

**REDISEÑO DEL CONTROL DE FLUJO DE AGUA DEL ENFRIADOR
EVAPORATIVO DE LA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
MERILECTRICA**

**LEYTON JOSÉ CHÁVEZ PRENTT
ORLANDO TARAZONA GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
BUCARAMANGA
2010**

**REDISEÑO DEL CONTROL DE FLUJO DE AGUA DEL ENFRIADOR
EVAPORATIVO DE LA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
MERILECTRICA**

**LEYTON JOSÉ CHÁVEZ PRENTT
ORLANDO TARAZONA GÓMEZ**

**Monografía de grado para optar al título de Especialista en Control e
Instrumentación Industrial**

**Director
Raúl Restrepo, MSc
Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
BUCARAMANGA
2010**

CONTENIDO

1. MARCO REFERENCIAL	11
1.1 MARCO TEORICO	11
2. EL ENFRIADOR EVAPORATIVO	14
2.1 DESCRIPCION DEL ENFRIADOR EVAPORATIVO	14
2.2 DESCRIPCION ELECTRICA DEL ENFRIADOR EVAPORATIVO	16
2.3 OPERACIÓN DEL ENFRIADOR EVAPORATIVO	16
2.4 TEORIA Y OPERACIÓN DE ENFRIADORES EVAPORATIVOS	18
2.5 DISEÑO	24
2.6 FLUJO DE AGUA	29
2.7 ARRASTRE DE AGUA	30
2.8 INSTALACION	32
2.9 ENFRIADORES EVAPORATIVOS RECIRCULANTES	32
2.10 ENFRIADOR EVAPORATIVO NO RECIRCULANTE	33
3. CONTROL DE VELOCIDAD DE BOMBAS DE FLUIDO	34
3.1 APLICACIÓN DE VELOCIDAD VARIABLE EN SISTEMAS DE BOMBEO	37
3.2 REGULACIÓN DEL FLUJO EN BOMBAS CENTRÍFUGAS	37
3.3 LEYES DE AFINIDAD	40
4. DISEÑO METODOLOGICO	43
4.1 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA A CONTROLAR	43
4.2 PROCEDIMIENTO PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA	46
4.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR MEDIANTE MATLAB	50
4.4 PERTURBACIONES DEL SISTEMA	55
4.5 SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN SIMULINK	60
4.6 MODELO DE ESPACIO DE ESTADOS	64
4.7 AJUSTE DE PARÁMETROS EN EL VARIADOR DE VELOCIDAD	65
4.8 VARIADOR DE VELOCIDAD PARA MOTORES ASINCRONOS	65
5. CONCLUSIONES	68
6. BIBLIOGRAFÍA	69

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema Básico de un enfriador evaporativo.....	17
Figura 2. Esquema Básico del Enfriador Evaporativo para Turbinas.....	18
Figura 3. Esquemático Media Rígida del Enfriador evaporativo.....	19
Figura 4. Media Rígida del Enfriador evaporativo.....	20
Figura 5. Carta Sicrométrica.....	22
Figura 6. Enfriador Evaporativo Típico.....	25
Figura 7. Despiece de un Enfriador Evaporativo Típico.....	26
Figura 8. Eliminador Mixto de niebla tipo alabe.....	26
Figura 9. Accesorios del Enfriador Evaporativo.....	28
Figura 10. Motor y bombas del sistema.....	28
Figura 11. Polaridad de la Media Evaporativo.....	31
Figura 12. Consumo de Potencia vs Caudal.....	35
Figura 13. Ahorro de Potencia vs Caudal.....	36
Figura 14. Control de flujo por válvulas.....	37
Figura 15. Control por modificación de la curva del sistema.....	38
Figura 16. Control de gasto por variación de velocidad en la bomba.....	39
Figura 17. Variación simultánea de las curvas del sistema y la bomba.....	40
Figura 18. Leyes de Afinidad en Bombas Centrífugas.....	41
Figura 19. Vista General bomba enfriador evaporativo.....	41
Figura 20. Comparación entre métodos de regulación de flujo.....	42
Figura 21. Esquema general de las señales del sistema.....	44
Figura 22. Variador de Velocidad Altivar.....	67

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. CARACTERISTICAS TECNICAS DEL VARIADOR DE VELOCIDAD ALTIVAR 71 TELEMECANIQUE.....	69

GLOSARIO

CARTAS PSICROMETRICAS: Una carta psicrométrica, es una gráfica de las propiedades del aire, tales como temperatura, *hr*, volumen, presión, etc. Las cartas psicrométricas se utilizan para determinar, cómo varían estas propiedades al cambiar la humedad en el aire.

HUMEDAD RELATIVA: La humedad relativa (*hr*), es un término utilizado para expresar la cantidad de humedad en una muestra dada de aire, en comparación con la cantidad de humedad que el aire tendría, estando totalmente saturado y a la misma temperatura de la muestra. La humedad relativa se expresa en por ciento, tal como 50%, 75%, 30%, etc.

MANIFOLD: Tubería de distribución. Es la unión de varias tuberías que salen o llegan a la tubería de distribución principal.

MEDIA EVAPORATIVA: Son bloques formados por una celulosa transversal acanalada la cual está impregnada con sales insolubles. Estos bloques se mantienen en el lugar frente a las placas dentro de la sección del enfriador. El aire que entra al enfriador pasa a través de agua saturada en la media y es enfriado por medio de intercambio de calor.

