

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA FÍSICAS Y FORMALES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL EN CASCADA
PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA
ELÉCTRICA DE COMPRESORES DE PISTÓN PARA AMONIACO
EN PROCESO DE REFRIGERACIÓN DE ENVASADO DE BEBIDAS
GASIFICADAS.**

Tesis Presentada para optar el Grado:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

BACHILLER. SERGIO FELIX VENEGAS GARAFFO

ASESOR:

MGTER. ING JUAN CARLOS COPA

AREQUIPA-PERU

2017

Nota de aceptación

Firma de presidente de jurado

Firma de jurado

Firma de jurado



DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la Universidad Católica de Santa María”



Sergio Venegas Garaffo

DEDICATORIA

A Dios, por dármele todo, por poder tener la bendición de ser una persona de bien y responsable con todas su pruebas.

A mi Padre Efraín Venegas Cori, Madre Isolina , Abuelos que son como mis padres Salome Cori y Félix Venegas, por siempre creer en mí y darme todas las oportunidades de lograr mis deseo y metas que me planteo día a día.

A mi hermano Santiago Córdoba que este donde este en argentina él siempre está orgulloso de mis logros.

A Gabriela Ojeda e hija, por aguantarme mis altos y bajo días de estrés y cansancios, con sus motivaciones de superación me inspiraron para lograr todas mis metas.

A mis tíos, primos y amigo, que siempre me ayudaron en las buenas y en las malas y que me seguirán acompañando incondicionalmente.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por dármele todo, por poder tener la bendición de ser una persona de bien y responsable con todas su pruebas.

A mi Padre Efraín Venegas Cori, Madre Isolina , Abuelos que son como mis padres Salome Cori y Félix Venegas, por siempre creer en mí y darme todas las oportunidades de lograr mis deseo y metas que me planteo día a día.

A mi hermano Santiago Córdoba que este donde este en argentina él siempre está orgulloso de mis logros.

A Gabriela Ojeda e hija, por aguantarme mis altos y bajo días de estrés y cansancios, con sus motivaciones de superación me inspiraron para lograr todas mis metas.

Al Ing. Jorge Málaga, un gran compañero y amigo, por sus clases en el trabajo de sistemas de refrigeración

Al Ing. Gonzalo Loaiza, gran jefe y amigo, por darme la posibilidad de experimentar conocimiento en la práctica, su confianza en todo es fundamental en este proyecto.

ÍNDICE

Nota de aceptación	2
ÍNDICE	6
ÍNDICE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS	14
RESUMEN.....	15
ABSTRACT.....	16
INTRODUCCIÓN	17
1. CAPÍTULO I: MARCO METODOLÓGICO.....	19
1.1 Título de la tesis:	20
1.2 Descripción del problema:	20
1.2.1 Campo y Área	22
1.3 Justificación del problema.....	22
1.4 Objetivo:.....	23
1.4.1 Objetivo Principal:	23
1.4.2 Objetivos Específicos:.....	23
1.5 Hipótesis:	24
1.5.1 Hipótesis Principal:	24
1.5.2 Hipótesis Secundarias:	24
1.6 Operaciones con variables:	25
1.7 Antecedentes de la Investigación:	25
1.8 Factibilidad:	26
1.8.1 Técnica:	26
1.8.2 Operativa:.....	27
1.8.3 Campos de verificación:.....	27
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	28
2.1 Problemática ambiental del consumo energía:.....	29
2.2 Esquema de proceso refrigeración Embotelladora:.....	32
2.3 Ciclo de refrigeración normal:	32

2.4	Funcionamiento del ciclo de refrigeración por compresión amoniaco:	34
2.4.1.	Comportamiento del refrigerante en el ciclo de refrigeración por compresión:	34
2.4.2.	Efecto del aire residual como gas no condensable en un refrigerante en estado gaseoso: 37	
2.5	Funcionamiento del compresor:	39
2.5.1	Compresión de vapor:	39
2.5.2	Compresión de isotérmica, politrópica y adiabática:	40
2.6	Funcionamiento del condensador:.....	43
2.7	Funcionamiento de la válvula de expansión:	44
2.8	Funcionamiento del evaporador:.....	47
2.9	Bombas primarias y secundarias:.....	48
2.10	Tanque de Glicol:.....	48
2.11	Tanque de separador de amoniaco líquido y vapor:.....	49
2.12	Ciclo ideal de refrigeración:.....	49
2.13	Cálculo capacidad de compresor aplicada:	51
2.14	Cálculo la potencia teoría del compresor:	52
2.15	Tabla de selección de equipo compresor:	53
2.16	Control de compresores de pistón alternativos existentes:.....	54
2.17	Control avanzado con variables auxiliares:.....	57
2.17.1	Control Cascada:	57
2.17.2	Control Anticipativo:	59
2.18	Sintonía en lazo cerrado Ziegler y Nichols	62
2.19	Sistema de monitoreo Scadas:.....	64
2.19.1	Indusoft:	64
2.20	Hipótesis: Variaciones de las presiones y su repercusión en las potencias	67
3.	CAPÍTULO III: PLANTEAMIENTO OPERACIONAL	69
3.1	Esquema conceptual: sistema de control electrónico para optimización de consumo de energía compresores de pistón en sistema de refrigeración Amoniaco:	71
3.2	Identificación del proceso de control de refrigeración existente en compresores (función matemática de sistemas control interno):	73
3.2.1	Método de identificación:	75

3.2.2	Planificación experimental:.....	76
3.2.3	Procesamiento de datos experimentales:.....	85
3.2.4	Comprobación de los resultados obtenido en la identificación no paramétrica utilizando análisis de correlación:	87
3.2.5	Comprobación de los resultados obtenidos en la identificación no paramétrica utilizando Análisis Espectral:.....	91
3.2.6	Selección de la estructura del modelo:.....	95
3.2.7	Validación de resultados obtenidos:.....	98
3.3	Controlador PID-FUZZY en cascada, para proceso de refrigeración Amoniaco – Glicol (control primario o interno):.....	114
3.3.1	Control interno existente:.....	116
3.4	Descripción de equipos:	121
3.4.1	Diagrama general del proyecto final:.....	121
3.4.2	PLC 1200 Siemens:.....	121
3.4.3	Medidores de energía PM710:	122
3.4.4	Pasarela EGX100 Schneider (TSXETG100):	124
3.4.5	Controlador EKC 361 DANFOSS:	126
3.4.6	Sensor de presión:	128
3.4.7	Sensor temperatura:.....	129
3.4.8	Descripción de interface usuario (Indusoft):.....	130
3.5.	Análisis de costo:	131
4	CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL EQUIPO.....	132
4.1.	Diseño del Hardware:.....	134
4.1.1	Diagrama específico del control en cascada:	134
4.1.2	Calculo de constantes de controlador PID externo fórmulas de sintonía en lazo cerrado:	134
4.1.3	Simulaciones:	135
4.1.4	Ingreso parámetros de la sintonización a controlador EKC 361:.....	137
4.1.5	Configuración de la Comunicación en los medidores:.....	138
4.1.6	Configuración del Gateway TSXETG100:	139
4.1.7	Resumen configuración equipos de adquisición de datos:	146

4.1.8	Arquitectura de Medidores:.....	149
4.1.9	Resultado de final proyecto control en cascada:	150
4.2.	Diseño del Software:	152
4.2.1.	Diagrama de bloque de software Indusoft:	152
4.2.2.	Programación de PLC:	153
4.2.3.	Diagrama de bloques programa PLC	153
4.2.4.	Cálculos PLC:	154
4.2.5.	Resumen de configuración Indusoft:.....	154
4.2.6.	Pruebas de sistema, puesta en marcha Scada:	159
4.2.7.	Plano final del Proyecto:	162
4.3.	Sistema de Redundancia:	163
4.4.	Confiabilidad:.....	163
4.5.	Cálculo de la confiabilidad de sistema propuesto:	165
4.6.	Consumo Energético:	167
4.7.	Análisis de costo y ahorro Económicos:	168
4.8.	Coste económico de elaboración de Proyecto:.....	170
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		173
BIBLIOGRAFÍA		177
ANEXO.....		179
ANEXO I -PROPIEDADES DEL REFRIGERANTE AMONIACO		179
Propiedades del refrigerante:.....		179
ANEXO II -CAUSAS Y CORRECCIÓN ANOMALÍAS EN COMPRESORES		184
ANEXO III RENDIMIENTO DE COMPRESORES		188
Rendimiento:		188
ANEXO IV-MODELAMIENTO MATEMATICO-FISICO DE CORPORACION LINDLEY		189
Modelamiento Matemático Intercambiador:		189
Modelamiento Matemático Condensador Evaporativo:		196
Modelamiento Matemático Compresor de Amoniaco:		202
Modelamiento Matemático Sistema de Refrigeración:		205
Análisis de datos reales de sistema de Refrigeración a modelar:.....		205

ANEXO V-ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS UTILIZADOS	213
Especificaciones PM710	213
Ficha técnica EKC 361.....	215
Modbus.....	216
Características técnicas PLC siemens 1200 CPU 1212c utilizado para proyecto	218
ANEXO VI-PROGRAMA	220
Programacion Matlab	220
Programación y configuración del Sistema de supervisión SCADA Indusoft Web Studio	220
Creación de un proyecto en Indusoft Web Studio.....	221
Enlace de datos a través de Indusoft Web Studio	222
Programa de PLC, adquisición de datos Scada	226
ANEXO VII-NORMATIVAS	230
Norma EN50160	230
Norma IEC 61000-4-30.....	232
ANEXO VIII- PLANO PROYECTO FINAL	234
Plano de proyecto final.....	234

ÍNDICE FIGURAS

Figura 2-1 Circuito refrigeración de corporación lindley	32
Figura 2-2 Circuito de refrigeración glicol	33
Figura 2-3 Presión del gas en el interior del condesado	38
Figura 2-4 Proceso de compresión en un compresor recíprocante	40
Figura 2-5 Compresor pistones utilizados en Corporación Lindley	43
Figura 2-6 Condensadores utilizados en Corporación Lindley	44
Figura 2-7 Sistema de intercambiador y expansión Corporación Lindley	48
Figura 2-8 Diagrama de entalpia vs presión de proceso de refrigeración	50
Figura 2-9 Control de compresores variación de espacios	55
Figura 2-10 Compresor de doble efecto; variación de la capacidad	56
Figura 2-11 Regulación de la capacidad mediante un by-pass	56
Figura 2-12 Estructura control en cascada 1	58
Figura 2-13 Estructura control en cascada 2	58
Figura 2-14 Estructura de control anticipativo	60
Figura 2-15 Estructura de control anticipativo incremental	61
Figura 2-16 Ciclo con variación de presión Hipótesis	68
Figura 2-17 Variación temperatura según Hipótesis y ciclo de refrigeración.	68
Figura 3-1 Diagrama de sistema dinámico	74
Figura 3-2 Diagrama método de identificación	76
Figura 3-3 Adquisición de datos scada	78
Figura 3-4 Análisis de ganancia estática, en el que se grafica la salida del sistema en estado estacionario, para diversas magnitudes de la señal de entrada	79
Figura 3-5 Prueba paso escalón para una entrada entre 50% y 100 %	80
Figura 3-6 Función vista teóricamente	81
Figura 3-7 Muestreo de presión sistema de refrigeración Glicol	83
Figura 3-8 Respuesta al tren de pulsos sistema	85
Figura 3-9 Respuesta impulso encontrado mediante análisis por correlación	90
Figura 3-10 Diagrama de Bode	94
Figura 3-11 Diagrama cero y polos ARMAX 2220	101
Figura 3-12 Diagrama cero y polos ARMAX3330	101
Figura 3-13 Diagrama cero y polos ARMAX4440	102
Figura 3-14 Diagrama cero y polos ARX220	102
Figura 3-15 Diagrama cero y polos ARX340	103
Figura 3-16 Validación cruzada ARMAX3330	104
Figura 3-17 Validación cruzada ARMAX2220	104
Figura 3-18 Validación cruzada ARX340	105
Figura 3-19 Diagrama de bode ARMAX 3330	107
Figura 3-20 Diagrama de Bode ARX 340	107
Figura 3-21 Función de correlación de residuos ARMAX 3330.	108
Figura 3-22 Diagrama de bode ARX 340	108
Figura 3-23 Diagrama de ceros y polos ARMAX3330	110
Figura 3-24 Diagrama respuesta al impulso ARMAX 3330	110

Figura 3-25 Repuesta al escalón ARMAX3330	111
Figura 3-26 Diagrama de bode ARMAX 3330	111
Figura 3-27 Función transferencia adquirida de ARMAX 3330	113
Figura 3-28 Función transferencia adquirida de ARMAX 3330 vs data2 (muestreo)	113
Figura 3-29 Respuesta al impulso final	113
Figura 3-30 Diagrama de bloques de un sistema con control en cascada	114
Figura 3-31 Conjuntos difusos para el error y el incremento	116
Figura 3-32 Esquema del controlador difuso proporcional	117
Figura 3-33 Diagrama serrucho de activación de capacidades de compresores pistón	117
Figura 3-34 Bloque de función transferencia hallada experimentalmente	118
Figura 3-35 Función de transferencia trasladada a 0 a 8	119
Figura 3-36 Parámetros de función de transferencia encontrada	120
Figura 3-37 Parámetros de función para el análisis de pid, trasladado a partir de cero	120
Figura 3-38 Proyecto final	121
Figura 3-39 Medidor pm710 de Schneider electric	122
Figura 3-40 Gateway o pasarela tsxetg100 de Schneider electric.	125
Figura 3-41 Medidor de presión MB 3000	128
Figura 3-42 Scada inicio	130
Figura 4-1 Diagrama de bloques control en cascada final	134
Figura 4-2 Respuesta de temperatura sin control cascada	135
Figura 4-3 Respuesta al escalón con control temperatura Glicol PID cascada	136
Figura 4-4 Parámetros de respuesta al escalón con control temperatura glicol con control PID cascada	136
Figura 4-5 Programación EKC 361	137
Figura 4-6 Cableado Modbus – RS485 con red de tipo bus (Schneider)	138
Figura 4-7 Resistencia o terminal de línea.	139
Figura 4-8 Aspecto físico del Gateway TSXETG100	140
Figura 4-9 Conectividad del puerto serie y switch de configuración.	141
Figura 4-10 Dirección ip de la máquina para el proyecto, 192.168.232.252	142
Figura 4-11 Ingreso ventana de comandos de Windows.	142
Figura 4-12 Confirmar la conectividad y la ip 192.168.232.159 del Gateway	143
Figura 4-13 Web embebida del gateway a través del explorador de Internet.	143
Figura 4-14 Ventana principal del Gateway	144
Figura 4-15 En setup se selecciona serial port, para configurar la conexión RS-485	144
Figura 4-16 En ethernet & TCP/IP se designa la dirección IP del Gateway	145
Figura 4-17 Configuración de la comunicación a 2 hilos de Modbus RTU (Gateway)	145
Figura 4-18 Gateway con la configuración de dos hilos	145
Figura 4-19 Gateway montado en tablero eléctrico	146
Figura 4-20 Tablero de instalación Gateway	147
Figura 4-21 Instalación de plc 1200 Siemens	147
Figura 4-22 Configuración medidor vilter1, velocidad transmisión	148
Figura 4-23 Configuración medidor vilter2, dirección	148
Figura 4-24 Arquitectura de medidores	149
Figura 4-25 Control cascada implementado	150
Figura 4-26 La variación de presión según la necesidad por el control en cascada	150

Figura 4-27 Variaciones de set de control interno según el control externo	151
Figura 4-28 Ahorro por el control en cascada	151
Figura 4-29 Diagrama de bloque Indusoft programa	152
Figura 4-30 Diagrama programa PLC 1200	153
Figura 4-31 Declaración de variable en sistema hmi sistema de refrigeración	155
Figura 4-32 Declaración de variable PM710	156
Figura 4-33 Configuración de ingreso de datos de Indusoft Seith	156
Figura 4-34 Uso de variable a utilizar para visualización	157
Figura 4-35 Configuración de cierre de aplicación	157
Figura 4-36 Configuración de cierre de aplicación diseño	158
Figura 4-37 Configuración para diseño Scada voltaje	158
Figura 4-38 Configuración para diseño Scada corriente	159
Figura 4-39 Scada inicio	159
Figura 4-40 Histórico presión proceso refrigeración	160
Figura 4-41 Control visual proceso de refrigeración	160
Figura 4-42 Temperatura proceso	161
Figura 4-43 Adquisición datos PLC	161
Figura 4-44 Análisis ratio energía últimos meses	171



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Operaciones de variables	25
Tabla 2.1 Tipo de consumo energía (instituto sindical de, s.f.)	31
Tabla 2.2 Coeficiente conversión co2 eq (instituto sindical de, s.f.)	32
Tabla 2.3 Relación entre temperatura y presión del refrigerante amoníaco en ciclo de refrigeración	36
Tabla 2.4 Valor constante k	43
Tabla 2.5 Obtenida de fabricante de compresores de amoníaco vilter	53
Tabla 2.6 Actualizada de equipos obtenida de fabricante de compresores de amoníaco vilter	53
Tabla 2.7 Propiedades refrigerante amoníaco en ciclo refrigeración	54
Tabla 2.8 Tipos de controles avanzados	57
Tabla 2.9 Primer método ziegler y nichols se realiza en lazo abierto	63
Tabla 2.10 Proporción de kc y tc segundo método Ziegler y Nichols, utilizado en el proyecto	63
Tabla 3.1 Descripción proyecto hardware	71
Tabla 3.2 Descripción software del proyecto	72
Tabla 3.3 Datos experimentales de la adquisición de datos	82
Tabla 3.4 Comparaciones métodos frecuencias y temporales	87
Tabla 3.5 Coeficiente a método ARX y ARMAX	97
Tabla 3.6 Coeficiente b método ARX y ARMAX	98
Tabla 3.7 Coeficiente c método ARX y ARMAX	98
Tabla 3.8 Resultado FPE	100
Tabla 3.9 Validación de FIT ARMAX y ARX	106
Tabla 3.10 Reglas difusas del controlador PP difuso	118
Tabla 3.11 Medidor características del medidor trifásico PM710	123
Tabla 3.12 Características gateway TSXETG100	125
Tabla 3.13 Variación resistencia de PT 1000	129
Tabla 3.14 Costo de proyecto	131
Tabla 4.1 Tasa de falla por etapas	165
Tabla 4.2 Análisis de carga sistema implementado	168
Tabla 4.3 Costo en consumo de energía mes	169
Tabla 4.4 Costo de equipos utilizados	170
Tabla 4.5 Costo y ahorro desde la instalación	171
Tabla 4.6 Horas de trabajo de compresores	171

RESUMEN

El sistema de refrigeración es una de las áreas críticas e importantes de una planta de envasado de bebidas gasificadas, es así que los compresores cumplen un papel importante en este proceso y así mismo son identificados como los grandes consumidores de energía eléctrica en la planta.

El presente estudio se centra en la optimización de consumo de energía eléctrica de compresores de pistón para amoníaco en proceso de refrigeración de envasado de bebidas gasificadas mediante un control en cascada para cualquier planta de manufactura que tengan o cuenten con sistema de refrigeración con amoníaco y compresores de amoníaco, el cual cuenta con el análisis matemático-físico para obtener el estudio y comportamiento de sistema de refrigeración por amoníaco teórico. Mediante los datos Experimentalmente se obtendrá de forma precisa en el comportamiento funcional del sistema. El estudio de control de Zengle Nichols nos permitirá poder obtener los parámetros de control externo con menor incertidumbre. Como ya se sabe que el área de refrigeración es muy importante es por ello que se debe tener un control y monitoreo constante, es así que el estudio se complementa con el desarrollo de un sistema Scada de esta área para el mejoramiento del control de este proceso. Las conclusiones de la tesis muestran la consecuencia de los objetivos planteados, aplicada en Corporación Lindley, generando un ahorro de energía eléctrica muy significativo, por otro lado el alcance es amplio ya que este estudio se puede aplicar a cualquier tipo de planta que cuenten con este tipo de proceso de refrigeración.

PALABRAS CLAVES: Ahorro de energía Proceso de refrigeración, Compresores, Control Cascada

ABSTRACT

The refrigeration system is one of the critical and important areas of a gas beverage packaging plant, so the compressors play an important role in the processes and also those identified as the major consumers of electrical energy in the plant.

The present study focuses on the optimization of the electric energy consumption of piston compressors for ammonia in refrigeration process of packaging of aerated beverages by a cascade control for any manufacturing plant that has the refrigeration system with the Ammonia and compressors Ammonia, which has the maintenance-physical analysis to obtain the study and the behavior of the cooling system by theoretical ammonia. By means of the data Experimentally it obtains of precise form in the functional behavior of the system. Using the Zengle Nichols methods we can obtain the control parameters with less uncertainty. As it is known that the refrigeration area of is very important is why it must have a control and constant monitoring, is so that the study contemplates the development of scada system of this area for the improvement of the monitoring of this process . The conclusions of the thesis are the consequence of the proposed objectives, applied in Lindley, generates a very significant electrical energy saving, the scope is broad and that this study can be applied to any type of plant that have type of cooling process

WORDS KEYS: Energy saving Cooling process, Compressors, control Waterfall

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia el medio ambiente ha ido cambiando. Los ecosistemas que componen el planeta han sufrido diferentes evoluciones debido a los cambios en los seres vivos que los integran, la cantidad de oxígeno en el aire, los tipos de vegetación, etc.

Al principio la tierra constaba de una gran cantidad de vegetación y de seres vivos. En este ecosistema abundaba la vegetación y el aire era rico en oxígeno.

Con la llegada del ser humano se fue modificando, primero con el sedentarismo y luego con la revolución de la agricultura. La capacidad de controlar y usar el fuego permitió a los seres humanos modificar o eliminar la vegetación natural. Por otro lado, la domesticación y pastoreo de animales herbívoros llevó al sobrepastoreo y a la erosión del suelo.

El otro gran cambio sufrido por el planeta fue la revolución industrial. Las ciudades crecían y la necesidad de materias primas (madera y carbón) para generar electricidad fue mayor.

Para acabar, en los últimos años el ser humano se ha concentrado en grandes ciudades en las cuales vivir. Estas ciudades necesitan un gran consumo de energía para su mantenimiento.

La sostenibilidad describe cómo los diferentes ecosistemas se mantienen productivos a lo largo del tiempo. Para conseguir este propósito, la sostenibilidad se basa en tres factores: ecológico, social y económico.

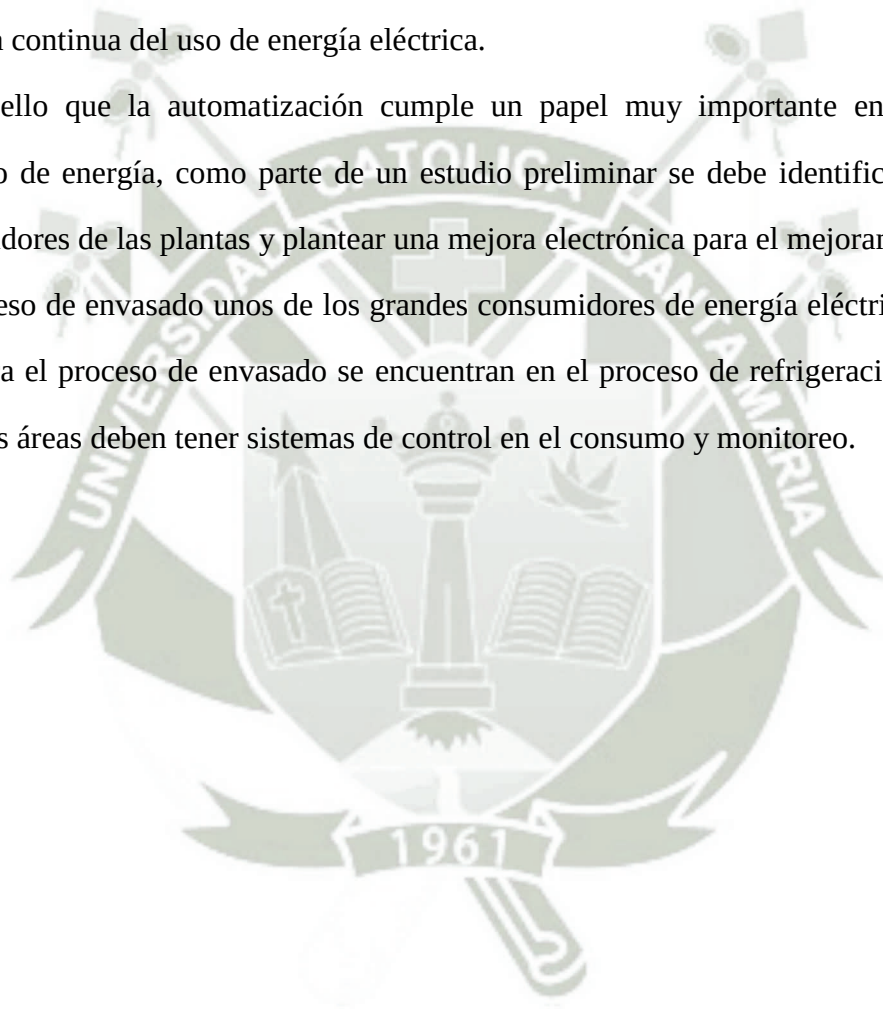
Para conseguir la sostenibilidad hay que respetar el medio ambiente y no exigir más materia prima de la que nos puede ofrecer. En una sociedad sostenible se tendrían que respetar los derechos humanos, es decir no explotar a los trabajadores. Debería ser también económicamente viable, esto quiere decir sin grandes desigualdades entre los trabajadores y las empresas, sin especulaciones sobre el producto de manera que se pusiera al alcance de todo el mundo.

Hoy en día la energía eléctrica es una necesidad de la cual no podemos prescindir y que va en aumento. Por este motivo hay que conseguir generar de una forma sostenible respetuosa con el medio ambiente a largo plazo (Endesaeduc, Endesaeduc, 2014).

Por otro lado las plantas que generan una grande demanda de estos recurso debe tener un plan para poder control los excesivos consumos de energía eléctrica, por ello que la automatización y el control son unas de las mejores opciones para poder agregarle este plus a mejora continua del uso de energía eléctrica.

Es por ello que la automatización cumple un papel muy importante en el ahorro de consumo de energía, como parte de un estudio preliminar se debe identificar los grandes consumidores de las plantas y plantear una mejora electrónica para el mejoramiento.

En proceso de envasado unos de los grandes consumidores de energía eléctrica y de mayor foco para el proceso de envasado se encuentran en el proceso de refrigeración, es por ello que estas áreas deben tener sistemas de control en el consumo y monitoreo.



1. CAPÍTULO I: MARCO METODOLÓGICO



1.1 Título de la tesis:

Diseño e implementación de un control en cascada para la optimización del consumo de energía eléctrica de compresores de pistón para amoniaco en proceso de refrigeración de envasado de bebidas gasificadas.

1.2 Descripción del problema:

Hoy en día la energía eléctrica es una necesidad de la cual no podemos prescindir y que va en aumento. Por este motivo hay que conseguir generar de una forma sostenible y respetuosa con el medio ambiente a largo plazo. La situación energética en el mundo ha cambiado mucho en el último siglo.

En los últimos 20 años se ha duplicado la energía consumida, este cambio es debido a la evolución de los países en desarrollo. Los estudios realizados nos indican que esta necesidad de energía eléctrica continuará aumentando a un ritmo similar. Hoy en día la generación de esta energía se reparte de la siguiente manera: 5,4% Petróleo, 23,3% Gas natural, 37,6% Carbón 13,8% Nuclear, 19,9% Renovables. (Endesaeduc, Endesaeduc, 2014, pág. 1).

El proceso de refrigeración en Corporación Lindley cuenta con compresores de amoniaco de gran capacidad eléctrica, el cual este proceso viene registrando un consumo elevado de energía eléctrica, es por ello que para poder controlar el exceso de energía que se viene derrochando es necesario poder analizar una solución viables para mejorar la mala utilización de este recurso.

En la preparación de bebidas gasificadas se necesita de un proceso de refrigeración, ya que en el proceso la carbonatación de la bebida gasificada (mezclar jarabe terminado más agua y dióxido de carbono) juega un papel importante permitiendo que este proceso físico-químico (carbonatación) sea de la mejor manera sin generar espumeo (se genera merma de jarabe), siendo el espumeo una pérdida para la embotelladora. El sistema de refrigeración por amoníaco cuenta con compresores de amoníaco para poder obtener un ciclo de refrigeración, los compresores son de grandes capacidades eléctrica debido a que gracias a estos se obtendrá la energía (entalpía) suficiente para que el ciclo de refrigeración se pueda cumplir.

En tanto los compresores son máquinas, importante para el proceso de refrigeración y su consumo de energía eléctrica es elevado debido a que estas máquinas cuentan con motores de 80 HP o 107 KW de potencia no es utilizado de una manera eficaz. Por lo tanto el control de los compresores es importante para poder definir la cantidad de capacidad calorífica como límite máximo sin tener que utilizar todos los compresores, ya que si un compresor para amoníaco es encendido sin demanda este entra en vacío y su consumo de corriente es aproximadamente de 50 % de lo que consume un compresor para amoníaco a carga completa siendo el aporte del compresor en vacío no significativo en el proceso.

Ahora no todo el tiempo de producción los compresores se encuentran en máxima demanda sino que tiene un tiempo el cual refrigeran todo un depósito de bebida carbonatada y luego solo debe mantenerla, es por ello que no solo basta con controlar la capacidad del compresor sino controlar el ciclo de refrigeración, es aquí que no se cuenta con un control sobre el control de capacidad.

En tanto el problema tiene solución, poder controlar todas las aristas anteriormente mencionadas, llegando así a una mejor optimización en el uso de energía eléctrica.

1.2.1 Campo y Área

Campo	:	Ciencia Aplicada
Área Específica	:	Ingeniería electrónica
Especialidad	:	Automatización y control.
Tópico	:	Automatización Sistema refrigeración

1.3 Justificación del problema

La justificación se divide en dos para poder entender de mejor manera:

- Justificación técnica

Ya que los compresores son máquinas importantes para el proceso de refrigeración y el derroche de energía eléctrica es significativo si no se aprovecha de mejor manera.

Actualmente el proceso de refrigeración no solo cuenta con un solo compresor de pistones sino que se tiene dos compresores de pistones, los cuales cuentan con un control de capacidad de compresión controlado por la presión de succión del tanque evaporador, si bien el setpoint es fijo, la presión de succión de compresores podría ser más óptima si se variara de forma automáticas y monitoreada constantemente, así que se plantea la mejora del control mediante un control en cascada y sistemas Scada.

- **Justificación económica:**

Aquí es donde el presente estudio representa un impacto directo, ya que la implementación del mismo supone reducciones drásticas en el tiempo de utilización de compresores y tiempo de utilización de máximas cargas de compresor en el proceso, es así que este control en cascada genera un proceso más óptimo de que ya se cuenta en planta y con ello a consumir menos cantidad de energía eléctrica, esto con lleva una ahorro energético y por consiguiente un ahorro económico.

1.4 Objetivo:

1.4.1 Objetivo Principal:

Diseñar e implementar un control en cascada para la optimización del consumo de energía eléctrica de compresores de pistón para amoníaco en proceso de refrigeración de envasado de bebidas gasificadas.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- Analizar el proceso termodinámico para el enfriamiento del proceso de llenado de bebidas gasificadas.
- Encontrar la función de transferencia de proceso de lazo primario de proceso de refrigeración.
- Implementar un Control en Cascada en compresores de pistón para sistema de refrigeración por compresión.
- Elaborar un Scada de recopilación de datos, para el monitoreo de energía eléctrica de los compresores.
- Analizar la viabilidad y factibilidad económica.

1.5 **Hipótesis:**

El presente estudio permitirá que los resultados e indicadores de consumo de energía eléctrica que se encuentran desviados en el proceso de refrigeración mejoren generando un ahorro en la utilización de energía eléctrica, como ahorros económicos.

1.5.1 **Hipótesis Principal:**

El objetivo de la refrigeración está basada en poder obtener el producto en temperaturas adecuadas , el cual el producto ha pasado de temperaturas altas a temperaturas bajas, los controles existentes por defecto en los compresores de pistones viene dado por el sensado de presión y así poder para variar la capacidades de compresión por medio un presión de succión seteada, como se observa los compresores regulan las capacidades solo con la variable indirecta (presión de succión), es que por ello el control tiene muchos errores para precisar un óptimo uso de los compresores(capacidades) teniendo en cuenta que los más importante del proceso es enfriar, por lo que se presenta la mejora en el control en cascada con la variable más directa para el proceso(temperatura) y así poder controlar de forma automática el seteo del controlador de presión en los compresores, permitiendo ahorrar más energía eléctrica en la utilización del proceso de refrigeración.

1.5.2 **Hipótesis Secundarias:**

- Procesos críticos tienen que tener un control y monitoreo constante, es por ello que el proceso de refrigeración en la producción de bebidas gasificadas se califica como proceso crítico, así se presenta la oportunidad de monitorear constantemente

mediante un sistema Scada para poder obtener información y verificación del correcto funcionamiento de los equipos de dicho proceso.

1.6 Operaciones con variables:

Tabla 1.1 Operaciones de variables

Tipo	Variables	
Independiente	1. Uso de sistema de control en cascada temperatura – presión para la optimización en el consumo de energía eléctrica en proceso de refrigeración.	
Tipo	Variables	Indicadores
Dependiente	2. Análisis de sistemas de refrigeración.	• Función matemática del comportamiento de proceso de refrigeración con el control de presión
	3. Control en cascada Temperatura - Presión	• Graficas de funcionamiento del control en cascada mediante el sensado de presión y temperatura.
	3. Consumo de energía eléctrica antes y después del control,	• Mediciones tomas mediante el sistema Scada programas e instalado en sala de monitoreo taller mantenimiento

1.7 Antecedentes de la Investigación:

Para el desarrollo de la presente investigación se ha realizado una búsqueda sobre algunas investigaciones anteriores, encontrándose algunos avances de diferentes temas y en diversas áreas, pero se encuentran abocados a diferentes tipos de controles.

Sin embargo cuando se habla de poder adaptar y brindar la automatización y control del consumo eléctrico, resulta más específica ya que depende muchas de las condiciones en la que se encuentre el sistema a automatizar, es por eso que las investigaciones encontradas no resultan tan definidas a lo que se pretende hacer, esto se debe a que esta investigación a realizar abarca una parte experimental y teórica, la cual nos permitirá poder tener un mejor aprovechamiento de las condiciones y adaptarlo de manera óptima y precisa.

Otros: Lugares que abarca el proyecto:

- Industrias alimenticias que elaboren productos que en su proceso tenga sistema de refrigeración con compresores de amoníaco. Ejemplo elaboración de gaseosas, cerveza, lácteos, etc.
- Industria frigorífica para conservar alimentos primarios como carnes, pescados, mariscos, etc.
- Industria de procesos refino de petróleo.
- Industria de transporte de gas.

1.8 Factibilidad:

1.8.1 Técnica:

De acuerdo a la orientación

- Aplicada

De acuerdo a la técnica de constatación

- Experimental

De acuerdo con el tipo de fuente de datos

- Prolectiva

De acuerdo con la dirección

- Prospectiva

1.8.2 **Operativa:**

Operador podrá monitorear de manera remota sin tener que correr el riesgo de estar en el sitio, y también podrá regular la temperatura que desee para el proceso mediante el controlador, siendo más sencillo regular temperatura que presión.

1.8.3 **Campos de verificación:**

- **Ubicación espacial:**

El siguiente trabajo de investigación se realizara en sistema de refrigeración de Corporación Lindley en Arequipa Tiabaya.

- **Ubicación temporal:**

El trabajo se llevara a cabo durante el periodo de un año, este será 2016-2017.

- **Unidades de Estudios:**

Se tomó sistema de refrigeración de Corporación Lindley Arequipa, como modelo.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO



Este capítulo tiene como objetivo el poder entender a fondo la problemática que existe en el mundo con el derroche de energía eléctrica por la falta de optimización del uso de energía eléctrica en los proceso de refrigeración en planta industriales.

Así mismo se explicara algunas definiciones y aspectos teóricos que nos podrá facilitar el entendimiento de los próximos capítulos.

Con finalidad el poder entender y comprender el funcionamiento físico del proceso de refrigeración, permitiendo dar paso a la hipótesis para el mejoramiento de control existente de presión que cuentan los compresor de amoniaco, y así poder sustentar la aplicación de control en cascada mediante el control directo de temperatura de glicol y ya no depender del setpoint de presión, que no permite tener el control de forma directo de temperatura.

2.1 Problemática ambiental del consumo energía:

La producción y el uso de la energía suponen la principal causa, junto con el transporte, de las emisiones de gases de efecto invernadero, gases responsables del cambio climático. Por ello, una de las formas de actuar para limitar e impedir sus gravísimas consecuencias ambientales, sociales y económicas, relacionadas con el aumento de temperatura, subida del nivel del mar y disminución de precipitaciones, entre otras, consiste en reducir el consumo energético.

El modelo de generación, transporte y consumo actual, absolutamente dependiente de los combustibles fósiles, es insostenible como consecuencia del cambio climático que supone.

Según los estudios más recientes, las consecuencias serán el aumento del número de «olas de calor», con temperaturas cada vez más extremas, y el aumento progresivo de la desertificación (Instituto Sindical de, s.f.).

En la actualidad, el incremento de la demanda y consumo de energía y las dificultades que existen para satisfacer esta demanda con las fuentes de energía disponibles, están prefigurando un escenario de crisis energética global.

Además la insuficiencia de recursos propios de combustibles fósiles en nuestro país conlleva una gran dependencia energética de otros países y una gran vulnerabilidad de nuestro sistema energético.

Según sea su origen -térmica (carbón, gas-oil), nuclear o hidroeléctrica- la producción de energía eléctrica tiene otros importantes impactos ambientales:

- Los productos químicos que se emiten, principalmente en las centrales térmicas de carbón y derivados del petróleo, son transportados por el viento y depositados por las lluvias a miles de kilómetros de distancia de su origen, provocando «la lluvia ácida», causante del deterioro y la destrucción de bosques, lagos y otros ecosistemas
- Las centrales nucleares producen residuos radiactivos de alta actividad (larga vida, alto poder radiactivo) que suponen una amenaza constante para el medio ambiente por la incapacidad actual para gestionarlos.

La comprensión de los problemas globales del Planeta, la conciencia de la necesidad de cambiar el actual modelo productivo por otro modelo ambientalmente sostenible y

socialmente justo, deben desembocar en una actuación a nivel local, en el seno de la empresa.

Para revertir el actual deterioro ambiental, es necesario un cambio en las condiciones productivas y operativas empresariales que repercuten en la calidad del entorno.

Las emisiones de CO₂ son las emisiones de efecto invernadero, responsables del cambio climático. Se pueden y deben medir las emisiones asociadas a la actividad de cada empresa. Para ello, se cuantifican las toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) responsables del aumento de temperatura de la atmósfera.

Para calcularlo se necesita saber la cantidad total consumida de todos los combustibles o energía y se calcula después el CO₂ eq que se ha producido. (Instituto Sindical de, s.f.)

Tabla 2.1 Tipo de Consumo Energía (Instituto Sindical de, s.f.)

TIPO DE ENERGÍA	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	PRECIO
Gas Natural	Kilowatios hora (KWh)		
Propano/Butano	Kilos (kg) o toneladas (t)		
Gasóleo	Metros cúbicos (m ³)		
Fuelóleo	Toneladas (t)		
Carbón	Kilos (kg) o toneladas (t)		
Electricidad	Kilowatios hora (KWh)		
NOTA: En la factura de la compañía suministradora de Gas Natural, se dan los KWh equivalentes de los m ³ suministrados. La equivalencia es de 11,6 kilowatios hora (KWh)= 1 metro cúbico (m ³).			

Tabla 2.2 Coeficiente Conversión CO₂ eq (Instituto Sindical de, s.f.)

Total CO ₂ [equivalente/tep*] = Cantidad x Coeficiente de Conversión		
TIPO DE COMBUSTIBLE O ENERGÍA CONSUMIDA	COEFICIENTE CONVERSIÓN CO ₂ eq	UNIDADES
Gas Natural	0,000023	[t CO ₂ eq/ KWh]
Propano-butano	3,04	[t CO ₂ eq/t]
Gasóleo	2,34	[t CO ₂ eq/m ³]
Fuelóleo	2,58	[t CO ₂ /t]
Carbón	1,69	[t CO ₂ eq/t]
Energía Eléctrica	2,69	[t CO ₂ eq/KWh]

EJEMPLO: mes de agosto

- Consumo eléctrico de la oficina [Unión Fenosa]:
Valle 672 x 2,69= 1807,68 t CO₂ eq/ KWh
Llano 4.260 x 2,69=11459,4 t CO₂ eq/ KWh
- Consumo gas de la caldera (calefacción y agua caliente) [Gas Natural]:
215 x 0,000023= 0,004945 t CO₂ eq/ KWh

*tep: tonelada equivalente de petróleo.

2.2 Esquema de proceso refrigeración Embotelladora:

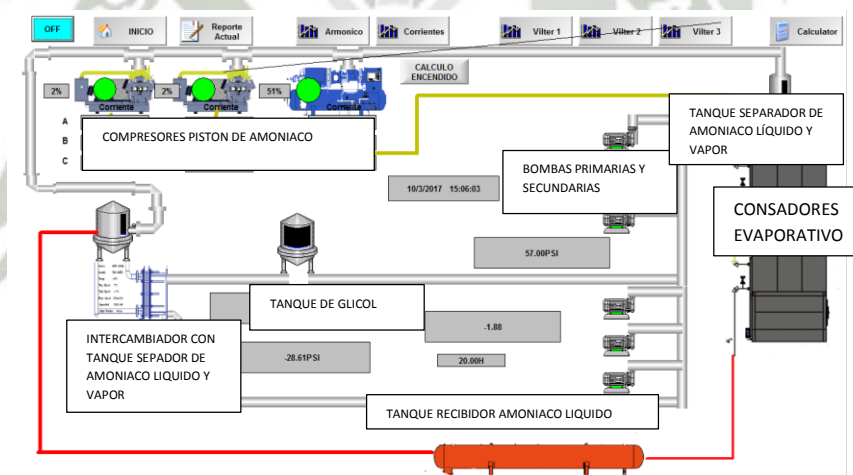


Figura 2-1 Circuito Refrigeración de Corporación Lindley

2.3 Ciclo de refrigeración normal:

El principio de la refrigeración se basa en la evaporación del amoníaco líquido que fluye en el evaporador, el refrigerante líquido no se puede evaporar a una temperatura inferior a los 0° grados centígrados cuando tiene una presión alta, es por ello que se debe succionar el amoníaco evaporado del evaporador por medio del compresor, con el fin de que no se altere

la presión dentro de dicho evaporador, al bajar la presión el amoniaco liquido se evapora a una temperatura baja. Por otro lado, el vapor tiene que ser licuado nuevamente para restituirlo al estado en que su capacidad como refrigerante permita reutilizarlo, para lograr nuevamente el estado líquido es necesario aumentar la presión del gas, el compresor aumenta la presión y esta elevación de presión ocasiona se eleve la temperatura del gas (al estar el gas dentro del compresor, se contamina con partículas de aceite, provenientes de la lubricación del mismo, estas se eliminan en el separador de aceite).

El gas se introduce en el condensador para enfriarse con agua. Es por ello que el gas con alta presión se convierte en líquido al ser enfriado en el condensador. Este gas licuado retorna al recipiente en que estaba al principio, alimentándose denuevo al evaporador primeramente pasando por la válvula de expansión que hace que baje la presión del refrigerante y controla la capacidad del sistema, a este proceso se le conoce como ciclo de refrigeración. Cabe agregar que al recipiente que contiene el líquido de refrigeración se le denomina recibidor. En la Figura 2.2 se observa el ciclo de refrigeración.

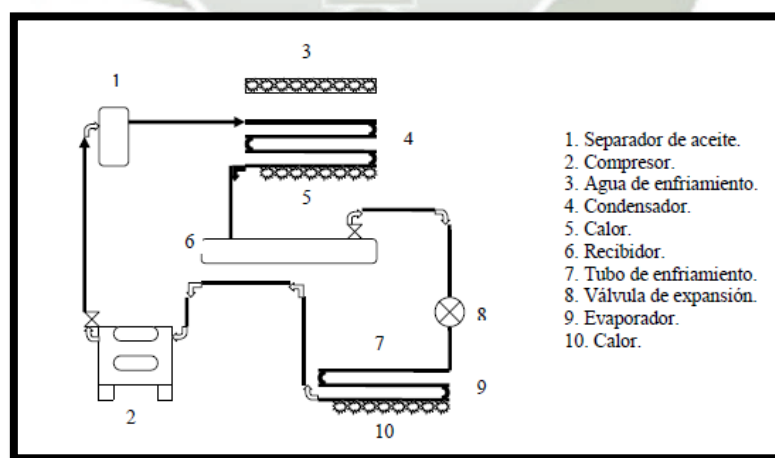


Figura 2-2 Circuito de refrigeración Glicol

¿Qué sucede con el calor extraído de los productos al ser refrigerados por el evaporador?

El vapor que se generó en el evaporador, al absorber el calor de los productos refrigerados, pasa por el compresor y llega al condensador, en donde se descarga dicho calor. (GUTIÉRREZ, 2010, pág. 5).

2.4 Funcionamiento del ciclo de refrigeración por compresión amoniaco:

2.4.1. Comportamiento del refrigerante en el ciclo de refrigeración por compresión:

El ciclo de refrigeración por compresión consiste en efectuar la refrigeración aprovechando el calor que se genere al evaporarse un refrigerante líquido, frío y a baja presión (amoniaco líquido).

Brevemente, el ciclo de refrigeración se puede iniciar cuando el compresor succiona el vapor de amoniaco comprimiéndolo de manera que se incremente su presión, este gas de amoniaco a alta presión, se enfría en el condensador, mediante el agua de enfriamiento y se almacena en el recibidor en forma líquida, pasa por la válvula de expansión, por el evaporador y retorna al compresor.

El alimentar amoniaco líquido al evaporador, no significa que se pueda obtener amoniaco frío, o que ese líquido se evapore por sí solo, sino que requiere del ciclo de refrigeración. El que el amoniaco líquido cuya temperatura no difiera mucho de la temperatura atmosférica; se enfría al pasar del recibidor del líquido al evaporador, así como que dicho líquido se evapore aún frío, se debe a que tanto la válvula de

expansión como el compresor mantienen la presión ideal en el interior del evaporador de un nivel mucho más bajo que la del recibidor de líquido.

El líquido suele evaporarse aun estando frío al reducirse la presión. La temperatura a la que un líquido hierve a determinada presión atmosférica se denomina punto de ebullición. Lo mismo puede decirse del amoniaco líquido, mientras este no se evapora al permanecer en el recibidor de líquido debido a su alta presión, una parte del amoniaco líquido que esta tibio se evapora, porque la válvula de expansión actúa como reductora de presión antes de entrar al evaporador.

En resumen un ciclo de refrigeración, se puede iniciar cuando el compresor succiona, el vapor refrigerante, comprimiéndolo de manera que se incremente su presión; este gas refrigerante de alta presión se enfría o se condensa (cambia de fase gaseosa a líquida), denominándole calor latente, después pasa por un dispositivo de expansión cuya función principal es la de bajar la presión del líquido refrigerante, para que este pueda evaporarse, y así ceder su calor latente de vaporización en el evaporador o enfriador de salmuera para retornar al compresor iniciando nuevamente el ciclo.

El amoniaco líquido se evapora utilizando plenamente su propio calor, es por ello que el amoniaco líquido se va enfriando hasta tener una temperatura determinada que corresponda a la presión en el interior del evaporador. Hasta que valor se debe reducir la presión para obtener amoniaco líquido frío.

La tabla 2-3 nos indica la relación entre la temperatura y la presión del amoniaco. (GUTIÉRREZ, 2010, pág. 7).

Tabla 2.3 Relación entre temperatura y presión del Refrigerante amoníaco en Ciclo de refrigeración (GUTIÉRREZ, 2010)

Presión de evaporación		Presión de condensación	
Temp(°C) de saturación	Presión (escala de saturación PSI)	Temp(°C) de saturación	Presión (escala de saturación PSI)
0	47.5	40	211
-2	43.1	35	181
-4	38.8	30	155
-6	34.8	28	145
-8	31.0	26	135
-10	27.5	24	126
-12	24.2	22	118
-14	21.1	20	110
-16	17.5	18	102
-18	15.4	16	94
-20	12.9	14	87
-22	10.5	12	81
-24	8.4	10	75
-26	6.3	8	68
-28	4.4	6	63
-30	2.7	4	57

Para poder evaporar el amoníaco líquido a una temperatura determinada basta conocer la presión correspondiente a dicha temperatura que se localiza en la tabla anterior. En otras palabras, se puede obtener la temperatura de amoníaco líquido frío que se desea solamente manteniéndose la presión en el interior del evaporador.

Eso es indicativo, que cuanto más baja la presión en el evaporador, más frío se encuentra el amoníaco líquido. Por tener una temperatura más baja que los que lo rodean, este amoníaco se calienta por el calor emitido por el medio circundante sin que se eleve la temperatura, por el solo hecho de evaporarse, al igual que lo que sucede con el agua al llegar a su punto de ebullición. El vapor de amoníaco,

consecuencia de la evaporación del amoníaco líquido, es igualmente frío en la medida en que se mantiene la temperatura del líquido, y se puede afirmar que mientras haya residuos de líquido, su temperatura no sube por encima de un valor determinado, ya que en este contexto si funciona la relación presión temperatura del anterior cuadro mostrado. Si el líquido se continúa calentando aun después de que se evapore totalmente dentro de un recipiente hermético, se termina la evaporación y a partir de este momento, se eleva la temperatura de este amoníaco gaseoso.

También el condensador es un recipiente en donde coexisten líquido y gas. Por lo tanto, se puede determinar la presión del condensador a partir de la temperatura del líquido generado al condensarse en el condensador. La presión del condensador puede medirse con cierto grado de precisión por medio del manómetro de alta presión (manómetro de descarga), instalado en el compresor.

Así mismo se puede decir del recipiente de amoníaco (bomba), que contiene amoníaco líquido, en la parte superior de dicho recipiente prevalece el vapor amoníaco y en la parte inferior del mismo se encuentra el amoníaco líquido. La presión del vapor de amoníaco puede determinarse a partir de la temperatura del amoníaco líquido. (GUTIÉRREZ, 2010, pág. 8).

