Costo de operación (US\$) = 640.00

- **Mantenimiento mensual.** Considerando un 0.125 % de la inversión.

Mantenimiento (US\$) = 256.57

A continuación se muestra la tabla 6.3 muestra un resumen de los costos.

MOTIVO	COSTO (US\$)
Personal Operación	640.00
Mantenimiento mensual	256.57
Total costos de operación y mantenimiento	896.57

Tabla 6.3. Resumen de costos de operación y mantenimiento

6.1. Evaluación Económica

Para fines de análisis, la siguiente evaluación económica tomó como base la tarifa eléctrica de consumo de energía activa (KWh) de otra compañía minera, esto debido a que no se cuenta con este dato de la mina en mención.

Tarifa con consumo de energía activa:

$$\text{precio} = 4.650 \text{ cent US\$ / KWh}$$

Caso A:

Con la selección propuesta del ventilador tenemos:

Potencia	700HP
Caudal Máximo	460 000 CFM

$$\text{Potencia} = 700 \text{ HP} = 522.2 \text{ KW}$$

El cálculo del consumo diario de energía, sabiendo que los ventiladores trabajarán las 24 horas.

$$\text{Energía(KWh)} = (522.2 \text{ KW}) * (24 \text{ h})$$

$$\underline{\text{Energía(KWh)} = 12\,532.8 \text{ (KWh)}}$$

Entonces el consumo mensual aproximado de energía será:

$$\underline{(12\,532.8\text{ KWh}) * (30) = 375\,984\text{ KWh}}$$

Considerando la tarifa de consumo de energía mencionada líneas atrás tenemos:

$$\underline{(375\,984\text{ KWh}) * (0.04650\text{ US\$ / KWh}) = \text{US\$}.\,17\,483.256$$

Luego considerando un IGV del 19%, significa una facturación de:

$$\underline{(\text{US\$}.\,17\,483.256) * (1.19) = \text{US\$}.\,20\,805.07$$

Caso B:

En este caso se supone la continuidad el uso de los ventiladores antiguos:

Potencia	50 HP
Caudal Máximo	25 000 CFM

Para que estos ventiladores logren alcanzar el caudal que se requiere, se necesitarían un aproximado de 18 a más ventiladores de las mismas características trabajando en paralelo y a plena carga.

Analizando igual al CASO A, para un ventilador de 50 HP tenemos:

$$\text{Potencia} = 50\text{ HP} = 37.3\text{ KW}$$

$$\text{Energia(KWh)} = (37.3\text{ KW}) * (24\text{ h})$$

$$\underline{Energia(KWh) = 895.2 (KWh)}$$

Entonces el consumo mensual aproximado de energía será:

$$\underline{(895.2 KWh) * (30) = 26856 KWh}$$

Considerando la tarifa de consumo de energía mencionada líneas atrás tenemos:

$$\underline{(26856 KWh) * (0.04650 \text{ US\$} / \text{KWh}) = \text{US\$} . 1248.804}$$

Luego considerando un IGV del 19%, significa una facturación de:

$$\underline{(\text{US\$} . 1248.804) * (1.19) = \text{US\$} . 1486.07}$$

Entonces el consumo por los 18 ventiladores de 50 HP sería:

$$\underline{\text{US\$} . 26749.26}$$

CONCLUSIONES

- La inversión que se realizaría en el equipo propuesto (Ventilador Vane-Axial) para lograr obtener el caudal requerido resultaría ser menor en un 22.2% comparándolo con el caso de continuar con el uso de los ventiladores de baja capacidad.
- Con el diseño propuesto se logrará mejorar los estándares de calidad de ventilación de la mina subterránea, proporcionando el caudal necesario, exigido por las normas peruanas establecidas, lo que significa una mejora en las condiciones de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente.
- Mayor certeza en la toma de decisiones operacionales debido a la centralización del proceso y registros históricos del comportamiento de las variables involucradas.

BIBLIOGRAFÍA

Textos, manuales, seminarios

- **Handbook for Dust Control in Mining**
Fred N. Kissell, Publicación 2003.
- **Mine Ventilation and Air Conditioning**
Hartman, Mutmansky.
- **Handbook of Air Conditioning and Refrigeration**
Wang S.K. Publicación 2001.
- **Mechatronics**
Dan Necsulescu
- **Controladores PID**
Virginia Mazzone, Publicación 2002.
- **Resistance Temperature Detectors (RTD)**
Diego Oroño, Publicación 2007.
- **Engineering Vibration**
Daniel J. Inman, 3rd edición.
- **AC800M – Controller Hardware (Hardware and Operation)**
Industrial IT ABB
- **Communication (Protocolos and Design)**
Industrial IT ABB

- **Instrumentación electrónica**
Pérez. M.A.
- **Publicación, Evaluation of Different Airflow Sensors at the WIPP Facility**
Ian J. Duckworth, Kirk McDaniel, Brian Prosser.
- **Publicación, Instrumentación electrónica.**
Universidad de Zaragoza (Dpto. de Ing. electrónica y comunicaciones)
- **Presentaciones, Redes industriales.**
Celso Montalvo (Universidad Nacional de Ingeniería UNI)
- **Relay feedback based monitoring and autotuning of processes with gain nonlinearity**
Zeinab Tehrani Zamani, University of Tehran (Control Department, Electrical Engineering Faculty)
- **Curso de Ventilación minera 2006**
Instituto de capacitación Minera del Perú

Páginas WEB

- www.profibus.com
- www.modbus.com
- www.engineeringtoolbox.com
- www.docencia.udea.edu.co/bibliotecologia/
- www.unicrom.com
- www.abb.com
- www.solomineria.com.pe