2.4.2. Efecto del aire residual como gas no condensable en un refrigerante en estado gaseoso:

Supongamos la siguiente situación: el manómetro de alta presión (manómetro de presi

ón de descarga) del compresor para amoníaco está indicando 213 psi; por otra parte, la temperatura del agua de enfriamiento del condensador no ha rebasado los 25 °C y mantiene un flujo suficiente. ¿Los tubos de enfriamiento del condensador no están sucios y la temperatura de condensación del amoníaco líquido no es superior a 30°C, si el cálculo de la presión se hace a partir del Tabla 2-3 y bajo estas condiciones de operación, la presión de descarga debería de ser 155 psi, entonces en donde radica el problema?

Podemos atribuir en primera instancia que la causa de esta diferencia es que se haya mezclado aire con amoníaco vaporizado y que éste permanezca en el condensador. La relación Presión-Temperatura señaladas en el Tabla 2-3 tiene como condición previa que el amoníaco sea puro, libre de aire. La mezcla de aire impide que el vapor de amoníaco se convierta en líquido sin aumentar la presión por la parte correspondiente de aire, esto se puede expresar en la siguiente formula.

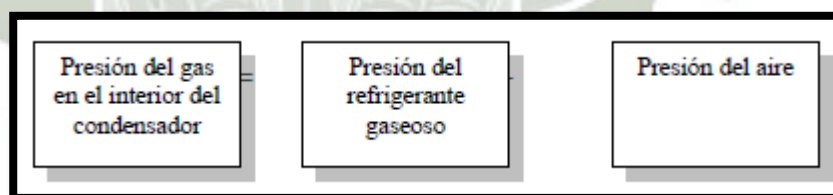


Figura 2-3 Presión del gas en el interior del condesado

La presión del Tabla 2-3 no toma en consideración la presión del aire, por lo cual, la presión real se tiene que obtener agregando la presión del aire con las cifras proporcionadas por dicha tabla. Dicho residuo de aire obstaculiza la licuefacción de vapor de amoníaco, lo cual incrementa aún más la presión del condensador.

Los lugares más susceptibles de admitir el aire al sistema se encuentran en los empaques del compresor, los acoplamientos de tubo, válvulas etc. (GUTIÉRREZ, 2010, pág. 9).

2.5 Funcionamiento del compresor:

2.5.1 Compresión de vapor:

El compresor sirve para elevar la presión del refrigerante evaporado, comprimiendo el vapor. Por medio del compresor, el refrigerante transfiere el calor desde un lugar frío hasta uno caliente, haciéndolo fluir por lo que se llama ciclo de refrigeración.

Está provisto de una cámara de compresión constituida por un cilindro de sección circular, con una "tapa" fija ("cabeza" o "culata") y otra móvil ("pistón"). Válvulas de admisión y escape permiten el acceso del gas a comprimir y la salida del gas comprimido. Un motor hace girar un cigüeñal.

A través de una biela, el pistón adquiere un movimiento alternativo entre las dos posiciones extremas, de velocidad nula, llamadas punto muerto superior (P.M.S.) la más alejada del cigüeñal y punto muerto inferior (P.M.I.) la otra. Véase la Figura 2.4 del proceso de operación del equipo.

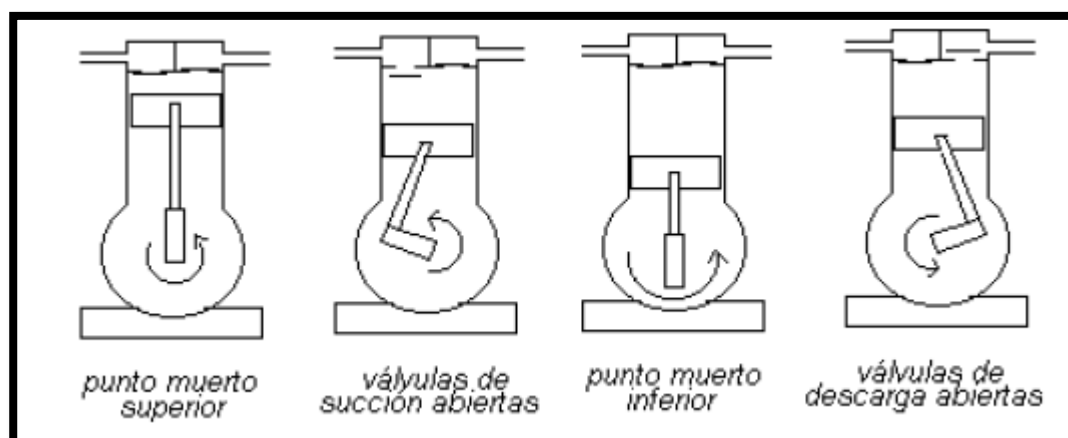


Figura 2-4 Proceso de compresión en un compresor recíprocante (GUTIÉRREZ, 2010)

Al moverse el pistón hacia abajo, pasa vapor de baja presión a través de la válvula de succión. En la carrera ascendente el vapor es comprimido y luego es descargado como vapor a alta presión a través de la válvula de descarga. (GUTIÉRREZ, 2010, pág. 10).

2.5.2 Compresión de isotérmica, politrópica y adiabática:

Compresión isotérmica: El esquema de compresión en que el enfriamiento del cilindro y del pistón sea perfecto, de manera que no se altere la temperatura del vapor antes y después de la compresión, es solo posible a nivel teórico por ser mínimo el trabajo requerido para la compresión. La elevación de la presión que se registra al comprimirse un gas se expresa con la siguiente formula:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (2-1)$$

Donde:

P1= Presión absoluta del vapor antes de comprimirse

P2= Presión absoluta del vapor después de comprimirse

V1= Volumen del vapor antes de la compresión

V2= Volumen del vapor después de la compresión

Compresión politrópica: Pese a las pequeñas fugas de calor que se registran durante la compresión, se observa un incremento de la temperatura del vapor después de la compresión. Este es el sistema más utilizado en compresores; el trabajo requerido para la compresión es mayor que el de la compresión isotérmica, pero menor que el de la compresión adiabática. Por otra parte la proporción de presiones que se registran es mayor que en la compresión isotérmica pero menor que en la compresión adiabática. El incremento de la presión que se registra al comprimirse el vapor queda mostrada por la siguiente formula:

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n \quad (2-2)$$

$$1 < n < \frac{c_p}{c_v}$$

Donde:

Cp: Temperatura específica isobárica (medida cuando se calienta manteniendo la presión del vapor constante).

Cv: temperatura específica isovolumétrica (medida cuando se calienta manteniendo el volumen del vapor constante).

Compresión adiabática: Es una forma de compresión en la que se evita completamente la fuga de calor hacia el exterior por medio de un aislamiento perfecto en el cilindro y el pistón. El ascenso de temperatura que se registra después de la compresión es mayor que las dos formas de compresión antes mencionadas,

requiriéndose mayor trabajo para efectuar la compresión. La proporción de la elevación de presión es mayor que las dos primeras y se expresa por la siguiente formula (GUTIÉRREZ, 2010, pág. 11):

$$\frac{p_1 V_1^k}{2} = \frac{p_2 V_2^k}{2} \quad (2-3)$$

Donde:

$$K = \frac{C_p}{C_v}$$

Con respecto a la elevación de la temperatura del gas se tiene lo siguiente:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (2-4)$$

T1=Temperatura de aspiración °C

T2=Temperatura de descarga °C

P1= Presión de aspiración (Kg/Cm2)

P2=Presión Descarga (Kg/Cm2)

Tabla 2.4 Valor Constante K (Vergara Rodríguez, 2009)

VALOR DE K	
Aire	1.4
Freón 12	1.135
Freón 500	1.127
Cloruro de metilo	1.2
Amoniaco	1.3
Freón 22	1.18
Freón 502	1.132

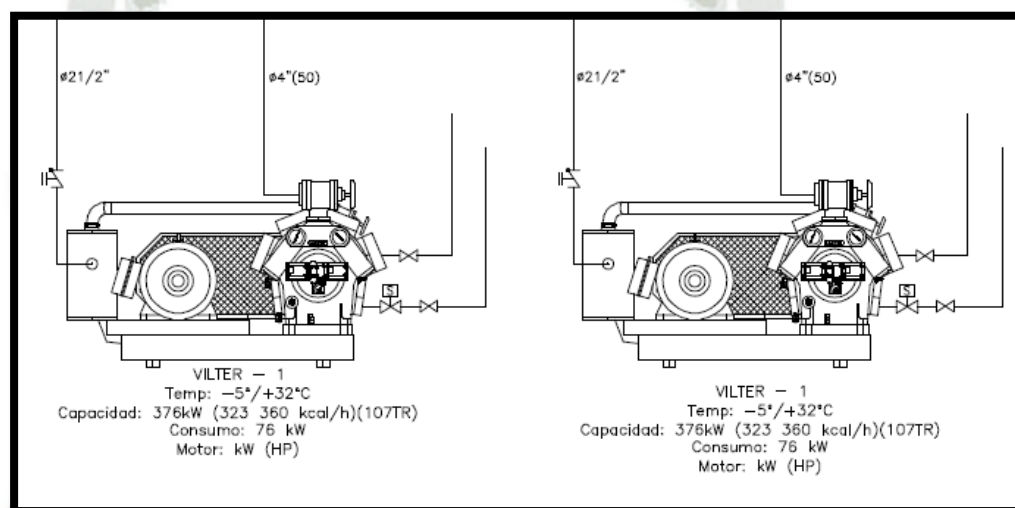


Figura 2-5 Compresor Pistones utilizados en Corporación Lindley

2.6 Funcionamiento del condensador:

El condensador sirve para licuar el gas enfriándolo; en la mayoría de los casos, se utiliza agua para enfriar el gas (sistema de enfriamiento por agua), sin que se descarte el uso de aire (sistema de enfriamiento por aire), en condensadores de tamaño pequeño. Actualmente los condensadores ocupan ambas opciones para mejorar la operación del sistema.

El sistema de enfriamiento por agua permite la transferencia del calor que tiene el refrigerante gaseoso al agua de enfriamiento por la pared del tubo de enfriamiento. El grosor de la pared del tubo oscila entre 3 y 5 milímetros, realmente no obstruye dicha

transferencia calorífica, dado que algunos metales como el hierro, cobre y latón son buenos conductores de calor.

La transferencia calorífica se vuelve ineficiente cuando se deposita sarro o una película de aceite en el interior o exterior del tubo según sea el caso por más delgadas que sean. El sarro y la película de aceite no son buenos conductores de calor, estos apenas conducen 1/40 y 1/400 del calor que conduce el hierro respectivamente, por consiguiente 1 mm de sarro depositado, 0.1 mm de la película de aceite formado en la superficie del tubo de hierro, equivale a que el tubo tenga 40 mm de grosor.

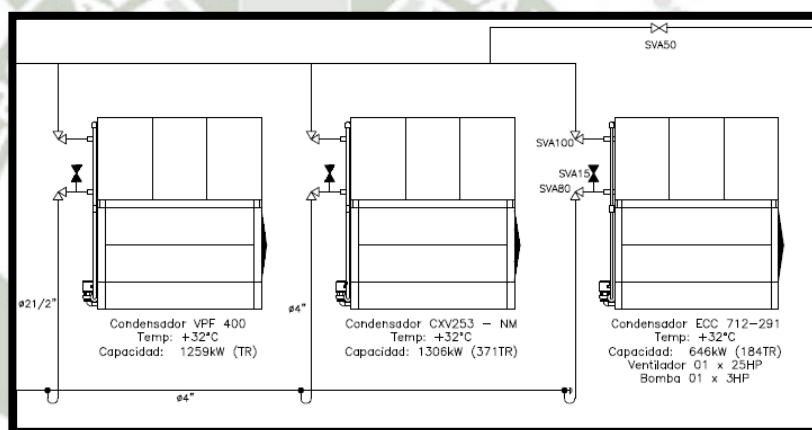


Figura 2-6 Condensadores utilizados en Corporación Lindley

2.7 Funcionamiento de la válvula de expansión:

La válvula de expansión está diseñada para oponer una resistencia al flujo del refrigerante líquido. El que se mantenga baja la presión del evaporador, se atribuye a la función de la válvula de expansión y del compresor, aun cuando el compresor succione el refrigerante evaporado sin cesar, la presión del evaporador no se puede reducir de haber un flujo cuantioso del líquido proveniente de la válvula de expansión.

Así que el ajuste de la presión del evaporador se hace por medio de la apertura y cierre de la válvula de expansión. Cuando la válvula está demasiado abierta, la presión en el evaporador se incrementa, ocasionando que el compresor succione vapor mezclado con líquido, al presentarse esta situación el cabezal del cilindro del compresor genera escarcha y se denomina compresión en húmedo, es decir el compresor comprime el vapor que contiene gotas microscópicas de líquido, estas se evaporan, y se enfría el gas de descarga dejando la escarcha en el cilindro.

La base de la refrigeración es el utilizar la capacidad de refrigeración del refrigerante en su totalidad, por lo que al succionar vapor que aún tiene capacidad de refrigeración se provoca desperdicio del mismo. Además estas gotas succionadas por el cilindro, que se convierten en vapor dentro del mismo impiden la succión del vapor en el volumen adecuado, reduciendo aún más la capacidad de refrigeración.

El fenómeno conocido como regreso de líquido, es el acumulamiento de líquido en el compresor, a medida que se realiza el proceso de compresión se tiene una cantidad de líquido cada vez mayor dentro del mismo, el líquido opone mayor resistencia para fluir por la válvula de descarga, dando lugar a que el cilindro quede lleno de líquido, esto genera una presión de líquido extremadamente alta, ocasionado lo que se conoce como bloqueo de líquido, reconociéndose por los ruidos anormales en el compresor. Estas altas presiones pueden llegar al extremo de romper el compresor cuando el bloqueo del líquido es sumamente violento.

Una solución a este problema es cerrar un poco la válvula de expansión; esta medida implica que el flujo de líquido se reduzca aumentando, en consecuencia, la resistencia al flujo, reduce la presión, con la consecuente reducción en la temperatura del evaporador. Al cerrar la válvula de expansión, se transfiere un gran volumen de calor desde el exterior ocasionando que el líquido alimentado al evaporador se evapore por completo, el compresor trabaja succionando gas totalmente seco y se conoce como compresión en seco.

En lo que se refiere al compresor de amoníaco, la compresión en seco que se hace, en base a un gas ligeramente calentado, o para ser más concreto, un gas con 5 °C más alto que el líquido a ser evaporado, muestra la mayor eficacia; así la escarcha alcanza apenas la válvula de succión y no se deposita en el cilindro del compresor.

De cerrar demasiado la válvula de expansión, sin embargo, se incrementa la resistencia al flujo del líquido provocando que se reduzca el volumen que entra y la presión del evaporador. Al mismo tiempo, baja la temperatura junto con la disminución en la presión. Ello permite que un gran volumen de calor se transfiera desde el exterior al interior del evaporador, por lo cual el líquido se convierte completamente en vapor antes de llegar a la salida del evaporador, este vapor se calienta bastante, debido al calor; cuando es succionado por el compresor y al comprimirlo le incrementa más su temperatura, lo cual impide que se deposite escarcha en el tubo de succión, produciéndose una serie de anomalías tales como el deterioro en la calidad del aceite lubricante, se genera hollín. (GUTIÉRREZ, 2010, pág. 13).

2.8 Funcionamiento del evaporador:

El evaporador es en donde el refrigerante líquido se evapora a temperaturas bajas y se lleva a cabo la acción de refrigeración. Existe gran variedad en cuanto a su estructura, desde una forma U de tubo de acero o cobre hasta una cilíndrica hecha con lámina de acero. Independientemente de la diferencia de forma, lo importante es que se transfiera bien el calor desde el exterior hasta el refrigerante líquido que contiene el evaporador. Es por ello que el evaporador se diseña para cumplir con este requisito.

El tubo de enfriamiento colocado en el interior del refrigerador es un ejemplo de evaporador, al enfriarse el evaporador, la humedad que prevalece en el aire se condensa, convirtiéndose en hielo y cubriendo el exterior del tubo de enfriamiento, este hielo no conduce bien el calor, impidiendo la transferencia de calor como si el evaporador fuera cubierto de una capa aislante.

Una caída de presión en el evaporador exige una mayor compresión, obligando a una considerable expansión del volumen, aun cuando el peso de mantenga constante, esto ocasiona como consecuencia que el vapor quede diluido. El calor sin embargo, cambia en función de su peso y no de su volumen, cuando se duplica el peso del vapor, producto de la evaporación; también se duplica el calor de la evaporación, por lo que la capacidad de evaporación solo concierne al peso del vapor al ser succionado por el compresor y no tiene nada que ver con su volumen.

Sucede entonces que cuando la presión del vapor sufre alguna caída y se incrementa su volumen en relación a su peso, la capacidad de refrigeración se ve reducida

considerablemente. Es preciso hacer todo lo posible para no reducir la temperatura de evaporación. Queda de manifiesto con todo lo anterior, que la temperatura del evaporador debe ser mantenida al nivel en que el líquido se evapore completamente a la salida del evaporador. (GUTIÉRREZ, 2010, pág. 12).

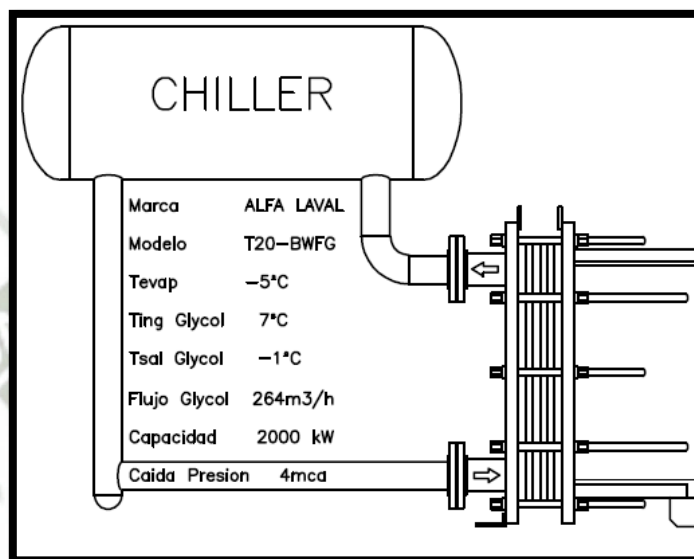


Figura 2-7 Sistema de intercambiador y Expansión Corporación Lindley

2.9 Bombas primarias y secundarias:

Las bombas primarias son básicamente para enviar el glicol hacia las líneas de producción y para enviar hacia los intercambiadores.

2.10 Tanque de Glicol:

El tanque de glicol se encuentra separado por dos partes, la primera la que cuenta con glicol frío que sale de intercambiador, y la segunda es el glicol caliente que regresa de las líneas caliente para ser enfriado.

2.11 Tanque de separador de amoniaco líquido y vapor:

Ya que el proceso que se realiza en el intercambiador es básicamente un transferencia de calor, lo ideal sería que el amoniaco cambie de líquido a gaseoso por el diferencia de temperatura que adquirido al momento de intercambiar calor con el glicol, pero surge un efecto físico de condensación de amoníaco por lo que este tanque cumple la función de poder asegurar que el compresor comprima solamente gas ya que se sabe que el líquido no se puede comprimir, el caso fuera que llegar a pasar amoniaco líquido a surgiera el congelamiento de el compresor y por consiguiente un compresor inservible.

2.12 Ciclo ideal de refrigeración:

- Compresión (1 a 2):

Ocurre en el compresor. En teoría es una operación isotrópica (entropía en (1) = entropía en (2)). La presión del gas es aumentada y también aumenta la temperatura, obteniéndose un vapor sobrecalentado en el punto de la descarga (2).

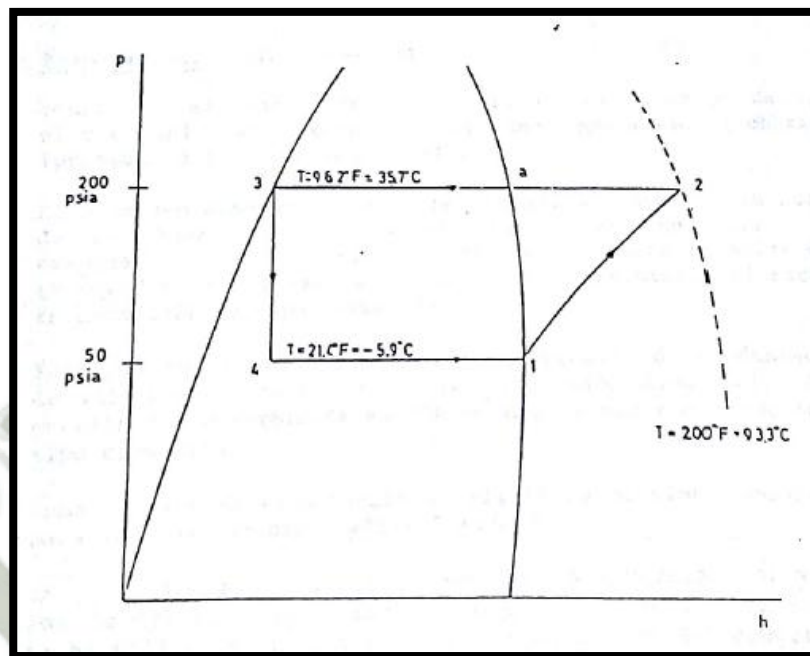


Figura 2-8 Diagrama de entalpia vs presión de proceso de refrigeración (450XL, 2006)

Presión absoluta = p (presión en manómetro) + 14.7 psi (presión de atmosfera)

- **Condensación (2 a 3):**

Ocurre en el condensador evaporativo. Es un operación isobárica (presión en (2) = presión en (3)).

El sobrecalentado entra al condensador y empieza a entregar calor sensible (disminuyendo su temperatura) hasta alcanzar el punto a que corresponde a vapor saturado. A partir de este instante el amoniaco empieza a entregar calor latente (a

temperatura constante) hasta alcanzar su condensación total en el punto (3). Por lo tanto, el punto (3) representa a un líquido saturado.

- **Expansión: (3 a 4):**

En los equipos de embotelladora convencionales ocurre en el sector del inyector. Es en teoría, un operación isoentálpica (entalpía en (3) = entalpía (4)). La presión y la temperatura bajan. Parte del líquido se evapora.

- **Evaporación: (4 a 1):**

Ocurre en el evaporador, es decir, en el interior de las placas del Carbo-cooler. Es una operación isobárica (presión en (4) presión en (1)).

El amoníaco absorbe calor de la bebida, a través de la pared de la placa, obteniéndose el enfriamiento de esta y la evaporación de refrigerante. El amoníaco debería salir del evaporador, e ingresar al compresor para reiniciar el ciclo, en condición de vapor saturado.

Para efecto de diseño se elige una presión de condensación de 185 psi (es decir, 200psi de presión absoluta).

Como presión de evaporación se eligió la presión recomendada para enfriar bebida a 2°C: 2.5°C Kg /cm².

Ya que 1 Kg/cm²=14.7 psi; entonces 2.5 Kg/cm² = 36.8 psi. Por lo tanto, p (absoluta) =36.8+14.7 psi= 51.5 psi. Se ha utilizado 50 psi para facilitar el uso del diagrama. (450XL, 2006, pág. 3).

2.13 Cálculo capacidad de compresor aplicada:

Para los cálculos se debe responder a las siguientes preguntas

¿Qué se va a enfriar? , ¿Qué masa o flujo se va enfriar?, ¿Cuál es el salto de temperatura a producir?

El calor el cual el sistema de refrigeración entrega se calcula de la siguiente formula:

$$Q = m . Cp . \Delta t \quad (2-5)$$

Este mismo calor Q es el que absorbe el refrigerante. Ya que generalmente, los valores de Q son bastantes altos se le expresa en una cierta unidad, la tonelada de refrigeración que los hace manejable.

1 ton de refrigeración (TR) = 200 Btu/min = 12.000 Btu/hora.

En el diagrama ideal, el amoniaco absorbe calor en el evaporado entre 4 y 1 de modo que la diferencia de entalpia entre ambos punto representa la cantidad de calor que puede absorber una libra de refrigerante.

Se escogerá la entalpia (h (1) y h (4) (Figura 2-8).

$$\Delta h = h(1) - h(4) \quad (2-6)$$

$$Q = M . \Delta h \quad (2-7)$$

$$M = \frac{Q}{\Delta h} \quad (2-8)$$

Donde el M es dado en lb/hr

2.14 Cálculo la potencia teoría del compresor:

La potencia teórica se determina considerando el aumento de entalpia que ocurre en el compresor y la masa de refrigerante a circular.

$$W = M . \Delta h \quad (2-9)$$

Siendo:

$$\Delta h = h(2) - h(1)$$

(2-10)

Por lo que un 1 HP = 2.545 Btu/hr (análisis obtenido de la Fig. 2-8. Diagrama de entalpia vs presión de proceso de refrigeración (450XL, 2006, pág. 11)

2.15 Tabla de selección de equipo compresor:

(450XL, 2006, pág. 14).

Tabla 2.5 Obtenida de fabricante de compresores de amoniaco Vilter

*MODELO DE COMPRESORES		442		444		446		448		4412	
Condensador	Evaporación	TR	HP	TR	HP	TR	HP	TR	HP	TR	HP
185 psi	33,5 psi	23,2	28,9	46,5	54,9	69,7	80,4	93	104,4	139,5	154,8
	39,0 psi	27	29,8	54,1	56,7	81,1	83,4	108,3	108	162,4	159
	35,0 psi	24,2	29,1	48,6	55,4	72,8	81,2	97,2	105,4	145,7	155,9

Tabla 2.6 Actualizada de equipos obtenida de fabricante de compresores de amoniaco Vilter (450XL, 2006)

Dimensiones generales						
ITEM	452XL	454XL	456XL	458XL	4512XL	4516XL
Numero de Cilindros	2	4	6	8	12	16
Máximas RPM	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Diámetro y carrera - Inches (mm)	4½x4½ (114x114)	4½x4½ (114x114)	4½x4½ (114x114)	4½x4½ (114x114)	4½x4½ (114x114)	4½x4½ (114x114)
Desplazamiento volumétrico (m³/hr)	99.4(169)	199(338)	298(507)	398(676)	597(1014)	796(1352)
Potencia frigorífica (kW) a - 12-35°C, R-717	84	172	257	341	514	686
Diámetro de aspiración - Inches (mm)	2½(64)	3(76)	4(102)	4(102)	5(127)	6(152)
Diámetro de descarga - Inches (mm)	2(51)	2½(64)	3(76)	3(76)	Two 3(76)	Two 3(76)
Peso de la unidad sin el motor - Lbs. (Kg.)	1900(862)	2700(1225)	3100(1406)	3400(1542)	5300(2404)	5800(2630)
Capacidad del carter - Gallons (Liters)	5(19)	7(27)	7(27)	7(27)	14(53)	14(53)
Etapas control capacidad estándar (%)	0	50	33/66	24/50	33/66	25/50
Opción 1 etapa (%)	50	25/50/75	-	25/50/75	-	25/50/75
Opción 2 etapas (%)	100	50/100	33/66/100	25/50/75/100	33/66/100	25/50/75/100
Máxima temperatura de descarga. - °F (°C)	300(149)	300(149)	300(149)	300(149)	300(149)	300(149)
Rango de temperatura de aceite del carter - °F (°C)	110-130 (43-54)	110-130 (43-54)	110-130 (43-54)	110-130 (43-54)	110-130 (43-54)	110-130 (43-54)
Vilter se reserva el derecho de hacer cambios						

Tabla 2.7 Propiedades Refrigerante Amoniaco en ciclo refrigeración (450XL, 2006)

Refrigerante	Amoniaco
Presión de evaporación(kg/cm ² abs)	2.41
Presión de condensación (kg/cm ² abs)	11.9
Proporción de compresión	4.94
efecto de refrigeración (Kcal/Kg)	269
Volumen especifico (l/kg)	1.68
Volumen de circulación de refrigerante (liquido)	20.7
Volumen especifico (Vapor) m ³ /kg	0.509
Volumen de descarga por pistones	6.28
Trabajo de compresión (kcal/kg)	55.3
Coeficiente de resultado	4.87
Fuerza requerida(KW/Rt)	0.8
Temperatura del gas de descarga (°C)	99
Condiciones	Temperatura de evaporación de -15 Temperatura de condensación 30 °C

2.16 Control de compresores de pistón alternativos existentes:

La mayoría de los compresores se diseñan para trabajar en unas condiciones operativas fijas y determinadas, de acuerdo con el proceso al que van destinados. No obstante, siempre se pueden presentar emergencias que obliguen a variaciones en las condiciones de operación.

La capacidad de un compresor es el gasto energético que circula por el compresor, que debe ser controlado en forma manual o automática, para contrarrestar los aspectos negativos que puedan aparecer.

Para ello se puede recurrir a las siguientes soluciones:

a) Regulación de la capacidad utilizando un motor de velocidad variable:

Al igual que en las bombas, la regulación a base de disminuir el número de emboladas no es fácil, máxime en los compresores de cierto tamaño, que suelen ir siempre acoplados a un motor eléctrico síncrono.

b) Regulación de la capacidad utilizando una válvula:

En la aspiración que cierre y haga que la presión de admisión sea menor que la existente en la línea de aspiración.

c) Regulación de la capacidad en los compresores de varios cilindros:

Descargando algunos de ellos.

d) Regulación de la capacidad variando el espacio:

Nocivo en forma artificial, manual o automáticamente, tal como se indica en la figura 2-9.

e) Regulación de la capacidad en forma escalonada:

Mediante el control, manual o automático, de válvulas de by-pass, Figura.2 -10 , de forma que en el recorrido del cilindro se puedan disponer hasta 3 válvulas con el fin de conseguir un control escalonado de la capacidad, que van inutilizando partes sucesivas de la cámara de compresión.

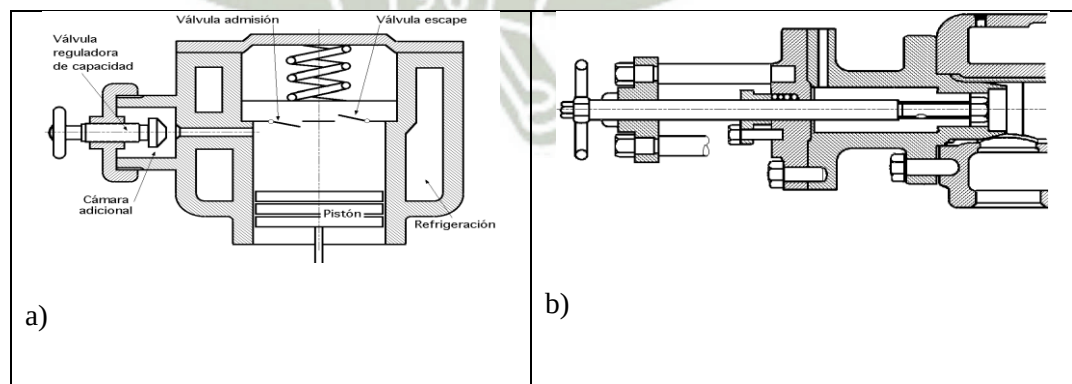


Figura 2-9 Control de Compresores variación de espacios (GUTIÉRREZ, 2010)

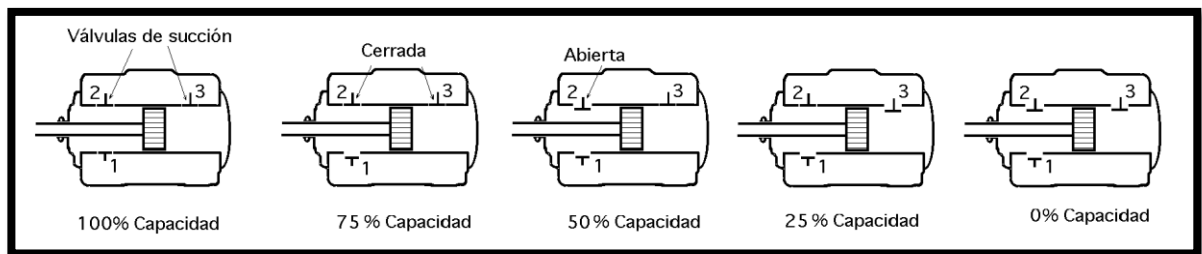


Figura 2-10 Compresor de doble efecto; variación de la capacidad (GUTIÉRREZ, 2010)

A título de ejemplo supongamos el compresor de doble acción de la figura 2.10: Si mantenemos el espacio muerto y todo lo demás normal, el compresor está actuando a plena carga. Si abrimos el espacio muerto, tenemos que el compresor trabajará al 75%; se observa cómo se van obteniendo las diferentes capacidades de compresión al actuar con las posibilidades de que dispone el compresor. En el ejemplo representado en la fig. 2.11 se dispone únicamente de una válvula reguladora de la capacidad (Díez, 2010, pág. 17).

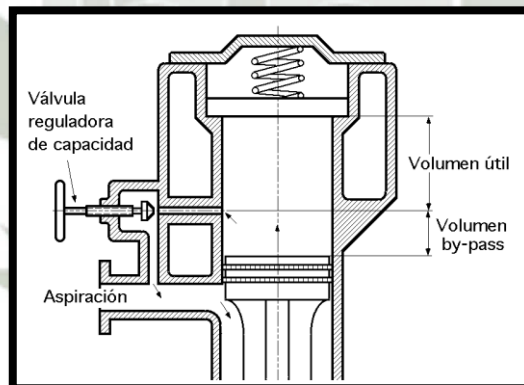


Figura 2-11 Regulación de la capacidad mediante un by-pass (GUTIÉRREZ, 2010)

f) **Regulación de la capacidad en compresores pequeños, mediante un control on-off:**

Parando y arrancando el motor por medio de un termostato.

g) Regulación de la capacidad utilizando un by-pass refrigerado:

Entre la descarga y la succión, de forma que según se recircule una mayor o menor cantidad, se obtendrá un menor o mayor caudal de gas comprimido. Este sistema de regulación se suele utilizar generalmente en combinación con el anterior.

En todos estos casos las presiones de descarga y aspiración se mantienen invariables en el proceso.

Sólo se regulan las cantidades de gases enviadas. Cuando se estrena un compresor hay que seguir cuantas recomendaciones nos sugiera el fabricante para una mejor conservación y funcionamiento del mismo. De su cumplimiento dependerá mucho la vida del compresor y se evitarán desagradables consecuencias.

2.17 Control avanzado con variables auxiliares:

Tabla 2.8 Tipos de Controles Avanzados

TIPOS DE CONTROL	DESCRIPCION CONTROL
•Control Cascada	Control de una variable de salida y una variable manipulada, utilizando la medición de varias variables (internas o perturbación)
•Control anticipativo.	
•Control selectivo	Control de varias variables de salida mediante una de salida mediante una variable manipulada
•Control de gama partida	Control de una variable de salida mediante varias variables manipuladas.

2.17.1 Control Cascada:

Principio de funcionamiento:

Controlar rápidamente las variables intermedias corrigiendo el efecto de las perturbaciones de entrada antes de que estas afecten a la salida del proceso.

- **Estructura:** Lazos de control por realimentación anidados.

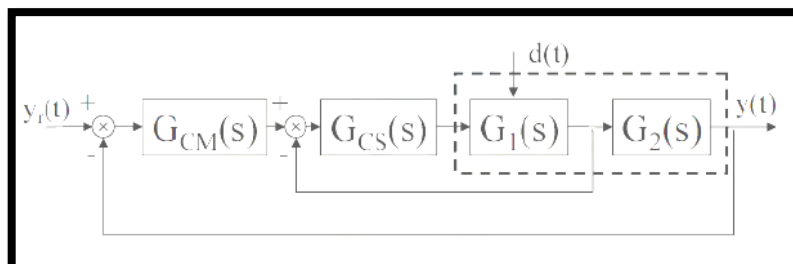


Figura 2-12 Estructura Control en Cascada 1

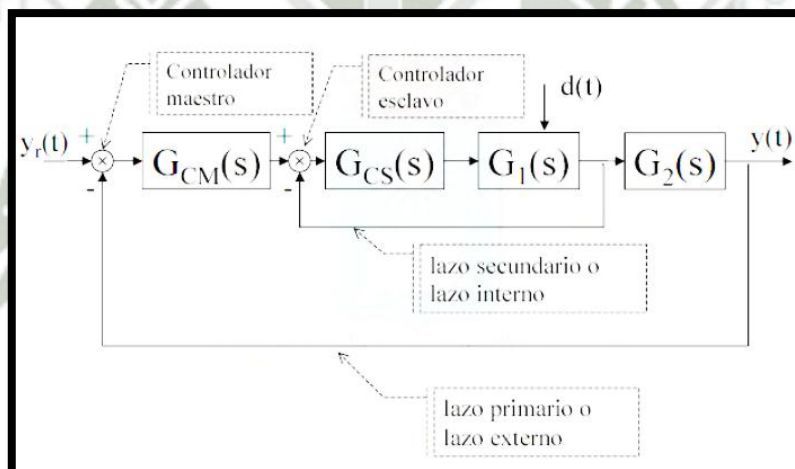


Figura 2-13 Estructura Control en Cascada 2

- **Procesos a los que es aplicable:**
 - La dinámica del lazo interno debe ser mucho más rápido que el lazo externo.
 - En cualquier caso no hay empeoramiento (hay mejora) si la dinámica fuera similar.
 - Excepción (rara): interacción, resonancia.

- Estructura muy utilizada: Los controladores industriales tienen estradas y modos específicos para que funcionen como maestros o como esclavos (master/slave).
- **Sintonización del controlador:**
 1. Sintonización del controlador esclavo:
 - Modelo del proceso afectado por este lazo de control. (solo una parte del proceso).
 - Al ser un proceso rápido, lo normal es utilizar un PI. (Necesitamos precisión, no más rapidez).
 2. Sintonización del controlador maestro:
 - Obtenemos un modelo del conjunto secundario (en automático) y lo agregamos al modelo del proceso.
 - Diseñamos el regulador maestro sobre este sistema equivalente.

2.17.2 Control Anticipativo:

- **Objetivo:** El objetivo del control anticipativo es el de anular atenuar directamente el efecto de una perturbación medible.
- **Nomenclatura:**
 - Control anticipativo.
 - Control en adelanto.
 - Control por pre alimentación.

Bajo estos nombres se esconden distintas estructuras pero con la misma finalidad.

- **Principio de funcionamiento:**

- Medir las perturbaciones y actuar sobre la entrada para corregir el efecto de aquellas.
- Necesario por tanto un modelo de cómo la perturbación afecta a la salida.

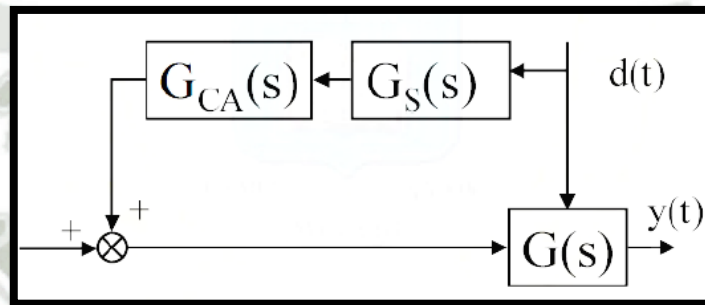


Figura 2-14 Estructura de Control Anticipativo

- Teóricamente logra un control perfecto, pero en la práctica no es 100% viable por:
- No es posible medir todas las perturbaciones.
- Hay errores de medida en las variables.
- No hay modelos perfectos del proceso.
- No siempre se puede realizar la acción de control calculada. (Anticipación excesiva por ser la corrección más lenta que el efecto).
- Es un control en CA, por lo que hay que completarlo con una realimentación del error.

2.17.2.1 Anticipativo incremental:

- Cálculo del controlador por aplicación del objetivo:

- Anular el efecto de la perturbación.

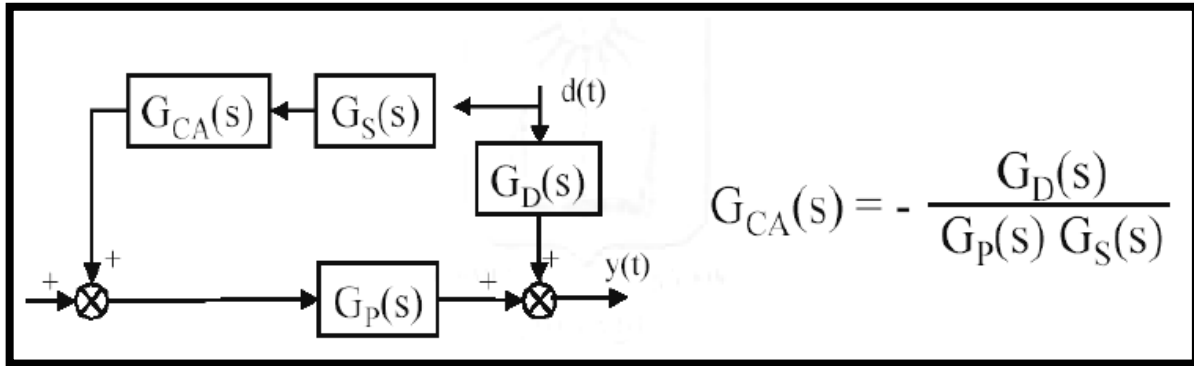


Figura 2-15 Estructura de Control Anticipativo Incremental

2.17.2.2 Anticipativo estático:

- Incremental demasiado estricto, y a menudo irrealizable.

$$G_D(s) = G'_D(s) e^{-t_{md}s} \quad G_P(s) = G'_P(s) e^{-t_{mp}s} \quad (2-11)$$

- Si la diferencia de tiempos muertos es pequeña respecto de las constantes de tiempo se anulan los términos del retardo.

$$G_F(s) = \frac{-G'_D(s)}{G'_P(s)} \quad (2-12)$$

- Si no, se corrige el régimen permanente.

$$G_{KF}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{-G_D(s)}{G_P(s)} = \frac{-K_D}{K_P} \quad (2-13)$$

2.17.2.3 Control de proporción:

Tipo particular de control anticipativo

- Objetivo: Controlar una relación entre dos variables. Una de ellas hace el papel de perturbación, mientras que la otra es manipulada para cumplir la relación. Es un control no lineal, salvo que la relación permanezca constante.
- Dos estructuras:
 - Estructura 1: Cálculo de la referencia para la variable manipulada (multiplicador)
 - Estructura 2: Control de la relación (divisor).

2.18 Sintonía en lazo cerrado Ziegler y Nichols

Un método fundamental en la sintonía de reguladores PID, es un método en lazo cerrado propuesto por Ziegler y Nichols en el año 1942, cuyo nombre más conocido es el método de la oscilación sostenida. Es un algoritmo basado en la respuesta en frecuencia del proceso. Las características a determinar son:

- Ganancia proporcional crítica (K_c).- Es la ganancia de un controlador solo proporcional, que provoca que el sistema sea oscilatorio (críticamente estable).
- Periodo de oscilación sostenida (T_c).- Es el periodo de oscilación que se consigue con la ganancia crítica.

Las fórmulas de Ziegler y Nichols poseen reglas heurísticas, y que son las siguientes:

- Las constantes de tiempo integral y derivativo se fijan en función del periodo de la oscilación mantenida.
- La ganancia proporcional se fija en función de la ganancia crítica.
- La constante de tiempo derivativa es igual a un cuarto de la constante de tiempo integral.

En base a ellas, las expresiones de sintonía para un regulador PID propuestas por Ziegler y Nichols se muestran en la siguiente tabla, y son función de la Ganancia proporcional crítica (K_c) y del periodo de oscilación sostenida (T_c) del sistema en cuestión: (Calvo Rolle, 2010).

Tabla 2.9 Primer Método Ziegler y Nichols se realiza en lazo abierto (Katsuhiko, 2010)

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 2.10 Proporción de K_c y T_c Segundo Método Ziegler y Nichols, utilizado en el proyecto

K	$= 0.6 \times K_c$
T_i	$= 0.5 \times T_c$
T_d	$= 0.125 \times T_c$

2.19 Sistema de monitoreo Scadas:

2.19.1 Indusoft:

Para el desarrollo de todo tipo de aplicaciones SCADA. Desde sencillas aplicaciones de visualización, que pueden ser ejecutadas desde un Palm-PC, hasta la más completa aplicación de supervisión para ser ejecutada sobre una potente estación de trabajo. Desde la supervisión de una sencilla máquina de control, hasta la supervisión de un complejo sistema de control distribuido.

Su enfoque como aplicación abierta a la conectividad con otro software basado en Windows, hace que sea el sistema idóneo para comunicar con MES, ERP u otros sistemas de gestión de planta.

2.19.1.1 Características Generales:

- Interfaz gráfico en tiempo real para el desarrollo de todo tipo de sistemas de automatización industrial, de instrumentación o sistemas embebidos.
- Acceder en tiempo real, utilizando un navegador estándar, a las pantallas de la aplicación: sinópticos, históricos, alarmas, informes, recetas, etc.
- Permite el Intercambio de datos entre dispositivos móviles y wireless.
- Desarrollar aplicaciones orientadas a Web o para funcionar sobre una única estación, desde el mismo entorno de desarrollo y para cualquier plataforma Windows NT, 2000, XP, CE y CE.NET.
- Sencilla integración con las aplicaciones Windows de escritorio (como Word y Excel); interfaz con otros paquetes de desarrollo como Java, C, C++ y Visual Basic.

- Soporte de ActiveX.
- Visualizar múltiples aplicaciones Web Thin Client desde un simple navegador (Internet Explorer o Netscape) a través de Internet/Intranet para intercambiar datos utilizando el protocolo TCP/IP.
- Proporciona la configuración y depuración on line de aplicaciones, así como la gestión remota de las mismas.
- Amplio espectro de herramientas de soporte al desarrollo como: registro de mensajes, códigos de error, eventos, Database Spy y LogWin.
- Potente y flexible Base de Datos de tags con: tipos discretos, enteros, reales, string, arrays, clases y punteros.
- Avanzada librería matemática con más de 100 funciones estándar.
- Programación vía un sencillo y flexible lenguaje basado en Scripts.
- Proporciona seguridad multi-nivel para el control de acceso a las aplicaciones, incluyendo su uso en Internet y/o Intranet.
- En conformidad con los estándares aceptados por la industria: Microsoft .NET, OPC, DDE, ODBC, XML, SOAP, y ActiveX.
- Herramienta para el soporte de aplicaciones en múltiples lenguajes, permitiendo su selección en tiempo de ejecución.
- Ayuda sensible al contexto.

2.19.1.2 Gráficos:

- Desarrollar sofisticados interfaces mediante manejables herramientas "drag and drop".

- Importar gráficos desde más de 15 formatos diferentes para lograr las pantallas con apariencia más real.
- Contiene los más completos objetos gráficos totalmente configurables (color, tamaño, visibilidad, intermitencia, posición, rotación, etc) para lograr los más variados efectos de animación en las aplicaciones.
- Entorno para el desarrollo de las aplicaciones orientado a objetos, para una mayor usabilidad.
- Extensa librería de símbolos para facilitar el desarrollo de aplicaciones.

2.19.1.3 Alarmas:

- Sofisticado sistema de gestión de alarmas, con la posibilidad de visualizar los avisos en la pantalla, por medio del navegador de Internet, enviarlos por e-mail, a un fichero o a la impresora. Permite a los usuarios hacer anotaciones después de aceptar las alarmas.
- Flexibilidad en el formato de los mensajes de alarmas, herramientas de búsqueda y acceso por grupos o tags.
- Almacenar las alarmas en un fichero o en la impresora o en una Base de Datos.
- Filtrado, ordenación y selección de diferentes colores, para facilitar su visualización. Filtrado por categorías en tiempo de ejecución.

2.19.1.4 Recetas E Informes:

- Creación de recetas e informes de manera flexible.
- Importar/Exportar recetas, informes y datos en tiempo real en formato XML.

- Publicación de pantallas: gráficos y animaciones, recetas, informes para su acceso por medio de un navegador estándar.

2.19.1.5 Entrada/Salida:

- Incluye más de 200 drivers de dispositivo.
- Soporta OPC (cliente y servidor).
- En conformidad con los estándares aceptados por la industria: Microsoft .NET, OPC, DDE, ODBC, XML, SOAP, y ActiveX.

2.20 Hipótesis: Variaciones de las presiones y su repercusión en las potencias

Analicemos el diagrama de presión vs entalpia se puede observar como varia la potencia frigorífica según las distintas temperaturas de evaporación y condensación.

Supongamos que la presión de aspiración del compresor P_a disminuye hasta un valor P_a' origina que:

1. Al disminuir la presión de aspiración, el efecto refrigerante ER' también disminuye, con lo cual también disminuye la potencia.
2. El volumen específico Ve' aumenta, lo que implica que el desplazamiento volumétrico disminuye.

También se puede demostrar numéricamente con la relación de compresión R_c ya que, en este caso, aumenta y por lo tanto, disminuye el rendimiento volumétrico R_v y la potencia de refrigeración. En la figura 2-16 y figura 2-17 se muestra e análisis.

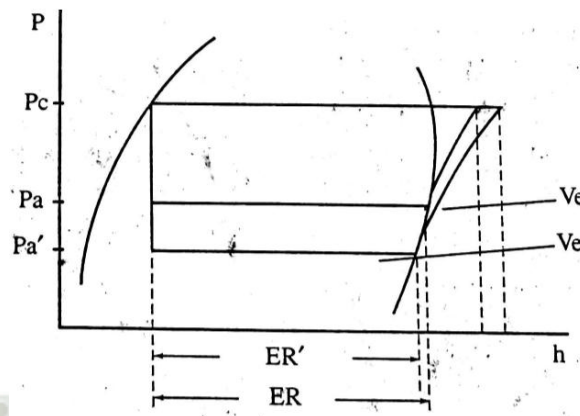


Figura 2-16 Ciclo con variación de presión Hipótesis

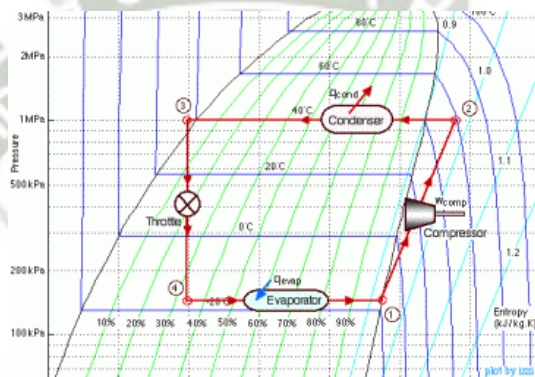


Figura 2-17 Variación Temperatura según Hipótesis y ciclo de refrigeración.

3. CAPÍTULO III: PLANTEAMIENTO OPERACIONAL



Este Capítulo tiene como objetivo el diseñar un sistema electrónico que permita realizar el control en cascada para la optimización del consumo de energía eléctrica en compresores reciprocante de amoniaco.

Así mismo la descripción de los equipos utilizados y funcionamientos de cada uno de ellos, para poder tener el conocimiento previo al desarrollo del sistema final que se instalar en planta.

Por otro lado el capítulo cuenta con el análisis matemático del funcionamiento actual del proceso de refrigeración que se encuentra en Planta, este análisis matemático permitirá tener con certeza la función matemática del funcionamiento del proceso según las condiciones.



3.1 Esquema conceptual: sistema de control electrónico para optimización de consumo de energía compresores de pistón en sistema de refrigeración Amoniaco:

Tabla 3.1 Descripción proyecto Hardware

HARDWARE	
Sensor de presión MBS 3000	Permitirá poder medir la presión que se encuentre en el tanque separador de vapor de amoniaco , siendo esta la presión de succión de compresores de amoniaco, esta medición es llevada al controlador primario del sistema , al igual que PLC para transmitir por Ethernet la información al Sistema Scada diseñado, la señal que se transmite es de 4 a 20 mA
PT 1000 AKS 21	Permitirá medir la temperatura en tiempo real del glicol, para luego llevar esta señal al controlador de temperatura EKC, cabe resaltar que el controlado cuenta con acondicionamiento de temperatura interno.
EKC 361 Controlador temperatura	Controlador de temperatura , con señal de salida de 4 a 20 mA, el cual permite ingresar los parámetros de PID para el control externo del control en cascada, esta salida de 4 a 20 mA es llevado al control interno de compresor de pistón para poder brindar un variación de setpoint al control existente (control primario o interno)
Medidor de Energía PM710	Este equipo permitirá poder tener la capacidad del compresor, como también que compresor sé que encendido y parámetros de perfil de cargas, armónicos, alarmas de sobrecarga, desfases de líneas de alimentación, horas de funcionamiento, etc. Esta información se monitorea se visualizaran mediante el Sistema Scada diseñado
Gateway EXG 100	Este equipo permitirá el poder transformar la señales de comunicación recibidas de medidores de energía eléctrica PM710 (señales Modbus), estas señales serán transmitida por protocolo de comunicación TCP/IP por medio del Gateway (pasarela)
PLC 1200 Siemens	Función principal , es poder captar información importante y activar sirena de alarma críticas, esta información también se monitoreada mediante el Sistema Scada

Tabla 3.2 Descripción Software del Proyecto

SOFTWARE	
Indusoft	El software de interface de usuario ha sido diseñado para manejar los requerimientos de la gestión energética de proceso de refrigeración, permitirá programar y diseñar la interface Scada para esta aplicación
Página de configuración de Gateway	Permitir configuración la dirección IP pasarela para leer la información en Sistema Scada
Tía Portal V11	Software permitirá poder programar el controlador PLC
Matlab	Software permitirá poder programar la simulación del control diseñado , pero como otra función importante el poder realizar todo el análisis de probabilísticos de aproximación de función de transferencia hallado, y encontrar las contaste de controlador PID de control externo de control en cascadas

Como objetivo principal se debe obtener una función de transferencia real del modelo matemático que existe en corporación Lindley el cual cuenta con el control de presión en el compresor de amoniaco, en el Anexo IV se puede observar el modelamiento matemático de sistema de refrigeración teórico , este anexo se calculó para el estudio de sistema sin ningún control, el anexo se utiliza para saber el comportamiento teórico del sistemas de refrigeración de forma referencial, modelo hallado en el Anexo IV se puede utilizar para cualquier tipo de plantas de refrigeración, que no cuente con control.

Al mismo tiempo obtener el control adecuado PID del sistema identificado, mediante simulaciones de MATLAB.

3.2 Identificación del proceso de control de refrigeración existente en compresores

(función matemática de sistemas control interno):

Para poder realizar el modelamiento matemático de este sistema es complejo en el Anexo IV se aproximó mediante los cálculos matemáticos aplicando leyes física fundamentales, pero tenemos que tener en cuenta que nuestro sistema entra en constante variación, por lo que es necesario poder identificar el sistema de forma experimental. Por lo que se puede utilizar un modelamiento matemático de tipo “entrada-salida”, en el que se consideren solo los valores de las variables manipuladas y controladas, dejando las interacciones de lado. Si se asume que el sistema puede modelarse como un sistema causal, lineal, relajado e invariante en el tiempo, entonces el modelo a obtener puede expresarse como una función de transferencia.

Por lo que para lograr este objetivo debe utilizarse metodología y procedimiento estadístico de identificación de sistema. La identificación de sistema un capo de modelamiento matemático de sistema dinámico que utilizan datos experimentales como punto de partida, a los cuales se aplican un conjunto de técnicas estadísticas con el fin de ajustar los datos a una estructura dinámica determinada por el investigador. Por lo que no hay necesidad de conocer las leyes interna que gobiernan el comportamiento del sistema. (Ljung, 1987).

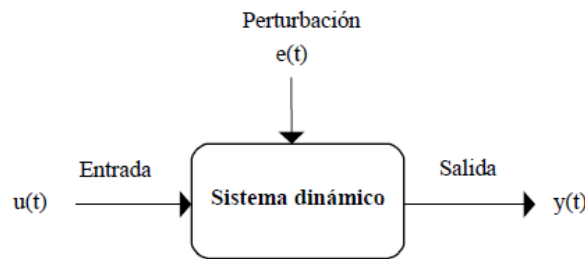


Figura 3-1 Diagrama de sistema dinámico

En la identificación de sistema se observan tres elementos importantes:

1. **Experimento:** Debe diseñarse un experimento que involucre, las señales de excitación, captura de datos y organización de información.
2. **Clase de modelo:** Se busca el modelo que refleje el comportamiento del sistema. Se incluye estructura, retardos, linealidad.
3. **Criterios:** Minimizar un índice de performance que refleje el nivel de proximidad del modelo respecto al comportamiento del sistema a identificar.

La identificación de sistema no segura, las razones son:

1. Se debe encontrar una estructura apropiada del modelo.
2. Presenta sin duda datos no perfectos en la vida real. El motivo es que los datos grabados sean perturbados por ruido, $e(t)$.
3. El proceso puede variar en el tiempo, por lo que causa problemas sobre todo si se intenta describir sistemas invariantes en el tiempo.
4. La dificultad de medir algunas viables o señales que son importante en para el modelo.

3.2.1 Método de identificación:

Para obtener el modelo experimental se debe realizar una excitación al sistema (utilizando tipo de entrada tales como señales escalón, sinusoidal, PRBS (Pseudo Random Binary Signal)).

El modelo obtenido es examinado para una representación apropiada del sistema, en alguno caso donde la estructura es más compleja debe ser considerada, estimando sus parámetros.

- Seleccionar las variables de entradas (Variables manipuladas) y salida (Variables controlada).
- Seleccionar un conjunto de datos experimentales de entrada y salida realizando ensayos.
- Examinar y pulir datos (filtrar los datos).
- Seleccionar estructura del modelo y elegir un algoritmo particular para determinar sus parámetros.
- Validar el modelo identificado y su incertidumbre, básicamente es el análisis en el tiempo y en frecuencia del modelo obtenido.
- El proceso de identificación es cíclico como se observa.
- Planificación Experimental.
- Procesamiento de los datos experimentales.
- Estimación de modelo no –paramétrico.
- Selección de la estructura del modelo.
- Formación de un criterio.
- Estimación de parámetros.

- Validación de modelo obtenido.

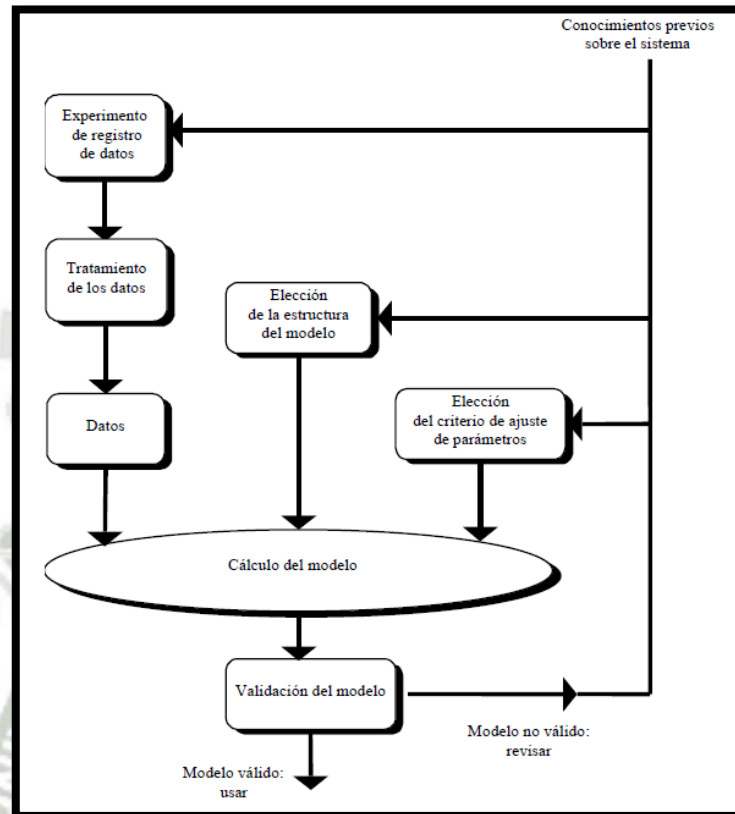


Figura 3-2 Diagrama Método de Identificación (Ljung, 1987)

3.2.2 Planificación experimental:

La repuesta al escalón no permite obtener información útil sobre el retardo de tiempo, contante de tiempo y ganancia del proceso. El análisis de repuesta estática permite analizar la respuesta estacionaria que presenta el sistema ante distintos estímulos, lo que se utiliza para determinar la región lineal de la planta. Una vez obtenido el resultado se puede mejora la estructura del modelo y diseñase nuevos experimentos.

En nuestro caso se debe seleccionar como variable entrada a la presión de los compresores de amoniaco que retorna del tanque de retorno y como la variable de salida la presión de salida de intercambiadores.

Entonces un primer análisis a través de una prueba de ganancia estática, sirvió de guía para estimar diversos modelos no paramétrico como también modelos paramétricos del proceso de interés.

Para obtención de datos del sistema de refrigeración se debe realizar la instalación de sensores de presión Danfoss en tanque receptor de amoníaco en estado gaseoso, esta señal es llevada hacia PLC para su realización de sistema SCADA de monitoreo.

Parte del proceso de obtención de repuesta debemos realizar prueba de modificación de SET en el sistema ya controlado (Sistema primario de Control en cascada).

Considerando que la presión de salida contribuye a las variables controlada o variable de proceso (PV) y que la presión de succión del sistema es la variable manipulada o variable de control (CV), el modelo matemático a obtener tendrá a la presión del vapor como variable de salida y presión de succión variable de entrada.

Para realizar el experimento se contó con:

- Sensor de presión Danfoss.
- PLC de obtención de datos (programado para el escalamiento de la señal reciba).
- Computadora (con software Indusoft).

Puntos resaltantes del experimento que se presentó en el sistema.

- El control de presión primario no cuenta con la presión.
- Se observa retraso en la después del control primario.
- Se observa que el set tiene un rango de variación 40 psi a 45.5 psi, presión ingreso.

Definidas las condiciones de experimentación, se realizaron las pruebas con ganancias estáticas.

- Paso inicial se aplicó el set de 45 psi en 100 por ciento el potenciómetro.
- Registra los valores de entradas y salida para el estado estacionario.
- Incrementar ligeramente la entrada y repetir el procedimiento.

Con la prueba realizada se puede apreciar que la señal de entrada desde distintos niveles de magnitud tiene sobre la señal de salida.

En la figura 3.3 se muestran los datos adquiridos y se observa que la respuesta cuenta con una zona lineal entre el 10% y 25 % de la variación del set.



Figura 3-3 Adquisición de datos SCADA

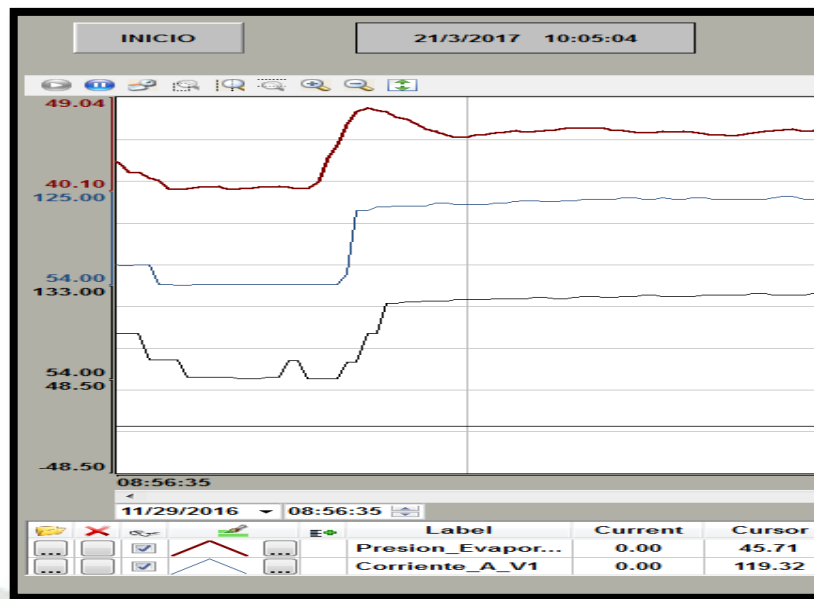


Figura 3-4 Análisis de ganancia estática, en el que se grafica la salida del sistema en estado estacionario, para diversas magnitudes de la señal de entrada

Luego se realiza un segundo examen preliminar, que consiste en:

- Se modifica el valor del set hasta el límite superior.

Con este procedimiento se encuentra la dinámica del sistema de refrigeración, con las constantes más significativas, el retardo de tiempo y la ganancia. Los datos adquiridos mediante esta prueba preliminar se muestran en la gráfica. ($T_1 = 7$ seg , $T_2 = 10$ seg, T subida hasta set = 4 seg)

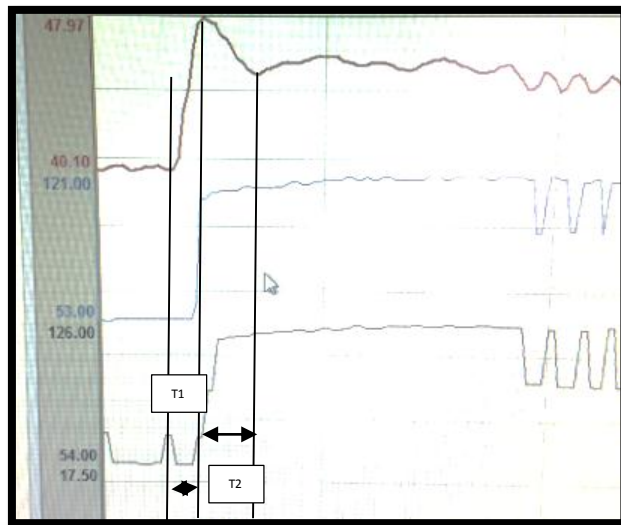


Figura 3-5 Prueba pasó escalón para una entrada entre 50% y 100 %

Se obtiene de la respuesta se tiene que la presión de salida del sistema tiene:

- Retardo de 13 seg
- Mp: 18 seg
- Tiempo de estabilización : 20 seg
- Tiempo de subida es de 2.41

Se puede concluir que el comportamiento de la presión del sistema de salida del sistema de refrigeración se representa.

$$G(s) = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2 \xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (3-1)$$

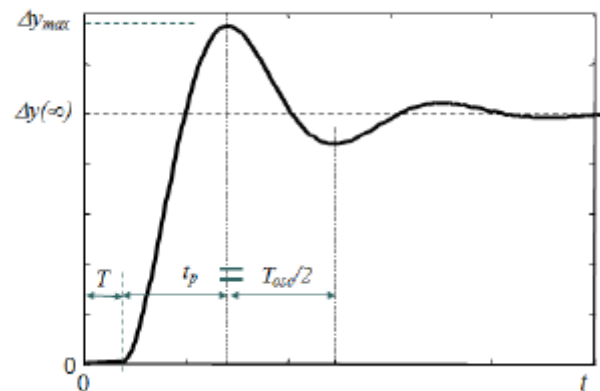


Figura 3-6 Función vista teóricamente

Donde:

$G(s)$: Función de transferencia del proceso de variación de la presión del sistema de refrigeración

K : Ganancia

T : es retardo del sistema

Por ser una prueba preliminar, estos resultados son aproximados, con estos resultados se puede diseñar el experimento para obtener los datos necesarios para realizar la identificación paramétrica del proceso de variación.

Tabla 3.3 Datos experimentales de la adquisición de datos

Muestreo Experimental	Número de Muestra	Muestreo Experimental	Número de Muestra
40.21	1	46	31
40.43	2	45.92	32
41.56	3	45.81	33
43.55	4	45.74	34
45.04	5	45.64	35
46.77	6	45.58	36
47.74	7	45.64	37
47.87	8	45.7	38
47.68	9	45.71	39
47.39	10	45.63	40
47.02	11	45.5	41
46.69	12	45.38	42
46.22	13	45.34	43
45.84	14	45.36	44
45.56	15	45.5	45
45.27	16	45.65	46
45.16	17	45.75	47
45.23	18	45.82	48
45.39	19	45.88	49
45.5	20	45.81	50
45.62	21	45.76	51
45.72	22	45.71	52
45.74	23	45.56	53
45.69	24	45.48	54
45.75	25	45.35	55
45.83	26	45.25	56
45.93	27	45.21	57
46.04	28	45.28	58
46.06	29	45.39	59
46.03	30	45.55	60
		45.58	61
		45.44	62
		45.08	63
		44.73	64
		44.37	65
		44.5	66

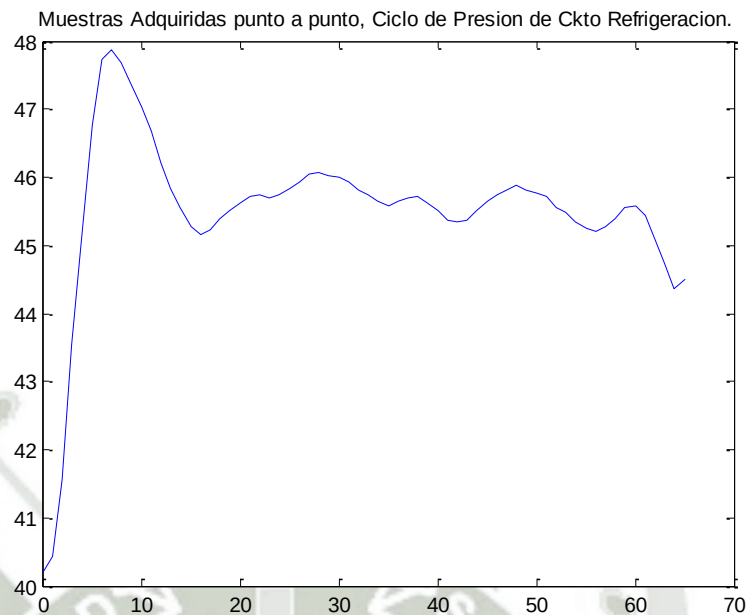


Figura 3-7 Muestreo de Presión sistema de refrigeración glicol

Las propiedades de los datos son usados en la estimulación de los parámetros, son cruciales para obtener un modelo con claridad. Uno de estos parámetros es el periodo de muestreo, el cual no debe ser muy pequeño ya que los polo del modelo identificado se sitúan alrededor de $Z=1$, ni muy grande que se pierda información fundamental de la dinámica del sistema. Por lo que el tiempo de estabilización esta entre 60 seg. Para el proceso se determina un periodo de muestreo de 1.

Una de las propiedades más importante de la señal de entrada que se utilizara para identificar el proceso es la excitación persistente. Esto implica que la matriz de covarianzas de esta señal sea definida positiva. Bajo estas circunstancias, el proceso es excitado distintas frecuencias, lo que permite estimar un modelo que contenga la mayor cantidad de información posible acerca del sistema real.

La amplitud de la PRBS es este caso se termina de tal forma que abarque la mayor parte de la región lineal.

Los anchos de pulso mínimo y máximo, se determina aplicando las siguientes reglas prácticas:

$$T_{max} = \frac{2\pi T}{0.15} \quad (3-2)$$

$$\frac{2\pi T}{10} < T_{min} < \frac{2\pi T}{5}$$

T = Tiempo de muestreo

T_{max}= Ancho de pulso máximo

T_{min} Ancho de Pulso mínimo

Los ancho de pulso mínimo y máximo calculado son entonces T_{max}= 190 seg y T_{min}= 10 seg .

El periodo de cada pulso (T_{prbs}) se elige como la suma de T_{max}+T_{min} de esta forma T_{prbs}= 200 seg .

La duración del experimento también afecta los parámetros estimados. Una regla general consiste en aplicar entre 10 y 20 ciclos completos de la PRBS la señal de excitación diseñada se muestra en la figura 3-8.

Comuna entra al 10 %

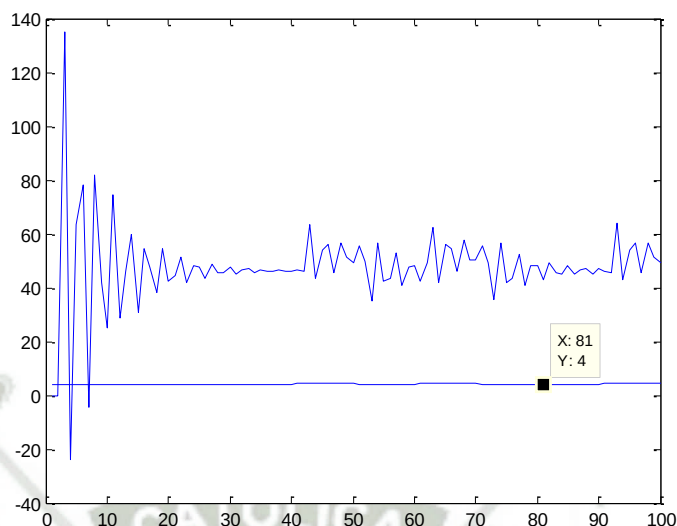


Figura 3-8 Respuesta al tren de pulsos sistema

3.2.3 Procesamiento de datos experimentales:

Ya obtenido los datos del proceso de variación de presión en el sistema de refrigeración por amoníaco, se debe realizar un tratamiento previo a la respuesta obtenida, para lo que existe distintas diferencias en los datos adquiridos que deben ser corregidos para garantizar una correcta estimación de parámetros, entre los que se encuentran:

- Perturbaciones de altas frecuencias en los datos.
- Ocasiónales datos incorrectos y/o olvidados.
- Derivas, offset perturbaciones a bajas frecuencias.
- Los valores numéricos de las distintas señales no tiene al mismo orden de magnitud.
- Presencia de tiempos de retardo importante.

Las perturbaciones de altas frecuencias aparecen cuando se elige tiempo de muestreo muy pequeño. En los datos adquiridos no se aprecia la presencia de esta deficiencia.

Existen datos incorrectos y que pasan desapercibidos estos se presenta cuando existe deficiencia en el sistema de adquisición de datos. Para que esto se pueda corregir, exista algoritmos que permiten dar arreglos a los datos adquiridos sin falsificarlos. Con se observó presenta una pequeño periodo transitorio al inicio de la adquisición de datos, el cual se elimina para que no influya en la estimación de los parámetros.

Los derivas, offset y perturbación a bajas frecuencia se deben a factores externos, que es deseable incluir en el modelo. Así mismo, se tiene que el modelo paramétrico a determinar, se encuentra en función del operador de desplazamiento anterior (q^{-1}), esto implica que la respuesta del proceso debe ocurrir alrededor de un punto de operación al que se considera como cero.

La diferencia de calores numéricos entre señales se presenta frecuentemente en sistema MIMO, la utiliza señales de entrada y salida que numéricamente tiene elevada diferencia de magnitud. Por lo que la presencia de tiempo de retardo se analiza durante la identificación no paramétrica, la cual en este caso ofrece resultados más confiables.

Adicionalmente se debe realizar con el objetivo de validar el modelo con datos que no han sido utilizados durante la identificación.

Los métodos de estimación en el dominio temporal que se estudian, tienen la particularidad de que a partir de ellos se estiman modelos discretos (dominio-Z).

Consecuentemente, en el caso de desearse un modelo continuo (dominio-S o

ecuación diferencial) del sistema será necesario convertir el modelo discreto a continuo. Ello no presenta problemas cuando el sistema presenta un mantenedor de orden cero. Contrariamente, utilizando técnicas de frecuencias podremos estimar modelos tanto continuos como discretos. La comparación entre ambos modelos se muestra en la siguiente tabla 3-4.

Tabla 3.4 Comparaciones Métodos Frecuencias y Temporales

Método Frecuenciales	Métodos temporales
Función de transferencia en el dominio s y z	Función de transferencia en el dominio z
Ruido aditivo en la entrada y en la salida	Ruido aditivo al modelo
Modelo no paramétrico del ruido	Modelo paramétrico del ruido
Retardo fraccional	Retardo es un múltiplo entero de T_s
Sistemas SISO	Sistemas MISO

3.2.4 Comprobación de los resultados obtenido en la identificación no paramétrica utilizando análisis de correlación:

El análisis por correlación es un método basado en técnicas estadísticas y el objetivo es poder estimar la respuesta impulso del proceso. Cabe resaltar que con este método no se obtiene una función de transferencia sino una secuencia o una gráfica de la respuesta impulso del proceso. Este análisis es útil para comprobar la información obtenida durante la identificación no paramétrica.

El análisis por correlación es un método basado en técnicas estadísticas y tiene como objetivo estimar la respuesta impulso del proceso. Con este método no se obtiene una función de transferencia sino una secuencia o una gráfica de la respuesta impulso del

proceso. Este análisis es útil para comprobar la información obtenida durante la identificación no paramétrica.

La respuesta impulso del proceso se determina a partir de la correlación que existe entre la señal de entrega y a la señal de salida. Las señales de prueba más utilizadas en este ensayo son las secuencias de ruido blanco e en la práctica, las PRBS. En resumen, el método consiste en solucionar la siguiente ecuación: (Stoica., 1989):

$$\widehat{R}_{yu}(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} \widehat{g}(k) \widehat{R}_u(\tau - k) \quad (3-3)$$

Donde:

$\widehat{R}_{yu}$ Correlación cruzada entre la salida “y” y la entrada “u”

$\widehat{R}_u$ Auto correlación de la entrada “u”

$\widehat{g}$ Respuesta impulso estimada del proceso

κ, τ Número de la muestra y del desplazamiento respectivamente

La correlación cruzada entre la salida, la entrada y el auto correlación de la entrada se pueden definir como:

$$\widehat{R}_{yu}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1-\min(\tau,0)}^{N-\max(\tau,0)} y(k)u(k + \tau) \quad (3-4)$$

$$\tau = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

$$\widehat{R}_u(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-\tau} u(k)u(k + \tau) \quad (3-5)$$

Donde:

N- número total de muestras

El problema queda muy simplificado en el caso en que se utilicen señales de entrada especiales con funciones de auto correlación sencillas. Cuando se utiliza, por ejemplo, un ruido blanco como señal de prueba, sabiendo que $\widehat{R}_u(\tau) = 0$ para $\tau > 0$ la solución se reduce a:

$$\widehat{g}(\tau) = \frac{\widehat{R}_{yu}(\tau)}{\widehat{R}_u(0)} \quad (3-6)$$

Siendo fácilmente calculable a partir de los datos experimentales

En el caso en que la señal de excitación no sea un ruido blanco, el cálculo de la solución no es trivial. Por esto, es que se propone varios métodos para resolverla. Uno de ellos es el método de la respuesta impulsional finita (FIR). En este caso se considera que la función impulso es de orden finito $g(k)=0$ para $k \geq M$. Para ser utilizado, es necesario que M sea mayor que la constante dominante del sistema. Así, la respuesta impulso puede calcularse según:

$$\widehat{R}_{yu}(\tau) = \sum_{k=0}^{M-1} \widehat{g}(k) \widehat{R}_u(\tau - k) \quad (3-7)$$

Si se desarrolla la ecuación anterior y se ordena en forma matricial, podemos encontrar un sistema de ecuaciones lineales:

$$\widehat{R}_{yu} = \widehat{R}_u x \widehat{g} \quad (3-8)$$

Las propiedades básicas del análisis por correlación son:

- Da una rápida información sobre la constante de tiempo dominante del sistema y del retardo puro.
- Da como resultado una tabla de datos o una gráfica que no pueden ser utilizados directamente en simulación.
- Los resultados obtenidos parten del hecho de que la entrada es independiente de las perturbaciones y/o ruido, esta limita el uso de este método a sistemas sin retroalimentación (lazo abierto).

En Matlab, el algoritmo de análisis por correlación se encuentra implementado en el System Identification Toolbox en la función `Cra`, la misma que estima la respuesta impulso del sistema, partiendo de los datos de entrada y de salida del mismo. Aplicando esta función a los datos adquiridos de variación de presión en sistema de refrigeración, se obtuvo la respuesta impulsiva que se muestra en la figura 3-9.

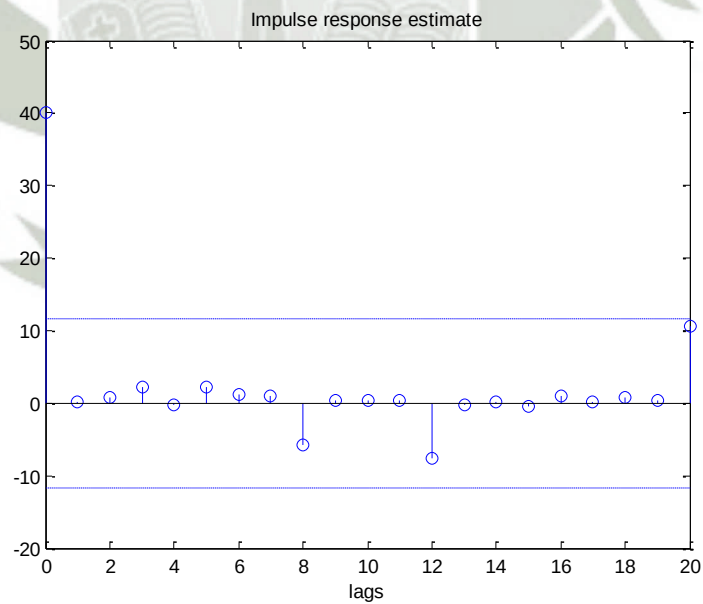


Figura 3-9 Respuesta impulso encontrado mediante análisis por correlación

Se observa que la respuesta impulso encontrada mediante análisis por correlación tiene la forma característica de la respuesta de un proceso de segundo orden, lo que verifica la observación realizada en la identificación no paramétrica. Así mismo, se logra una mejor estimación del retardo de tiempo del proceso, el cual es de $t=20$ seg.

3.2.5 Comprobación de los resultados obtenidos en la identificación no paramétrica utilizando Análisis Espectral:

Los sistemas lineales pueden también definirse a partir de la respuesta frecuencial $G(j)$.

Mientras que las respuestas transitorias y el análisis por correlación tienen por objetivo estimar la respuesta impulsional, las técnicas frecuenciales tiene por objetivo la estimación directa de la respuesta del sistema en el dominio de la frecuencia.

El espectro de una señal $u(t)$ o periodograma, $\phi_u(w)$, se puede interpretar como una media de su contenido frecuencial y se define como:

$$\phi_u(w) = \frac{1}{N} |U(w)|^2 \quad (3-9)$$

Donde:

$U(w)$ Transformada de Fourier de la señal de entrada(t)

N Número total de muestras

Las propiedades de los periodogramas son:

Una señal puramente senoidal presenta picos en este diagrama.

Con otros tipos de señales el resultado obtenido es muy fluctuante.

Suavizando visualmente los resultados obtenidos puede obtenerse una idea del contenido frecuencial de la señal.

Dada una señal $u(t)$ obtenida de un proceso estocástico con una densidad especial $\phi_u(w)$, el valor estimado $\hat{\phi}_u^N(w)$, para N muestras será:

$$\hat{\phi}_u^N(w) = \phi_u(w) + R_N \quad (3-10)$$

Donde:

R_N Término residual, responsable de las fluctuaciones.

El término R_N se caracteriza por tener un valor medio y una variancia que depende del tipo de señal y puede tender a cero a medida que se aumente N.

Como resultado de aplicar la transformación de Fourier al modelo representando por:

$$Y(t) = G(q)u(t) + v(t) \quad (3-11)$$

Donde:

$y(t)$ Salida o respuesta del proceso.

$u(t)$ Entrada al proceso.

$G(q)$ Función de Transferencia del proceso.

$v(t)$ Perturbaciones medibles como no medibles.

Se obtiene:

$$Y(w) = G(jw)U(w) + V(w) \quad (3-12)$$

Donde:

$Y(w)$, $U(w)$, $V(w)$ Transformada de Fourier de las señales correspondientes

$G(jw)$ Función de Transformada del proceso expresada en el dominio de la : frecuencia

Considerando que las señales $u(t)$ y $v(t)$ son independientes, al multiplicar la ecuación anterior por $U(w)$ tenemos:

$$\widehat{\phi}_{yu}^N(w) = \widehat{G}_N(jw)\widehat{\phi}_n^N(w) \quad (3-13)$$

Donde:

$\widehat{\phi}_{yu}^N(w)$ Estimación del espectro cruzado entre la señal de salida y la señal de entrada: para N muestras.

$\widehat{\phi}_n^N(w)$ Estimación del espectro de la señal de entrada para N muestras

$\widehat{G}_N(jw)$ Estimación de la respuesta espectral del sistema para N muestras

La estimación de la función espectral se realiza mediante:

$$\widehat{G}_N(jw) = \frac{\widehat{\phi}_{yu}^N(w)}{\widehat{\phi}_n^N(w)} \quad (3-14)$$

En Matlab, el algoritmo de análisis espectral se encuentra implementando en función `spa`, la misma que estima valores de la función de transferencia sistema para determinadas frecuencias, con los que se obtiene su diagrama de Bode. Aplicando esta función a los datos adquiridos en el sistema de refrigeración (presión de succión), se obtuvo el diagrama de Bode que se muestra en la figura 3-10.

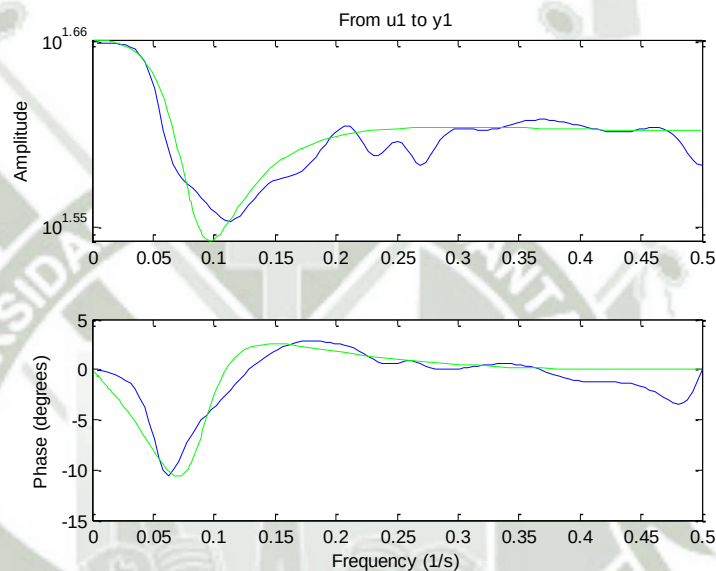


Figura 3-10 Diagrama de Bode

Se observa que el diagrama de Bode obtenido se asemeja bastante a la respuesta en frecuencia de un sistema de segundo grado. Las irregularidades presentes en el diagrama de ganancia se deben al ruido de alta frecuencia que se observa en los datos. Así mismo, a bajas frecuencias se observa la influencia de dos retardos de primer orden superpuestos, es decir, un retardo de segundo orden. En el diagrama de fase se observa una tendencia hacia la que es característica de los procesos con retardo de tiempo.

3.2.6 Selección de la estructura del modelo:

Las aplicaciones de control requieren modelos que permiten relacionar la entrada aplicada con la salida. Sin embargo, los datos experimentales no solo muestran esta relación, sino también la influencia de las perturbaciones en la salida.

Los métodos de estimación por mínimos cuadrados y por probabilidad máxima, permiten identificar estructuras Auto-regresiva Controlada (**ARX**) y Auto/Regresiva de Media Móvil Controlada (**ARMAX**). Ambas consideran la influencia de las perturbaciones en la salida.

De particular interés es la estructura **ARMAX**, ya que permite obtener una función de transferencia de la parte determinística (relación entrada-salida)- esto provee al controlador respuesta del sistema. Por esas razones, la estructura candidatas son **ARX** y **ARMAX**.

La siguiente selección importante. Se refiere al orden de los parámetros de cada estructura. En base a la identificación no paramétrica realizada, como también en base al análisis por correlación y al análisis espectral. Puede hacerse una aproximación tentativa. En estas pruebas se observó que la respuesta del proceso bajo estudio similar a la respuesta de un sistema de segundo orden.

Sin embargo, por consideraciones prácticas el modelo debe tener un orden más elevado ya que el actuador y el sensor tienen dinámicas o incluidas en los datos. Se probaran entonces modelos de orden 2,3 y 4, a manera de comprobación también se probaran modelos de primer orden. En cuanto al número de “ceros” o de los polinomios $B(q^{-1})$

y $C(q^{-1})$, solo se puede inferir que debe ser igual o menor que el número de polos estimados, para obtener funciones de transferencia propias. Por último, es necesario incluir en el modelo el retardo de tiempo del sistema.

Cuando se formula un problema de identificación se introduce un criterio para tener una medida hasta qué punto un modelo se ajusta a los datos experimentales. Mediante hipótesis estadísticas se pueden deducir criterios de base probabilística. Con frecuencia los criterios para los sistemas discretos se expresan de forma.

$$J(\theta) = \sum_{t=1}^n g(\varepsilon(t))$$

(3-15)

Donde:

 $J(\theta)$ Función de costo de estimación

 $g(\varepsilon(t))$ Función de ponderación del error

 ε Error de entrada, error de salida o un error generalizado

Para este estudio vamos a utilizar el criterio de mínimo cuadrados y una variante de este, la estimación de probabilidad máxima. El criterio de mínimo cuadrados es bueno para estimar parámetros de sistemas que se pueden modelar mediante estructura ARX, en donde se puede separar claramente el ruido blanco del modelo ARMAX. Cuyo regresar es pseudo-lineal, es necesario utilizar la estimación de máxima probabilidad, debido a que el método de mínimo cuadrados produce una desviación indeseable de los parámetros estimados.

Los algoritmos de identificación que utilizan estos criterios se encuentran implementados en Matlab. Las funciones a utilizar son ARX y ARMAX, en las que se ingresan los datos de entrada- salidas y los órdenes tentativos del modelo. Las funciones devuelven el modelo paramétrico encontrado.

La función ARX, realiza la estimación de mínimo cuadrados, usando factorización QR para ecuaciones lineales sobre determinadas. La función ARMAX minimiza un criterio de máxima probabilidad utilizando un algoritmo de búsqueda iterativa. Adicionalmente, el correspondiente a predictores estables sea estimado.

Se procedió entonces a realizar la estimación de varios con estructuras ARMAX y ARX utilizando los criterios de selección expuestos y los algoritmos implementados en Matlab. Los órdenes de los polinomios y el retardo de tiempo de los modelos candidatos se muestran en la tabla 3-5,3-6 y 3-7.

Tabla 3.5 Coeficiente A método ARX y ARMAX

Estructura	a1	a2	a3	a4	FPE	Loss Fuction
ARX 220	-0.78	-0.04	0.00	0.00	1.54	1.53
ARX 340	-1.10	0.11	0.28	0.00	1.15	1.14
ARMAX 1110	-0.05	0.00	0.00	0.00	6.75	6.75
ARMAX 1220	-0.82	0.00	0.00	0.00	3.77	3.73
ARMAX2220	-0.78	-0.03	0.00	0.00	1.18	1.17
ARMAX 3330	-1.43	0.67	-0.01	0.00	0.97	0.95
ARMAX4440	-1.02	-0.30	0.51	0.03	0.95	0.92

Tabla 3.6 Coeficiente B método ARX y ARMAX

Estructura	b1	b2	b3	b4	FPE	Loss Fuction
ARX 220	39.54	-31.39	0.00	0.00	1.54	1.53
ARX 340	40.25	-44.15	5.11	12.20	1.15	1.14
ARMAX 1110	41.41	0.00	0.00	0.00	6.75	6.75
ARMAX 1220	40.81	.32.78	0.00	0.00	3.77	3.73
ARMAX2220	40.32	-31.50	0.00	0.00	1.18	1.17
ARMAX 3330	40.27	-57.52	27.76	0.00	0.97	0.95
ARMAX4440	40.08	-40.65	-11.48	21.76	0.95	0.92

Tabla 3.7 Coeficiente C método ARX y ARMAX

Estructura	c1	c2	c3	c4	FPE	Loss Fuction
ARX 220	0.00	0.00	0.00	0.00	1.54	1.53
ARX 340	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	1.14
ARMAX 1110	1.00	0.00	0.00	0.00	6.75	6.75
ARMAX 1220	0.71	0.45	0.00	0.00	3.77	3.73
ARMAX2220	0.53	0.41	0.00	0.00	1.18	1.17
ARMAX 3330	-0.28	0.28	-0.02	0.00	0.97	0.95
ARMAX4440	0.04	-0.52	0.27	-0.25	0.95	0.92

3.2.7 Validación de resultados obtenidos:

La validación de los modelos calculados es uno de los pasos más importante del proceso de identificación. Luego que la fase de estimación de parámetros ha sido realizada, se deberá validar el modelo obtenidos en los procesos anteriores.

Cuando hablo de validación me refiero a evaluar el grado de confianza del modelo obtenido en los pasos anteriores. . Se sabe que la validación pude llegar a ser preciso y en realidad, no existe una medida de validación definitiva. Cabe resaltar que la aceptación del modelo no solo depende del modelo en sí, sino del propósito de su uso.

El validar involucra varios análisis de los repuestos bajos diferentes puntos de vista. Este grupo de pruebas y la coherencia de los resultados que se obtiene, nos permitirá aceptar el modelo. Existen varias formas de probar un modelo:

- Prueba de error final de predicción y análisis de polos y ceros.
- Validación cruzada.
- Verificación cruzada con otros modelos.
- Medidas estadísticas.

En primera lugar debemos verificar la correcta estimación del orden del modelo. El método más siempre es mirar la función costo $V(\Theta)$, directamente vinculada con el orden del modelo. Cuando se incrementa el orden, la función de costo decrece hasta que se mantienen constante o cambia lentamente. Otro método se basa en pruebas estadísticas de la función de costo o en la evaluación de diferentes criterios que tiene en cuenta la complejidad del modelo.

Una prueba es conocer el criterio propuesto por Akaike llamado “final predicción error criterio (FPE)”. Este criterio no solo se evoca en la función costo, sino que también observa la complejidad del modelo:

$$FPE(p) = \frac{N + p}{N - p} j(\Theta) \quad (3-16)$$

Donde:

$J(\Theta)$ Función de costo de la estimación de parámetros

P Número de parámetros del modelo

N Número de muestras

Se análisis este modelo y se observa que este modelo tiene a subestimar el modelo del sistema, permite determinar el orden del mismo como el valor mínimo del criterio y no es necesario evaluarlo en función de unos niveles de confianza.

Existe otro método importante de utilizado para verificar el orden de los parámetros del modelo estimado, es el de la evaluación de sus polos y ceros. Si el orden del modelo es S y es superior al orden del proceso real N , se originan pares de poloceros muy próximos que pueden ser cancelados. En este caso se dice que el modelo está sobredimensionado y se debe reducir el orden.

Para el modelo estimado, la aplicación del criterio FPE dio los resultados que se muestran en la tabla 3-8.

Tabla 3.8 Resultado FPE

Estructura	na	nb	nc	nk	FPE
ARX	2	2	0	0	1.54101
ARX	3	4	0	0	1.1541
ARMAX	1	1	1	0	6.75195
ARMAX	1	2	2	0	3.76763
ARMAX	2	2	2	0	1.18291
ARMAX	3	3	3	0	0.97107
ARMAX	4	4	4	0	0.946264

Con se observa que los modelo de ARMAX el FPE se estabiliza en 1.03 .Con este resultado se puede eliminar los modelo ARMAX de primer orden. Aun no se pueden sacar conclusiones de los modelo ARX todavía.

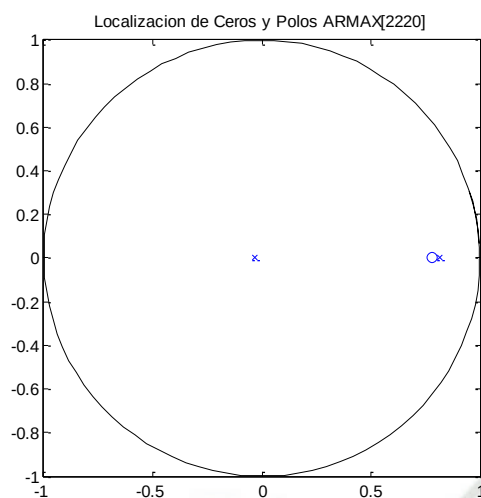


Figura 3-11 Diagrama Cero y Polos ARMAX2220

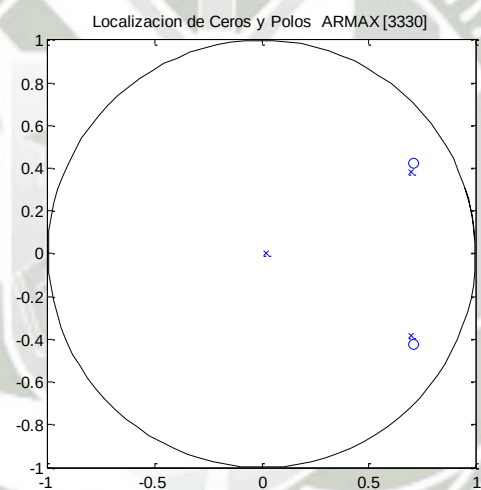


Figura 3-12 Diagrama Cero y Polos ARMAX3330

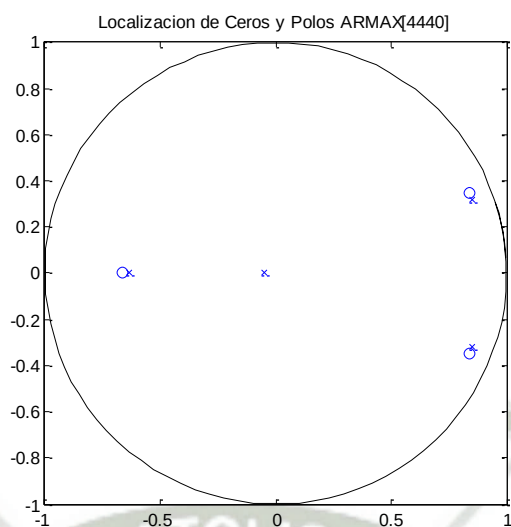


Figura 3-13 Diagrama Cero y Polos ARMAX4440

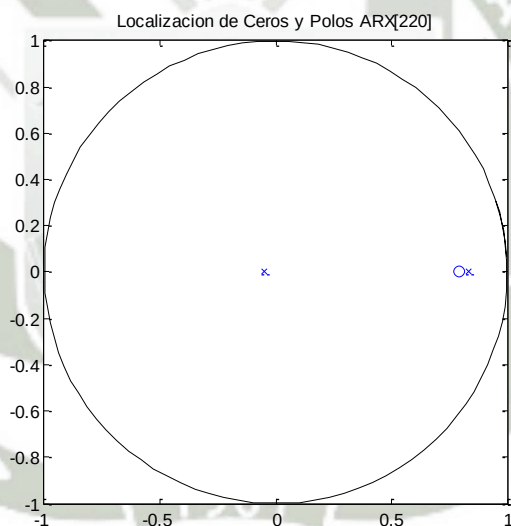


Figura 3-14 Diagrama Cero y Polos ARX220

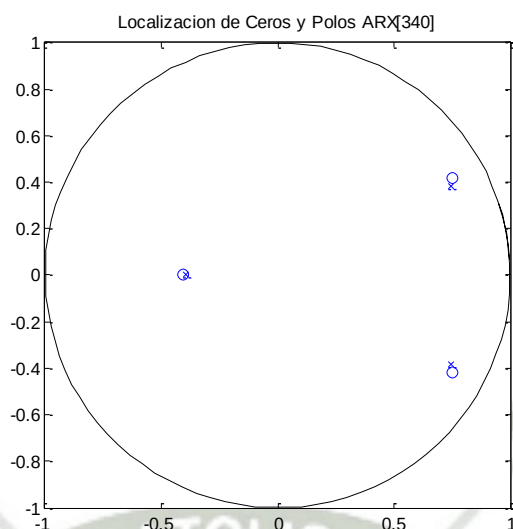


Figura 3-15 Diagrama Cero y Polos ARX340

Del análisis se observa que los modelos ARMAX de primer y segundo orden presentan cancelaciones de polos y ceros, dejando en cada caso 2 polos sin cancelar. Esto me permite que el orden preponderante del sistema es 2.

Una vez verificado el correcto orden de los modelos, se procede a realizar la validación cruzada. Este es un paso en la validación del modelo que consiste en comparar gráficamente en el dominio del tiempo la respuesta del modelo y la respuesta del sistema real. Para esto, se utilizan los datos experimentales de validación. De este modelo se pudo estudiar la independencia de los resultados del conjunto de los experimentos.

La comparación entre los datos observados anteriormente y la salida del modelo se realiza generalmente mirando las anomalías del modelo no detectadas previamente. La validación cruzada se considera la mejor manera para ser certero en obtener el modelo y la única verdadera para su aplicabilidad general.

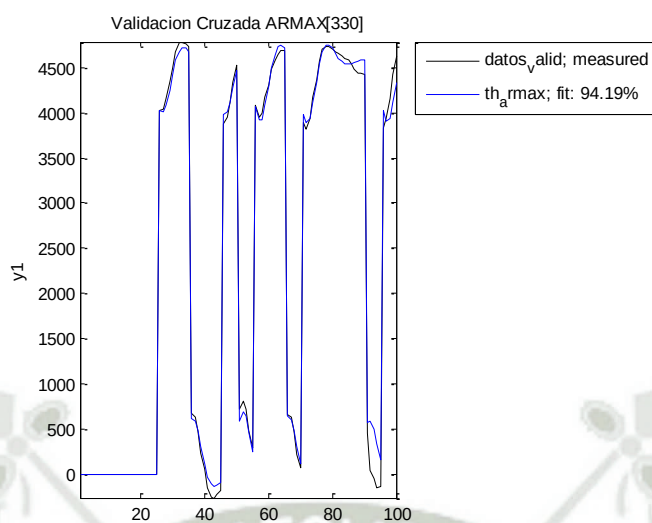


Figura 3-16 Validación Cruzada ARMAX3330

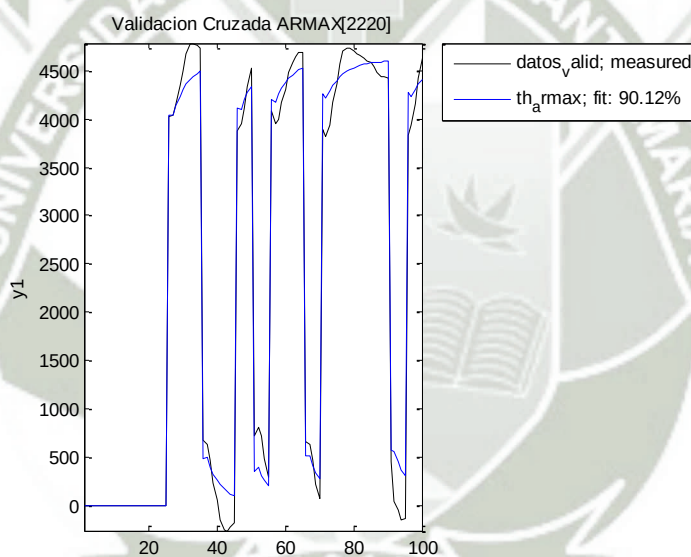


Figura 3-17 Validación Cruzada ARMAX2220

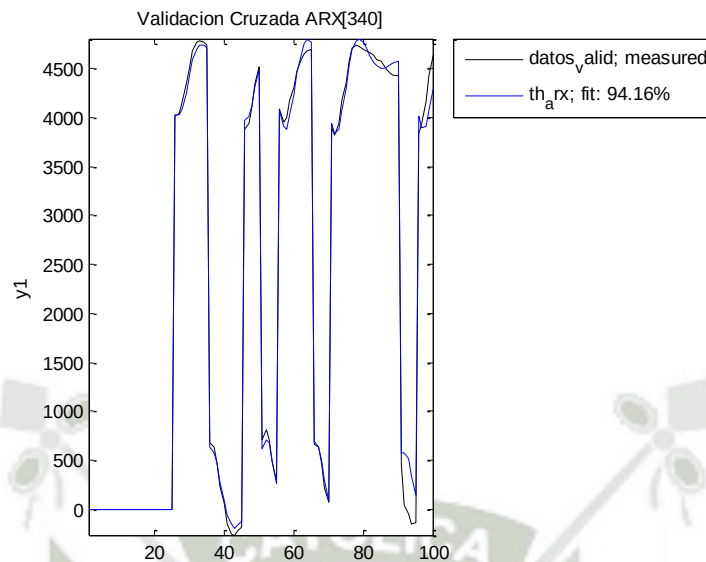


Figura 3-18 Validación Cruzada ARX340

A partir de estos resultados, se aprecia que las salidas de los tres modelos se aproximan bastante a los datos de validación adquiridos del proceso de refrigeración. En este caso se puede cuantificar la aproximación del modelo utilizando un “índice de performance”. Este es una medida cuantitativa de la calidad del modelo que puede obtener a partir de la norma de errores residuales. Una fórmula que utiliza Matlab como índice de performance (FIT) es la siguiente:

$$FIT = \left(1 - \frac{|y - y'|}{|y - y'|} \right) \times 100\% \quad (3-17)$$

Donde:

Y Salida medida

Y' Salida estimada

Este índice corresponde a las variaciones de la salida real que son reproducidas por el modelo. Un número más cercano a 100 % significa un mejor modelo. Para los modelos estimados se obtuvieron los índices de performance que se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Validación de FIT ARMAX y ARX

Estructura	na	nb	nc	nk	FIT %	FPE
ARX	3	4	0	0	94.16	1.1541
ARMAX	2	2	2	0	90.12	1.18291
ARMAX	3	3	3	0	94.19	0.97107
ARMAX	4	4	4	0	93.36	0.946264

Se observa que si bien todos los modelos dan una buena estimación, el modelo ARMAX es el que tiene mejor performance.

Para comprobar aún más las propiedades de los modelos estimados se realiza una “verificación cruzada de modelos”. Hasta ahora, varios tipos de modelos han sido identificados: funciones de transferencia, gráficos de repuesta transitoria (impulso) y de repuesta en frecuencia (diagrama de bode).

Si el modelo estimado es correcto, todos los modelos identificados deben ser coherentes entre sí. Se puede comparar la repuesta transitoria obtenida utilizando análisis por correlación con la respuesta que se obtiene del modelo como se muestra en la figura. También se puede comparar las repuestas en frecuencia obtenida por análisis espectral con la repuesta que se obtiene del modelo como se muestra en la figura 3-19.

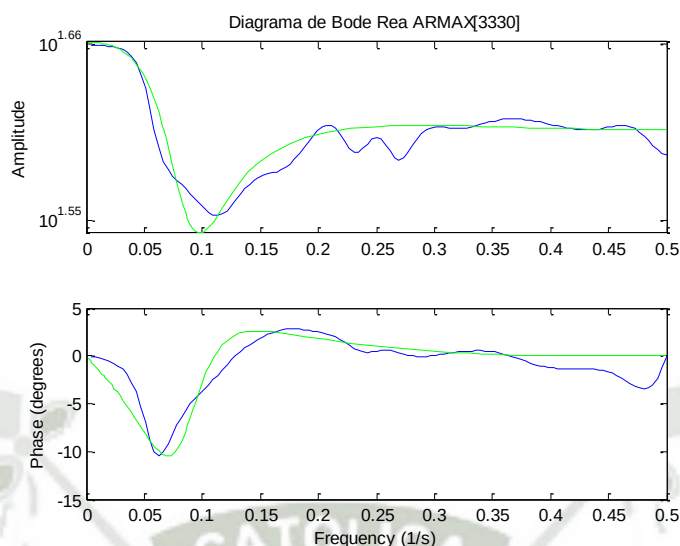


Figura 3-19 Diagrama de Bode ARMAX 3330

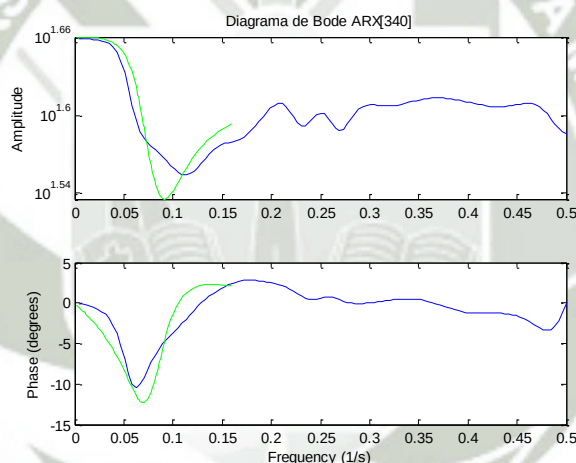


Figura 3-20 Diagrama de Bode ARX 340

Nota: Azul es real y Verde el ARX y ARMAX, según sea la gráfica.

Finalmente, se valida el modelo utilizado “medidas estadísticas “. Si un modelo es una representación valida del proceso, los errores o residuos deben ser estadísticamente independiente de las entradas de excitación. Estos quieren decir que la correlación cruzada entre la entrada y los residuos, no debe ser

significativamente diferente de cero para k diferente de cero. De la misma manera, el auto correlación de los residuos permite verificar si no hay más información posible a modelar. Las gráficas de correlación de cada modelo se muestran de las figuras 3-21 y 3-22.

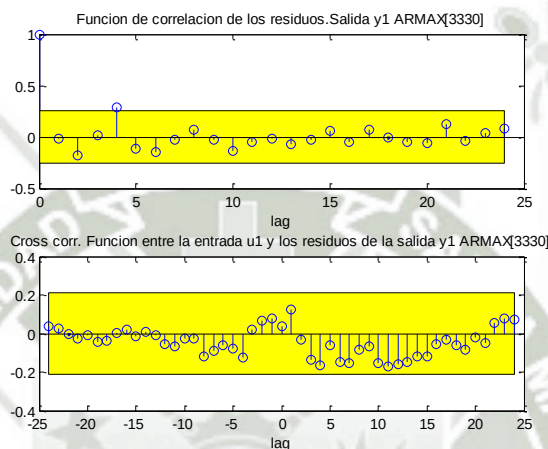


Figura 3-21 Función de correlación de residuos ARMAX 3330.

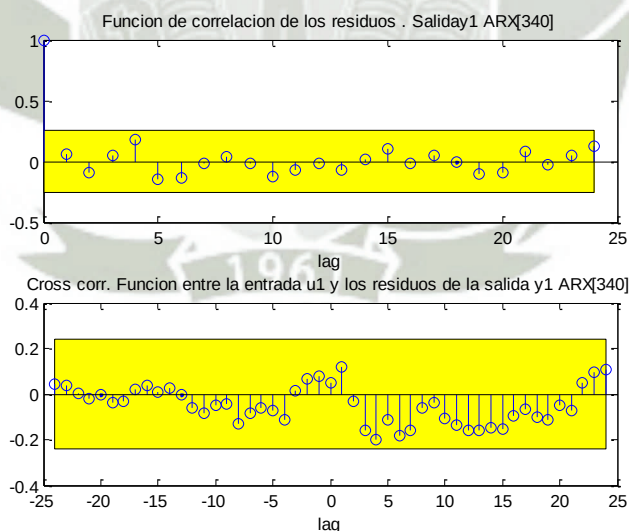


Figura 3-22 Diagrama de Bode ARX 340

De las figuras 3-21 y 3.22 presentadas se pudo apreciar que la estimación de la respuesta al impulso y de la respuesta en frecuencia de los tres modelos queda validada con los modelos no paramétricos obtenidos en frecuencia de los tres modelos queda validada con los modelos no paramétricos obtenidos por la correlación y por análisis espectral. Asimismo con la gráfica de la respuesta transitoria se confirma el valor del retardo de tiempo de 20 seg.

Sin embargo, se observa que los errores residuales de ambos modelos ARX y ARMAX, se encuentran correlacionados alrededor de un desplazamiento de 100 muestras. Esto es un indicador que es recomendable utilizar una estructura que emplee un molde de ruido "coloreado" para modelar la perturbación, en lugar de un modelo de ruido coloreado utilizando un filtro de media móvil.

Por esta razón, cuando se aplica la prueba de autocorrelación de errores residuales al modelo ARMAX [3 3 3 0], la gráfica que no están correlacionadas en un intervalo de confianza de 94.19%. También se observa que los errores residuales tampoco se encuentran correlacionados con la entrada a la planta.

Con esto se finaliza el proceso de validación y selección de modelo, y por las razones expuestas se elige el modelo de ARMAX [3 3 3 0] cuyas principales características presentan a en las siguientes figuras 3-23, 3-24, 3-25, 3-26.

Con características:

- Diagrama de Cero y Polos.

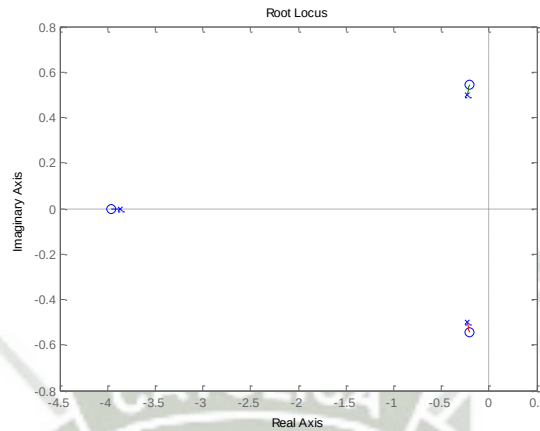


Figura 3-23 Diagrama de Ceros y Polos ARMAX3330

- Respuesta frente al impulso.

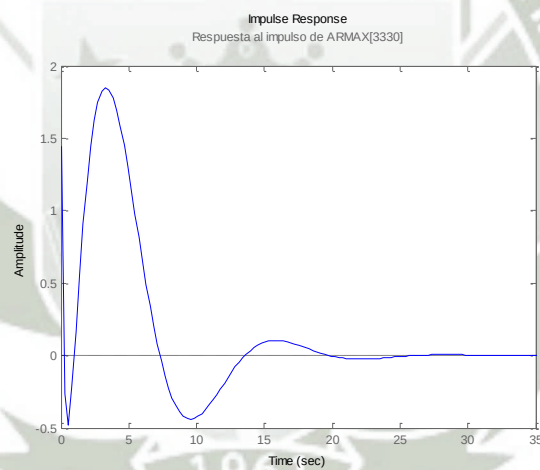


Figura 3-24 Diagrama respuesta al impulso ARMAX 3330

- Respuesta frente a escalón.

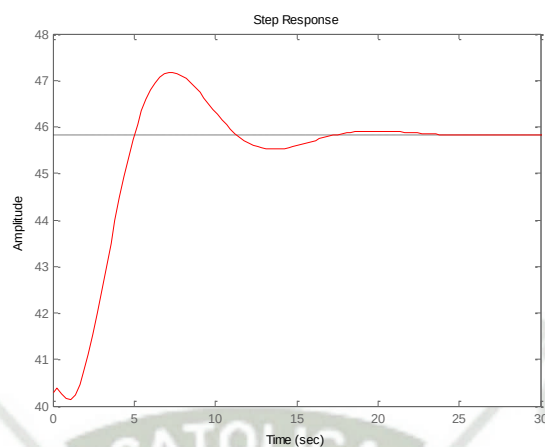


Figura 3-25 Respuesta al escalón ARMAX3330

- Diagrama de Bode.

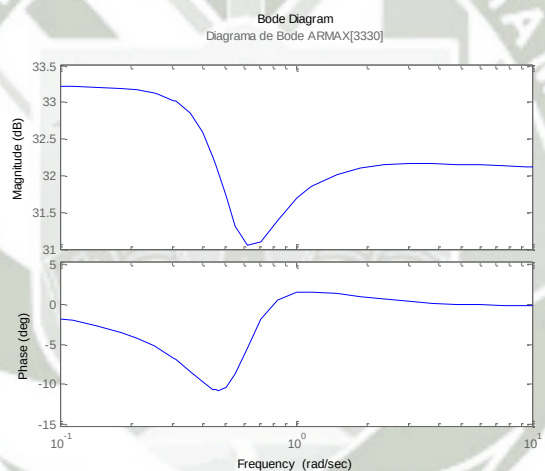


Figura 3-26 Diagrama de Bode ARMAX 3330

- Función transferencia ARMAX[3330].
- Resultado MATLAB.

$$\exp(-13 \cdot z) * \frac{0.003246 z^3 + 0.1782 z^2 + 33.62 z + 222.8}{s^4 z + 7.768 s^3 z + 8.516 z + 4.894}$$

- Expresión matemática.

$$Ft(z) = \frac{0.003246 z^3 + 0.1782 z^2 + 33.62 z + 222.8}{z^3 + 7.7768 z^2 + 8.516 z + 4.894} (e^{-13 z}) \quad (3-18)$$

Tenemos un modelo estable amortiguado que posee elevada ganancia de estado estacionario al tener su único cero en una posición muy buena alejada del círculo unitario. El repuesto escalón lo confirma.

El modelo ARMAX cuenta con la siguiente estructura:

ARMAX 3330:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) = b_1 u(t-1) + b_2 u(t-2) + e(t) + c_1 e(t-1) + c_2 e(t-2)$$

Como se ha visto en el modelo ARMAX 3330, la transferencia hacia la salida proviene de dos fuentes: la señal de entrada (modelo determinístico) y las perturbaciones que estadísticamente pueden modelarse como un ruido filtrado (modelo estocástico). A partir de este modelo, se pueden obtener las respectivas funciones de transferencia en tiempo continuo utilizando el método de zoh, como se muestra.

$$Ft(s) = \frac{40.2498 s^3 + 50.9226 s^2 + 23.8275 s + 10.9582}{s^3 + 1.2907 s^2 + 0.58778 s + 0.23941} \quad (3-19)$$

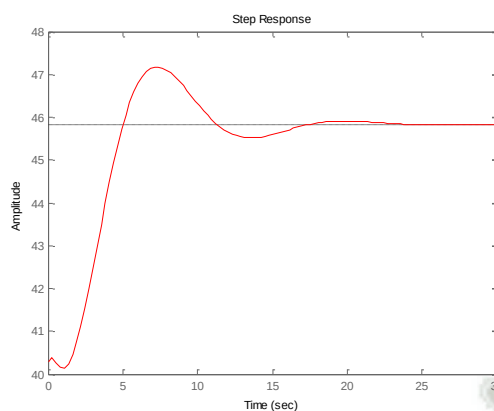


Figura 3-27 Función transferencia adquirida de ARMAX 3330

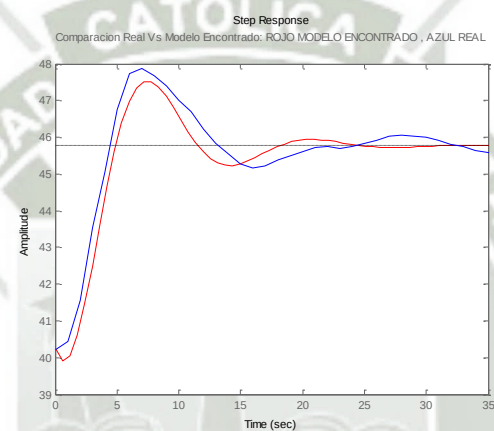


Figura 3-28 Función transferencia adquirida de ARMAX 3330 vs data2 (Muestreo)

Se realiza el ajuste de función adquirida

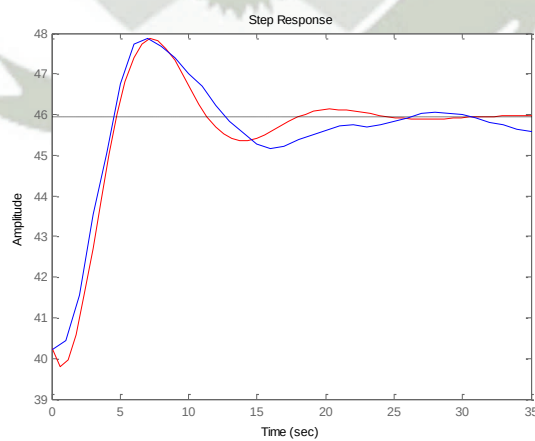


Figura 3-29 Respuesta al impulso final

Nota: Azul real muestreo, y Rojo el modelo encontrado. Se ajusta valores obtenidos

Función utilizada y ajustada:

$$Ft(s) = \frac{40.25 + 50.6 S^2 + 24 S + 11}{S^3 + 1.2907 S^2 + 0.58778 S + 0.23941} \quad (3-20)$$

3.3 Controlador PID-FUZZY en cascada, para proceso de refrigeración Amoniaco –

Glicol (control primario o interno):

El control en cascada puede utilizarse cuando existen varias señales de entrada y una sola variable de control. Se construye anidando los lazos de control, como se muestra en la Figura 3-30, donde C_p hace referencia al controlador primario, u es la variable de control, P_1 y P_2 indican las diferentes dinámicas de la planta, la variable y_{sp} indica la señal de referencia, y es la variable controlada. Además, el control en cascada emplea una señal de entrada secundaria y_s y también un controlador secundario realimentado C_s .

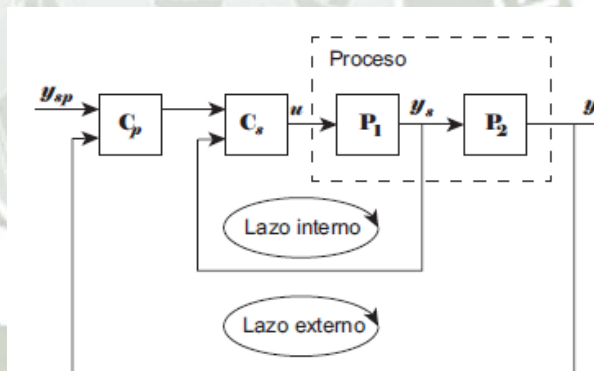


Figura 3-30 Diagrama de bloques de un sistema con control en Cascada

La entrada secundaria detecta la condición de error más rápido que la variable controlada y . Dicho controlador también es usado cuando las perturbaciones son asociadas con la variable controlada o cuando el elemento final de control presenta un comportamiento no lineal (Seborg, 2004).

El control en cascada es ampliamente utilizado en los procesos industriales (Seborg, 2004) y tiene dos características principales:

- La señal de salida del controlador primario C_p (a veces llamado maestro) sirve como set point para el controlado secundario C_s (a veces llamado esclavo).
- Los dos controladores realimentados son anidados, es decir, el lazo de control secundario (a veces llamado lazo interno) está localizado dentro del lazo de control primario (a veces llamado lazo externo).

De Figura 3.30, muestre el diagrama general, de este diagrama:

- P_1 = Es el Proceso de compresión y condensación del proceso de refrigeración Amoniaco en corporación.
- P_2 = Proceso de intercambiador de calor Amoniaco-Glicol.
- C_s = Controlador Secundario, este controlador tiene como función el control de capacidades de compresor de reciprocante o de pistón, mediante la presión de succión. Donde Y_s =presión
- C_p = el control primario, es lo que se diseñara en el próximo punto, este control tiene como variable de retroalimentación la variable de temperatura, el cual aportara el setpoint del controlador secundario o interior, donde y = temperatura de glicol.

3.3.1 Control interno existente:

Los compresores recíprocos cuentan con control interior el cual está basado en un control Fuzzy, actúa en el sistema de activación de plato del cuerpo del pistón para que este entre en capacidad.

El error realimentado e , es

$$e = P_{ref} - P_{tk} \quad (3-21)$$

Donde P_{ref} es la presión deseada del lecho y P_{tk} es la presión al interior del tanque evaporite. La salida del comando la capacidad del compresor recíproco.

Al igual que se probaron diferentes cantidades de conjuntos difusos, y empíricamente se observó que 7 conjuntos difusos para el error y 7 conjuntos difusos para el incremento del error presentaban el mejor desempeño. En consecuencia da como resultado 49 reglas difusas. Las funciones de pertenencia se presentan en la figura 3-31 nominadas Negativo Grande (NG), Negativo Mediano (NM), Negativo pequeño (NP), cero (CE), Positivo Pequeño (PP), Positivo Mediano (PM) y Positivo Grande (PG) y las reglas difusas respectivas se muestran en la Tabla 3-10.

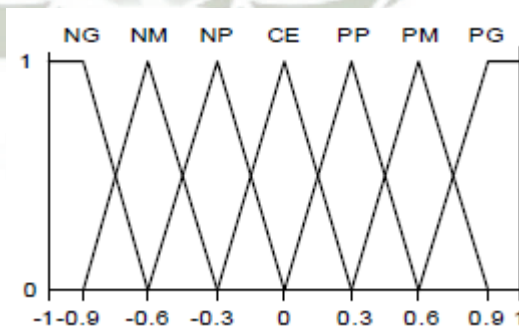


Figura 3-31 Conjuntos difusos para el error y el incremento

- **CONTROLADOR DIFUSO PROPORCIONAL PREALIMENTADO (CDPP):**

El CDPP se muestra en la Fig. 3-32, donde se combina un lazo de control proporcional más un control realimentado. Dado que la no linealidad en la presión de referencia incide en forma importante sobre la dinámica del proceso, se pre alimenta esta variable.

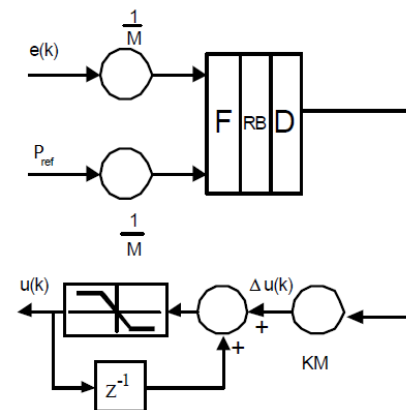


Figura 3-32 Esquema del controlador difuso proporcional

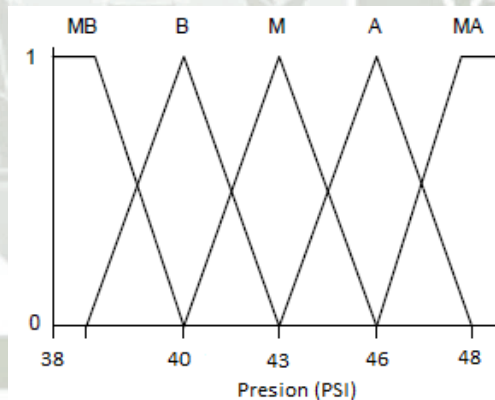


Figura 3-33 Diagrama serrucho de activación de capacidades de compresores pistón

En total el controlador está conformado por 35 reglas difusas. Es así como el error está conformado por las siete funciones de pertenencia de la figura 3-33. La presión de referencia está asociada con 5 funciones de pertenencia

(ver figura 33): Muy Bajo (MB), Bajo (B), Medio (M), Alto (A) y Muy Alto (MA). Las 35 reglas difusas resultantes activan 7 “singletons” denominados: Mucho Más Bajo (MMB), Muy Bajo (MB), Bajo (B), Medio (M), Alto (A), Muy Alto (MA) y Mucho Más Alto (MMA).

Tabla 3.10 Reglas difusas del controlador PP difuso

$\begin{matrix} e \\ p_{ref} \end{matrix}$	NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
MB	MMB	MMB	MB	MB	B	A	MMA
B	MMB	MB	MB	B	M	MA	MMA
M	MMB	MB	B	M	A	MA	MMA
A	MMB	MB	M	A	MA	MA	MMA
MA	MMB	B	A	MA	MA	MMA	MMA

En el apartado anterior cuando se encontró la función de transferencia del proceso de refrigeración de Amoniaco- Glicol (P1-P2, Lazo interior):

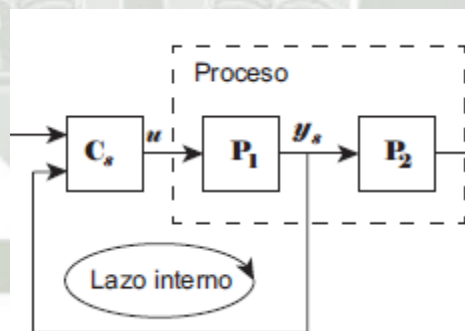


Figura 3-34 Bloque de Función transferencia hallada experimentalmente

Como se observó en la figura 3-35, se tiene como rango en él y (presión), 40 a 48 psi, esta función la desplazaremos desde 0 a 8 psi, por lo que la función de transferencia será:

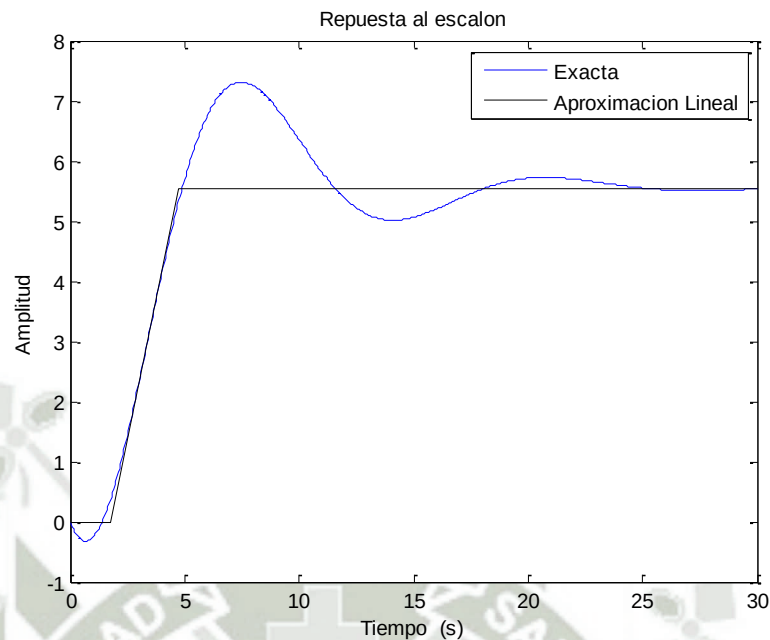


Figura 3-35 Función de transferencia trasladada a 0 a 8

La función desfasada hacia el punto cero como comienzo.

$$Ft(s) = \frac{-0.954 S^2 + 0.2329 S + 1.287}{S^3 + 1.262 S^2 + 0.5759 S + 0.2316} \quad (3-22)$$

Comparación de parámetros en relación de la nueva función de transferencia a la función obtenida del muestreo.

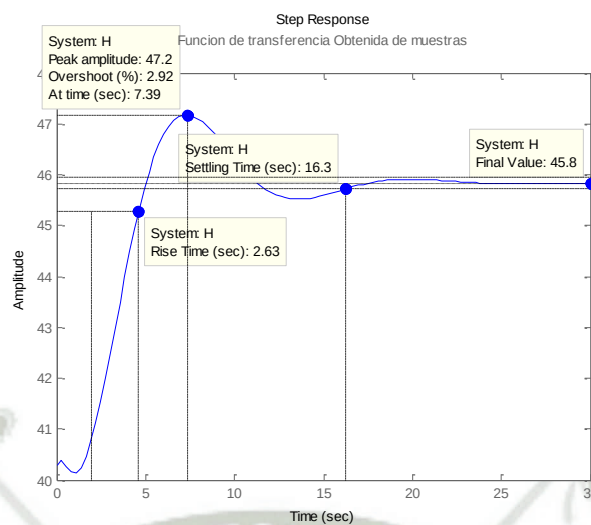


Figura 3-36 Parámetros de función de transferencia encontrada

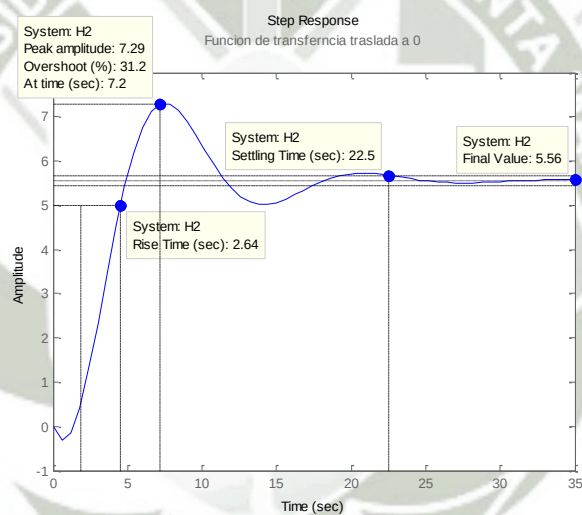


Figura 3-37 Parámetros de función para el análisis de PID, trasladado a partir de cero

3.4 Descripción de equipos:

3.4.1 Diagrama general del proyecto final:

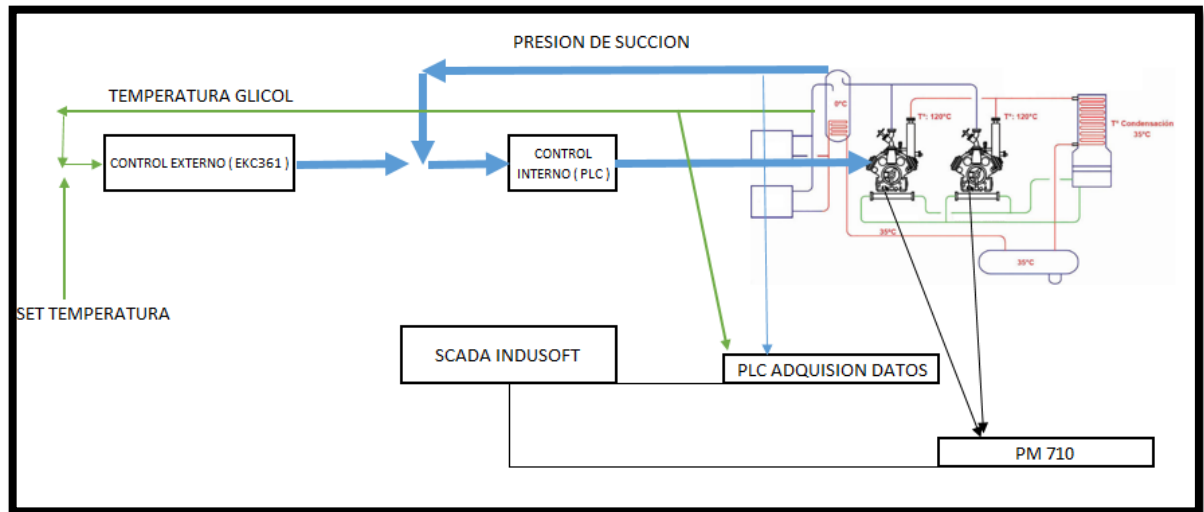


Figura 3-38 Proyecto Final

3.4.2 PLC 1200 Siemens:

El PLC nos permitirá poder enlazar algunas alarmas las cuales activaran un sirena para poder indicar alguna anomalía, es por ello que se tomó la decisión de escoger el controlador Siemens 1200, ya que este cuenta con muchas gamas de módulos y su interface de programación es simple con mucha precisión, el controlador se enlazará con la red mediante profinet para poder obtener la información de presión y temperatura de sistema de refrigeración en sistema SCADA.

3.4.2.1. Comunicación:

Ethernet es un estándar de redes de área local para computadores con acceso al medio por detección de la onda portadora y con detección de colisiones (CSMA/CD). Su nombre viene del concepto físico de Ether. Ethernet define las

características de cableado y señalización de nivel físico y los formatos de tramas de datos del nivel de enlace de datos del modelo OSI.

Ethernet se tomó como base para la redacción del estándar internacional IEEE 802.3, siendo usualmente tomados como sinónimos. Se diferencian en uno de los campos de la trama de datos. Sin embargo, las tramas Ethernet e IEEE 802.3 pueden coexistir en la misma red.

3.4.3 Medidores de energía PM710:

El medidor multifunción PM710 ofrece toda la capacidad requerida para monitorear una instalación eléctrica.

Con su display se puede monitorear las tres fases y el neutro al mismo tiempo, la figura 3-39 muestra el aspecto físico del medidor. El display es anti deslumbramiento y muestra las mediciones con letras de 11mm de altura lo que hace posible ver las magnitudes sin dificultad desde cualquier ángulo.



Figura 3-39 Medidor PM710 de Schneider Electric

El medidor multifunción PM710 incluye un amplio rango de características estándar, se presentara una lista de las principales funciones del equipo y el apartado anexo se está dejando el manual para una consulta más detallada. La tabla 3-11 muestra una vista de las características más importantes.

Tabla 3.11 Medidor Características del medidor trifásico PM710 (Schneider)

Analizador Multifuncional Trifásico PM710	
Precisión del analizador	0,5% de la lectura de 20% a 120% tensión y corriente
	1% para potencia
Medida básica de calidad de suministro	Armónicos (hasta el 15 %).
	Niveles de THD en tensión e intensidad
	Etiquetado temporal de máxímetros y mínímetros.
Reloj de tiempo real	Función de reloj
Alarma y control de funciones	Memoria no volátil para registro de mínimos y máximos.
Fuente de alimentación	De 100 a 415 $\pm 10\%$ V CA, 5 VA; de 50 a 60 Hz
	De 125 a 250 $\pm 20\%$ V CC, 3 W
Protocolos de comunicación	2 hilos, 2.400, 4.800, 9.600 o 19.200 baudios; Paridad — Par, Impar, Ninguna; 1 bit de parada; Modbus RTU
Módulos adicionales	Salida y entrada de pulsos para energía activa y reactiva, comunicación Modbus. (ambos según modelo)
Medidas	Tensión (con neutro), corriente (con neutro), frecuencia, potencia activa-reactiva-aparente y factor de potencia.
Montaje	Panel de doble montaje: Redondo 4 "; Cuadrado de 96x96 DIN.

3.4.4 Pasarela EGX100 Schneider (TSXETG100):

Para poder transformar la información obteniendo de los medidores se debe contar con una pasarela, la cual se escogió la Schneider ya que los medidores seleccionados son de la misma marca, para evitar invertir mayor tiempo en la conexión de entre ellos.

La EGX100 es un dispositivo de comunicación que ofrece conectividad entre Ethernet (Modbus TCP/IP) y dispositivos en línea serie, permitiendo que los clientes Modbus TCP/IP accedan a la información desde dispositivos esclavos en serie. También permite que los dispositivos maestros serie accedan a información desde dispositivos esclavos serie distribuidos en una red Ethernet, en la figura 4.3 se muestra el aspecto físico del equipo.

El equipo muestra las siguientes características dentro de su página web de configuración y diagnóstico, y se muestra en la siguiente tabla 3-12:

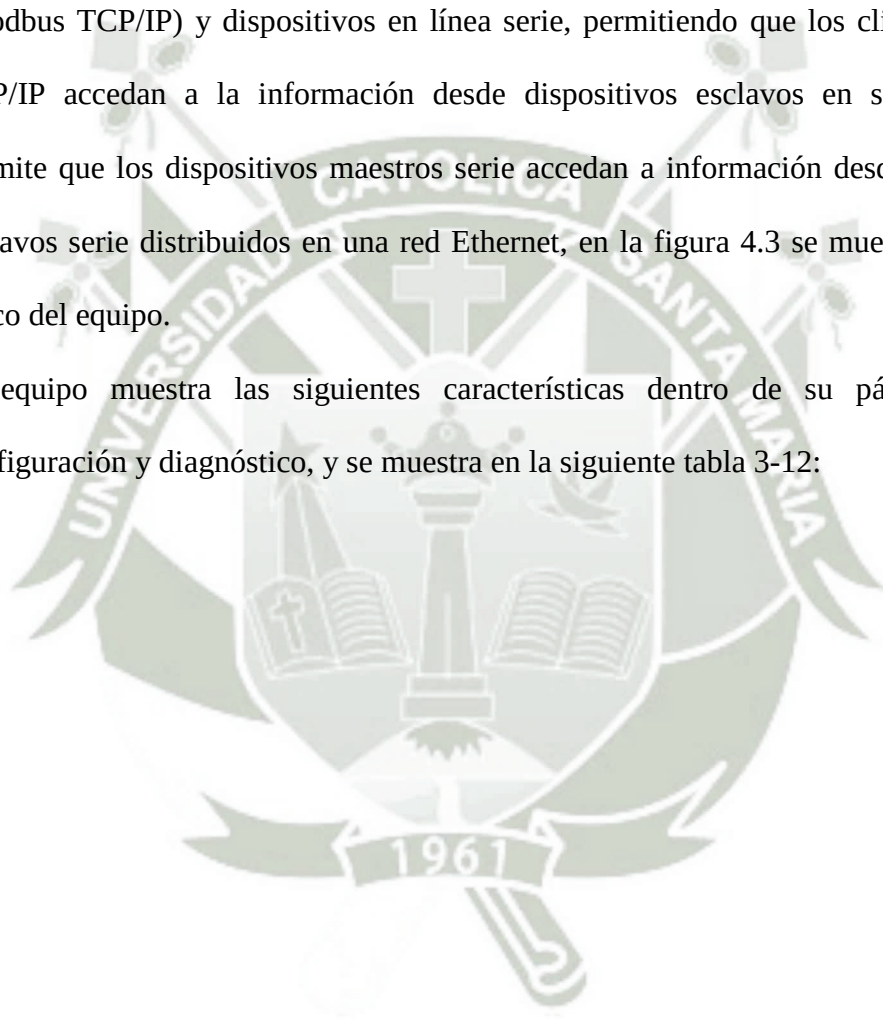


Tabla 3.12 Características Gateway TSXETG100 (Gateway)

Gateway TSXETG100 de Schneider Electric	
Configuración	Configure los parámetros de las comunicaciones Ethernet y TCP/IP.
	Configure o cambie los parámetros de las comunicaciones serie.
	Identifica los dispositivos conectados en el bus de comunicaciones serie.
	Cree y modifique nombres de grupo, nombres, introduzca contraseñas, seleccione grupos y seleccione el idioma para las cuentas de usuario.
	Seleccione los derechos de acceso a las páginas Web para cada grupo de usuarios.
	Configure las direcciones IP que pueden acceder a la ETG a través de Modbus TCP/IP.
	Habilite y configure el Protocolo simple de administración de redes (SNMP), que permite que la ETG se identifique a otros dispositivos de red que solicitan datos SNMP.
Diagnostico	Muestra datos de diagnóstico que se utilizan para resolver problemas de la red. Esta página contiene también información acerca de su ETG específica, incluido el número de serie, la fecha de fabricación y la dirección de control de acceso de medios (MAC).
	Permite que los administradores de la ETG lean los datos de registro de un dispositivo serie conectado a la ETG.



Figura 3-40 Gateway o Pasarela TSXETG100 de Schneider Electric.

3.4.5 Controlador EKC 361 DANFOSS:

Aplicaciones El controlador y la válvula se utilizan cuando existen requerimientos estrictos en cuanto a la medida de temperatura del medio. Por ejemplo en:

- Cámaras para frutas y productos comestibles.
- Sistemas de refrigeración.
- Industria alimentaria.
- Procesos de enfriamiento de líquidos.

Ventajas:

- La temperatura se mantiene con una precisión de $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ o menos después de un periodo transitorio.
- La temperatura del evaporador se mantiene lo más alta posible, de esta forma, la humedad del aire es alta y se limitan las pérdidas de peso de los alimentos.
- El periodo transitorio se puede controlar con la función adaptativa.

Se puede seleccionar:

- Enfriamiento rápido donde están permitidas las oscilaciones sobre la referencia.
- Enfriamiento menos rápido donde las oscilaciones son menos pronunciadas.
- Enfriamiento sin oscilaciones sobre la referencia.
 - o Regulación PID
 - o Limitación de la temperatura de evaporación p_0 .

Funciones:

- Control modulante de la temperatura.
- Entrada ON/OFF para arranque/parada de regulación.

- Alarma cuando los valores límites de alarmas se sobrepasan.
- Relé de salida para ventilador.
- Relé de salida para válvula solenoide.
- Señal de entrada capaz de desplazar la temperatura de referencia.
- Señal de salida que permite mostrar la temperatura en una pantalla.

Opciones:

- Sensor de entrada para monitorización de temperaturas.
- Operación con PC El controlador se puede proveer con comunicación de datos, con lo cual puede ser conectado con otros productos de la línea ADAP-KOOL® de Danfoss. Operación, monitorización y almacenamiento de datos se pueden realizar desde un PC.
- Bien instalado en la misma planta o bien en la compañía de mantenimiento.

Funciones Control de temperatura muy preciso Con este sistema donde el controlador, la válvula piloto y la válvula principal han sido adaptados para una utilización óptima de la planta, los productos refrigerados pueden permanecer almacenados con fluctuaciones de temperatura inferiores a $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$. Humedad del aire alta Como la temperatura de evaporación siempre es lo más alta posible con pequeñas fluctuaciones de temperatura y se adapta constantemente, las fluctuaciones en la humedad relativa del aire en la cámara se mantendrán al máximo. El secado de los productos es mínimo. La temperatura requerida se alcanza rápidamente Con la utilización del control PID y la posibilidad de elegir entre tres fenómenos transitorios, el controlador puede adaptarse a las temperaturas óptimas para cada tipo de planta de refrigeración. •

- Enfriando lo más rápido posible • Enfriando con menos oscilaciones sobre la referencia
- Enfriando sin oscilaciones sobre la referencia.

Limitación de la temperatura de evaporación p_0 El Lazo de Control Principal mencionado arriba también colabora en que la presión de evaporación permanezca en unos límites fijos. De esta forma el sistema se salvaguarda contra temperaturas de aire demasiado bajas. Esto ofrece las siguientes ventajas: - Sistemas de alta temperatura se pueden conectar con compresores de baja temperatura.

- Protección contra hielo en el evaporador.
- Protección contra congelación en enfriadores de líquido.

3.4.6 Sensor de presión:

Para el control de la presión y monitoreo se utiliza un transmisor de presión de 0 a 10 bares de presión con salida 4-20 mA, el cual enviara señal al PLC para ser monitoreada en sistema Scada:



Figura 3-41 Medidor de presión MB 3000

MARCA	Danfoss
MODELO	MB 3000 - 060G1136
SALIDA SEÑAL	4-20 mA
CONEXIÓN	1/4 NPT

3.4.7 Sensor temperatura:

Como se mencionó el sistema de controlador EKC 361 cuenta con un traductor de temperatura el cual me permite solo conectar la PT 1000 al controlador, PT 1000 utilizada es AKS 21 de marca Danfoss, la cual cuenta con las siguientes características:

Tabla 3.13 Variación resistencia de PT 1000

Resistance values, Pt 1000 ohm

°C	°F	Ohm	°C	°F	Ohm
0	32.0	1000.0	0	32.0	1000.0
1	33.8	1003.9	-1	30.2	996.1
2	35.6	1007.8	-2	28.4	992.2
3	37.4	1011.7	-3	26.6	988.3
4	39.2	1015.6	-4	24.8	984
5	41.0	1019.5	-5	23.0	980.4
6	42.8	1023.4	-6	21.2	976.5
7	44.6	1027.3	-7	19.4	972.6
8	46.4	1031.2	-8	17.6	968.7
9	48.2	1035.1	-9	15.8	964.8
10	50.0	1039.0	-10	14.0	960.9
11	51.8	1042.9	-11	12.2	956.9
12	53.6	1046.8	-12	10.4	953.0
13	55.4	1050.7	-13	8.6	949.1
14	57.2	1054.6	-14	6.8	945.2
15	59.0	1058.5	-15	5.0	941.2
16	60.8	1062.4	-16	3.2	937.3
17	62.6	1066.3	-17	1.4	933.4
18	64.4	1070.2	-18	-0.4	929.5
19	66.2	1074.0	-19	-2.2	925.5
20	68.0	1077.9	-20	-4.0	921.6
21	69.8	1081.8	-21	-5.8	917.7
22	71.6	1085.7	-22	-7.6	913.7
23	73.4	1089.6	-23	-9.4	909.8
24	75.2	1093.5	-24	-11.2	905.9
25	77.0	1097.3	-25	-13.0	901.9
26	78.8	1101.2	-26	-14.8	898.0
27	80.6	1105.1	-27	-16.6	894.0
28	82.4	1109.0	-28	-18.4	890.1
29	84.2	1112.8	-29	-20.2	886.2
30	86.0	1116.7	-30	-22.0	882.2
31	87.8	1120.6	-31	-23.8	878.3
32	89.6	1124.5	-32	-25.6	874.3
33	91.4	1128.3	-33	-27.4	870.4
34	93.2	1132.2	-34	-29.2	866.4
35	95.0	1136.1	-35	-31.0	862.5
36	96.8	1139.9	-36	-32.8	858.5
37	98.6	1143.8	-37	-34.6	854.6
38	100.4	1147.7	-38	-36.4	850.6
39	102.2	1151.5	-39	-38.2	846.7
40	104.0	1155.4	-40	-40.0	842.7
41	105.8	1159.3	-41	-41.8	838.8
42	107.6	1163.1	-42	-43.6	835.0
43	109.4	1167.0	-43	-45.4	830.8
44	111.2	1170.8	-44	-47.2	826.9
45	113.0	1174.7	-45	-49.0	822.9
46	114.8	1178.5	-46	-50.8	818.9
47	116.6	1182.4	-47	-52.6	815.0
48	118.4	1186.3	-48	-54.4	811.0
49	120.2	1190.1	-49	-56.2	807.0
50	122.0	1194.0	-50	-58.0	803.1

3.4.8 Descripción de interface usuario (Indusoft):

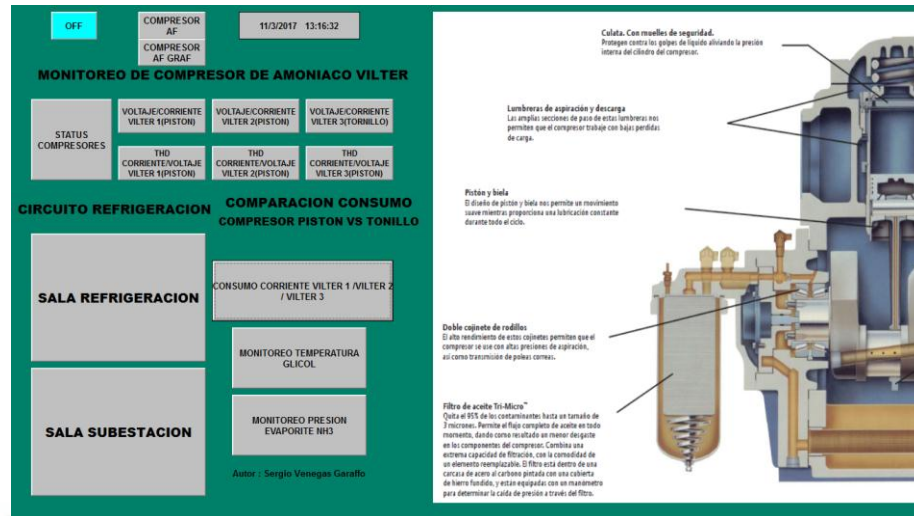


Figura 3-42 Scada Inicio

- STATUS COMPRESOR: Que compresor se encuentra encendido.
- VOLTAJE COMPRESOR: Diagrama de Voltajes de los diferentes compresores Vilter 1 y Vilter 2.
- THD : Tasa de Armónicos de compresores de Amoniaco, Compresores Vilter 1 Vilter 2.
- SALA REFRIGERACION: Scada de sala de refrigeración.
- SALA SUBESTACION: Monitoreo de subestación, llave general.
- CONSUMO DE CORRIENTE: Perfil de carga de corriente de los compresores.
- MONITOREO TEMPERATURA DE GLICOL: Control de monitoreo de temperatura de glicol frio.
- MONITOREO DE PRESION EVAPORITE: Control de presión de tanque evaporador de Amoniaco para succión de los compresores , si esto aumenta

la presión , puede ser un indicador que el tanque se encuentra por el encima de nivel de líquido existente.

3.5. Análisis de costo:

Tabla 3.14 Costo de Proyecto

ITEM	DESCRIPCION DE EQUIPOS Y CIRCUITOS	PRECIOS
1	PLC Siemens 1200	S/. 723.00
2	PM710 Schneider (3)	S/. 750.00
3	Gateway EGX 100	S/. 1,941.00
4	Fuente Gateway EGX 100	S/. 288.00
5	EKC 361	S/. 1,980.00
6	Fuente EKC 361	S/. 300.00
7	PT 1000 Ohm Danfoss	S/. 723.00
8	Sensor de Presión Danfoss MBS 3000	S/. 444.70
9	Módulo de Analógico Siemens	S/. 1,242.00
10	Equipo de sistema Fuentes de 24 Voltios	S/. 288.00
CONSUMO TOTAL soles		S/. 8,679.70

4 CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL EQUIPO



En este capítulo tiene como objetivo el poder diseñar e implementar sistema de monitoreo para poder tener el control y consumo diario de compresores de amoniaco, así mismo poder obtener la capacidad de carga de cada compresor en este sistema de refrigeración.

Para ello se escogió como alternativa el software Indusoft para implementar la plataforma monitoreo Scada, el cual como característica principal e importante de este software es que tiene OPC de muchas marcas y diferente tipo de comunicaciones.

Como información importante que tenemos que obtener y extraer del sistema de refrigeración es el consumo de los compresores y estado de capacidad. Importante es saber el tiempo de uso desde el último mantenimiento para poder llevar el control en plan planificación de los mantenimientos.

Presiones de succión de los compresores y temperatura de salida del intercambio del glicol es información que también es muy importante en este sistema.

4.1. Diseño del Hardware:

4.1.1 Diagrama específico del control en cascada:

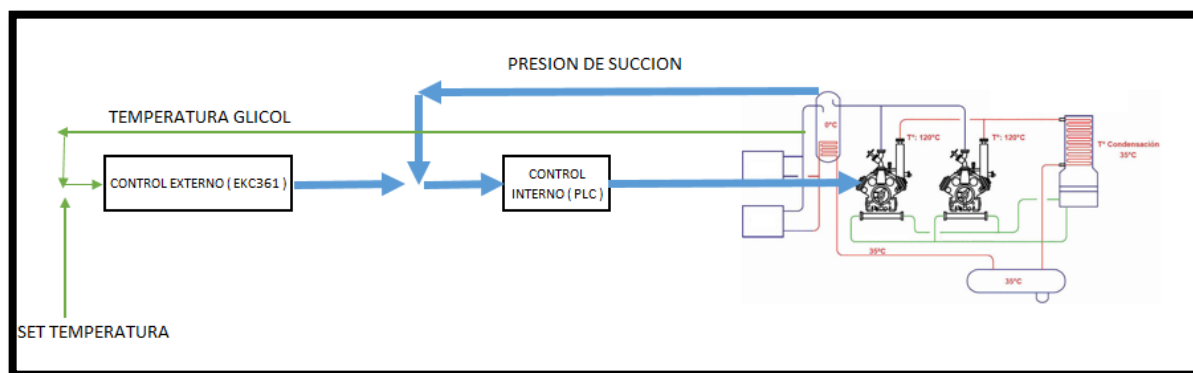


Figura 4-1 Diagrama de Bloques control en cascada final

(Ver Anexo VIII Plano final del proyecto)

4.1.2 Calculo de constantes de controlador PID externo fórmulas de sintonía en lazo cerrado:

Se escoge el segundo método de Ziegler y Nichols que el controlador a utilizar más adelante cuenta con la configuración de lazo cerrado, se realiza el programa para la obtención de parámetros. (Ver Anexo VI programa de Matlab).

kcri o Km =
0.3264
tc =
7.6687

Resultado MATLAB

Resultado Matemático:

$$G_c = \frac{KdS^2 + K S + Ki}{S} \quad (4-1)$$

$$G_c = \frac{0.1789 S^2 + 0.1828 S + 0.04669}{S}$$

Se observa en la función del controlador que: Variables a programar:

$$k_p = 0.1959$$

$$t_i = 3.8343$$

$$t_d = 0.9586$$

$$k_p = 0.6 * k_m; 0.1959 \text{ Proporcionador}$$

$$k_d = (k_p * \pi) / (4 * \omega_m); 0.1877 \text{ Derivador}$$

$$k_i = (k_p * \omega_m) / \pi; 0.0511 \text{ Integrador}$$

4.1.3 Simulaciones:

Simulación de sistema de lazo cerrado sin controlador de temperatura y otra simulación con controlador, la simulación se realiza por medio de Matlab.

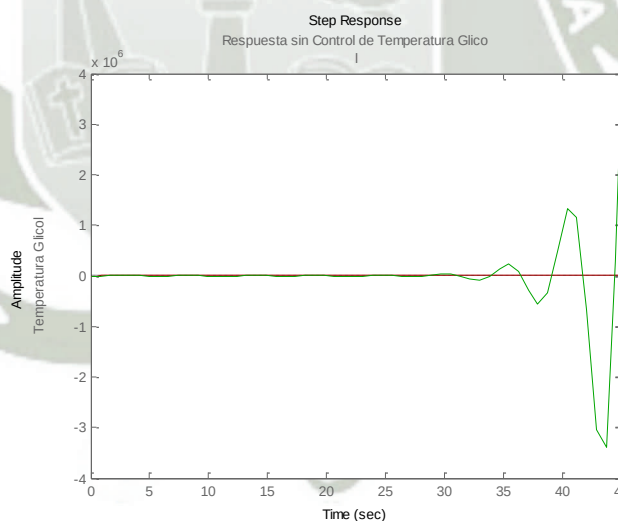


Figura 4-2 Respuesta de temperatura sin Control Cascada

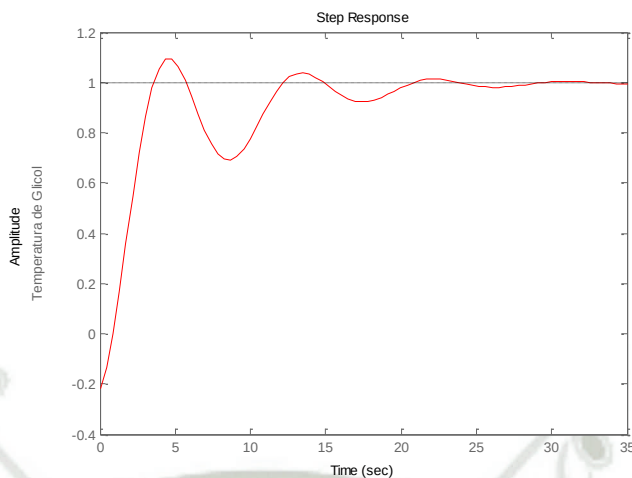


Figura 4-3 Respuesta al escalón con control Temperatura Glicol PID Cascada

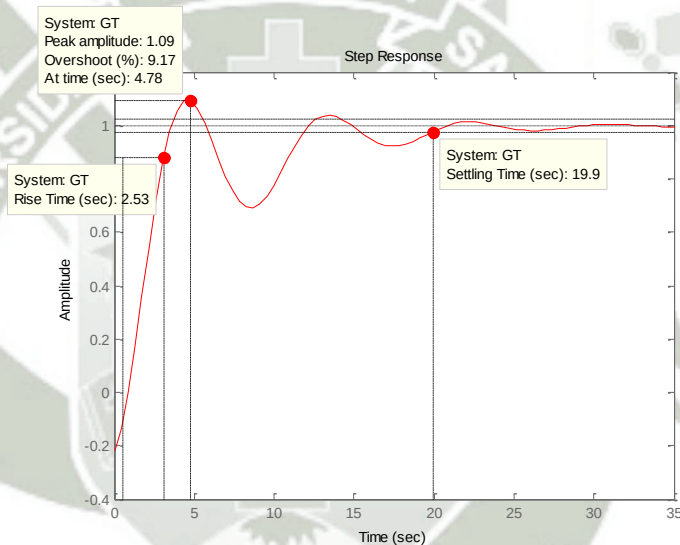


Figura 4-4 Parámetros de respuesta al escalón con control Temperatura Glicol con control PID Cascada

4.1.4 Ingreso parámetros de la sintonización a controlador EKC 361:

EKC 361(Controlador de temperatura de medio).

FUNCION DE CONTROLADOR EKC 361:

$u(t) = e(t) + \frac{60}{Ti} \int_0^t e(t) dt + Td \frac{de(t)}{dt}$	(4-2)
--	-------

De los resultados obtenidos en capitulo anterior se programa el controlador, para ello se debe observar el la ficha técnica del controlador (ver anexo V).

- Se ingresa en los parámetros n04 (P: Factor de amplificación Kp) el valor de =1.
- Se ingresa en los parámetros n05 (I: Tiempo de integración) el valor de = 3.8343x 60= 228.
- Se ingresa en los parámetros n06 (D: Tiempo diferencial Td) el valor de =0.9.

PROGRAMACIÓN DE CONTROLADOR EKC



Figura 4-5 Programación EKC 361

4.1.5 Configuración de la Comunicación en los medidores:

Para este paso se procede según la figura mostrada para el PM710 y si fuera el caso para otro medidor esta conexión también le correspondería. En este punto se debe de tener en cuenta que todos los módulos o analizadores deben de tener los mismos parámetros de velocidad de transmisión o Baudios y Bit de paridad, 19200 y none (sin bit de paridad) respectivamente, en el caso que se tuviera una red de comunicación entre varios equipos, para el caso del presente proyecto se está considerando la configuración mencionada.

En la figura 4-6 se muestra el cableado típico de la interfaz RS-485, se emplea cable de instrumentación de 22AWG de dos hilos con apantallado o cable Belden con longitud máxima de 1000 metros para 32 módulos, Modbus permite la comunicación de hasta 31 módulos esclavos y 1 maestro, en este caso el Gateway, al llegar al último modulo se coloca una resistencia de 200 a 500 ohms o terminal de línea MCT2W-485 de Schneider Electric como se aprecia en la figura 4-6.

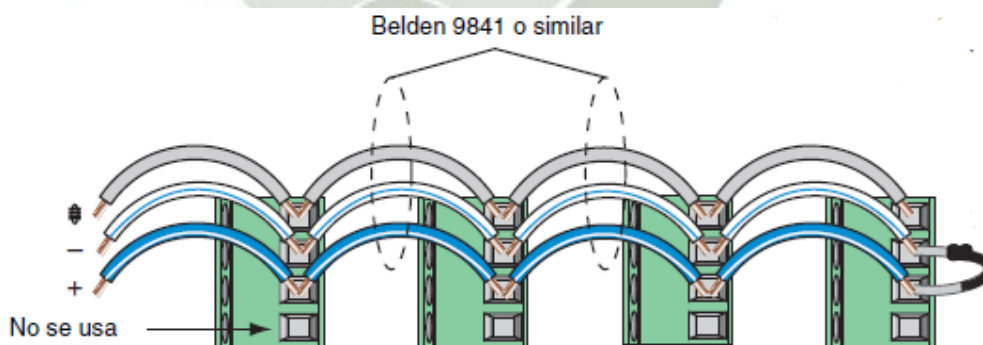


Figura 4-6 Cableado Modbus – RS485 con red de tipo bus (Schneider)

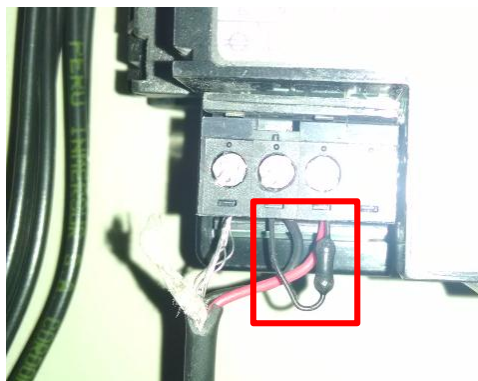


Figura 4-7 Resistencia o terminal de línea.

4.1.6 Configuración del Gateway TSXETG100:

La pasarela de comunicación Modbus RTU a Modbus TCP/IP con página web embebida para visualización y configuración del equipo, da la posibilidad al proyecto de conectar el sistema de monitorización hacia la red de la planta de tal manera que la información puede ser leída y administrada en la oficina de mantenimiento eléctrico.

En la figura 4-9 se muestra los cambios para que coincida con los ajustes realizados al módulo (baudios y bit de paridad), se cambia la IP para que pueda añadirse a la red de la planta y se realizan las pruebas antes del montaje en tablero eléctrico, el procedimiento es sencillo y muestra una página amigable hacia el usuario, es necesario poder conocer la dirección IP del Gateway que por defecto es 169.254.0.10, al no conocer dicha IP existe la posibilidad de poder resetear el dispositivo a los valores de fábrica, con un botón que cuenta el dispositivo en su parte frontal como se muestra en la figura 4-8, o el otro procedimiento es a través de software (por ejemplo IP Scanner) el cual es conectarse al equipo y leer la dirección IP que se le ha asignado.

Para el proyecto se cuenta con el equipo asignado la dirección IP 192.168.232.159 ya que es la que proporciona el área de Sistemas de la planta y no haya inconvenientes al conectarlo a la red.

Este procedimiento es requerido ya que sino no habría enlace entre los medidores y el SCADA, la página web embebida del Gateway facilita la configuración del equipo, pudiendo realizarlo desde cualquier PC de la planta que tenga acceso a la red. La mejora de estos equipos está en poder comunicarse con cualquier elemento controlador, su tecnología permite comunicaciones inalámbricas como bluetooth, wifi o GSM, pudiendo conectarse con dispositivos remotos o con smartphones.

Por lo tanto en las siguientes figuras se describe los pasos seguidos para la configuración del equipo, así como también la configuración del hardware.

Aspecto físico del Gateway TSXETG100 de Schneider Electric para identificar sus indicadores luminosos de funcionamiento, así como los puertos de comunicación y la configuración del protocolo Modbus, figura 4-8. (Gateway).

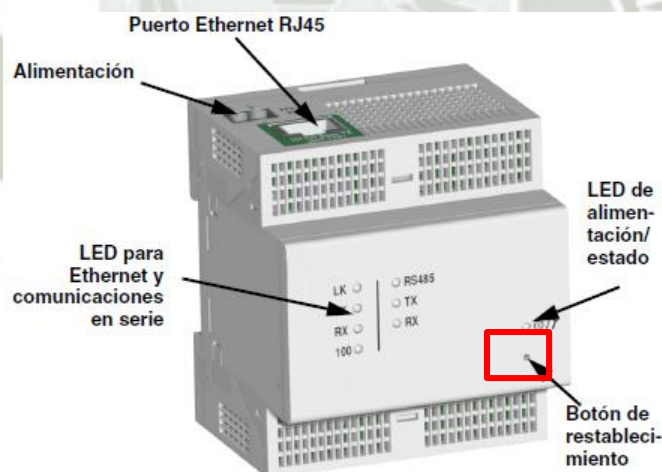


Figura 4-8 Aspecto físico del Gateway TSXETG100

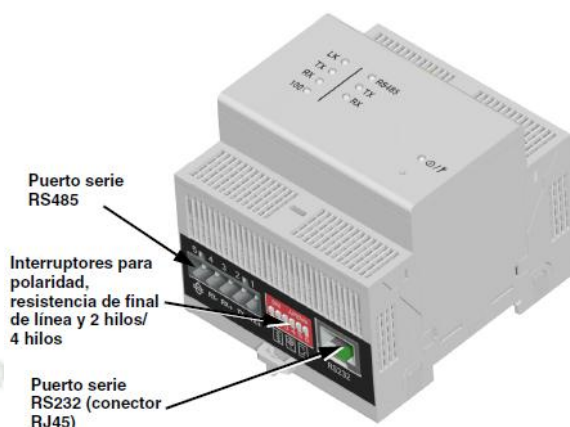


Figura 4-9 Conectividad del puerto serie y Switch de configuración.

Configuración de la IP de la PC, asignando una que se encuentre en la red del Gateway como se aprecia en la figura 4-10, luego se confirma la conectividad y la dirección IP asignada al equipo ingresando a la ventana de comando y realizando PING a la dirección IP del Gateway, tal como se observa en las figuras 4-11y 4-12 obteniéndose el resultado de confirmar la conectividad:

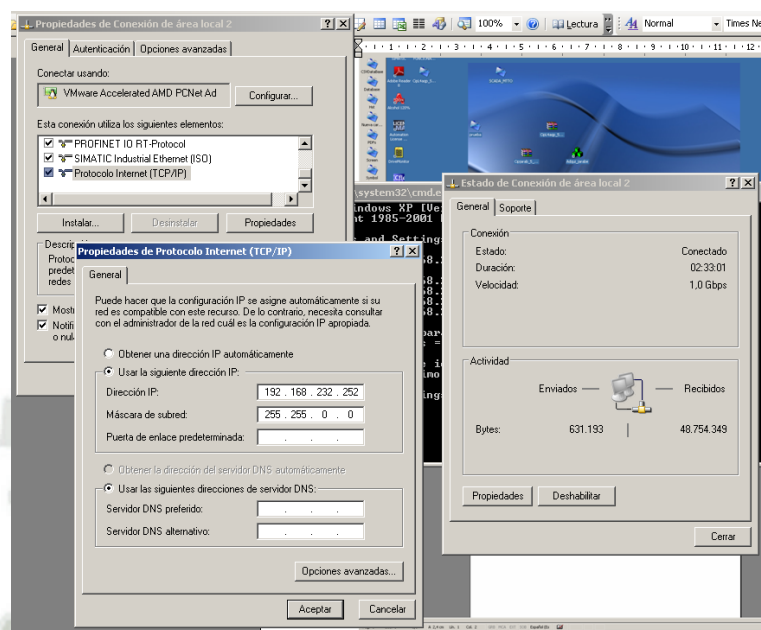


Figura 4-10 Dirección IP de la máquina para el proyecto, 192.168.232.252

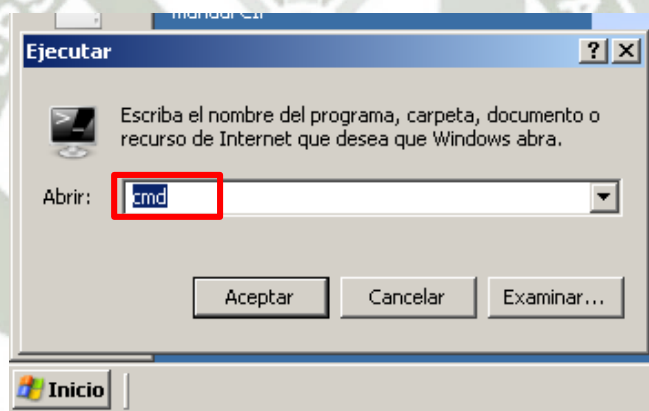


Figura 4-11 Ingreso ventana de comandos de Windows.

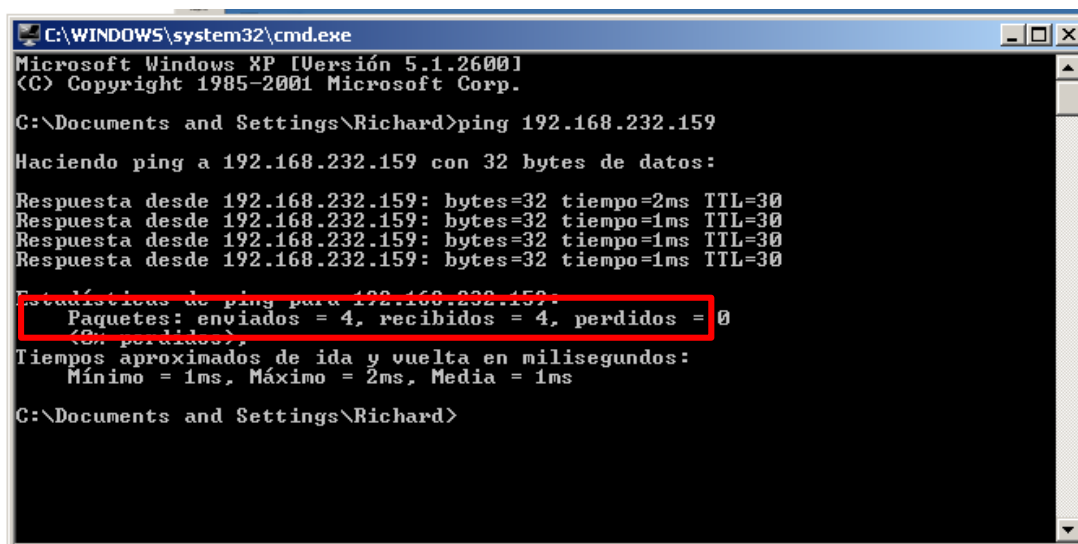


Figura 4-12 Confirmar la conectividad y la IP 192.168.232.159 del Gateway

Conociendo la dirección IP del Gateway y habiendo establecido comunicación con el mismo, es factible entrar a la página embebida y proceder con la configuración para que los parámetros coincidan con el monitor de energía, figura 4-13:

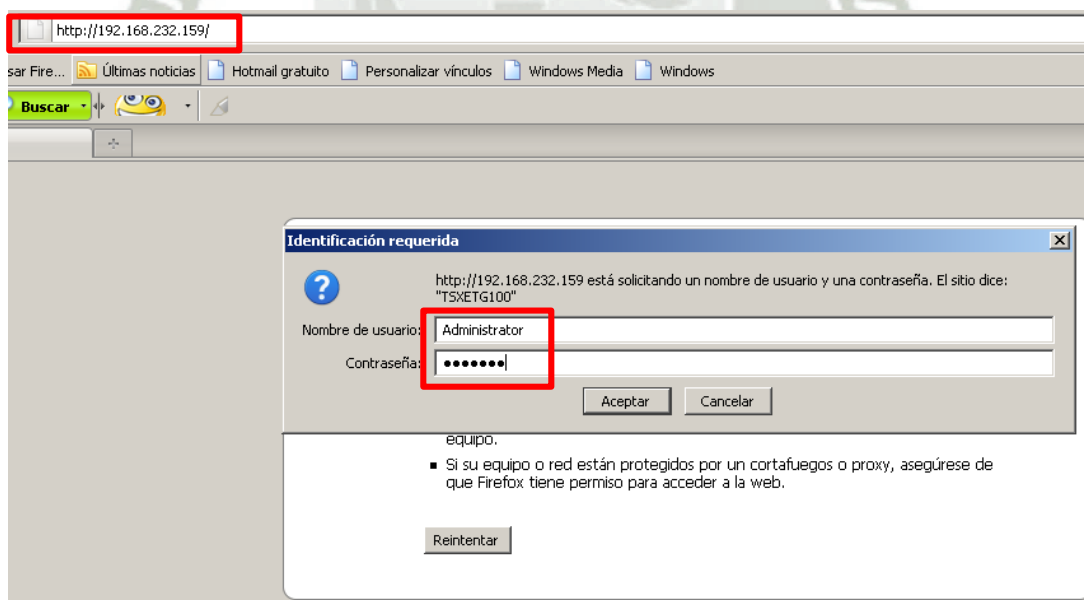


Figura 4-13 Web embebida del Gateway a través del explorador de internet.

Las siguientes ventanas en las figuras 4-14, 4-15 y 4-16 corresponden a la configuración del Gateway, solo dos pestañas activas donde Diagnostic permite observar el comportamiento de los equipos Modbus, se tiene en cuenta los registros de los equipos. En Setup se procede a la configuración.

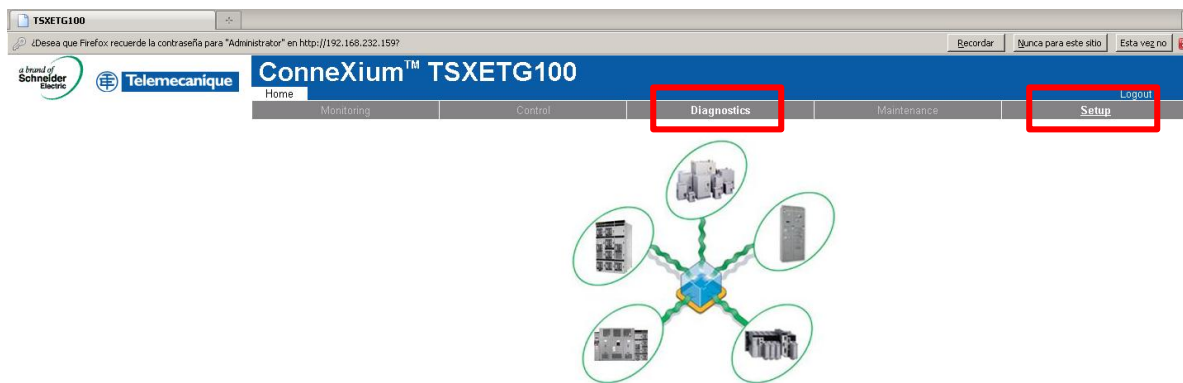


Figura 4-14 Ventana principal del Gateway

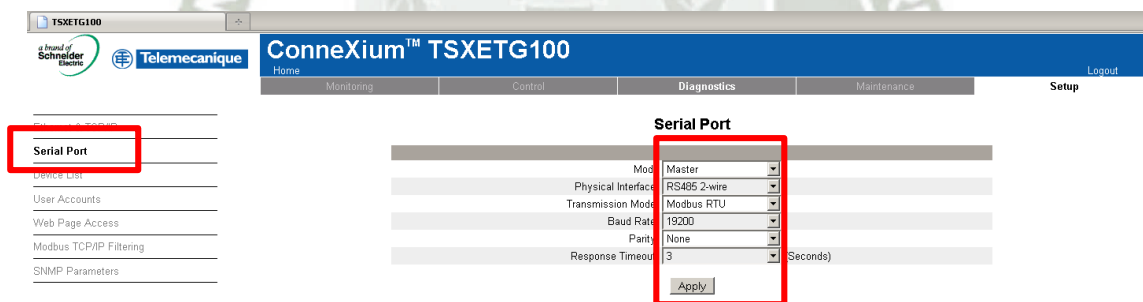


Figura 4-15 En Setup se selecciona Serial Port, para configurar la conexión RS-485

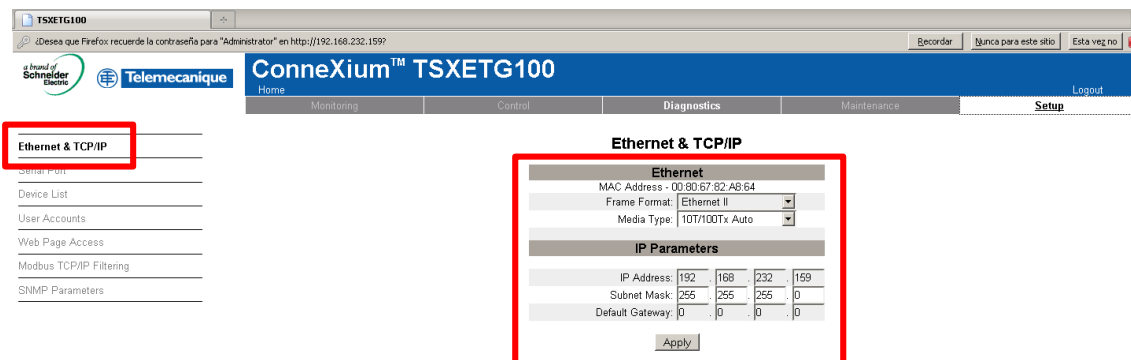


Figura 4-16 En Ethernet & TCP/IP se designa la dirección IP del Gateway

Para la configuración del hardware indicando si es de 2 o 4 hilos se tienen en cuenta los Switch en las figuras 4-17 y 4-18, y en la figura 4-19 se observa Gateway y fuente de alimentación montados en el tablero:

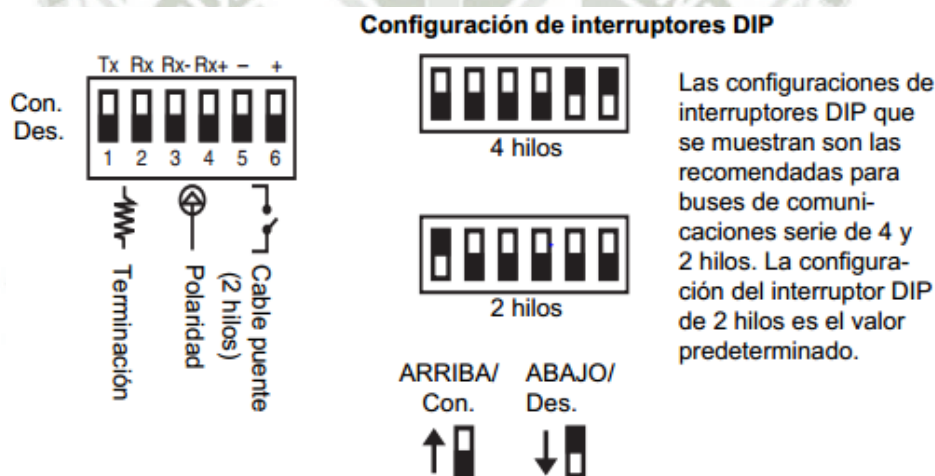


Figura 4-17 Configuración de la comunicación a 2 hilos de Modbus RTU (Gateway)



Figura 4-18 Gateway con la configuración de dos hilos



Figura 4-19 Gateway montado en tablero eléctrico

4.1.7 Resumen configuración equipos de adquisición de datos:

Debemos obtener la información mediante dispositivos los cuales deberán tener un tipo de comunicación para poder transmitir la información y ser traducida en la pantalla de PC. (Ver anexo, para ver paso a paso de programación de Scada).

Primero se instalaron equipo medidores de energía PM710 Schneider, estos equipos se comunican mediante MODBUS, por lo que se instalaron 3 equipo en sala de refrigeración ya que se cuenta con 2 compresores, como se sabe la comunicación MODBUS es la parte física de la transmisión de datos, en la capa superior el protocolo de comunicación es TCP/IP, por lo que se debe tener una pasarela para poder transmitir la información a la sala de control. Para lo cual se configuro un GATEWAY EGX100, esta pasarela o compuerta nos permitirá poder trasmitir a mayor distancia ya que la pasarela se configuro con una IP (192.169, 232,159) en la figura se muestra la instalación de tablero.

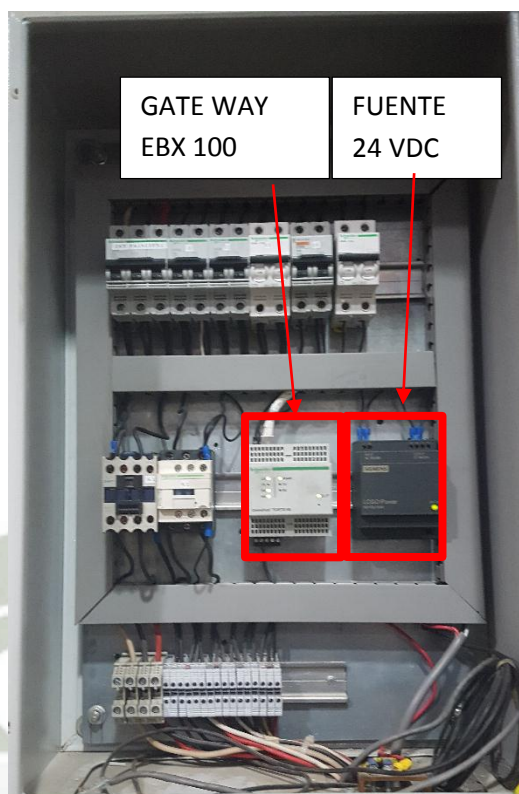


Figura 4-20 Tablero de instalación Gateway



Figura 4-21 Instalación de PLC 1200 Siemens

Si bien la el GATEWAY cuenta con IP se sabe que los equipo son configuración con direcciones MODBUS por lo que estas direcciones son número, foto muestras las configuración de los PM710.

FOTO PM710



Figura 4-22 Configuración Medidor Vilter1, Velocidad transmisión



Figura 4-23 Configuración Medidor Vilter2, Dirección

4.1.8 Arquitectura de Medidores:

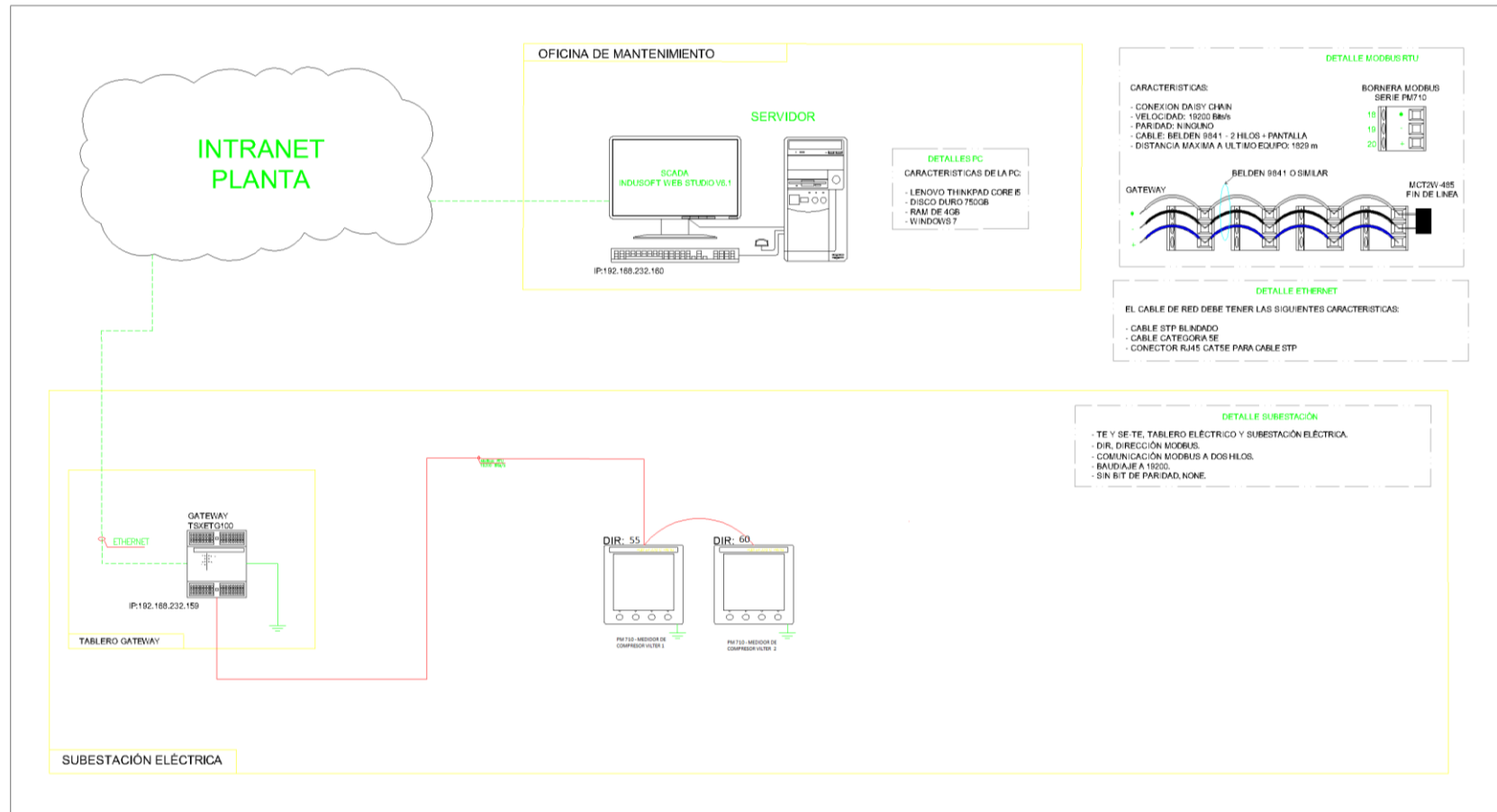


Figura 4-24 Arquitectura de Medidores

4.1.9 Resultado de final proyecto control en cascada:

En este punto se muestra el final del proyecto adquisición de datos en el control presión y temperatura. La temperatura se encuentra seteada a 0 ° C.

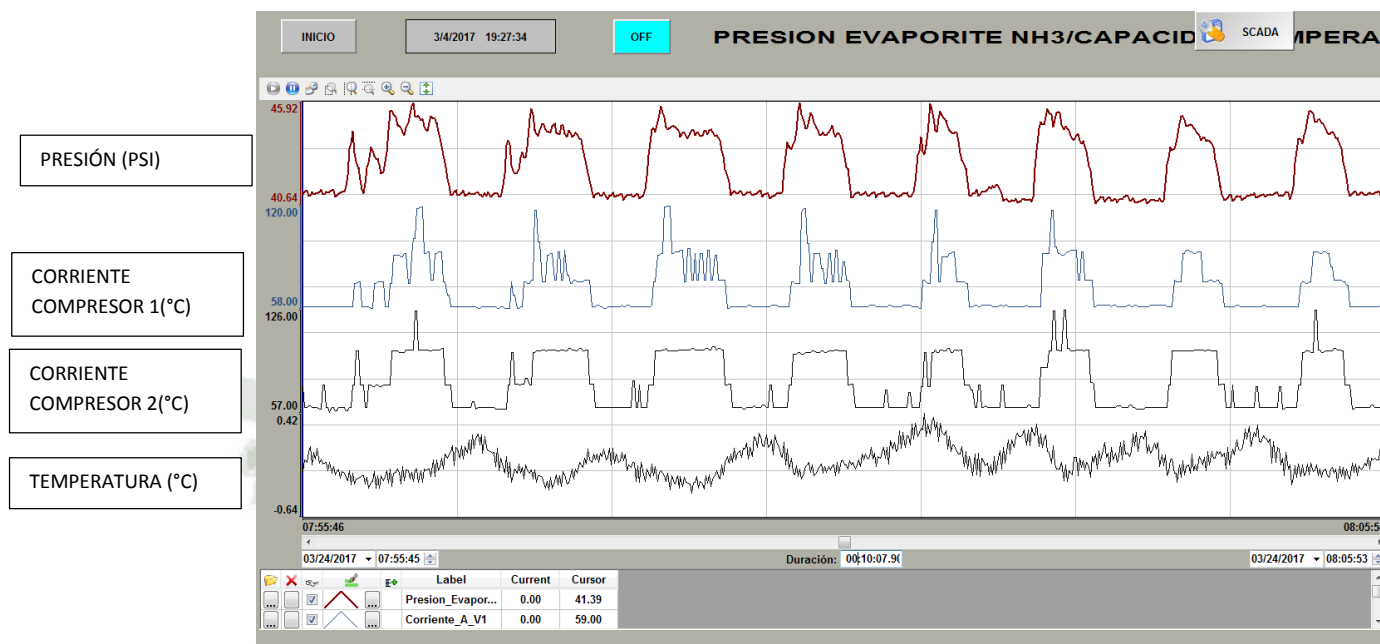


Figura 4-25 Control Cascada Implementado

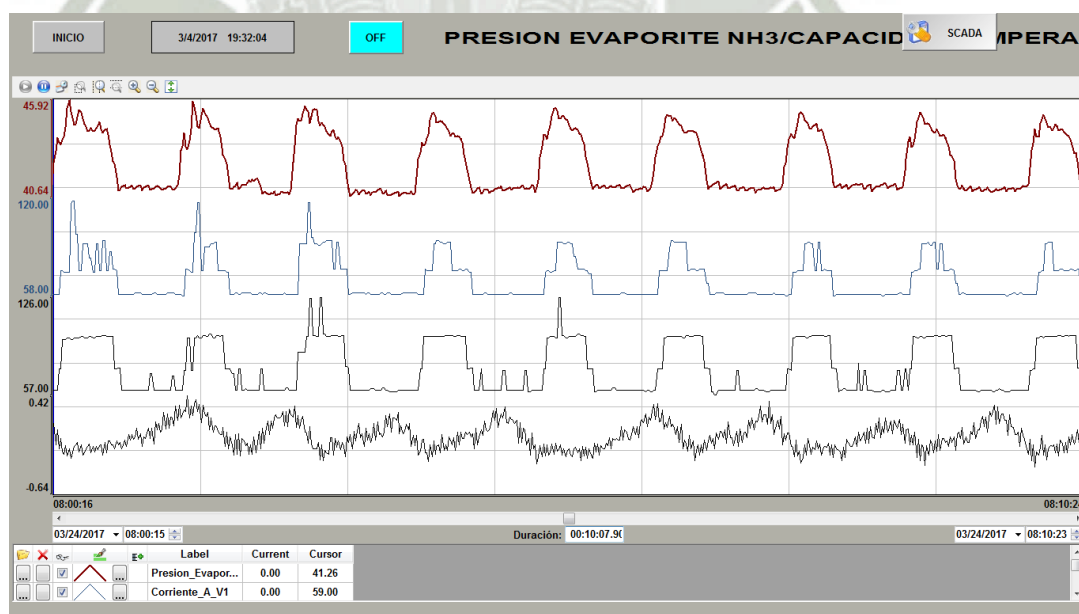


Figura 4-26 La variación de presión según la necesidad por el control en cascada

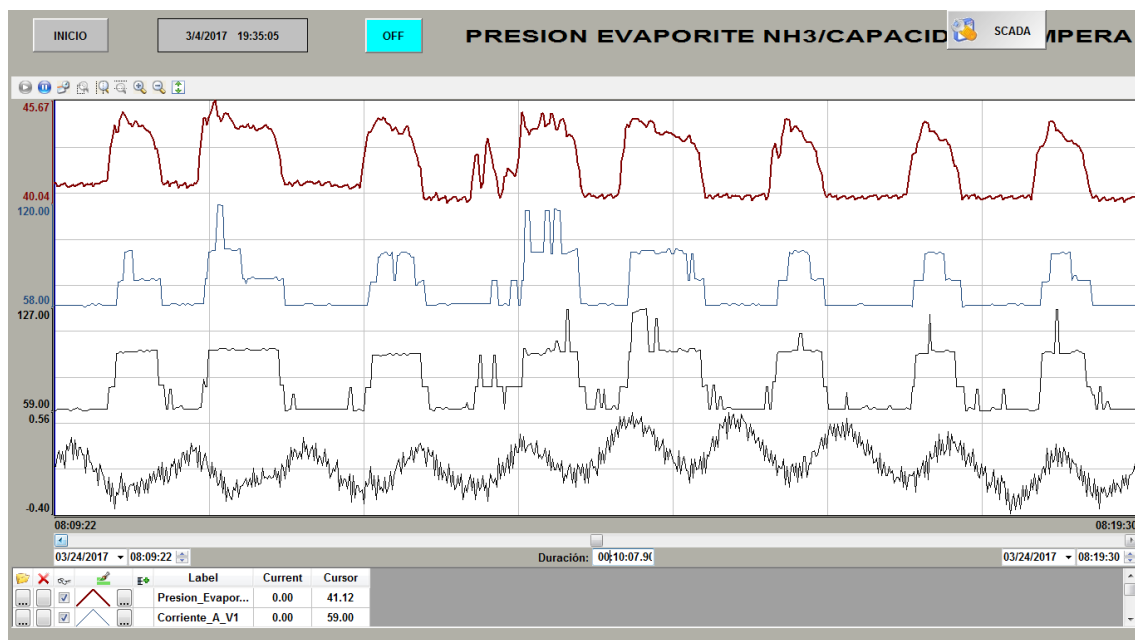


Figura 4-27 Variaciones de set de control interno según el control externo

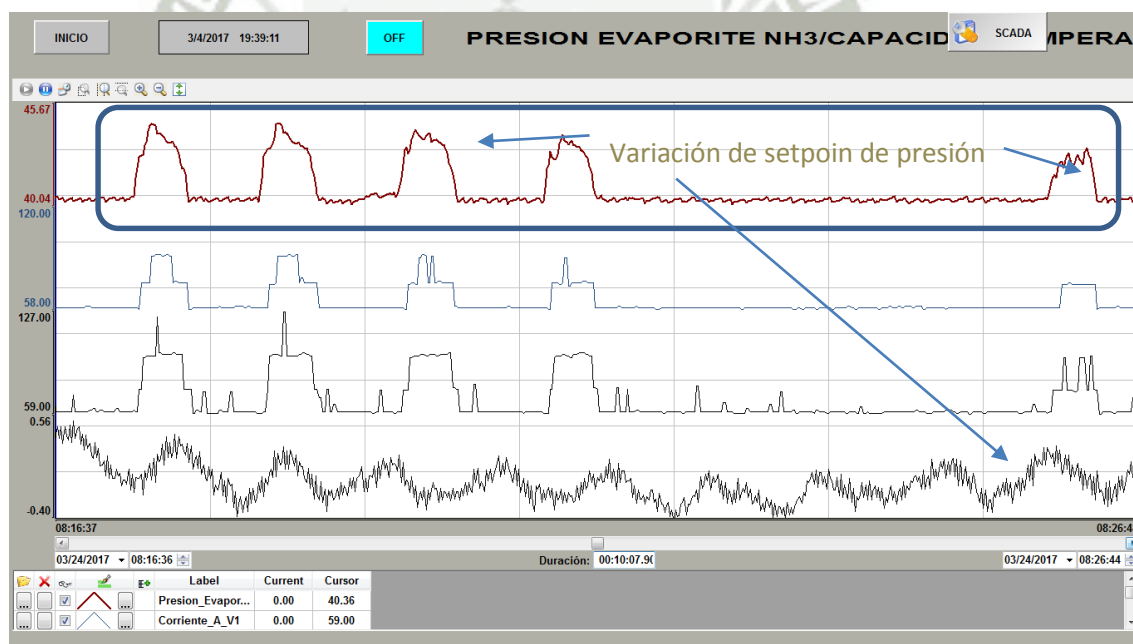


Figura 4-28 Ahorro por el control en cascada

Los resultado obtenido reflejan el funcionamiento con el control en cascada, estos resultados que el setpoint de la presión tiene una variación de pendiendo mucho de la temperatura, como

se ve en la figura 4-28 la temperatura comienza a subir por lo que el setpoint del compresor baja a 42 psi , ya que como se explicó en los capítulos anterior la hipótesis es que si la demanda de frio es mayor entonces el setpoint(presión de succión) baja ,y si fue el caso como en la figura 4-28 el set se manteniendo en la presión en 44 psi.

4.2. Diseño del Software:

El diseño de software es muy importante ya que permitirá poder entender de mejor manera el funcionamiento el sistema Scada implementado.

4.2.1. Diagrama de bloque de software Indusoft:

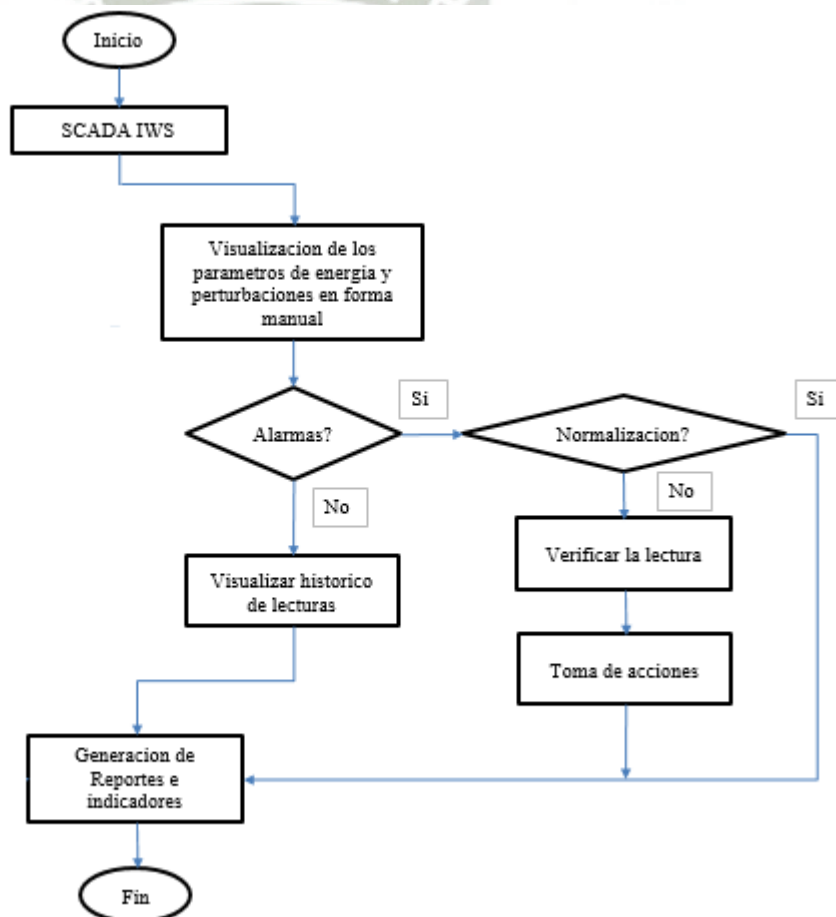


Figura 4-29 Diagrama de bloque Indusoft programa

4.2.2. Programación de PLC:

Como ya se vio la configuración de los medidores de energía, ahora debemos adquirir la información de transmisores de presión y transmisores de temperatura. Para ello existe muchas soluciones pero las, más indicada para este de aplicación es la instalación de un PLC, en este caso es un de marca SIMENS 1200, el cual fue programa con escalamiento de las señales adquiridas de formas de byte. (Ver anexo Programas, para ver programa completo).:

4.2.3. Diagrama de bloques programa PLC

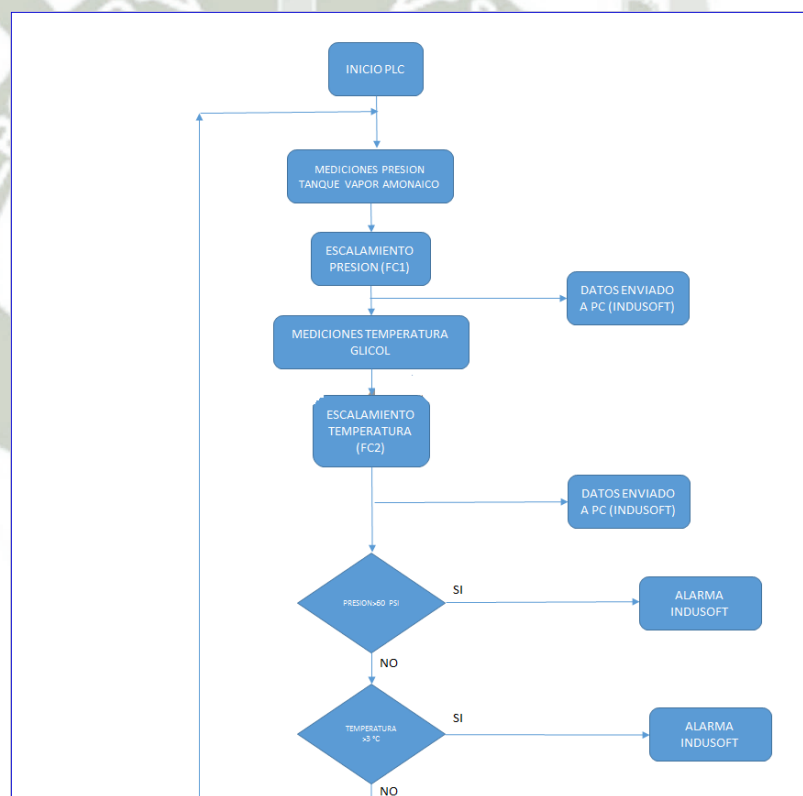


Figura 4-30 Diagrama Programa PLC 1200

La parte física de adquisición de datos queda configurada ahora vamos a configurar el software Indusoft.

4.2.4. Cálculos PLC:

Programación de Escalamiento 1200, Bloque FC1 de escalamiento.

El PLC lee valores entre [0; 27648] como valores dentro de rango. Una lectura fuera de este rango es que hay algún problema (rotura de hilo, por ejemplo).

Ahora bien, puede que la tarjeta solo admita 0-20mA o esté configurada entre 0-20mA (cosa que vamos a suponer para darle más interés). El “0”, por tanto, está pensado para 0mA, y nosotros vamos a tener un rango de 4-20mA como entrada.

Pues bien, los 4mA se corresponden con 5530. Lógicamente si la configuración de la tarjeta estuviera en vez de 0-20mA en 4-20mA, esto desaparece, y el límite inferior será un 0.

Pero como hay tarjetas aún por ahí que sólo tienen 0-20mA, vamos a suponer este caso, ya que es un poco más especial, y a la vez, más genérico.

Por tanto, nuestro valor mínimo va a ser 5530 (4mA) para 0 Bar.

$$\frac{(Valor\ escalado - Min\ Escala)}{Max.Escala - Min\ Escala} = \frac{Valor\ analogico - valor\ a\ 4mA}{Valor\ a\ 20\ mA - Valor\ a\ 4\ mA} \quad (4-3)$$

Por lo que el valor máximo será 27648

4.2.5. Resumen de configuración Indusoft:

Como se mencionó anteriormente el tipo de driver que se necesita configurar son dos tipos unos para los medidores que es TPC/IP y el otro que era para el PLC el drive SEITH.

A continuación configuramos todos los registros de PM710, como se observa en la imagen vemos un ejemplo de configuración de un registro , en el cuadro de Station

primero va el IP y luego va acompañado de un puerto enlace y de la dirección MODBUS del medidor que se desea adquirir el dato, en Address I/O aquí se coloca el registro ejemplo 4x4110 en este ejemplo los que indica esta dirección es que 4x se refiere a que el registro 4110 (horometro) será Leído(solo leer), este ejemplo se muestra en la configuración de registro de cada medidores. A continuación se destacara lo más importante de programa Scada en Indusoft. (Ver Anexo Programas, configuración paso a paso de Indusoft).

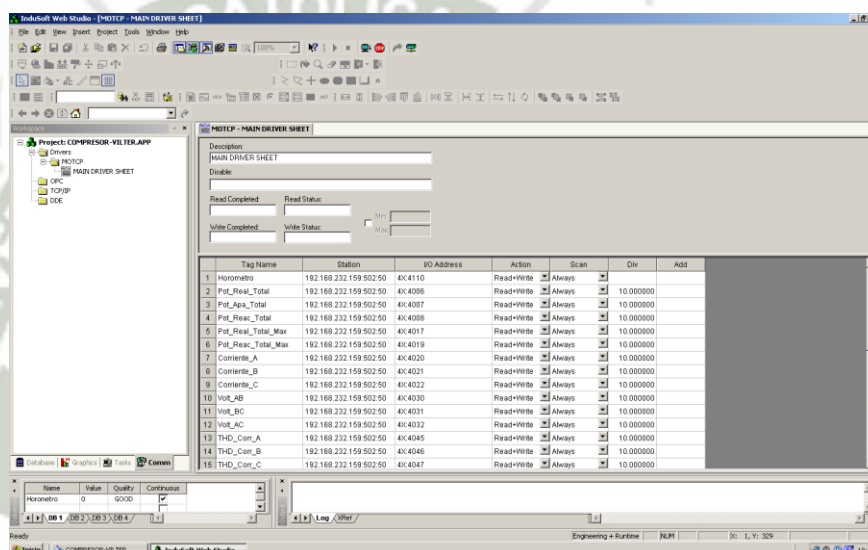
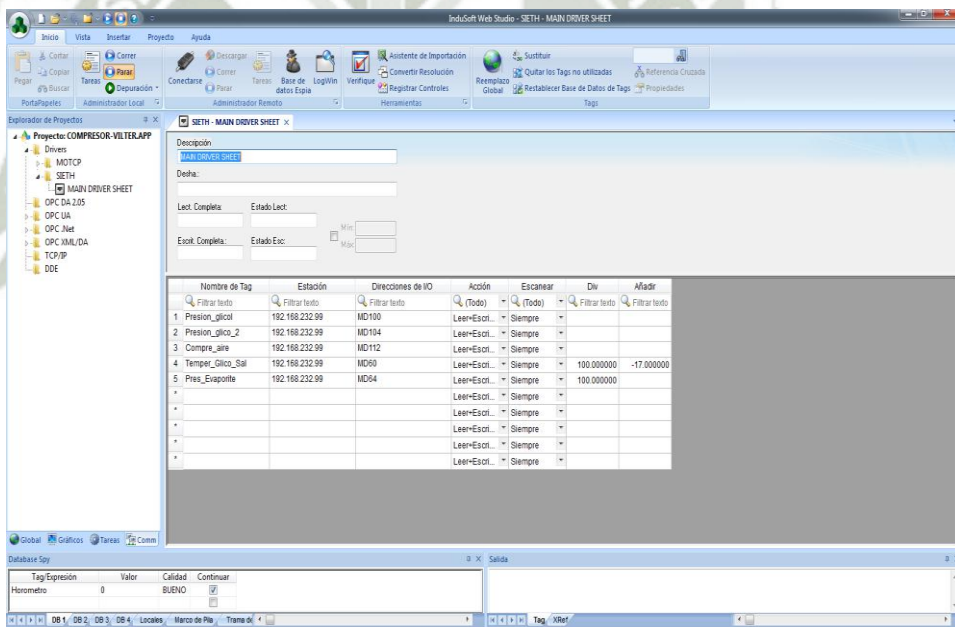


Figura 4-31 Declaración de variable en sistema HMI sistema de refrigeración

Configuración de Ingreso de Datos de Indusoft SEITH:



pág. 156

Diseño de interface Scada pc:

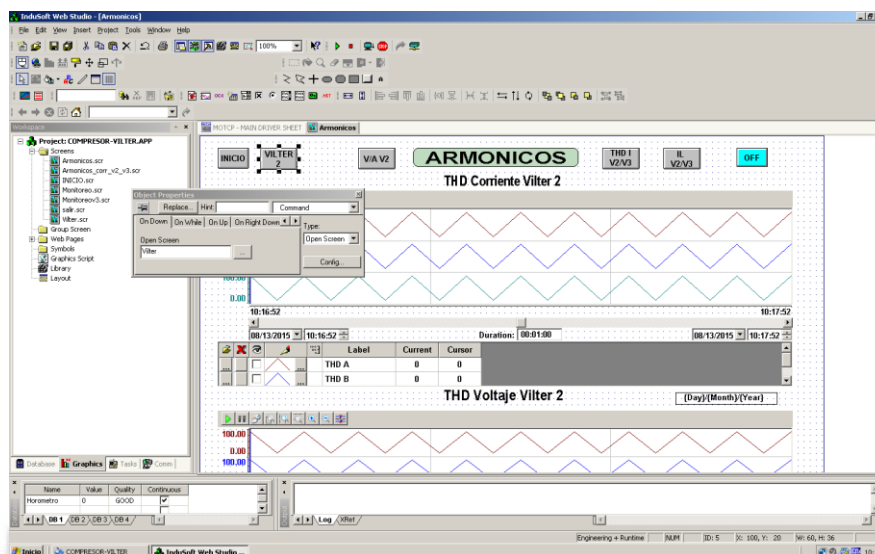


Figura 4-34 Uso de variable a utilizar para visualización

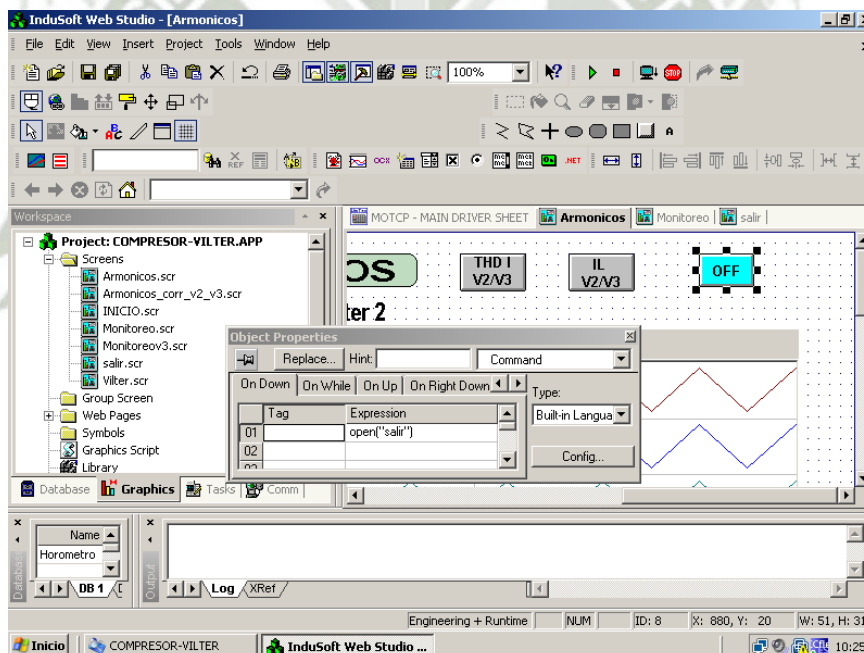


Figura 4-35 Configuración de cierre de aplicación

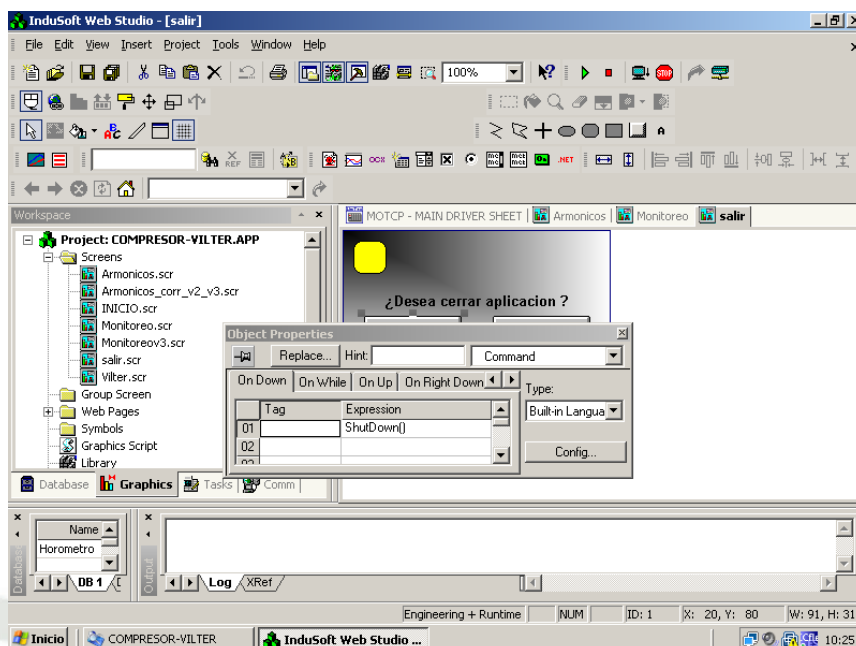


Figura 4-36 Configuración de cierre de aplicación diseño

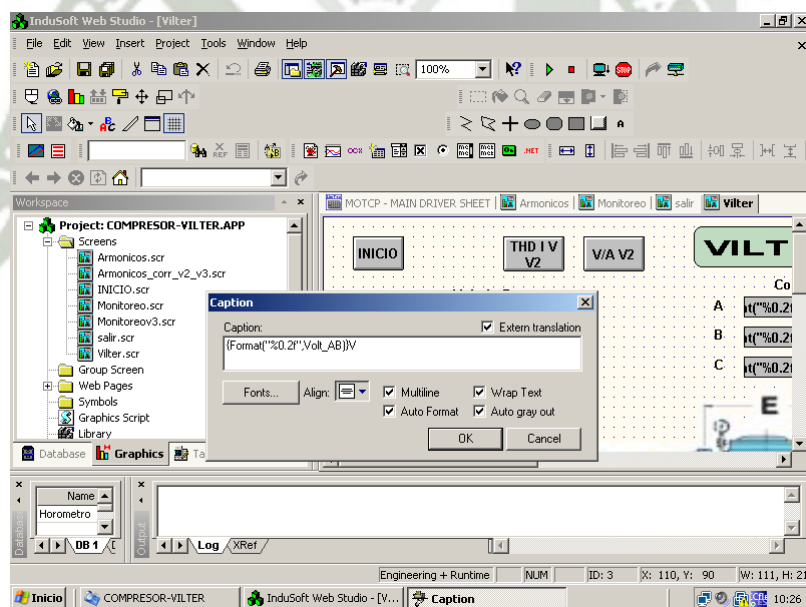


Figura 4-37 Configuración para diseño SCADA voltaje

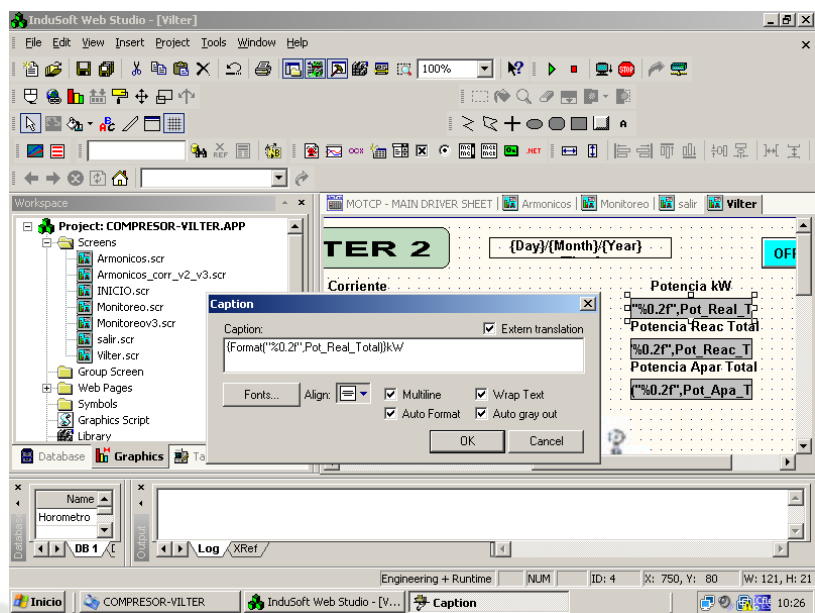


Figura 4-38 Configuración para diseño SCADA Corriente

Un Punto importante en el diseño de HMI, es el tratamiento de algunos registros que no solo cuenta con 1 byte de información sino que tiene 2 byte.

4.2.6. Pruebas de sistema, puesta en marcha Scada:

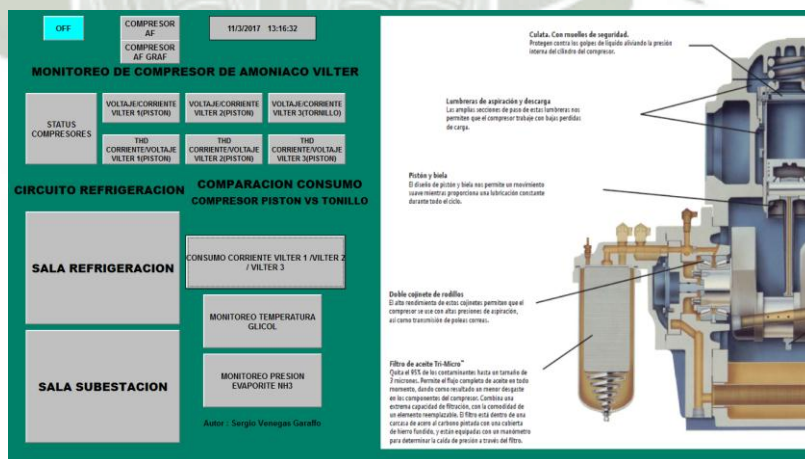


Figura 4-39 Scada inicio

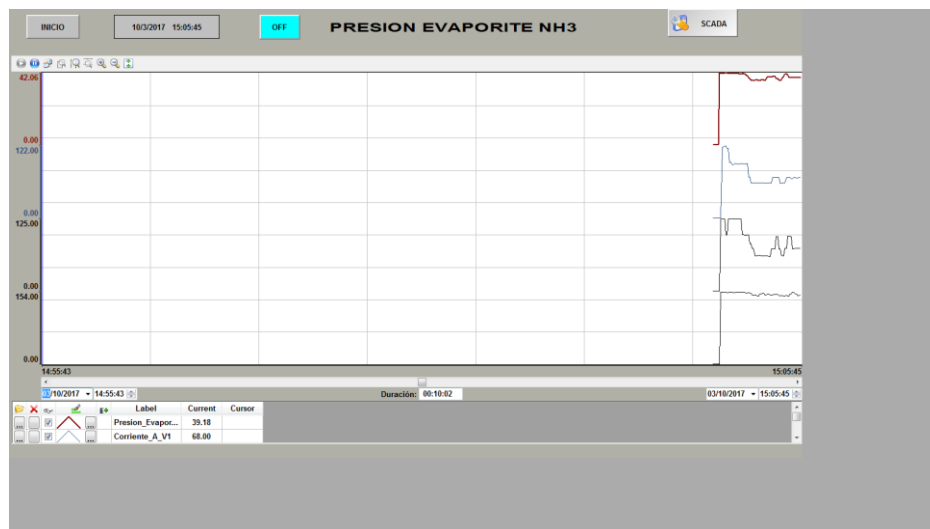


Figura 4-40 Histórico Presión Proceso Refrigeración

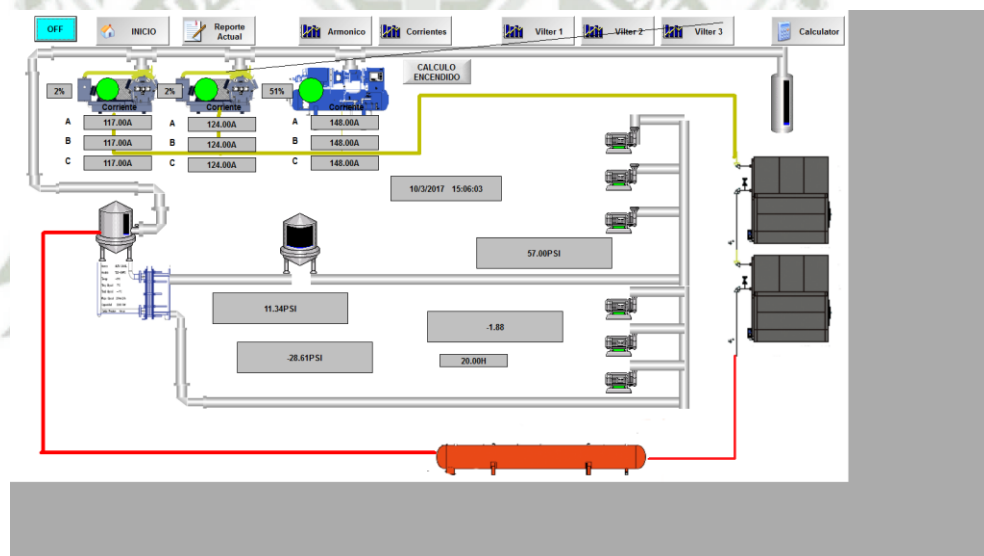


Figura 4-41 Control Visual Proceso de refrigeración



Figura 4-42 Temperatura Proceso

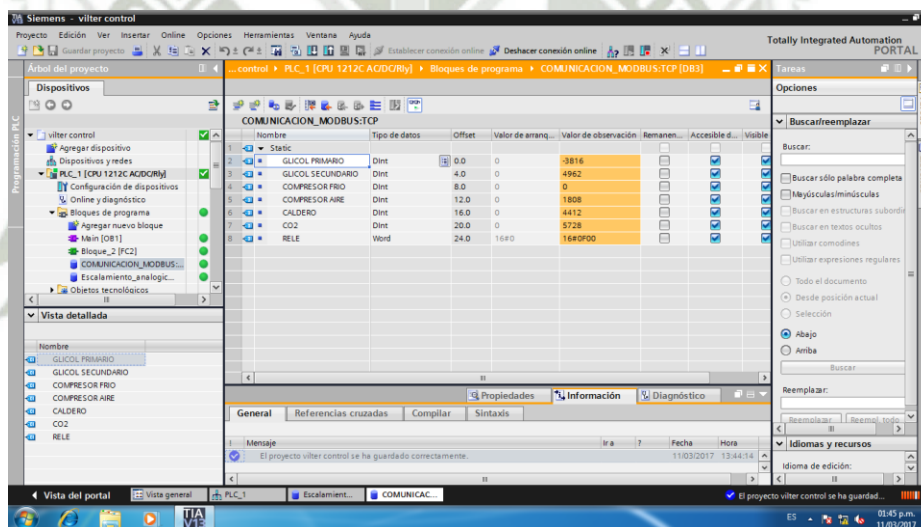
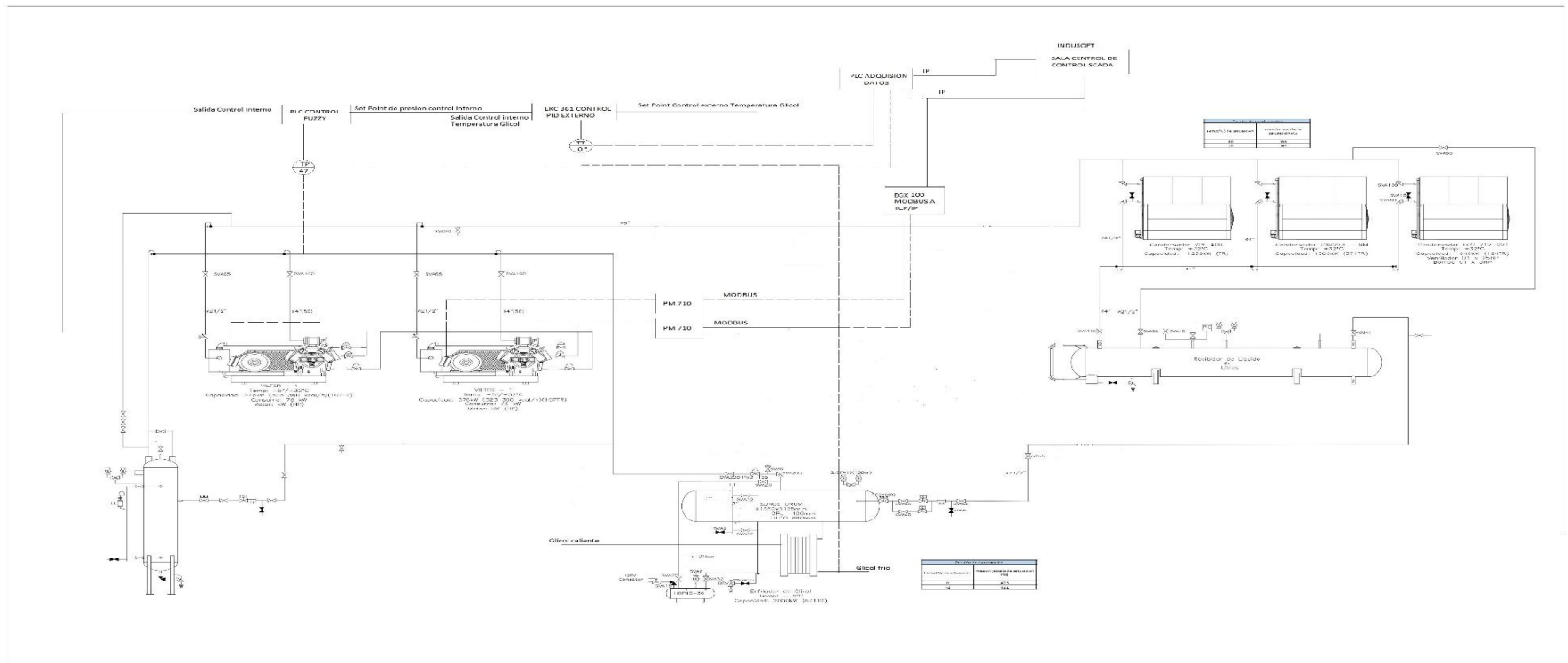


Figura 4-43 Adquisición datos PLC

4.2.7. Plano final del Proyecto:



A continuación se calcula la viabilidad del proyecto implementado, el costo beneficio que lleva la implementación del proyecto.

4.3. Sistema de Redundancia:

El sistema desarrollado funcionara únicamente con la tensión eléctrica que llega a la planta.

4.4. Confiabilidad:

La confiabilidad puede definirse como la capacidad de un componente, equipo o sistema de no fallar durante un determinado periodo de tiempo. Existe una relación matemática entre la confiabilidad de cada una de las partes y componente y sistema completo. Esta relación matemática es uno de los métodos conocidos para obtener en forma anticipada la confiabilidad de un equipo aun no instalado. La confiabilidad distingue 3 tipos de periodo de fallas:

- Fallas que ocurren al iniciarse el periodo de vida operativo y que suceden por efectos de producción o de instalación.
- Fallas debidas al desgates y que depende del mantenimiento preventivo.
- Fallas aleatorias distribuidas al azar y que no depende de pruebas o del mantenimiento.

Las fallas aleatorias tiene una distribución uniforme y por ello la confiabilidad responde a una ley exponencial. La confiabilidad de un sistema se puede calcular a partir de su tasa de fallas, si suponemos que el sistema falla, siguiendo una distribución exponencial, la tasa de fallas para un instante t es una constante denominada λ .

Así en general, la función de confiabilidad es del tipo:

$$R = e^{(-\int_0^t \lambda(t)dt)} \quad (4-4)$$

Es su distribución de probabilidades y $\lambda=f$ (independiente de t) es la tasa fallas por unidad de tiempo(típicamente por miles o millones de horas de funcionamiento), o también la expresión conocida como ecuación de Lusser, que es la forma más simple de estimar, como una distribución exponencial , para describir fallas aleatorias:

$$R = e^{(-\lambda t)} = e^{(-\frac{T}{\Theta})} = e^{-N} \quad (4-5)$$

Donde, $\Theta=1/\lambda=MTBF$ (Tiempo Medio entre Fallas), y T es el tiempo de observación o tiempo de misión (1 Semana ,1 Mes, 1 año o lo deseado) y N es el número de fallas durante el tiempo de observación T, este intervalo de tiempo, si bien es teóricamente discrecional, en situaciones practicas debe ser un tiempo suficientemente largo para que tenga un buen sentido estadístico, es recomendable 1 año. (Tavares, 2004).

Por comodidad se usa inversa de la tasa de fallas aleatorias denominado MTBF expresando en horas. Se suele utilizar también la unidad de fallas FIT, es equivalente a unas fallas cada 10^9 horas para los componentes electrónicos:

$$MTTF = \lambda \times 10^9$$

Donde MTTF es el tiempo medio a fallar y λ es la tasa de fallas.

El factor de intensidad de Fallas o tasa de Fallas se expresa generalmente en FIT

Donde:

$$1 FIT = \frac{1 falla}{10^9} \quad (4-6)$$

El factor de Intensidad de Fallos (λ) de un sistema está dado por la suma algebraica de los factores de intensidad de fallos de cada uno de los componentes.

$$\lambda_{sis} = \sum \lambda_{comp} \quad (4-7)$$

4.5. Cálculo de la confiabilidad de sistema propuesto:

Tabla 4.1 Tasa de Falla por Etapas (Davalos Cárdenas & Gonzales Begazo, 2012)

Etapa de Supervisión

Equipos y Circuitos	Cantidad	Tasa de Falla (FIT)
PLC Siemens 1200	1	10000
PM710 Schneider	3	10000
Gateway EGX 100	1	10000
TOTAL		30000

Etapa de Control

Equipos y Circuitos	Cantidad	Tasa de Falla (FIT)
EKC 361	1	1100
TOTAL		1100

Etapa de Sensado y Acondicionamiento

Equipos y Circuitos	Cantidad	Tasa de Falla (FIT)
PT 1000 Danfoss	1	1000
Sensor de Presión Danfoss	1	1000
Módulo de Analógico Siemens	1	1100
TOTAL		3100

Equipos y Circuitos	Cantidad	Tasa de Falla (FIT)
Equipo de sistema Fuentes de 24 Voltios	3	30000
TOTAL		30000

Total de FIT 64200

Se realiza el cálculo de la confiabilidad.

Donde:

$$\lambda_{sis} = 64200 \times 10^{-9}$$

También:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (4-8)$$

Entonces:

$$MTBF = \frac{1}{64200 \times 10^{-9}}$$

$$MTBF = 15576.32 \text{ Horas} = 1.78 \text{ Años}$$

Por lo tanto la probabilidad de falla del equipo es de una en 1.78 años. Nuestro equipos funcionan todos los días las 24 horas, entonces consideramos este valor, pero cabe resaltar que el EKC 361, solo funcionan para cuando funcionan los compresores (cuando se está produciendo).

Factor de uso 0.85

$$\frac{MTBF}{0.85} = 2.09 \text{ años}$$

Costo de Mantenimiento.

Como se sabe son equipos de mantenimiento simples, como simples mantenimiento de tablero eléctricos:

TRABAJOS A REALIZAR EN PLAN SUGERIDO:

- Inspección de tablero de distribución eléctrica/electrónico.
- Inspección de componentes eléctricos como, borneras, contactores interruptores, display, fuentes; verificar estado.
- Inspección de cables; verificar estado y ordenamiento ajuste de bornes

- Inspección sistema de ventilación; verificar funcionamiento y limpieza de filtros.
- Inspección PLCS; verificar estado y limpieza.
- Inspección de accionamiento electrónico (variadores, arrancadores, etc.)
verificar estado, limpieza.
- Inspección tablero; verificar hermeticidad de tablero (empaques y chapa).
- Verificar identificación y rotulado de los componentes eléctricos.
- Pero en caso de cambios para asegurar se debe tener en stock los equipos que se han utilizado para el cambio según el tiempo establecido en el tiempo de confiabilidad de los equipos.

4.6. Consumo Energético:

Un método eficiente de utilización de la energía generada es la apropiada distribución de la electricidad. En el sistema propuesto se realiza una revisión del esquema de distribución y de esta forma se minimiza sus pérdidas. A continuación se muestra el consumo energético del sistema en su extensión.

Tabla 4.2 Análisis de Carga Sistema implementado

ITEM	DESCRIPCION DE EQUIPOS Y CIRCUITOS	CONSUMO DE AMPERIOS
1	PLC Siemens 1200	0.40
2	PM710 Schneider	0.44
3	Gateway EGX 100	0.17
4	Fuente Gateway EGX 100	0.05
5	EKC 361	0.15
6	Fuente EKC 361	0.30
7	PT 1000 Ohm Danfoss	0.02
8	Sensor de Presión Danfoss	0.02
9	Módulo de Analógico Siemens	0.09
10	Equipo de sistema Fuentes de 24 Voltios	0.05
11	Perdida por Cableado y Circuitería	0.50
	CONSUMO TOTAL EN AMPERIOS	2.17

Todas las cantidades proporcionadas en la tabla se obtiene de promedio de las mediciones hechas en los circuitos en un día óptimo para el trajo del sistema. No se toman en cuenta los valores de consumo del sistema SCADA debido a que solo será utilizado para monitoreo remoto.

4.7. Análisis de costo y ahorro Económicos:

El ahorro de energía generado debe ser efectivo para lo que se calculara el consumo energético que aporta la instalación de este control al sistema.

Este consumo de energía depende del tiempo que se mantengamos encendido el control, así como su potencia eléctrica; es por eso que primero se debe conocer el valor de su potencia eléctrica, generalmente expresa en Watts (W) y las horas de trabajo de los equipos (horas de uso promedio por día); luego se toman dichos valores y se aplica el siguiente calculo:

$$\text{Energía Eléctrica} = \text{Potencia Eléctrica (W)} \times \text{Tiempo de uso en horas (h)}$$

(4-9)

$$\text{Energía Eléctrica (Watts por hora)} = Wh$$

Las unidades obtenidas cuando se aplica la formula anterior son Wh, este valor se debe multiplicar por la cantidad de días de uso al mes y dividirlo entre 1000 para obtener KWh que indica el recibo eléctrico (1000 wh = 1 KWh).

$$\text{Consumo en KWatts} = \frac{(Wh \times \text{días})}{1000}$$

(4-10)

Para estimar el monto en soles, que debe pagar por el recibo eléctrico de energía consumida: se tiene precio vigente en planta de s/ 0.20 por KWh.

Tabla 4.3 Costo en consumo de energía Mes

ITEM	DESCRIPCION DE EQUIPOS Y CIRCUITOS	WATT	Días	Horas	KWh	COSTO S/
1	PLC Siemens 1200	9.60	30	24	6.91	S/. 1.38
2	PM710 Schneider	15.00	30	24	10.80	S/. 2.16
3	Gateway EGX 100	4.00	30	24	2.88	S/. 0.58
4	Fuente Gateway EGX 100	1.08	30	24	0.78	S/. 0.16
5	EKC 361	5.00	27	16	2.16	S/. 0.43
6	Fuente EKC 361	10.00	27	16	4.32	S/. 0.86
7	PT 1000 Ohm Danfoss	0.48	30	24	0.35	S/. 0.07
8	Sensor de Presión Danfoss	0.48	30	24	0.35	S/. 0.07
9	Módulo de Analógico Siemens	0.45	30	24	0.32	S/. 0.06
10	Equipo de sistema Fuentes de 24 Voltios	1.08	30	24	0.78	S/. 0.16
11	Perdida por Cableado y Circuitería	12.00	30	24	8.64	S/. 1.73
CONSUMO TOTAL		59.17			38.28	S/. 7.66

Los costó se relaciones a un costo de s/ 0.2 soles por KWh este precio es el costo actual de la facturación de la energía, el caso fue cambia el precio se deberá tener en cuenta para el costo.

4.8. Coste económico de elaboración de Proyecto:

A continuación se muestra una tabla con el coste económico detallada de la elaboración de proyecto.

Tabla 4.4 Costo de equipos utilizados

ITEM	DESCRIPCION DE EQUIPOS Y CIRCUITOS	PRECIOS
1	PLC Siemens 1200	S/. 723.00
2	PM710 Schneider (3)	S/. 750.00
3	Gateway EGX 100	S/. 1,941.00
4	Fuente Gateway EGX 100	S/. 288.00
5	EKC 361	S/. 1,980.00
6	Fuente EKC 361	S/. 300.00
7	PT 1000 Ohm Danfoss	S/. 723.00
8	Sensor de Presión Danfoss MBS 3000	S/. 444.70
9	Módulo de Analógico Siemens	S/. 1,242.00
10	Equipo de sistema Fuentes de 24 Voltios	S/. 288.00
11	Costo de Mano de Obra	S/. 5,400.00
12	Software Indusoft Licencia	S/. 1,495.65
	CONSUMO TOTAL EN soles	S/. 15,575.35

La inversión del presente proyecto demanda inicial de S/. 15575.35, este sistema tiene un bajo mantenimiento y escaso de averías. Es posible reducir los costos ya que se hicieron modificaciones que alternaron el costo final.

A continuación se observara que mediante un indicador llamado ratio (para Corporación) el indicador mejora considerablemente cuando utilizamos el control en cascada de Compresores de amoniaco. $\text{Ratio} = \text{energía} / (\text{litros de bebida})$, figura muestra el ratio según el consumo de sala refrigeración.

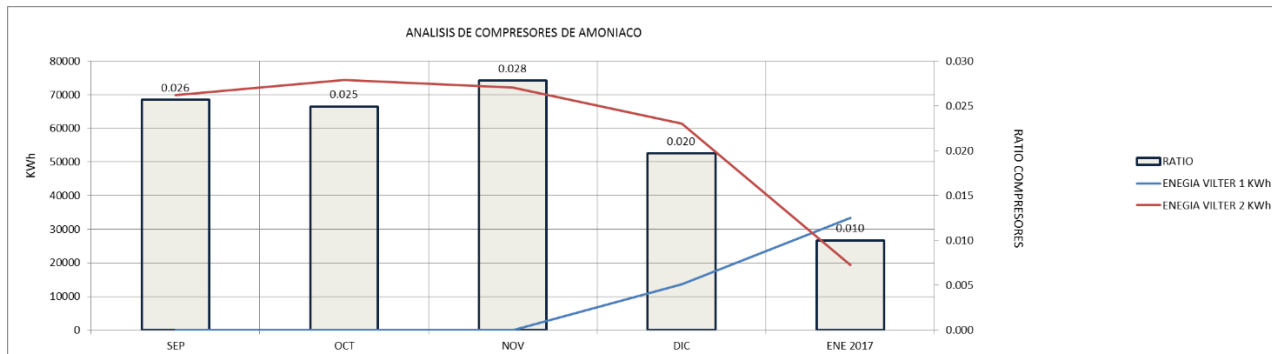


Figura 4-44 Análisis Ratio energía últimos meses

Tabla 4.5 Costo y Ahorro desde la instalación

	ENEGIA VILTER 1 KWh	ENEGIA VILTER 2 KWh	TOTAL ENERGIA CONSUMIDA	Soles Invertidos
SEPTIEMBRE	0	69834	69834	S/. 10,475.05
OCTUBRE	0	74413	74413	S/. 11,161.93
NOVIEMBRE	0	72149	72149	S/. 10,822.30
DICIEMBRE	13595	61430	75025	S/. 11,253.73
ENERO 2017	33428	19326	52754	S/. 7,913.13

Tabla 4.6 Horas de Trabajo de Compresores

VILTER 1 HORAS TRABAJADAS	VILTER 2 HORAS TRABAJADAS	HORAS TOTALES DE TRABAJO
0	471	471
0	429	429
0	340	340
198	353	551
514	365	879

Ahorro es de Diciembre en 2016 relación a Enero 2017 de s/ 3340.6. Al mes

Por lo que el ahorro en 5 meses será de aproximadamente de s/ 16703.0, lo que podemos ver que la inversión del proyecto será subsanado en solo 5 meses.

Ahora si lo vemos de forma de largo plazo 12 meses, el ahorro en energía será de S/ 40087.2 en relación a S/. 15,575.35 más el consumo por mes de consumo de energía de equipos ($s/ 7.66 \times 12 = s/91.92$), la ganancia total en el primer año será de $s/ 40087.2 - s/8679.7 - s/91.92 = s/ 24419.93$



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

La metodología empleada para el desarrollo de este proyecto de tesis, se inició desde el análisis de la problemática y la demanda de implementar un ahorro de energía para beneficio económico y natural, luego se planteó un diseño para la implementación del mismo.

En el transcurso de cada fase se realizó el análisis correspondiente, utilizando los conocimientos que se adquirieron en la formación universitaria y experiencia profesional. Por lo tanto se obtuvo las siguientes conclusiones:

1. Se logró obtener un análisis termodinámico del proceso de envasado según la demanda en relación a la velocidad de llenado del proceso de envasado, así mismo optimizar los recursos para la selección de compresores según el análisis en relación a la capacidad teórica de cada compresor recíproco.
2. Mediante el uso de las técnicas de identificación de sistema se logró el modelo matemático dinámico de la presión del sistema del control primario del proceso de refrigeración en Proceso de envasado de bebidas gasificadas. El modelo obtenido

del proceso bajo estudio presenta estructura ARMAX, de tercer orden. Los resultados de la validación muestran que el modelo obtenido describe con una elevada exactitud del proceso real bajo estudio.

3. Se logró implementar un control en cascada de un proceso critico de refrigeración, permitiendo reducir el consumo de energía eléctrica en dicho proceso, aportando una mayor eficiencia y rendimiento del mismo, el resultado fue muy bueno ya que se pudo mejorar el control existente en este proceso.
4. Se desarrolló un sistema de sensado, acondicionamiento, adquisición, monitoreo y supervisión de señales de elementos de campo como voltaje, corriente, temperatura, presiones, armónicos, potencia y energía en tiempo real mediante un sistema SCADA diseñado y analizado bajo la necesidades, el desarrollo fue en Indosoft.
5. Se demostró en la tesis la viabilidad del sistema de control en cascada diseñado. Por un lado se logró el ahorro de energía eléctrica, como eficiencia en la mejora del proceso de refrigeración, y así mismo unido a un sistema de monitoreo constante mediante Scada se originó una sinergia complementaria para el control total del proceso, es así que el análisis logrado de costo beneficio que se obtuvo permitió arrojar un balance positivo frente a la inversión de compras de equipos como periodo máximo de un año.
6. Finalmente, quiero dejar la patente con nuestro proyecto de lo siguiente:
 - Modelamiento matemático práctico de Sistema de refrigeración.
 - Control en cascada de Proceso de Refrigeración.
 - Desarrollo e integración de un sistema SCADA aplicado al proceso de refrigeración.

RECOMENDACIONES:

Como recomendaciones para el mejoramiento del proyecto, se presenta lo siguiente:

1. Se plantea enlazar las velocidades proceso de llenado para mejorar el rendimiento de capacidades de compresores para el control primario del proceso.
2. Mejorar la calidad de energía en circuito de alimentación, para evitar tener fluctuaciones a futuro en toma de alimentación de compresores de amoniaco, al igual que PLC y sistemas electrónicos.
3. Mejorar el arranque de compresores para evitar picos de corriente y afectar a sistema de control planteado en la tesis.
4. Instalación de UPS para el sistema de sensado, acondicionamiento, adquisición, monitoreo y supervisión de señales de elementos de campo como voltaje, corriente, temperatura, presiones, armónicos, potencia y energía en tiempo real, para evitar perder información valiosa en momento críticos.
5. El Mantenimiento preventivo al sistema, si la puesta en marcha se hizo de forma correcta , Básicamente, este consiste en:
 - Seguimiento de la producción eléctrica mediante sistema SCADA, detectando producciones anómalas, esto sirve para detectar malos funcionamiento.
 - Calibración de señales ingreso PLC que comunica al sistema SCADA de forma anual, para evitar información errónea.
 - Inspección visual de la protección galvánica, es decir, observar si existen descascarillados en el metal y de ser así, aplicar pinturas del sistema.

6. El mantenimiento correctivo, es que hace falta cuando se avería cual componente. Lo más común son los fallos y reparaciones de PLC y sensores. es importante que este mantenimiento permita la reposición de los elementos averiados en corto plazos de tiempo, en otras palabras tener los repuesto en stock para cualquier imprevisto.
7. Se deja abierta las posibles de siguientes de estudios para el análisis y aplicación de control anticipativo para este tipo de proceso de refrigeración, para poder obtener mejora en el consumo de energía.
8. Se deja abierta la oportunidad de aplicación del proyecto enlazando medidores que se encuentran en la subestación de la planta para monitorear de forma constante de dichos analizadores de energía y así mismo dedicar un PC como servidor para enlazar de forma interna la visualización del sistema Scada por medio de una web Server que cuenta el software Indusoft.

BIBLIOGRAFÍA

- 450XL, V. (2006). Manual Compresores Vilter. Vilter.
- Álvarez, P. (2001). Modelamiento y simulación de un intercambiador de calor. Guayaquil-Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Calvo Rolle, F. G. (2010). Metodo gráfico didáctico para matlab de ajuste de reguladores pid en cadena cerrada. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de León.
- Davalos Cárdenas, C. E., & Gonzales Begazo, E. A. (2012). Adquisicion y monitoreo de parametros de un sistema seguidor solar fotovoltaico sobre plataforma factorytalk view para la implementacion de un semaforo solar. Ucsm.
- Díez, P. F. (2010). Compresores. Cantabria: Universidad De Cantabria.
- Endesaeduca. (2014). Endesaeduca. Obtenido de http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/el-uso-de-la-electricidad/xxv.-la-energia-electrica-y-el-medio-ambiente#energia eléctrica
- Endesaeduca. (s.f.). http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/el-uso-de-la-electricidad/xxv.-la-energia-electrica-y-el-medio-ambiente.
- Fluke. (s.f.). <http://www.fluke.com/fluke/pees/formacion/seguridad/default.htm>.
- Gateway, S. . (s.f.). Manual de Gateway.
- GUTIÉRREZ, G. A. (2010). Diseño, instalación y puesta en marcha de un equipo con tecnología de nuevos materiales de ingeniería, para un sistema de refrigeración industrial con amoniaco y circuito de glicol.
- H. Markiewicz, A. K. (2004). Guía de Calidad de la Energía Eléctrica. University of Technology.
- Instituto Sindical de, A. S. (s.f.). <http://www.istas.net/web/index.asp?idpagina=2207>.
- Katsuhiko, O. (2010). Ingenieria Control Moderno. Madrid: Pearson.
- Lijo, J. F. (2006). Manual de refrigeracion. Marcombo.
- Ljung, L. (1987). System Identification. Theory for the user. Prentice Hall.
- Neumann., R. (2009). Conferencia Internacional de Calidad de Energía Paper 61000 4 30.
- Paris, E. d. (2006). Dynamic Simulation Model of a Vapor Compression Domestic Refrigerator Running. Purdue University .
- Sampieri. (2006). Metodologia de la investigacion. Pearson.
- Schneider. (s.f.). Manual de Central de medida PM710.

Stoica., T. S. (1989). System Identification. Prentice Hall.

Tavares, L. (3,4 de Junio de 2004). reliabilityweb. Obtenido de
<http://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/el-calculo-de-la-confiabilidad>

Vergara Rodríguez, M. S. (2009). Simulación dinámica de un sistema de refrigeración para la comparación del consumo energético bajo control on-off y control continuo. Universidad Industrial De Santander.



ANEXO

ANEXO I -PROPIEDADES DEL REFRIGERANTE AMONIACO

Propiedades del refrigerante:

La propiedad más importante de los refrigerantes consiste en que se convierta de gas líquido sin dificultad y que el calor latente al efectuarse la evaporación tenga un valor elevado. Cabe decir que con un volumen pequeño de refrigerante líquido, con alto valor de calor de evaporación, se puede realizar operaciones de refrigeración que se desee.

El amoníaco se destaca por tener mayor volumen de calor de evaporación por lo que el equipo de refrigeración en que se usa amoníaco como refrigerante, es más compacto en comparación que el que usa freón, pero la capacidad de refrigeración del primero es mayor que la del segundo. Por otra parte el costo del amoníaco es una quinta parte del costo del freón. Gracias a estas ventajas el amoníaco se considera como el refrigerante ideal para ser usado en los sistemas de refrigeración industrial o equipos para fabricar hielo.

Sin embargo el amoníaco tiene sus desventajas, como su alta toxicidad, la flamabilidad, corrosión en el cobre, y los metales con aleaciones de cobre, debido a estas desventajas el amoníaco no podrá ser en lugares concurridos o en lugares en donde se tengan posibilidades de incendio. En tales situaciones el freón es el que se emplea ya que es el menos dañino al cuerpo humano (GUTIÉRREZ, 2010, pág. 21).

Clases y propiedades de refrigerante

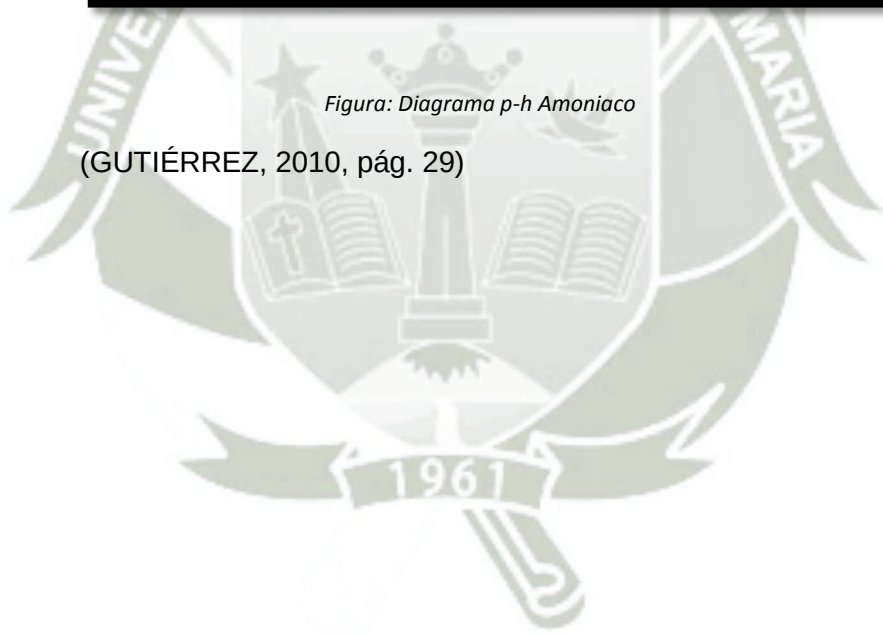
AMONIACO	R717
Formula química	NH ₃
Peso Molecular	17.03
Punto de ebullición	-33.3
Punto de congelación (°C)	-77.7
Temperatura critica (°C)	133
Presión Critica (Kg/cm ²)abs	116.5
Peso específico ,liquido , 30 °C (Kg/cc)	0.595
Peso específico; Punto de ebullición de vapor saturado (g/l)	0.905
Temperatura especifica liquido 30°C (cal/g °C)	1.143
Temperatura especifica Vapor Cp (30° 1 pres atm) (cal/g °C)	0.52
Proporción de temperatura especifica Cp/Cv(30° C pres atm)	1.31
Calor latente de evaporación punto de ebullición (cal/g)	327
Límite de aislamiento : 23 °C 1 pres atm Nitrógeno =1	0.83
Solubilidad del agua del agua frente a freón 30° (g/100g)	89.9 (0°C)
Combustibilidad	16-25 (Volumen 1.14- 1.77 Kg/10 m ³)
Toxicidad	2

Tabla: propiedades termodinámicas del refrigerante para el uso en el compresor de tipo alternativo

Temperatura	Presión absoluta	Volumen específico		Densidad		Entalpia		Calor latente de evaporación	Entropía	
t °C	P Kgl/cm ² abs	L V l/kg	V v m ³ /kg	L r kg/l	V r Kg/m ³	L h Kcal/kg	V h Kcal /kg	r kcal/kg	LS kcal/kg °K	V s kcal/kg °K
-60	0.2233	1.401	4.699	0.7138	0.2128	36	380	344	0.7366	2.3507
-58	0.2543	1.4056	4.161	0.7114	0.2403	38.1	380.8	342.7	0.7461	2.3393
-56	0.2869	1.4103	3.693	0.7091	0.2708	40.2	381.7	341.5	0.7555	2.3285
-54	0.3272	1.415	3.288	0.7067	0.3041	42.2	382.5	340.3	0.7648	2.318
-52	0.3697	1.4197	2.933	0.7044	0.3409	44.2	383.3	339.1	0.7741	2.3078
-50	0.4168	1.4245	2.623	0.702	0.3812	46.3	384.1	337.8	0.7882	2.2978
-48	0.4686	1.4293	2.351	0.6996	0.425	48.4	384.9	336.6	0.7931	2.2808
-46	0.5256	1.4342	2.112	0.6972	0.473	50.4	385.7	335.3	0.8021	2.2785
-44	0.5882	1.4392	1.901	0.6948	0.526	52.5	386.5	334	0.8112	2.2692
-42	0.6568	1.4442	1.715	0.6924	0.583	54.6	387.3	332.7	0.8203	2.26
-40	0.7318	1.4493	1.55	0.69	0.645	56.8	388.1	331.3	0.8295	2.251
-38	0.8137	1.4545	1.4045	0.6875	0.712	58.88	388.88	329.99	0.8385	2.2421
-36	0.9028	1.4597	1.2746	0.6851	0.785	61.01	389.65	328.63	0.8475	2.2336
-34	0.9999	1.4649	1.1589	0.6846	0.863	63.15	390.41	327.26	0.8565	2.2252
-32	1.1052	1.4703	1.0555	0.6801	0.948	65.28	391.17	325.88	0.8654	2.217
-30	1.219	1.4757	0.963	0.6777	1.038	67.42	391.91	324.49	0.8742	2.209
-28	1.342	1.4811	0.8801	0.6752	1.136	69.56	392.64	323.08	0.888	2.2011
-26	1.475	1.4867	0.8656	0.6726	1.242	71.71	393.36	321.66	0.8917	2.1934
-24	1.619	1.4923	0.7386	0.6701	1.354	73.86	394.07	320.22	0.9003	2.1858
-22	1.774	1.498	0.6782	0.6676	1.474	76.01	394.77	318.76	0.9089	2.1784
-20	1.04	1.5037	0.6236	0.666	1.604	78.17	395.46	317.29	0.9175	2.171
-18	2.117	1.5096	0.5742	0.6624	1.742	80.33	396.13	315.8	0.9259	2.1638
-16	2.309	1.5155	0.5205	0.6598	1.899	82.5	396.79	314.29	0.9343	2.1567
-14	2.514	1.5215	0.04889	0.6572	2.046	84.68	397.44	312.76	0.9427	2.1498
-12	2.732	1.5276	0.453	0.6516	2.213	86.85	398.06	311.21	0.9511	2.143
-10	2.566	1.5388	0.4184	0.652	2.39	89.03	398.67	309.64	0.9593	2.1362
-8	3.216	1.51	0.3878	0.6493	2.579	91.21	399.27	308.06	0.9675	2.1296
-6	3.481	1.5414	0.3599	0.667	2.779	92.4	399.85	306.45	0.9757	2.1231
-4	3.761	1.5528	0.3344	0.644	2.991	95.59	400.42	304.83	0.9839	2.1167
-2	4.06	1.5594	0.3111	0.6413	3.216	97.79	400.98	303.19	0.992	2.1103
0	4.379	1.568	0.2897	0.6386	3.452	100	401.52	301.52	1	2.1041
2	4.716	1.5727	0.27	0.6358	3.703	102.21	402.04	299.84	1.008	2.0979
4	5.073	1.5796	0.252	0.6331	3.969	104.43	402.55	298.13	1.016	2.0919
6	5.45	1.5866	0.2353	0.6303	4.25	106.65	403.04	296.39	1.024	2.0859

8	5.849	1.5936	0.22	0.6275	4.546	108.87	403.5	294.63	1.0319	2.0799
10	6.271	1.6008	0.2058	0.6247	4.859	111.11	403.95	292.84	1.0397	2.0741
12	6.715	1.6081	0.1927	0.6218	5.189	113.35	404.38	291.03	1.0475	2.0683
14	7.183	1.6156	0.1806	0.619	5.537	115.59	404.79	289.2	1.0553	2.0626
16	7.677	1.6231	0.1694	0.6161	5.904	117.85	405.19	287.34	1.0631	2.057
18	8.196	1.6308	0.1591	0.6132	6.289	120.11	405.57	285.46	1.0709	2.0514
20	8.741	1.6386	0.1494	0.6103	6.694	122.38	405.93	283.55	1.0785	2.0451
22	9.314	1.6466	0.1405	0.6073	7.119	124.66	406.27	281.61	1.0862	2.0405
24	9.915	1.6546	0.1322	0.6043	7.561	126.94	406.59	279.65	1.0938	2.0351
26	10.544	1.663	0.1245	0.6013	8.031	129.24	406.89	277.66	1.1014	2.0297
28	11.204	1.6714	0.1174	0.5981	8.521	131.54	407.17	275.64	1.109	2.0243
30	11.895	1.68	0.1107	0.5952	9.034	133.84	407.43	273.59	1.1165	2.0191
32	12.617	1.6888	0.1015	0.5921	9.573	136.16	407.67	271.5	1.1241	2.0139
34	13.374	1.6977	0.986	0.589	10.138	138.48	407.88	269.39	1.1315	2.0087
36	14.165	1.7069	0.0932	0.5859	10.731	140.82	408.06	267.24	1.139	2.0035
38	14.99	1.7162	0.0881	0.5827	11.353	143.16	408.23	265.06	1.1464	1.9984
40	15.85	1.7257	0.0833	0.5795	12.006	145.52	408.37	262.85	1.1538	1.9933
42	16.747	1.7354	0.0788	0.5762	12.69	147.88	408.49	260.6	1.1612	1.9882
44	17.682	1.7454	0.0746	0.5729	13.4	150.24	408.58	258.33	1.1686	1.9832
46	18.658	1.7555	0.0707	0.5696	14.15	152.62	408.64	256.02	1.1759	1.9781
48	19.673	1.7659	0.067	0.5663	14.94	155	408.68	253.67	1.1832	1.9731
50	20.727	1.7775	0.635	0.5628	15.75	157.38	408.72	251.34	1.1905	1.9683
52	21.83	1.788	0.0602	0.5591	16.59	159.8	408.7	248.9	1.1982	1.9638
54	22.97	1.9	0.0572	0.5554	17.47	162.2	408.8	246.6	1.2056	1.959
56	24.15	1.812	0.0543	0.5516	18.39	164.6	408.8	244.2	1.213	1.9542
58	25.37	1.825	0.0515	0.5478	19.35	167.1	408.7	241.6	1.2205	1.9494
60	26.66	1.838	0.0489	0.544	20.35	169.6	408.6	238	1.228	1.9445
62	27.96	1.851	0.0461	0.5402	21.41	172.2	408.5	236.3	1.2354	1.9396
64	29.36	1.864	0.0441	0.5361	22.53	174.8	408.3	233.5	1.2428	1.9347
66	30.77	1.877	0.042	0.5326	23.73	177.4	408	230.6	1.2502	1.9297
68	32.25	1.891	0.0399	0.5348	25.01	180	407.7	227.7	1.2576	1.9247
70	33.77	1.905	0.0379	0.5248	26.36	182.7	407.3	224.6	1.265	1.9196

(GUTIÉRREZ, 2010, pág. 25)



(GUTIÉRREZ, 2010, pág. 29)

ANEXO II -CAUSAS Y CORRECCIÓN ANOMALÍAS EN COMPRESORES

Puesta en marcha de los compresores alternativos:

En las instrucciones suministradas por el fabricante, se suele detallar esta operación; no obstante, en términos generales se puede decir:

1. Comprobar líneas, válvulas, juntas, etc.
2. Comprobar los sistemas de lubricación y niveles de aceite. Algo de aceite debe ir al cilindro directamente, pero mucho aceite puede ensuciar las válvulas (hollín) y es antieconómico. Poco aceite puede ser causa de un desgaste prematuro de los anillos del pistón. Poner en marcha el sistema en caso de cilindros lubricados. (Díez, 2010, pág. 18).
3. Comprobar el sistema de refrigeración de agua del cilindro y hacer circular el agua antes de ponerlo en marcha, para prevenir un sobrecalentamiento y pérdida de engrase.
4. Girar el volante lentamente para dar algunas emboladas y desalojar cualquier líquido que pudiera haber en el cilindro, y repartir bien el aceite.
5. Arrancar el compresor en descarga y con las válvulas de admisión y escape cerradas y el by-pass abierto. Después abrir la impulsión y cerrar el by-pass. A continuación ir abriendo la válvula de aspiración lentamente. De esta manera se da tiempo a evaporar todo el líquido. Durante todo el arranque el compresor debe tener las válvulas 2 y 3 de succión abiertas del todo (bloqueadas a tope). Así tenemos la seguridad de que el compresor no trabaja en carga.
6. Poner en carga el compresor, primero al 25%, después 50% y por último al 100%.

Parada de compresores alternativos:

1. Poner el compresor en descarga. Dejarle funcionando un poco sin carga para enfriar el pistón y asegurar la retención de una capa de aceite protector sobre todas las superficies metálicas. El agua de refrigeración debe seguir fluyendo hasta después de parar el compresor.
2. Cerrar la válvula de la línea de aspiración, abrir el by-pass y después cerrar la línea de impulsión.
3. Parar el motor o turbina que mueve el compresor.
4. Si el compresor va a estar parado unos días, el eje del pistón se debe proteger con una capa de aceite contra la corrosión. Antes de la nueva puesta en marcha se debe sacar el aceite del cárter y poner uno nuevo.

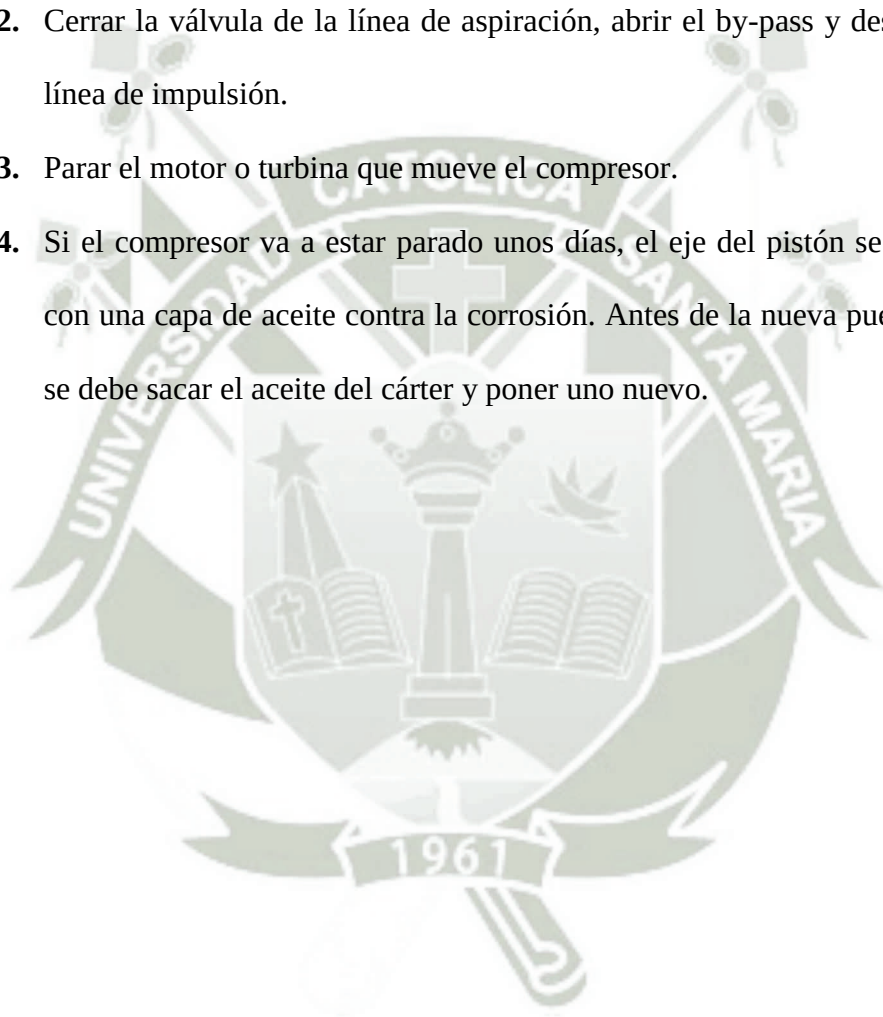


Tabla: Causa y Corrección de Anomalías Compresor

ANOMALIA	CAUSA	CORRECCION
No arranca el compresor	a) Falta de aceite	Llenar de aceite al nivel
	b) Poca Temporización en el temporizador del cuadro eléctrico, no dando tiempo al cambio y no subiendo la presión de aceite	Dar más tiempo al temporizador
	c) Falta de Agua	Abrir la llave de entrada o dar mayor caudal
Dispara la válvula de seguridad entre fases	a) Válvula de seguridad mal(destarada)	Repararla o reponerla
	b) Membranas o torica de regulación mal (pasa aire de regulación a la 1 etapa)	Reponer
Aceite en filtro de aspiración	Demasiado engrase (al trabajar en vacío expulsa por la aspiración)	Ajustar el engrase y revisar
Consumo excesivo de aceite del cárter	a) Empaquetadura deteriorada o floja	Reapretar o reponer
	b) Nivel de aceite muy bajo	revisar
No sube la presión de aceite	a) Giro inverso de la bomba	Cambiar la polaridad del motor
	b) Falta de aceite	Llenar de aceite al nivel
	c) Bomba descebada	Cebarla
Caudal del compresor disminuido	a) Válvula de admisión o escape mal	Limpiar zona pistón descargador
	b) Pistón de regulación en posición pisando (Válvula abierta)	Limpiar el filtro
	c) Filtro aspiración saturado o sucio	Reponer
Inconvenientes en el suministro de aire	Tuneria de admisión obstruida, filtro succión	Limpiar
Sube presión Final	a) Presos tato averiado	Reponer
	b) Tubería presos tato rota	Arreglar
	c) Electroválvula averiada, no abre , queda agarrada	revisar funcionamiento o reponer
	d) Tubería regulación rota	Arreglar tubería

	e) Pistón descargador bloqueado en posición alta (no abre válvula)	Aligerar pistón descargador
La máquina se para	a) Falta de aceite (Funcionando la seguridad)	Comprobar seguridad y circuito circuito de engrase
	b) Falta de agua (Funcionando la seguridad)	Comprobar seguridad y circuito de agua
	c) alta temperatura en escape (funcionando termostato)	refrigerador final succión o poca agua
	d) Fallo Eléctrico	Revisar maniobras
Baja la presión entre fases(en carga)	a)Válvula admisión 1 etapa mal	Revisar Válvulas
	b) Pistón de regulación en posición pisando (Válvula abierta)	Limpiar zona pistón descargador
	c) Válvula de escape 1 etapa mal (Baja un poco la presión)	Revisar Válvulas
Baja la presión entre fases (en vacío)	Válvula escape 1 etapa mi (Fuga)	Revisar Válvulas
Baja Presión final	a) Consumo excesivo en red	No es ningún fallo del compresor
	b) Presos tato mal tarado o averiado	Tarar bien o reponerlo
Aire caliente a la salida de los refrigerador	a) Falta de agua, si el agua sale caliente	Aportar más caudal de agua
	b) sucios los reguladores (Agua sale fría)	Limpiarlos
Calentamiento de compresor	a)válvulas en malas condiciones	Revisar
	b) Presión de descarga excesiva	Controlar
	c) Lubricación insuficiente	Vigilar el aceite

(Díez, 2010, pág. 19)

ANEXO III RENDIMIENTO DE COMPRESORES

Rendimiento:

El volumen depende principalmente de la relación de compresión y algo de la velocidad del compresor, y se ha comprobado que compresores de las mismas características de diseño tienen aproximadamente los mismos rendimientos volumétricos, independientemente del tamaño de compresor que se trate.

Para una estimación aproximada existen.

Valores aproximados de rendimiento

(p1/p2)	nvol%	ni%	nmec%	neléc%
2	88	90	85 a 93	85 a 90
4	83	82	85 a 93	85 a 90
6	78	74	85 a 93	85 a 90

- El ni depende igualmente de la relación de compresión. Tiene el mismo orden de magnitud que el rendimiento volumétrico.
- El nmec depende de la velocidad de rotación. Para una misma velocidad, será máximo cuando el compresor esté muy cargado.
- El neléc depende de la potencia del motor (a mayores potencias, mayores rendimientos).
- Dificultad de separar los rendimientos indicado y mecánico.

ANEXO IV-MODELAMIENTO MATEMATICO-FISICO DE CORPORACION

LINDLEY

Modelamiento Matemático Intercambiador:

Un sistema es la combinación de elementos o componentes que actúan conjuntamente y cumplen un objetivo determinado.

Los sistemas pueden clasificarse atendiendo sus características como lineales y alinéales, invariantes en el tiempo y variantes en el tiempo, parámetros concentrados y parámetros distribuidos.

Un modelo es el conjunto de elementos cuyo comportamiento es similar en ciertos aspectos al sistema real, el objetivo de modelar un sistema es estudiar ciertas características del sistema.

El universo está compuesto de energía y materia, la energía no puede ser creada ni destruida pero puede tomar muchas formas y cambiar de un tipo de forma a otra, la materia por si misma tiene energía interna y sus partículas está en movimiento constante.

Cuando una partícula energizada entra en contacto con una partícula menos energizada ocurrirá una transferencia térmica de energía de la partícula más caliente a la partícula más fría hasta que ambas partículas lleguen a un nivel de energía llamado equilibrio térmico.

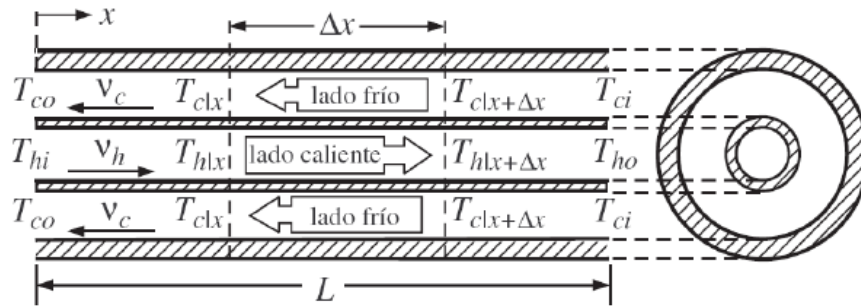


Figura: Intercambio de Energía Intercambiador

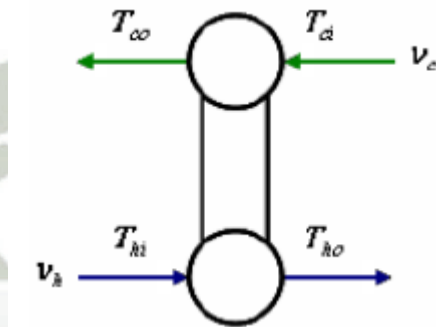


Figura Intercambio de energía Balance

El proceso de intercambio de calor entre dos fluido que están a diferentes temperaturas y separado por una pared sólida ocurre en muchas aplicaciones de ingeniería, el dispositivo que se utiliza para llevar a cabo es el intercambiador de calor.

El intercambiador de calor de coraza y tubos, es el tipo más común de intercambiador de calor usado en la industria, un conjunto de tubos llamados haz de tubos contiene el primer fluido, mientras que el segundo fluido o gas corre a través de los tubos en el lado de la carcasa para que el calor pueda ser transferido entre ellos.

Modelo matemático del intercambiador de calor.

Para el modelo matemático del sistema se estudiará el intercambiador de calor de placa y coraza.

La ecuación que define el calor que intercambian los fluidos de trabajo en un

Intercambiador de calor es la siguiente:

$$Q = U A_{total} DTLM$$

Donde la DTLM es la diferencia de temperaturas logarítmico media de los fluidos de trabajo y se define como:

$$DTLM = T_{ref, agua} - T_{ref, aire}$$

Siendo:

$$T_{ref, aire} = \frac{T_{aire, e} + T_{aire, s}}{2}$$

$$T_{ref, agua} = \frac{T_{agua, e} + T_{agua, s}}{2}$$

Donde:

T_{ref, agua} = temperaturua del agua de trabajo

T_{ref, aire} = temperaturua del aire de trabajo

T_{aire, e}

= temperaturua del aire de trabajo condiciones del fluido a la entrada del intercambiador

T_{aire, s}

= temperaturua del aire de trabajo condiciones del fluido a la salida del intercambiador

$T_{agua,e}$

= *temperatura del agua de trabajo condiciones del fluido a la entrada del intercambiador*

$T_{agua,s}$

= *temperatura del agua de trabajo condiciones del fluido a la salida del intercambiador*

Balance de energía del intercambiador de calor

Energía entrada – Energía Salida= Tasa de acumulación de energía

Se tiene la energía calorífica de salida debido al promedio de la temperatura en la parte exterior del tubo y también la energía del flujo del fluido con su temperatura de salida.

$$ei1 + ei2 - eo1 - eo2 = \frac{1}{2} mCp \frac{dT_s(t)}{dt}$$

- $ei1 = Udo * Atco * T_v(t)$
- $ei2 = W(t) * Cp * T_e$
- $eo1 = Udo * Atco * (T_e + T_s(t))/2$
- $eo2 = W(t) * Cp * T_s(t)$

Se realiza factor común de la constante global de transferencia de calor.

$$Udo * Atco * \left(T_v(t) - \frac{T_e}{2} - \frac{T_s(t)}{2} \right) + ei2 - eo2 = \frac{1}{2} mCp \frac{dT_s(t)}{dt}$$

Linealización de la ecuación diferencial

Se procede a linealizar la ecuación diferencial para luego poder aplicar la transformada de Laplace.

$$W(t)C_p T_s(t): w_0 C_p T_{s0} + C_p T_{s0}(w(t) - w_0) + C_p w_0 (T(t) - T_{s0})$$

Simplificando la ecuación de la energía de salida

$$W(t)C_p T_s(t): C_p T_{s0} w(t) + C_p w_0 \Delta T_s(t)$$

Remplazando el término lineal en 2.3 obtenemos la ecuación lineal que se necesita.

$$x_1 + ei_2 - (C_p T_{s0} w(t) + C_p w_0 \Delta T_s(t)) = y_1$$

Donde:

$$x_1 = U_{do} A_{tco} \left(T_v(t) - \frac{T_e}{2} - \frac{T_s(t)}{2} \right)$$

$$y_1 = \frac{1}{2} m C_p \frac{dT_s(t)}{dt}$$

Variable desviación de la ecuación diferencial.

Una vez resuelta la ecuación lineal del sistema, se ha podido obtener el modelo matemático con variables de desviación, siendo puntos escogidos cuando el sistema se estabiliza.

$$x_0 + w_0 C_p T_e - C_p T_{s0} w_0 - C_p w_0 \Delta T_{s0} = 0$$

Donde:

$$x_0 = U_{do} A_{tco} \left(T_{v0} - \frac{T_e}{2} - \frac{T_{s0}}{2} \right)$$

Una vez hecho el análisis matemático se llega a:

$$\Delta e_{i1} - \Delta e_{o1} + \Delta e_{i2} - C_p T_{s0} \Delta W(t) - C_p w_0 \Delta T_s(t) = \Delta y_1$$

Donde:

$$\Delta e_{i1} = U_{do} A_{tco} \Delta T_v(t)$$

$$\Delta e_{i2} = \Delta W(t) C_p T_e$$

$$\Delta e_{o1} = U_{do} A_{tco} \frac{\Delta T_s(t)}{2}$$

Transformada de la Laplace de la ecuación diferencial

$$L\{\Delta e_{i1}\} - L\{\Delta e_{o1}\} + L\{\Delta e_{i2}\} - L\{\Delta e_3\} - L\{\Delta e_4\} = L\{\Delta y_1\}$$

Donde:

$$\Delta e_3 = C_p T_{s0} \Delta W(t)$$

$$\Delta e_4 = C_p w_0 \Delta T_s(t)$$

La ecuación en término de la frecuencia:

$$\Delta E_{i1} - \Delta E_{o1} + \Delta E_{i2} - \Delta E_3 - \Delta E_4 = \frac{1}{2} m C_p \Delta T_s(S)$$

$$\Delta E_{i1} = U_{do} A_{tco} \Delta T_v(S)$$

$$\Delta E_{i2} = \Delta W(s) C_p T_e$$

$$\Delta E_{o1} = U_{do} A_{tco} \frac{\Delta T_v(S)}{2}$$

$$\Delta E_3 = \Delta W(s) C_p T_{s0}$$

$$\Delta E4 = C_p w_0 \Delta T_s(S)$$

Se agrupan lo términos con factor común:

$$\Delta E_{i1} + \Delta W = \Delta T_s(S) \left(\frac{mC_{ps}}{2} + \frac{U_{do}A_{tco}}{2} + C_p w_0 \right)$$

Donde:

$$\Delta E_{i1} = U_{do} A_{tco} \Delta T_v(S)$$

$$\Delta W = \Delta W(S) (C_p T_e - C_p T_{s0})$$

Se envía a izquierda la variable de temperatura de salida.

$$\Delta T(S) D_d = \Delta E_{i1} + \Delta W(S) (C_p T_e - C_p T_{s0})$$

Donde:

$$D_d = \left(\frac{mC_{ps}}{2} + \frac{U_{do}A_{tco}}{2} + C_p w_0 \right)$$

Se despeja la temperatura de salida:

$$\Delta T_s(S) = \frac{U_{do}A_{tco}}{D_d} \Delta T_v(S) + \frac{C_p(T_e - T_{s0})}{2} \Delta W(S)$$

Donde las constantes del sistema están compuestas por:

$$K1 = \frac{U_{do}A_{tco}}{0.5U_{do} + C_p w_0}$$

$$K2 = \frac{C_p(T_e - T_{s0})}{0.5U_{do}A_{tco} + C_p w_0}$$

$$t1 = t2 = \frac{0.5mCp}{0.5UdoAtco + Cp w0}$$

El único componente que queda por definir es el coeficiente global de transferencia U [W/m²K]. Este coeficiente, U, se define como aquella magnitud que multiplicada por el área (en cuya dirección normal se transmite el calor) y por la diferencia total de las temperaturas proporciona la tasa de calor transmitido a través de la configuración considerada. Éste se calculará usando los mecanismos de transferencia de calor por convección y despreciando los de conducción (Álvarez, 2001, pág. 1).

Modelamiento Matemático Condensador Evaporativo:

Los sistemas térmicos son aquellos que involucran la transferencia de calor de una sustancia a otra. Estos sistemas se analizan en términos de resistencia y capacitancia, aunque la capacitancia térmica y la resistencia térmica tal vez no se representen con precisión como elementos de parámetros concentrados, como, por lo general, están distribuidos en todas las sustancias. Para lograr análisis precisos, deben utilizarse modelos de parámetros distribuidos. Sin embargo, para simplificar el análisis, aquí se supondrá que un sistema térmico se representa mediante un modelo de parámetros concentrados, que las sustancias que se caracterizan por una resistencia al flujo de calor tienen una capacitancia térmica insignificante y que las sustancias que se caracterizan por una capacitancia térmica tienen una resistencia insignificante al flujo de calor. (Katsuhiko, 2010, pág. 136).

El calor fluye de una sustancia a otra de tres formas diferentes: por conducción, por convección y por radiación. Aquí sólo se considerarán la | y la convección. (La transferencia de calor por radiación sólo se aprecia si la temperatura del emisor es muy alta en comparación con la del receptor. La mayor parte de los procesos térmicos en los sistemas de control de procesos no involucran transferencia de calor por radiación.) Para la transferencia de calor por conducción o convección.

$$q = K \Delta\theta$$

$$q = \text{Flujo de calor} \frac{\text{kcal}}{\text{seg}}$$

$$K = \text{Coeficiente de calor} \frac{\text{kcal}}{\text{seg}} ^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta = \text{diferencia de temperatura}$$

El coeficiente se obtiene de la siguiente manera:

$$K = \frac{kA}{\Delta X} \text{ por conducción}$$

$$K = HA \text{ por convección}$$

Donde:

$$k = \text{conductividad térmica}, \frac{\text{kcal}}{\text{n}} \text{ seg } ^\circ\text{C}$$

$$A = \text{Área normal para flujo de calor } \text{m}^2$$

$$\Delta X = \text{espesor del conductor}, \text{m}$$

$$H = \text{Coeficiente de convección} \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2} \text{ seg } ^\circ\text{C}$$

Resistencia y capacitancia térmicas: La resistencia térmica R para la transferencia de calor entre dos sustancias se define del modo siguiente:

$$R = \frac{\text{cambio en la diferencia de temperatura } ^\circ\text{C}}{\text{cambio en el flujo de calor kcal/seg}}$$

La resistencia térmica para una transferencia de calor por conducción o por convección se obtiene mediante.

$$R = \frac{d(\Delta\theta)}{dq} = \frac{1}{K}$$

Como los coeficientes de conductividad y convección térmica son casi constantes, la resistencia térmica para la conducción o la convección es constante. (Katsuhiko, 2010, pág. 139).

La capacitancia térmica C se define mediante.

$$C = \frac{\text{cambio en el calor almacenado kcal}}{\text{cambio en la temperatura } ^\circ\text{C}}$$

$$C = mc$$

Donde:

m = masa de la sustancia considerada kg

c = calor específico de la sustancia $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} ^\circ\text{C}$

Físicamente condensador evaporativo.

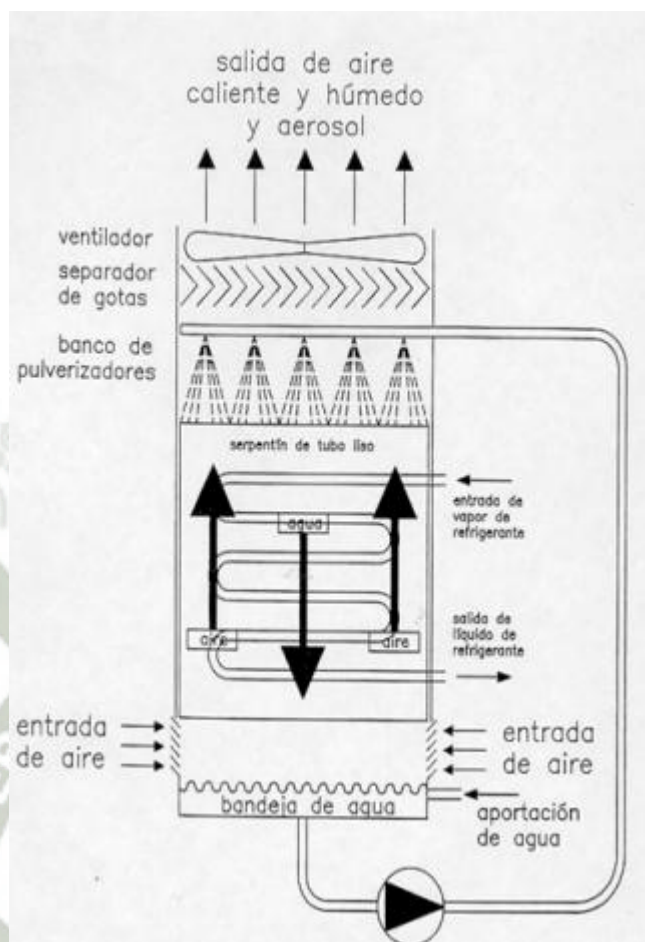


Figura Condensador Evaporativo real

T_{ic} = Temperatura inicial de condesador evaporativo

T_{oc} = Temperatura salida de condesador evaporativo

G = Velocidad de flujo de liquido en estado estable condesador evaporativo

M = Masa de liquido en Kg

c = Calor especifico del liquido, $\frac{kcal}{kg} ^\circ C$

R = Resistencia temica $^\circ C \frac{seg}{kcal}$

C = Capacidad termica $\frac{kcal}{^\circ C}$

H = flujo de calor en estado estable $\frac{kca}{seg}$

Supóngase que la temperatura del líquido que entra se mantiene constante y que el flujo de calor de entrada al sistema (el calor que proporciona el calefactor) cambia repentinamente de H_1 a $H_1 h_i$, donde h_i representa un cambio pequeño en el flujo de calor de entrada. El flujo de calor de salida cambiará, entonces, de forma gradual, de H_1 a $H_1 h_o$. La temperatura del líquido que sale también cambiará de C_1 o a $C_1 h$. Para este caso, h_o , C y R se obtienen, respectivamente, como.

$$h_o = Gc\theta$$

$$C = Mc$$

$$R = \frac{\theta}{h_o} = \frac{1}{Gc}$$

La ecuación diferencial para este sistema es

$$Cd\theta = (h_1 - h_o)dt$$

O bien:

$$\frac{Cd\theta}{dt} = (h_1 - h_o)$$

Que puede reescribirse como:

$$\frac{RCd\theta}{dt} + \theta = Rh_1$$

Obsérvese que la constante de tiempo del sistema es igual a RC o M/G segundos.

La función de transferencia que relaciona h con h_i se obtiene mediante:

$$\frac{\theta(s)}{H_1(s)} = \frac{R}{RCs + 1}$$

Donde $C(s)$ $[h(t)]$ y $H_i(s)$ $[h_i(t)]$.

En la práctica, la temperatura del líquido que entra puede fluctuar y actuar como una perturbación de carga. (Si se pretende mantener una temperatura de salida constante, puede instalarse un controlador automático que ajuste el flujo de calor de entrada, con el propósito de compensar las fluctuaciones en la temperatura del líquido que entra.) Si la temperatura del líquido que entra cambia repentinamente de C_1 a C_2 , mientras que el flujo de calor de entrada H y el flujo de líquido G se conservan constantes, el flujo de calor de salida cambiará de H_1 a H_2 y la temperatura del líquido que sale cambiará de C_1 a C_2 . La ecuación diferencial para este caso es:

$$Cd\theta = (Gc\theta_1 - h\theta)dt$$

$$\frac{Cd\theta}{dt} = (Gc\theta_1 - h\theta)$$

$$\frac{RCd\theta}{dt} + \theta = \theta_1$$

La función de transferencia que relaciona h y h_i se obtiene mediante.

$C(s)$ donde $C(s) = \frac{H(s)}{H_i(s)}$ y $C_i(s) = \frac{H_i(s)}{H(s)}$.

Si este sistema térmico está sujeto a cambios en la temperatura del líquido que entra y en el flujo de calor de entrada, en tanto que el flujo del líquido se conserva constante, el cambio h en la temperatura del líquido que sale se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$\frac{RCd\theta}{dt} + \theta = \theta_1 + Rh_1$$

Modelamiento Matemático Compresor de Amoniaco:

Para poder obtener el funcionamiento en relación a la temperatura, se realiza el muestreo de funcionamiento ya sea la temperatura de salida y entrada del compresor, de igual manera se realiza la variación de presión en el compresor para poder obtener un aproximación del funcionamiento.

DATOS OBTENIDOS

Descarga y carga de compresor de amoniaco real

DESCARGA y CARGA		
PRESION (PSI)	TEMPERATURA (°F)	TEMPERATURA (°C)
15	0	32
25	14	57.2
50	35	95
100	64	147.2
150	84	183.2
200	100	212
250	114	237.2
275	121	249.8

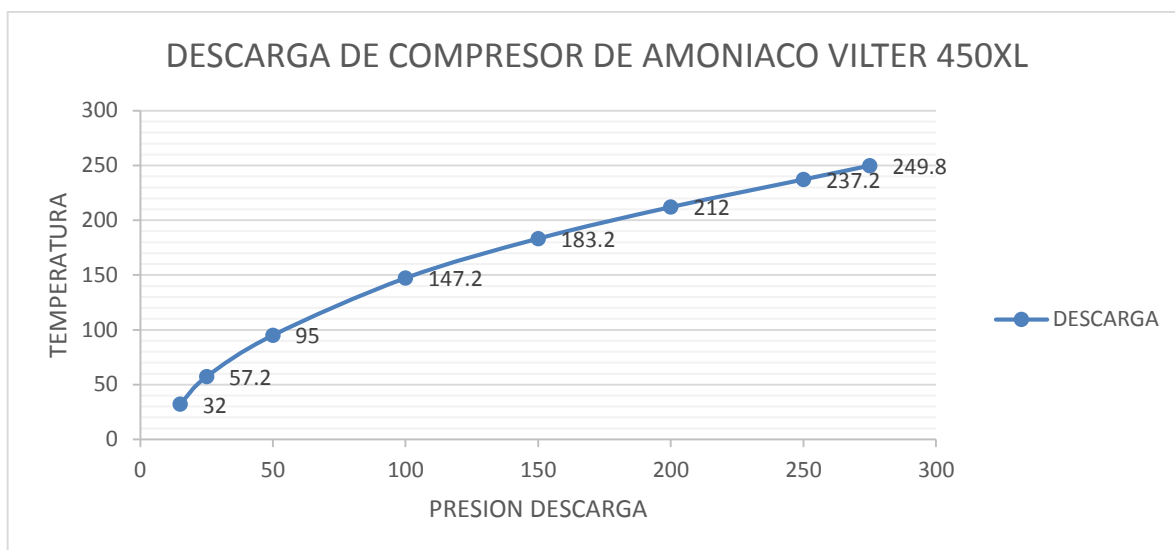


Figura Diagrama de Presión descarga

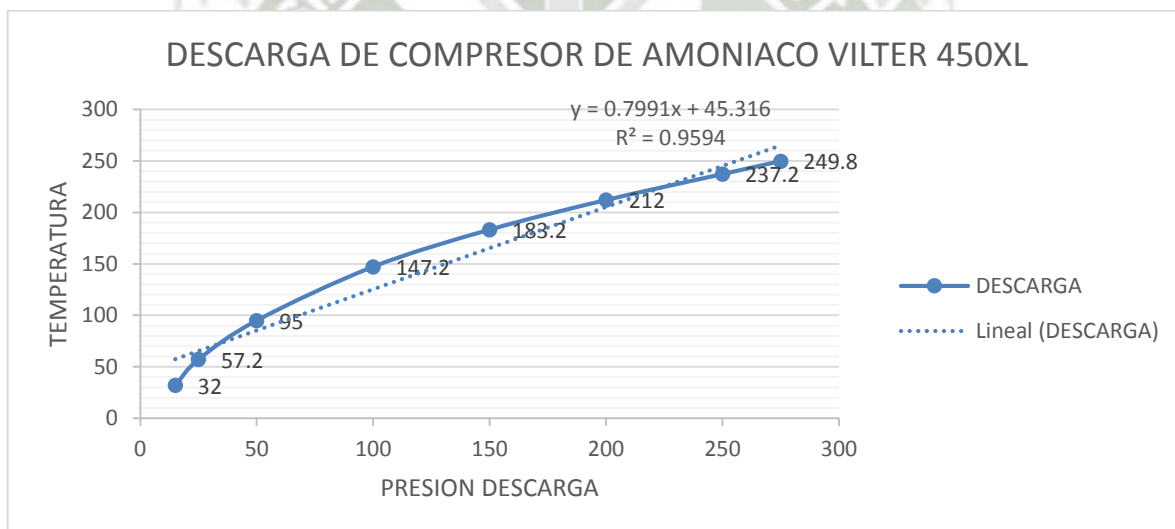


Figura Presión descarga con linealidad

$$y = 0.7991x + 45.316 = T(t) = 0.7991p(t) + 45.316$$

Donde:

$$T_0 = 45.316$$

$$A=0.7991$$

$$T(t) - T_0 = AP(t)$$

Según Ley de Newton de enfriamiento:

$$\frac{T(t) - T_0}{A} = \frac{dT}{dt} = P(t)$$

Donde:

$K=1/A = 1/A \times S$, Constante de k es el coeficiente de intercambio de calor y S es el área del cuerpo.

$$\frac{dT}{dt} = K(T(t) - T_0) = P(t)$$

$$\frac{dT}{dt} = P(t)$$

Transformada de la place:

$$ST(s) = P(S)$$

$$\frac{T(s)}{P(S)} = \frac{1}{S}$$

Modelamiento Matemático Sistema de Refrigeración:

Función de Transferencia Compresor:

$$\frac{T(s)}{P(s)} = \frac{1}{s}$$

Función de Transferencia Condensador Evaporativo:

$$\frac{\theta(s)}{H1(s)} = \frac{R}{RCs + 1}$$

Función de Transferencia Intercambiador:

$$\Delta Ts(S) = \frac{UdoAtco}{Dd} \Delta Tv(S) + \frac{Cp(Te - Ts0)}{2} \Delta W(S)$$

Análisis de datos reales de sistema de Refrigeración a modelar:

Condensador 1 VPF 400:

DATOS:

TR= 3023.95 Kcal/h

Temperatura: 32 ° C

Capacidad de disipar: 1259 kW = 357.990 Toneladas de refrigeración (TR)=
1082543.86 Kcal/Hr

Coeficiente de transmisión (k)= 800 Kcal/(h)(m2)(°C).

Tc=Temperatura de condensación °C.

Tca=Temperatura de entrada de agua en el condensador °C.

Tsa= Temperatura de salida de agua del condensador °C.

$$\Delta tm = \frac{(tc - tea) - (tc - tsa)}{\ln \frac{(tc - tea)}{(tc - tsa)}}$$

$$\Delta tm = \frac{(32 - 21) - (32 - 26)}{\ln \frac{(32 - 21)}{(32 - 26)}}$$

$$\Delta tm = 8.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Entalpía:

Antes de condensación: 136.16 Kcal/kg

Después: 91.21 Kcal/kg

Antes del compresor: 63.15 Kcal/ kg

$$\frac{h2 - h3}{h1 - h4} = \frac{136.16 - 91.21}{91.21 - 63.15} = 1.602$$

$$Qc = 1082543.86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Hr}} \times 1.602 = 1734235.27 \text{ Kcal/Hr}$$

$$S = \frac{Qc}{kx\Delta tm} = 264.365 \text{ m}^2$$

$$m = \frac{Qc}{Cex\Delta tm}$$

Calor específico de amoníaco: 307.96 Kcal /kg°C

$$m = \frac{1734235.27 \text{ Kcal/Hr}}{307.96 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (32 + 8)^\circ\text{C}} = 140.784 \text{ Kg/Hr}$$

$$\frac{\theta(s)}{H1(s)} = \frac{R}{RCs + 1}$$

$$R = \frac{1}{800 \text{ Kcal/(h)(m}^2\text{)(}^\circ\text{C)}} = 0.00125$$

$$C = 146.038 \text{ Kg} \times 307.96 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} = 43355.88 \frac{\text{Kcal}}{^\circ\text{C}}$$

- **Condensador 2 CXV 253:**

DATOS:

Temperatura: 32 ° C

Capacidad de disipar: 1306 kW = 371.35 Toneladas de refrigeración (TR)=
1122943.83 Kcal/Hr

Coeficiente de transmisión (k)= 800 Kcal/(h)(m²)(°C).

$$\Delta tm = \frac{(tc - tea) - (tc - tsa)}{\ln \frac{(tc - tca)}{(tc - tsa)}}$$

$$\Delta tm = \frac{(32 - 21) - (32 - 26)}{\ln \frac{(32 - 21)}{(32 - 26)}}$$

$$\Delta tm = 8.2^\circ\text{C}$$

Entalpia:

Antes de condensación: 136.16 Kcal/kg

Después: 91.21 Kcal/kg

Antes del compresor: 63.15 Kcal/ kg

$$\frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} = \frac{136.16 - 91.21}{91.21 - 63.15} = 1.602$$

$$Q_c = 1082543.86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Hr}} \times 1.602 = 1798956 \text{ kcal/Hr}$$

$$S = \frac{Q_c}{kx\Delta tm} = 274.231 \text{ m}^2$$

$$m = \frac{Q_c}{C_{ex}\Delta tm}$$

Calor específico de amoníaco: 307.96 Kcal /kg°C

$$m = \frac{1798956 \text{ kcal/Hr}}{307.96 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (32 + 8)^\circ\text{C}} = 146.038 \text{ Kg/Hr}$$

$$\frac{\theta(s)}{H1(s)} = \frac{R}{RCs + 1}$$

$$R = \frac{1}{800 \text{ Kcal/(h)(m}^2\text{)(}^\circ\text{C)}} = 0.00125$$

$$C = 146.038 \text{ Kg} \times 307.96 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} = 44973.9 \frac{\text{Kcal}}{^\circ\text{C}}$$

- **Condensador 3 ECC712-291:**

DATOS:

Temperatura: 32 ° C

Capacidad de disipar: 646 kW = 183.69 Toneladas de refrigeración (TR)=

555469.37 Kcal/Hr

Coeficiente de transmisión (k)= 800 Kcal/(h)(m²)(°C).

$$\Delta tm = \frac{(tc - tea) - (tc - tsa)}{\ln \frac{(tc - tca)}{(tc - tsa)}}$$

$$\Delta tm = \frac{(32 - 21) - (32 - 26)}{\ln \frac{(32 - 21)}{(32 - 26)}}$$

$$\Delta tm = 8.2 ^\circ C$$

Entalpía:

Antes de condensación: 136.16 Kcal/kg

Después: 91.21 Kcal/kg

Antes del compresor: 63.15 Kcal/ kg

$$\frac{h2 - h3}{h1 - h4} = \frac{136.16 - 91.21}{91.21 - 63.15} = 1.602$$

$$Q_c = 1082543.86 \frac{\text{Kcal}}{\text{Hr}} \times 1.602 = 889861.94 \text{ kcal/Hr}$$

$$S = \frac{Q_c}{kx\Delta tm} = 135.649 \text{ m}^2$$

$$m = \frac{Q_c}{C_{ex}\Delta tm}$$

Calor específico de amoniaco: 307.96 Kcal /kg°C

$$m = \frac{889861.94 \text{ kcal/Hr}}{307.96 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (32 + 8)^\circ\text{C}} = 72.238 \text{ Kg/Hr}$$

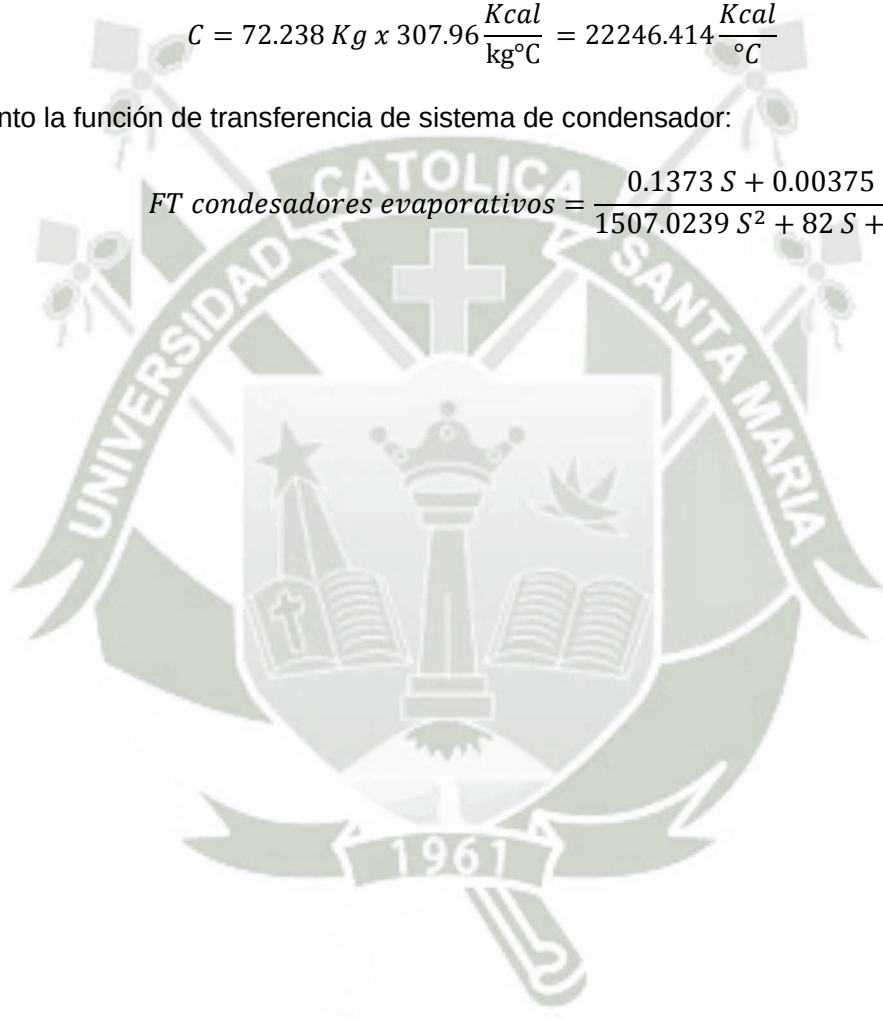
$$\frac{\theta(s)}{H1(s)} = \frac{R}{RCs + 1}$$

$$R = \frac{1}{800 \text{ Kcal/(h)(m}^2\text{)(}^\circ\text{C)}} = 0.00125$$

$$C = 72.238 \text{ Kg} \times 307.96 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} = 22246.414 \frac{\text{Kcal}}{^\circ\text{C}}$$

Por lo tanto la función de transferencia de sistema de condensador:

$$FT \text{ condensadores evaporativos} = \frac{0.1373 S + 0.00375}{1507.0239 S^2 + 82 S + 1}$$



- **Intercambiador:**

Datos reales de Intercambiador

Datos Físico de Intercambiador		
Largo del intercambiador	9	ft
Diámetro de la coraza	17 1/4	
Flujo	224	gal/min
Temperatura de entrada	80	°F
Temperatura de salida	185	°F
Presión de Vapor números de tubos	150 a 112	psi
Diámetro exterior del tubo	3/4 " con un claro entre tubos de 0.63	
Conductividad térmica de las placas	26	BTU/hft°F
Factor de obstrucción interior	0.0012	hft2°F/BTU
Factor de obstrucción externo	0.001	hft2°F/BTU
Coeficiente global de transferencia de calor	650	U/hft2°F

Función de transferencia Intercambiador:

$$Funcion Transferencia intercambiador = \frac{0.3811}{1.714 S + 1}$$

Función de transferencia del Proceso de Refrigeración de Corporación:

$$FT \text{ Proceso de refrigeracion} = \frac{1}{S} \times \frac{0.1373 S + 0.00375}{1507.0239 S^2 + 82 S + 1} \times \frac{0.3811}{1.714 S + 1}$$

$$FT \text{ Proceso de refrigeracion} = \frac{0.05233 S + 0.001429}{S(2583 S^3 + 1648 S^2 + 83.71 S + 1)}$$

Con retroalimentación:

$$FT \text{ Proceso de refrigeracion} = \frac{18.36 S^3 + 0.701 S^2 + 0.005992 S + 0.00001481}{(2583 S^5 + 1648 S^4 + 102.1 S^3 + 1.701 S^2 + 0.005992 + 0.00001481)}$$

Diagrama de respuesta con retro alimentación Modelamiento Matemático.

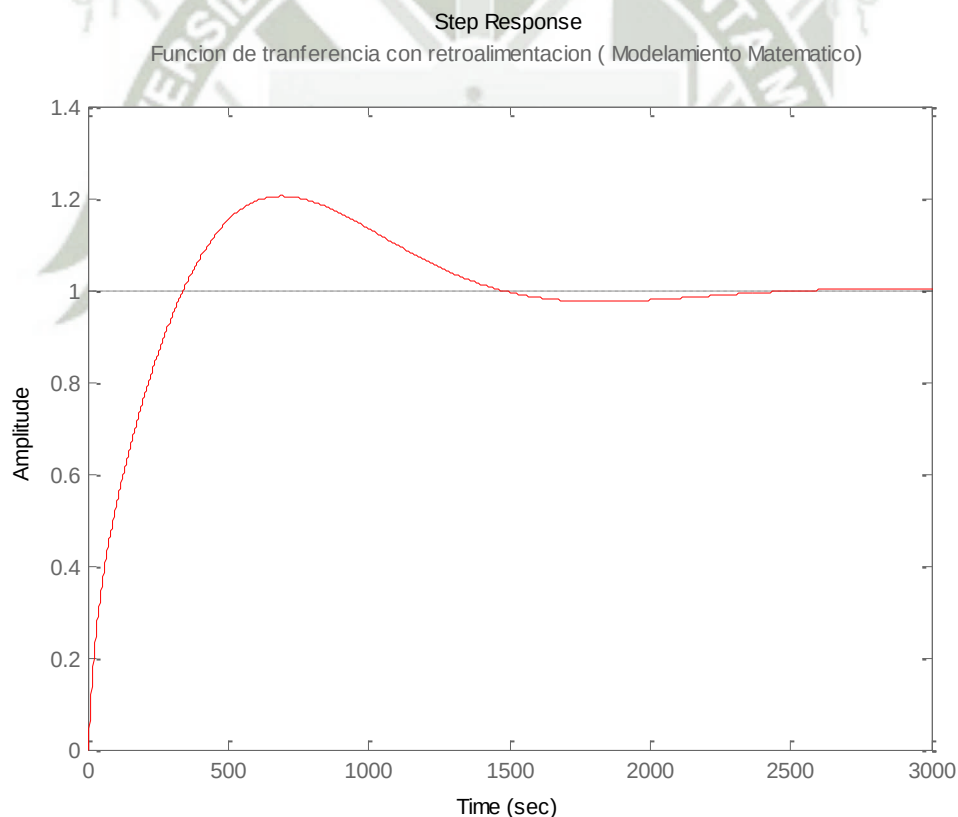


Diagrama de respuesta con retro alimentación Modelamiento Matemático

ANEXO V-ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS UTILIZADOS

Especificaciones PM710:

Características eléctricas		
Tipo de medida		RMS real hasta el armónico 15 en un sistema CA trifásico (trifásico, trifásico + N) 32 muestras por ciclo
Precisión de las mediciones	Intensidad	$\pm 0,5\%$ de 1 A a 6 A
	Tensión	$\pm 0,5\%$ de 50 V a 277 V
	Factor de potencia	$\pm 0,0031$ de 1 A a 6 A y de $-0,50$ a $+0,5$ FP
	Potencia	$\pm 1,0\%$
	Frecuencia	$\pm 0,02$ Hz de 45 a 65 Hz
	Energía activa	IEC 62053-21 Clase 1.0; precisión ANSI C12.16 Clase 1
Energía reactiva		IEC 62053-23 Clase 2
Velocidad de actualización de datos		1 s
Tensión de entrada	Tensión medida	De 10 a 480 V CA (L-L directa) De 10 a 277 V CA (L-N directa) De 0 a 1,6 MV CA (con TT externo). El inicio de la tensión de medida depende de la relación TT.
	Medición fuera del rango	1,2 Un
	Impedancia	2 M Ω (L-L) / 1 M Ω (L-N)
	Rango de frecuencia	De 45 a 65 Hz
Intensidad de entrada	Valores nominales de TI	Primario Ajustable de 1 A a 32767 A
		Secundario 5 A o 1 A
	Rango de entradas de mediciones	De 10 mA a 6 A
	Sobrecarga admitida	15 A continuo
		50 A durante 10 segundos por hora 120 A durante 1 segundo por hora
	Impedancia	$< 0,12 \Omega$
Alimentación	Carga	$< 0,15$ VA
	CA	De 100 a 415 $\pm 10\%$ V CA, 5 VA; de 50 a 60 Hz
	CC	De 125 a 250 $\pm 20\%$ V CC, 3 W
Tiempo de recorrido		100 ms a 120 V CA
Características mecánicas		
Peso		0,37 kg
Grado IP de protección (IEC 60529)		Pantalla delantera IP52, cuerpo de la central de medida IP30
Dimensiones	96 x 96 x 69 mm (central de medida con pantalla)	
	96 x 96 x 50 mm (tras la superficie de montaje)	

Características medioambientales		
Temperatura de funcionamiento	Medidor	De -5 °C a +60 °C
	Pantalla	De -10 °C a +55 °C
Temperatura de almacenamiento	Medidor + pantalla	De -40 °C a +85 °C
Valor nominal de la humedad		De 5 a 95% de humedad relativa a 50 °C (sin condensación)
Nivel de contaminación		2
Categoría de medición (entradas de tensión y alimentación)		CAT III, para sistemas de distribución de hasta 277 V L-N / 480 V CA L-L
Rigidez dieléctrica		Según EN61010, UL508 Pantalla del panel frontal con doble aislamiento
Altitud		3.000 m
Compatibilidad electromagnética		
Descarga electrostática		Nivel III (IEC 61000-4-2)
Inmunidad frente a campos de radiación		Nivel III (IEC 61000-4-3)
Inmunidad frente a transitorios rápidos		Nivel III (IEC 61000-4-4)
Inmunidad frente a ondas de impulso		Nivel III (IEC 61000-4-5)
Inmunidad por conducción		Nivel III (IEC 61000-4-6)
Inmunidad frente a campos magnéticos		Nivel III (IEC 61000-4-8)
Inmunidad frente a huecos de tensión		Nivel III (IEC 61000-4-11)
Emisiones conductivas y de radiación		Entorno comercial CE/FCC Parte 15 Clase B EN55011
Armónicos		IEC 61000-3-2
Emisiones de fluctuaciones		IEC 61000-3-3
Seguridad		
Europa		CE, según IEC 61010-1
EE. UU. y Canadá		UL508
Comunicaciones		
Puerto RS485		2 hilos, 2.400, 4.800, 9.600 o 19.200 baudios; Paridad — Par, Impar, Ninguna; 1 bit de parada; Modbus RTU
Características de la pantalla		
Dimensiones 73 x 69 mm		Pantalla de cristal líquido (LCD) verde con retroiluminación (total de 6 líneas, 4 valores concurrentes)

Comando	Descripción
0x03	Leer los registros de retención
0x04	Leer los registros de entrada
0x06	Preestablecer registros individuales
0x10	Preestablecer registros múltiples
0x11	Id de informe Cadena devuelta Byte 1: 0x11 Byte 2: número de bytes siguientes sin crc Byte 3: byte de Id = 250 Byte 4: estado = 0xFF Bytes 5 y siguientes: cadena de Id = central de medida PM710 Últimos 2 bytes: CRC
0x2B	Leer identificación del dispositivo, implementación BASIC (datos 0x00, 0x01, 0x02), nivel de conformidad 1, Valores de objetos 0x01: Si el registro 4128 es 0 entonces "Merlin Gerin". Si el registro 4128 es 1, entonces "Square D". 0x02: "PM710" 0x03: "Vxx.yyy" donde xx.yyy es el número de versión del sistema operativo. Esta es la versión con nuevo formato del registro 7001. Si el valor para el registro 7001 es 12345, entonces los datos 0x03 serán "V12.345".

Ficha técnica EKC 361:

Datos técnicos

Tensión	24 V c.a. +/-15% 50/60 Hz, 80 VA (el suministro de tensión esta galvánicamente separado de las señales de entrada y salida)	
Potencia	Controlador	5 VA
Potencia	Actuador	75 VA
Señal de entrada	Intensidad	4-20 mA o 0-20 mA
Señal de entrada	Entrada digital desde función de contacto externo	
Sensor de entrada	2 pcs. Pt 1000 ohm	
Señal de salida	Señal de intensidad	4-20 mA o 0-20 mA
Señal de salida	Intensidad máxima: 200 ohm	
Salida relé	2 pcs. SPST	AC-1: 4 A (ohmico)
Relé de alarma	1 pcs. SPST	AC-15: 3 A (inductivo)
Actuador	Entrada	Señal de temperatura del sensor en el actuador
Actuador	Salida	Pulsación de 24 V c.a. al actuador
Comunicación de datos	Posible conectar un módulo de comunicación de datos	
Temperatura ambiente	Durante operación	-10 - 55°C
Temperatura ambiente	Durante transporte	-40 - 70°C
Protección	IP 20	
Peso	300 g	
Montaje	Rail DIN	
Pantalla	LED, 3 dígitos	
Terminales	Max. 2.5 mm²	
Homologaciones	Cumple con directivas U.E. de baja tensión y estipulaciones EMC para marcado CE.	
Homologaciones	Pruebas LVD, según EN 60730-1 y EN 60730-2-9	
Homologaciones	Pruebas EMC, según EN50081-1 y EN 50082-2	
Homologaciones		

Menú

SW = 1.5x

Función	Parámetro	Min.	Max.	Ajuste de fábrica
Pantalla				
Muestra la temperatura del sensor seleccionado				
At ICM valve OD also can be selected				
Referencia				
Ajuste de la temperatura requerida en cámara	-	-70°C	160°C	10°C
Unidades de temperatura	r05	°C	°F	°C
Contribución externa a la referencia	r06	-50°C	50°C	0.0
Corrección en la señal Saire	r09	-10,0°C	10,0°C	0.0
Corrección en la señal Saux	r10	-10,0°C	10,0°C	0.0
Arranque/parada refrigeración	r12	OFF	On	On
Alarma				
Desviación superior (sobre el ajuste de temperatura)	A01	0	50 K	5.0
Desviación inferior (bajo el ajuste de temperatura)	A02	0	50 K	5.0
Retraso de alarma	A03	0	180 min	30
Parámetros de regulación				
Máxima temperatura en el actuador	n01	41°C	140°C	140
Mínima temperatura en el actuador	n02	40°C	139°C	40
Tipo de actuador (1=CVQ-1 a 5 bar, 2=CVQ 0 a 6 bar, 3=CVQ 1.7 a 8 bar, 4= CVMQ, 5=KVQ, 6=ICM)	n03	1	6	2
P: Factor de amplificación Kp	n04	0,5	20	3
I: Tiempo de integración Tn (600 = off)	n05	60 s	600 s	240
D: Tiempo diferencial Td (0 = off)	n06	0 s	60 s	10

Modbus:**Medio físico:**

El protocolo Modbus transmite y recibe datos de control, la comunicación es asíncrona y las velocidades de transmisión previstas van desde los 75 baudios a 19200 baudios. La máxima distancia entre estaciones depende del nivel físico, pudiendo alcanzar hasta 1200 m. Funciona mediante el sistema maestro /esclavo.

Acceso al medio:

La estructura lógica es del tipo maestro / esclavo, con acceso al medio controlado por el maestro. El número máximo de estaciones previsto es de 63 esclavos más una estación maestra. Los intercambios de mensajes pueden ser de dos tipos:

- Intercambios punto a punto, que contienen dos mensajes: una demanda del maestro y una respuesta del esclavo (puede ser simplemente un reconocimiento).
- Mensajes difundidos, esto mensajes consisten en una comunicación unidireccional del maestro a todos los esclavos. Este tipo de mensajes no tiene respuesta por parte de los esclavos y se suelen emplear para mandar comunes de configuración.

Protocolo:

La codificación de datos dentro de la trama puede hacerse en modo ASCII o puramente binario, según el estándar RTU (Remote Transmisión Unit). En cualquiera de los dos casos, cada mensaje obedece a una trama que contiene cuatro

campos principales. A continuación se da una explicación de cada uno de los campos de mensaje:

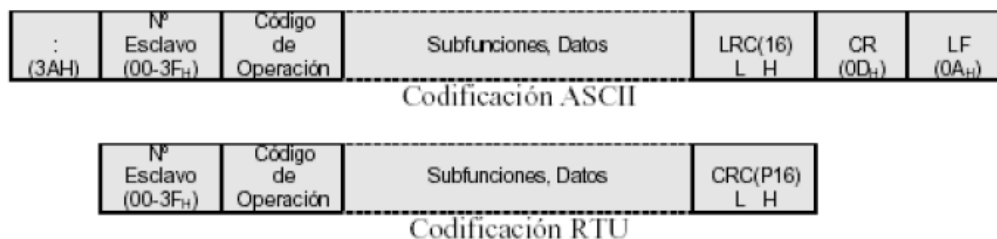


Figura Codificación RTU

Número de esclavo (1 byte).- permite direccionar máximo 63 esclavos que van del 01H hasta 3FH. El número 00H se reserva para los mensajes difundidos.

Código de operación o función (1 byte).- cada función permite transmitir datos u órdenes al esclavo. Existen dos tipos básicos de órdenes: o Ordenes de lectura / escritura de datos en los registros o en la memoria del esclavo. o Ordenes de control del esclavo y el propio sistema de comunicaciones (RUN / STOP, carga y descarga de programas, verificación de contadores de intercambio).

- Cambio de subfunciones / datos (n bytes).- este campo suele contener en primer lugar, los parámetros necesarios para ejecutar la función indicada por el byte anterior. Estos parámetros podrán ser códigos de subfunciones en el caso de órdenes de control (función 00H) o direcciones del primer bit o byte, número de bits o palabras a leer o escribir, valor del bit palabra en caso de escritura.

- Palabra de control de errores (2 bytes).- en código ASCII, ésta palabra es simplemente la suma de comprobación del mensaje en módulo 16 expresado en ASCII.

Características técnicas PLC siemens 1200 CPU 1212c utilizado para proyecto.

Datos técnicos

	6ES7 212-1BE31-0XB0 CPU 1212C AC/DC/relé	6ES7 212-1AE31-0XB0 CPU 1212C DC/DC/DC	6ES7 212-1HE31-0XB0 CPU 1212C AC/DC/relé
Información general			
Ingeniería con			
• Paquete de programación	STEP 7 V11.0 SP2 o superior	STEP 7 V11.0 SP2 o superior	STEP 7 V11.0 SP2 o superior
Tensión de alimentación			
24 V DC		Si	Si
120 V AC	Si		
230 V AC	Si		
Alimentación de sensores			
Alimentación de sensores 24 V			
• 24 V	Rango permitido: 20,4 a 28,8 V	Rango permitido: 20,4 a 28,8 V	Rango permitido: 20,4 a 28,8 V
Pérdidas			
Pérdidas, típ.	11 W	9 W	9 W
Memoria			
Memoria de trabajo			
• integrada	50 kbyte	50 kbyte	50 kbyte
Memoria de carga			
• integrada	1 Mbyte	1 Mbyte	1 Mbyte
Respaldo			
• sin pila	Si	Si	Si
Tiempos de ejecución de la CPU			
para operaciones de bits, típ.	0,085 µs; /instrucción	0,085 µs; /instrucción	0,085 µs; /instrucción
para operaciones de palabras, típ.	1,7 µs; /instrucción	1,7 µs; /instrucción	1,7 µs; /instrucción
para aritmética en coma flotante, típ.	2,5 µs; /instrucción	2,5 µs; /instrucción	2,5 µs; /instrucción
Áreas de datos y su remanencia			
Marcas			
• Cantidad, máx.	4 kbyte; Tamaño del área de marcas	4 kbyte; Tamaño del área de marcas	4 kbyte; Tamaño del área de marcas
Área de direcciones			
Imagen del proceso			
• Entradas, configurables	1 kbyte	1 kbyte	1 kbyte
• Salidas, configurables	1 kbyte	1 kbyte	1 kbyte
Hora			
Reloj			
• Reloj por hardware (reloj tiempo real)	Si	Si	Si

	6ES7 212-1BE31-0XB0 CPU 1212C AC/DC/relé	6ES7 212-1AE31-0XB0 CPU 1212C DC/DC/DC	6ES7 212-1HE31-0XB0 CPU 1212C AC/DC/relé
Entradas digitales			
Cantidad/entradas binarias	8; integrada	8; integrada	8; integrada
• De ellas, entradas usable para funciones tecnológicas	4; HSC (High Speed Counting)	4; HSC (High Speed Counting)	4; HSC (High Speed Counting)
Salidas digitales			
Número/salidas binarias	6; Relé	6	6; Relé
• De ellas, salidas rápidas		4; Salida de tren de impulsos 100 kHz	
Entradas analógicas			
Canales integrados (AI)	2; 0 a 10 V	2; 0 a 10 V	2; 0 a 10 V
Rangos de entrada			
• Tensión	Si	Si	Si
1. Interfaz			
Tipo de interfaz	PROFINET	PROFINET	PROFINET
Norma física	Ethernet	Ethernet	Ethernet
Funcionalidad			
• PROFINET IO-Controller	Si	Si	Si
Funciones de comunicación			
Comunicación S7			
• Soporta servidor iPAR	Si	Si	Si
Comunicación IE abierta			
• TCP/IP	Si	Si	Si
• ISO-on-TCP (RFC1006)	Si	Si	Si
• UDP	Si	Si	Si
servidores web			
• Soporta servidor iPAR	Si	Si	Si
Funciones integradas			
Nº de contadores	4	4	4
Frecuencia de conteo (contadores), máx.	100 kHz	100 kHz	100 kHz
Frecuencímetro	Si	Si	Si
Posicionamiento en lazo abierto	Si	Si	Si
Regulador PID	Si	Si	Si
Nº de entradas de alarma	4	4	4
Nº de salidas de impulsos		2	
Frecuencia límite (impulsos)		100 kHz	
Condiciones ambientales			
Temperatura de empleo			
• mín.	-20 °C	-20 °C	-20 °C
• máx.	60 °C	60 °C	60 °C
Configuración			
programación			
• Lenguaje de programación			
- KOP	Si	Si	Si
- FUP	Si	Si	Si
- SCL	Si	Si	Si
Dimensiones			
Anchura	90 mm	90 mm	90 mm
Altura	100 mm	100 mm	100 mm
Profundidad	75 mm	75 mm	75 mm
Peso			
Peso, aprox.	425 g	370 g	385 g

ANEXO VI-PROGRAMA

Programacion Matlab:

```
ng=[-0.954 0.2329 1.287];
dg=[1 1.262 0.5759 0.2316];
G=tf(ng,dg);
clf,rlocus(G);
[km,pole]=rlocfind(G)
wm=max(imag(pole));
kp=0.6*km;
kd=(kp*pi)/(4*wm);
ki=(kp*wm)/pi;
nk=[kd kp ki];
dk=[1 0];
gc=tf(nk,dk)
gd=series(G,gc)
GT=feedback(gd,1)
step(GT,'r') %Escalón rojo para la función de transferencia con el
regulador
hold on
```

Programación y configuración del Sistema de supervisión SCADA Indusoft Web

Studio:

El software de interface de usuario ha sido diseñado para manejar los requerimientos de la gestión energética del proceso de refrigeración, cuenta con pantallas amigables e intuitivas y de fácil interacción, las lecturas se encuentran en un tamaño de letra que permite que el usuario pueda distinguir fácilmente los parámetros, los perfiles de carga muestran la tendencia del consumo en función del tiempo y se consideran dos variables la corriente y la potencia activa, de tal manera que se puede conocer el comportamiento del proceso de refrigeración de la empresa, permite también conocer los tipos de perturbaciones eléctricas en la red como los armónicos de tensión y corriente, la energía reactiva o los desbalances, tiene la funcionalidad de generar alarmas ,el estado de la red,

el programa es escalable es decir se puede ir añadiendo más dispositivos de medición o adquirir datos de PLCs de las líneas de producción.

A continuación se detallara el procedimiento a seguir para lograr la inclusión de la gestión energética en el análisis del proceso:

Creación de un proyecto en Indusoft Web Studio:

El primer paso es proceder a la creación de la primera pantalla que tendrá el SCADA, a partir de ella se elaborara la lista de variables o tags procedentes de los registros de cada medidor, al abrir el Indusoft Web Studio (IWS) nos dirigimos a la pestaña File y le damos click a la opción New... saldrá la ventana según la figura establecemos el nombre de la aplicación, que para el presente proyecto de tesis se denominara COMPRESORES-VILTER, seleccionamos la ubicación de la carpeta que cargara la aplicación, que para un rápido acceso se realizara en el escritorio, seleccionaremos el tipo de plataforma que se implementara, en este caso Local Interface por ser una aplicación interna y de manejo solo del área de mantenimiento de la planta, por último se observa que el software tiene dispuesto para el proyecto alrededor de 1500 tags, esto como ya se menciona depende del tipo de la licencia adquirida.

Luego de ello saldrá la pantalla donde nos especificara las características del primer Screen, es importante determinar el tipo de monitor que se empleara, para el presente proyecto de tesis la aplicación correrá a través de un monitor de PC de 21" con una resolución de 1024x645, si hubiera un cambio en el panel de visualización no habría inconveniente ya que IWS da la posibilidad de cambiar las características, la figura muestra la ventana.

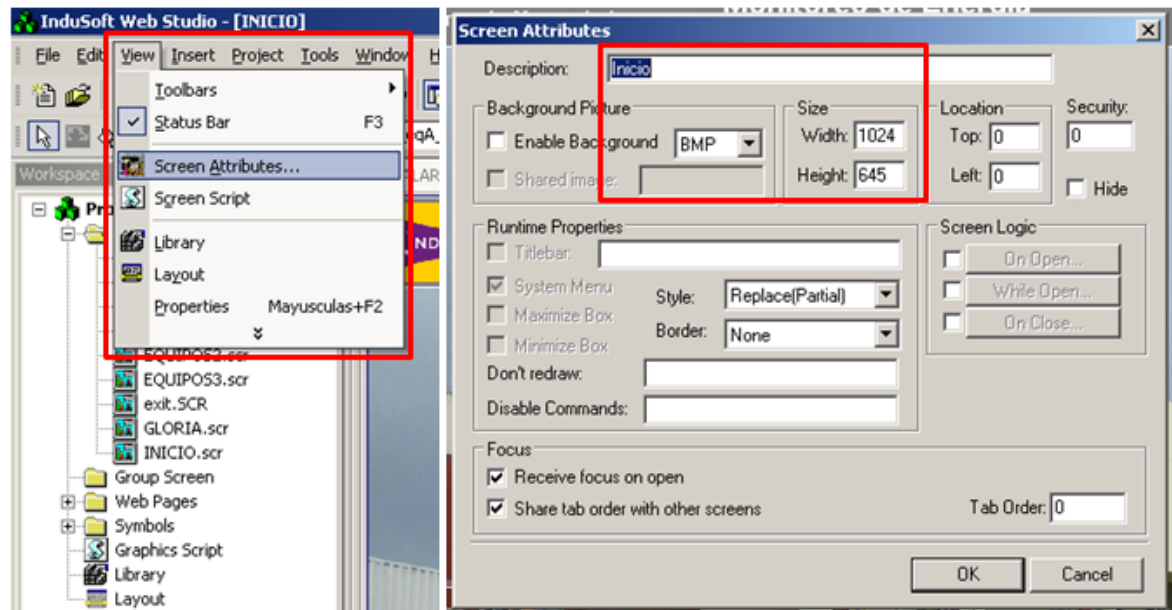


Figura Modificación de las características de las pantallas o Screens.

Enlace de datos a través de InduSoft Web Studio:

Se cuenta con dos posibilidades para ingresar la lista de tags al IWS, una es a través de la pestaña Database dentro del cuadro Workspace, donde manualmente se debe de ingresar cada tag estableciendo que tipo de variable es (integral, real, booleano, flotante, etc.) y la otra posibilidad es por medio del driver del protocolo de comunicación modbus, que para IWS es MOTCP. En ambas es factible, sin embargo para el presente proyecto de tesis se decidió por la segunda posibilidad ya que permite ingresar las direcciones de comunicación, los registros y la linealidad de los parámetros, esto a través de una sola ventana. Para la elección del driver se debe de tener en cuenta que IWS tiene alrededor de 4 drivers distintos para el protocolo modbus, unos que indican para cable de comunicación serial y el que se empleara para el desarrollo del proyecto el cual debe de especificar que es para modbus RTU

vía TCP/IP, la figura muestra los pasos a seguir para la creación de los tags a través de la pestaña Comm del cuadro Workspace y la selección del driver como se muestra en la figura a continuación.

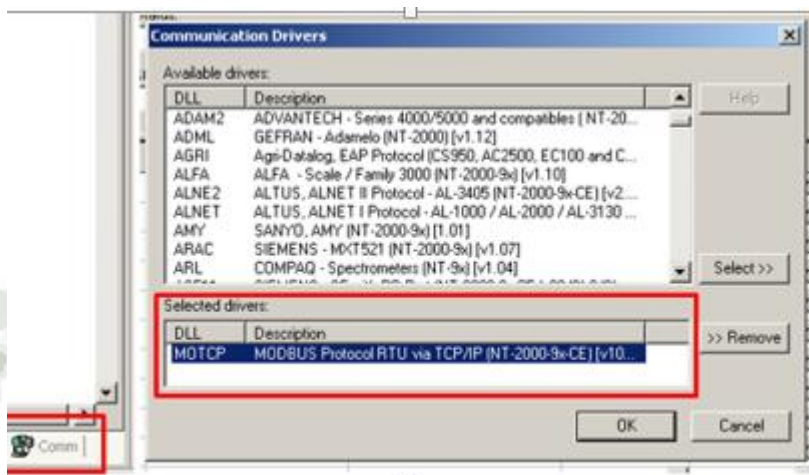


Figura .Pasos a seguir para la selección del driver.

Una vez seleccionado el driver el siguiente paso es la creación de los tags, se procedió ingresando abreviaturas del significado de cada variable con el fin de que proporcione una rápida identificación del tag, IWS automáticamente abre una ventana cuando no identifica un tag previamente creado, de esta manera es como se procedió a crear los tags de proyecto de monitoreo de energía. En la figura creación de tags de tipo Real se muestra los pasos IWS realiza para la creación de un tag a través del driver, todos los tags al ser valores de lectura con decimales se crearon como variables de tipo real:

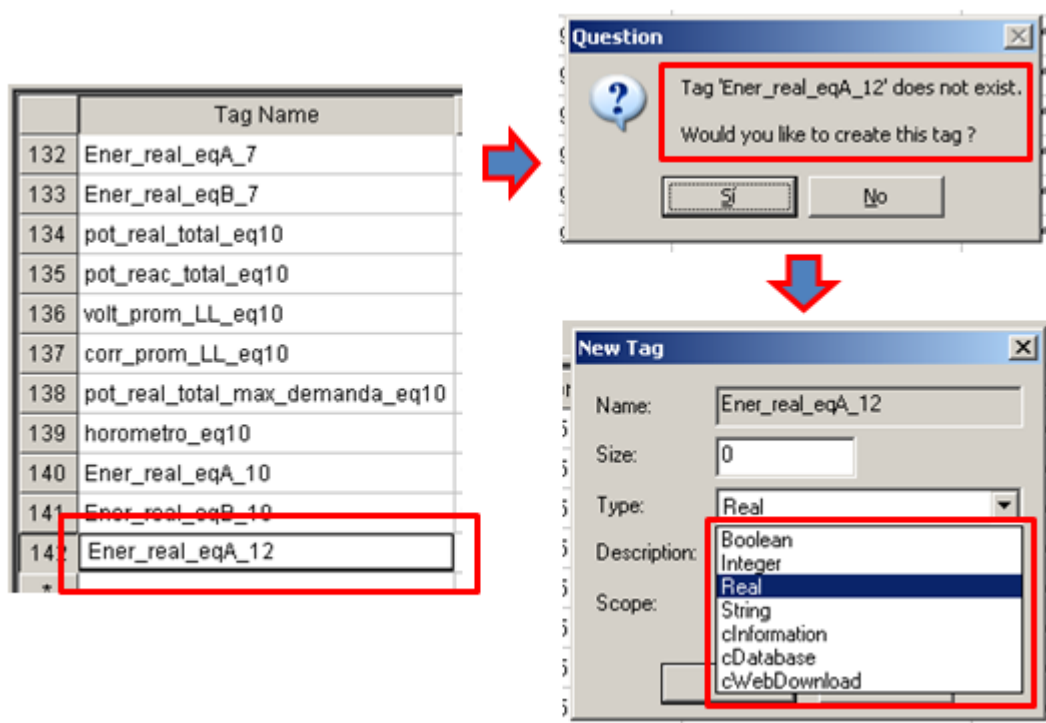


Figura. Creación de tags de tipo Real.

Son 141 tags divididos en 8 equipos medidores de energía, de los cuales 2 de ellos son principales y cuentan con 46 tags para sus lecturas, los equipos restantes cuentan con 8 tags cada uno que permiten leer datos básicos como energía, potencia, voltaje y corriente. La columna Tag Name corresponde a la abreviatura empleada para el tag o variable (ejemplo: potencia real total del medidor 1), la columna Station viene a ser la estación de trabajo remoto y corresponde a una nomenclatura establecida por IWS. Manual MOTCP de IWS.

<IP Address>:<Port Number>:<PLC ID>

Figura. Nomenclatura del driver MOTCP de IWS.

Donde:

- IP Address, es la dirección IP otorgada por el área de sistemas y corresponde a la IP con la que trabaja el Gateway, 192.168.232.159.
- Port Number, es el número del puerto con el que trabaja, generalmente, modbus y por defecto es 502.
- I/O Address, es la configuración de la lectura de los tipos de registros de modbus, pueden ser 0X, 1X, 2X, 3X, 4X, FP, etc. Depende del fabricante del equipo que envía la información hacia la estación de lectura. Para los medidores de energía corresponde 4X seguido del número del registro donde está alojado la información y donde el medidor va cargando sus lecturas.
- Div y Add, corresponden a la linealidad de los parámetros de lectura, hay parámetros como la frecuencia en el PM710 que requiere ser dividido entre 100 para obtener el dato real de lectura.

Programa de PLC, adquisición de datos Scada

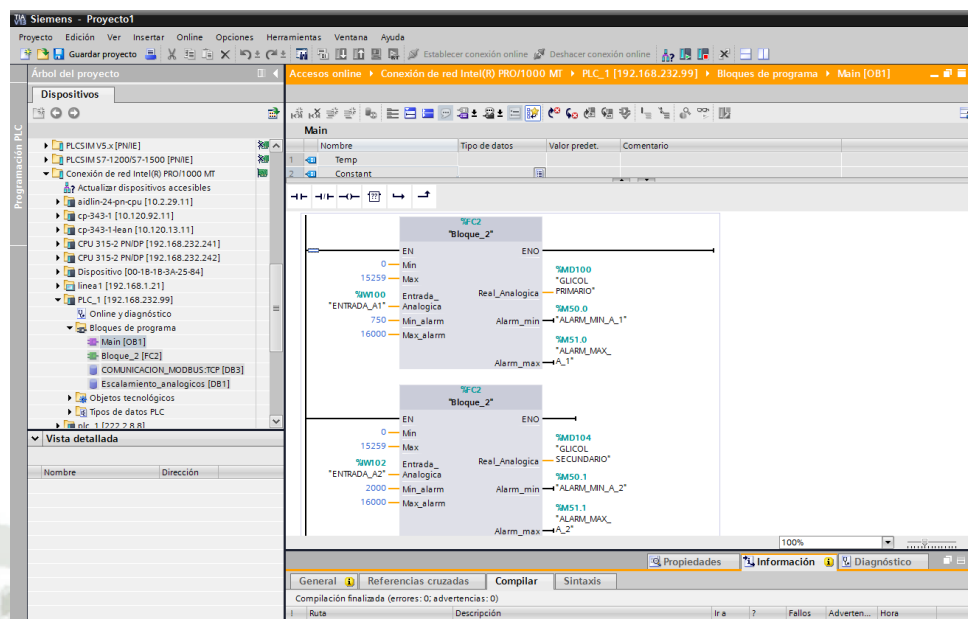


Figura Programa Principal de PLC Bloques FC1

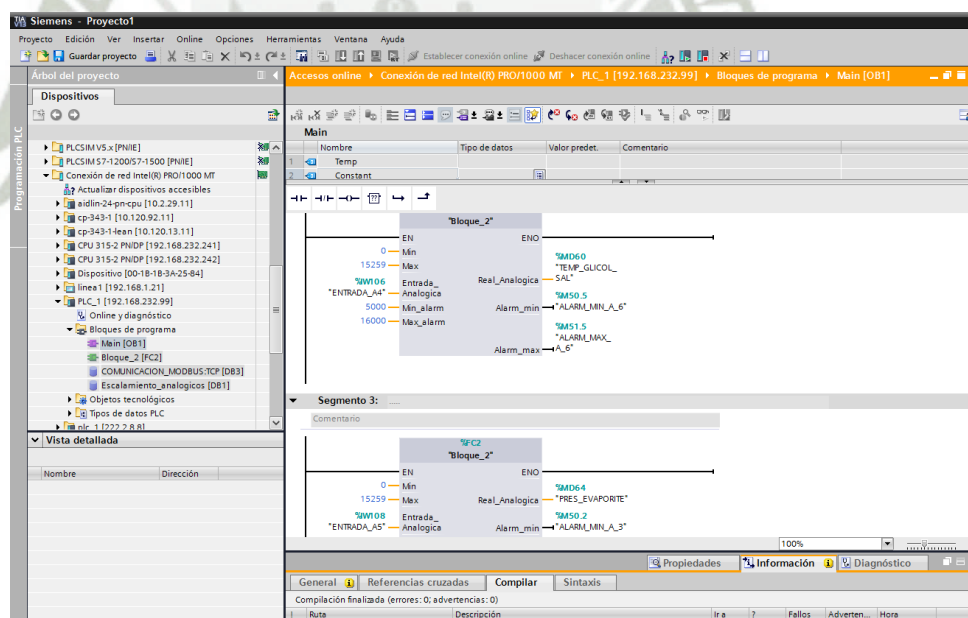


Figura Programa Principal de PLC Bloques FC1

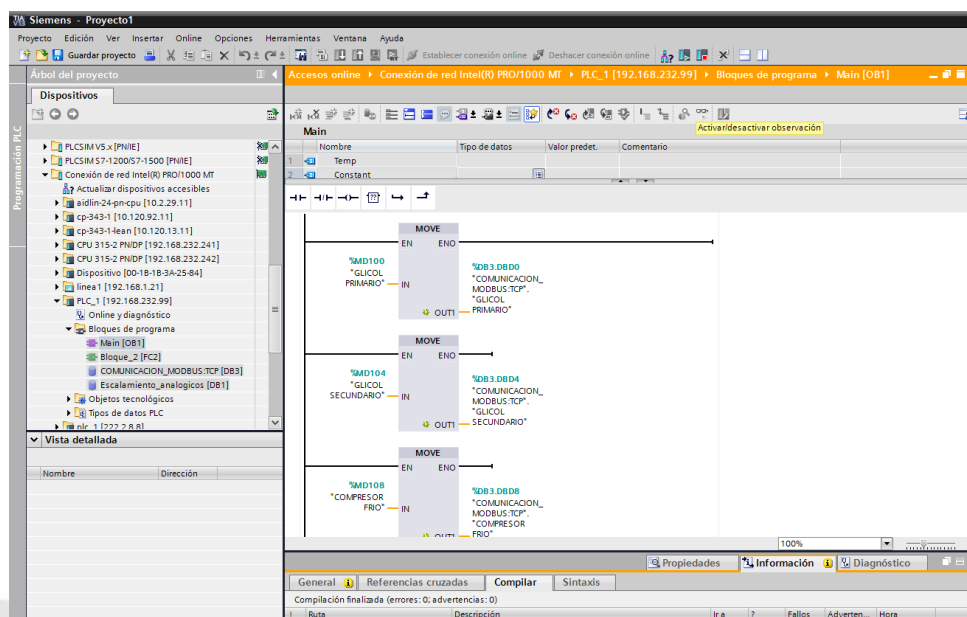


Figura Programación Cambio Variable

Ahora aplicaremos la famosa fórmula de recta que pasa por dos puntos:

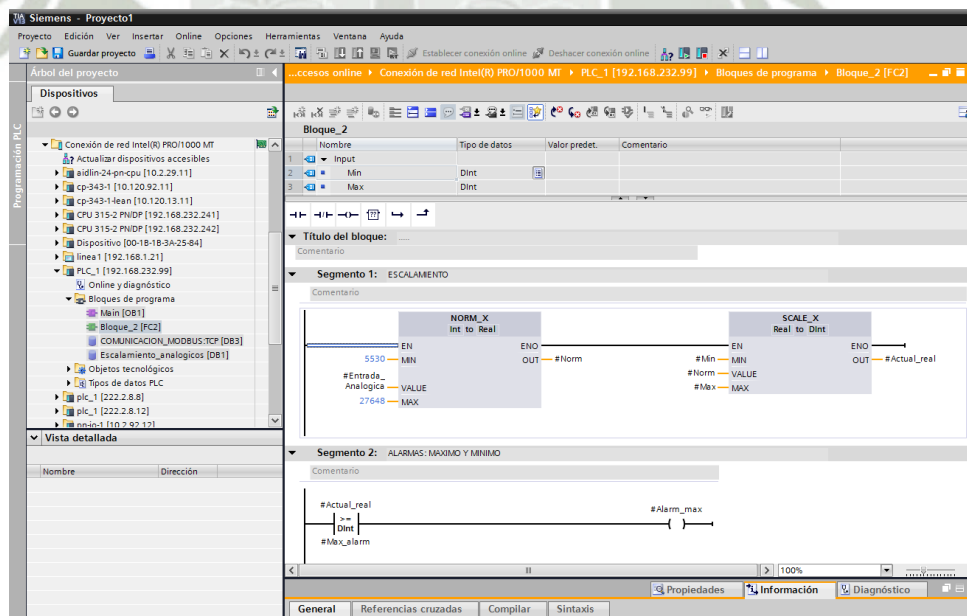


Figura Programación de Bloque Scale

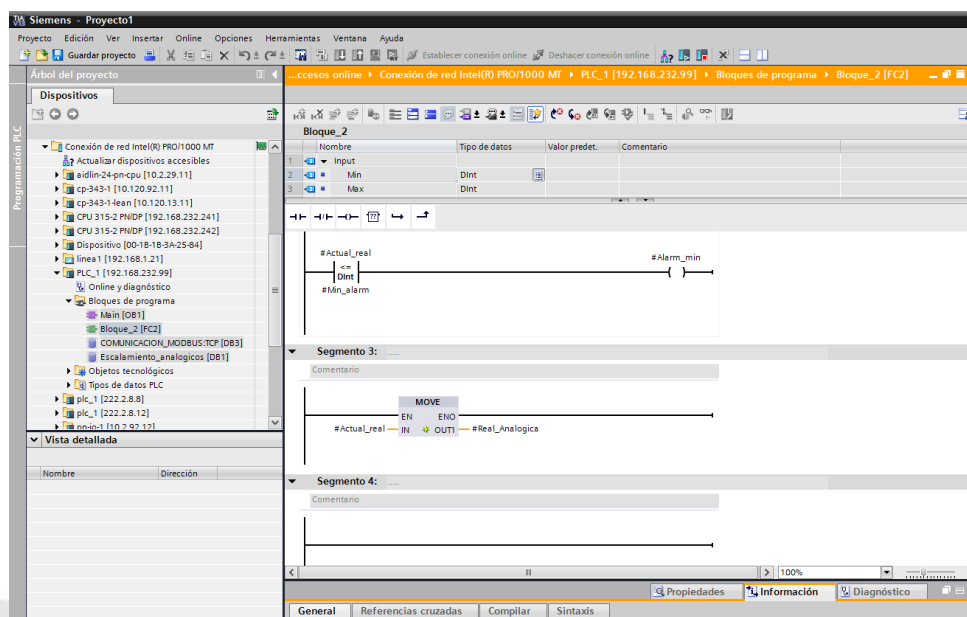


Figura Programación de Alarmas para seguridad de Proceso

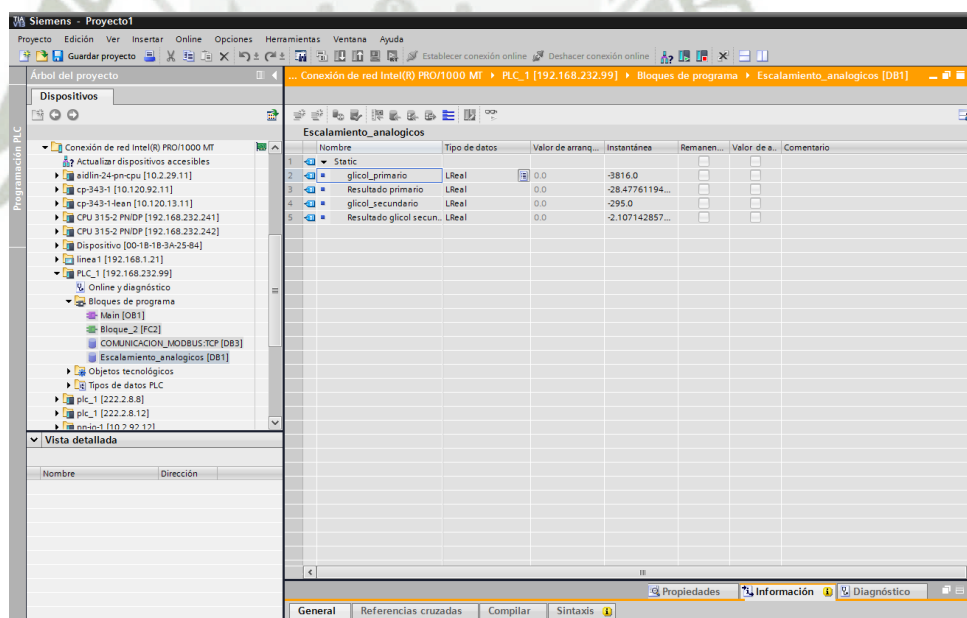


Figura Configuración para visualización de variables

Visualización de Señales recibidas

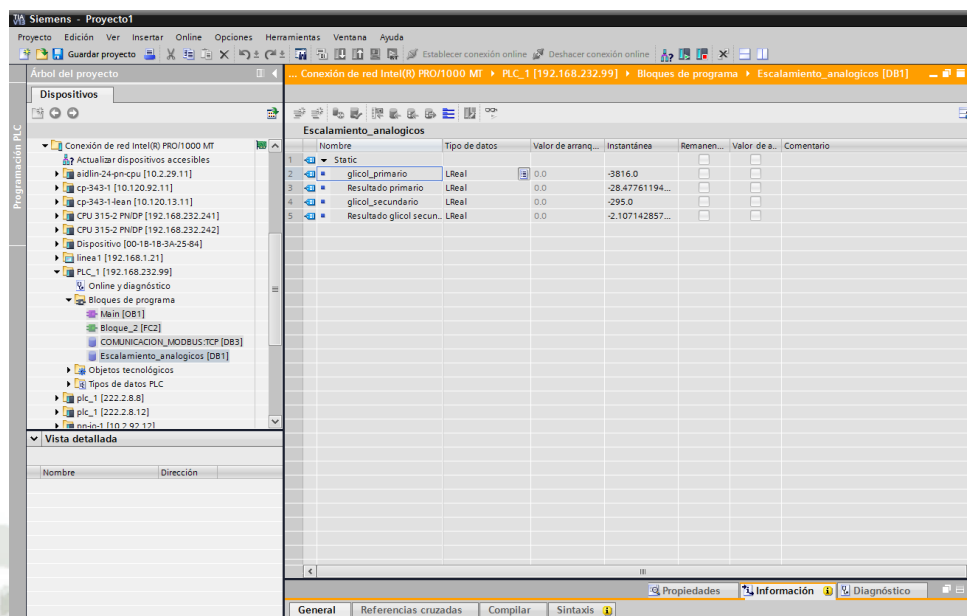


Figura Visualización de Variables PLC modo RUN

ANEXO VII-NORMATIVAS

Norma EN50160

Esta norma describe, en el punto de entrega al cliente, las características principales de la tensión suministrada por una red general de distribución en baja tensión y en media tensión en condiciones normales de entrega por parte del concesionario.

- Baja tensión: Hasta 1 KV.
- Media tensión: Desde 1 KV hasta 35 KV.

Da los límites o los valores de las características de la tensión que todo cliente tiene derecho a esperar:

- No es una norma de niveles de compatibilidad electromagnética (CEM).
- No define límites de emisión por el cliente de perturbaciones conducidas por las redes generales de distribución.
- No está destinada a ser utilizada para definir las exigencias de los equipos en las normas de producto (pero debe ser tomada en cuenta).

Las tablas muestran las perturbaciones y bajo que límites deben de trabajar estos valores.

Perturbación	Medida	Límites	Intervalos de evaluación	Porcentaje de medidas dentro de límites durante el intervalo
Frecuencia	Promedio de la frecuencia de cada ciclo durante 10 s	$\pm 1\%$	al año	99,5%
		4%/-6%		100,0%
Variaciones de la tensión	Promedio de la VAC de cada ciclo durante 10 min	$\pm 10\%$	cada semana	99,5%
		10%/-15%		100,0%
Variaciones rápidas de tensión	Número de eventos tipo escalón de tensión de hasta el 10% de UN	Indicación 1		
Severidad del parpadeo	Plt (2 horas)	<1	cada semana	95,0%
Huecos de tensión	Número de eventos (con $U < 0,9UN$)	Indicación 2	al año	
Interrupciones breves de la tensión	Número de eventos (con $U < 0,01UN$ y $t < 3$ min)	Indicación 3	al año	
Interrupciones largas de la tensión	Número de eventos (con $U < 0,01UN$ y $t > 3$ min)	Indicación 4	al año	
Sobretensiones (60 Hz)	Número de eventos (con $U > 1,1UN$ y $t > 10$ ms)	Indicación 5		
Sobretensiones transitorias	Número de eventos (con $U > 1,1UN$ y $t < 10$ ms)	Indicación 6		
Desequilibrio de la tensión	Promedio de la U_{inv}/U_{dir} de cada ciclo durante 10 min	<2%		95,0%
Tensiones armónicas	Para cada armónico i, promedio de la U_i/UN en cada ciclo durante 10 min	Ver tabla	cada semana	95,0%
Tensiones armónicas	Promedio del THD de la tensión referido a UN en cada ciclo durante 10 min	<8%	cada semana	95,0%
Tensiones interarmónicos	Por estudiar			
Transmisión de señales	Tensión eficaz de la señal transmitida promediado en 3 s	Ver tabla	cada día	99,0%

Tabla resumida de la Norma EN50160. (Fluke, s.f.)

Nº	Indicación
1	Escalones del 5% de UN son normales. Escalones del 10% de UN pueden producirse varias veces al día
2	De 10 a 1.000. La mayoría duran menos de 1 s y tienen una profundidad inferior al 60% de UN
3	De 10 a 1.000. El 70% de las interrupciones duran menos de 1 s
4	De 10 a 50
5	Generalmente no sobrepasan los 1,5 kV AC
6	Generalmente no sobrepasan los 6 kV de cresta

Indicaciones de la tabla resumida de la Norma EN50160. (Fluke, s.f.) (H. Markiewicz, 2004)

Norma IEC 61000-4-30.

Definir los métodos de medida, y la interpretación de los resultados, de los parámetros que definen la calidad eléctrica en los sistemas de alimentación a 60 Hz:

- Se trata de definir métodos de medida que permitan obtener resultados fiables, repetibles y comparables, independientemente de los instrumentos utilizados y de sus condiciones ambientales.
- Esta norma define procedimientos de medida, pero no establece los límites (ver la norma EN50160).

Aunque la norma EN50160 no hace mención a esta norma, es previsible que en futuras revisiones sí se recoja este requisito, la tabla muestra los porcentajes permisibles de los parámetros eléctricos.

Para cada parámetro a medir, se establecen dos clases de requerimientos en la medida:

- **Clase A:** Es el requerimiento de medida más exigente y se debe utilizar cuando sean necesarias medidas precisas. Por ejemplo, en aplicaciones de tipo contractual, para verificar el cumplimiento de normas, para dirimir disputas, etc.
- **Clase B:** El nivel de exigencia en la medida es menor. Resulta adecuado para realizar diagnosis o hacer un seguimiento de la calidad eléctrica en una instalación, etc.

Parámetro	Medida	Clase A		Clase B
		Intervalo	Exactitud	Procedimiento (y exactitudes)
Frecuencia	Hz	10 s	$\pm 10\text{mHz}$	A especificar por el fabricante
Tensión de alimentación	Vrms	12 ciclos	$\pm 0.1\%$	A especificar por el fabricante
Flicker	Plt	CEI 61000-4-15		A especificar por el fabricante
Huecos, sobretensiones, interrupciones	Vrms, t, T	Vrms ½ ciclo (10 ms)	$\pm 0.2\%$	Vrms ½ ciclo
Desequilibrio	%desequilibrio	Método de las componentes simétricas		A especificar por el fabricante
Armónicos e Interarmónicos	THD, Armónicos, Interarmónicos	CEI 61000-4-7		A especificar por el fabricante
Transmisión de señales	Vrms	Medida de interarmónicos (para $f > 3\text{kHz}$ ver CEI 61000-3-8)		A especificar por el fabricante
Flagging (advertencia de posible medida incorrecta por efecto de un hueco, sobretensión, o interrupción)	Aviso en pantalla	Requerido en las medidas de frecuencia, tensión, flicker, desequilibrio, armónicos e interarmónicos		No requerido
Sincronización horaria		A través de reloj externo, por GPS, etc.		A especificar por el fabricante

(H. Markiewicz, 2004) Tabla resumen de la Norma IEC 61000-4-30. (H. Markiewicz, 2004) (Neumann., 2009)

ANEXO VIII- PLANO PROYECTO FINAL

Plano de proyecto final