TEMPERATURA DE BULBO SECO: El confort humano y la salud, dependen grandemente de la temperatura del aire. En el acondicionamiento de aire, la temperatura del aire indicada es normalmente la temperatura de «bulbo seco» (*bs*), tomada con el elemento sensor del termómetro en una condición seca. Es la temperatura medida por termómetros ordinarios en casa. Hasta este punto, todas las temperaturas a que nos hemos referido han sido temperaturas de bulbo seco, tal como se leen en un termómetro ordinario, excepto donde nos hemos referido específicamente a la temperatura del punto de rocío.

TEMPERATURA BULBO HUMEDO: Básicamente, un termómetro de bulbo húmedo no es diferente de un termómetro ordinario, excepto que tiene una pequeña mecha o pedazo de tela alrededor del bulbo. Si esta mecha se humedece con agua limpia, la evaporación de esta agua disminuirá la lectura (temperatura) del termómetro. Esta temperatura se conoce como de «bulbo húmedo» (*bh*). Si el aire estuviese saturado con humedad (100% *hr*), la lectura de la temperatura en el termómetro de bulbo húmedo, sería la misma que la del termómetro de bulbo seco. Sin embargo, la *hr* normalmente es menor de 100% y el aire está parcialmente seco, por lo que algo de la humedad de la mecha se evapora hacia el aire. Esta evaporación de la humedad de la mecha, provoca que la mecha y el bulbo del termómetro se enfríen, provocando una temperatura más baja que la del bulbo seco.

Mientras más seco esté el aire, más rápida será la evaporación de la humedad de la mecha. Así que, la lectura de la temperatura del bulbo húmedo, varía de acuerdo a qué tan seco esté el aire.

VALVULA DE FLOTADOR: Es una válvula utilizada para el control de llenado de depósitos .Evita que el nivel del un liquido en un depósito sobrepase una determinada altura.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: REDISEÑO DEL CONTROL DE FLUJO DE AGUA DEL ENFRIADOR EVAPORATIVO DE LA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA MERILECTRICA

AUTORES: LEYTON JOSÉ CHÁVEZ PRENTT
ORLANDO TARAZONA GÓMEZ

FACULTAD: Especialización en Control e Instrumentación Industrial

DIRECTOR: Msc. RAUL RESTREPO

RESUMEN

El presente documento tiene como fin u objetivo, el rediseño del control de flujo de agua del enfriador evaporativo de la turbina a gas W501FD2 de la planta de generación de energía eléctrica Merilétrica. Esta Monografía se realizó basándose en la necesidad de la planta de contar con un sistema capaz controlar el flujo de agua de las bombas del enfriador evaporativo de aire mediante el monitoreo de la humedad relativa ambiente y adaptación variadores de velocidad en los motores de las bombas, con el fin de controlar el flujo de agua.

Luego de la visita al sitio y mediante el desarrollo de ingeniería conceptual, en el cual se estudiaron en detalle los equipos pertenecientes del sistema, su rango de operación y las condiciones ambientales en las que podemos obtener su mejor desempeño se dio paso a la ingeniería de desarrollo la cual permitió realizar la búsqueda de las especificaciones de los instrumentos a utilizar y por consiguiente la identificación del sistema mediante la obtención de datos históricos.

La identificación del sistema mediante la herramienta de matlab se hace necesaria cuando los sistemas a identificar son grandes y complejos los cuales hacen que matemáticamente sea muy engorroso o casi imposible realizarlos. Fue necesario establecer cuál era la mejor opción de control, en este caso se eligió un variador de velocidad en comparación con una válvula de control por costos y tiempo de instalación.

PALABRAS CLAVES: Enfriador evaporativo, humedad relativa, flujo de agua.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF DEGREE

TITLE: REDISEÑO DEL CONTROL DE FLUJO DE AGUA DEL ENFRIADOR EVAPORATIVO DE LA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA MERILECTRICA

AUTHORS: LEYTON JOSÉ CHÁVEZ PRENTT
ORLANDO TARAZONA GÓMEZ

FACULTY: Especialización en Control e Instrumentación Industrial

DIRECTOR: Msc. RAUL RESTREPO

ABSTRACT

This paper aims to redesign the water flow control from the evaporative cooler to gas turbineW501FD2 in the power generation electric plant Merilétrica. This monograph was made on the need for the plant to have a system capable of controlling water flow to evaporative cooler pumps by monitoring the relative humidity and variable speed drives adaptation in the engine pumps, in order to control the flow of water.

After the site visit and through the development of conceptual engineering, which were studied in detail the equipments from the system, its range of environmental conditions operation and where we can get your best performance gave way to engineering Site development which permitted the search for the specifications of the instruments used and therefore the identification of the system by obtaining historical data.

The identification of the system using matlab tool is needed to identify where systems are large and complex, which makes it mathematically difficult to perform. It was necessary to establish which was the best option to control; in this case we choose a variable speed drives compared with a control valve installation costs and time.

KEY WORDS: Evaporative cooler, relative humidity, flow of water.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la turbina W501FD2 de la planta Merilétrica utiliza un enfriador tipo evaporativo para el aire de entrada de su compresor axial de 16 etapas, dicho compresor aumenta su eficiencia cuando la humedad relativa a la entrada del compresor es alta y la temperatura del aire ambiente es baja, de esta forma la presión de descarga del compresor aumenta debido a que el flujo másico del aire a través del compresor aumenta por el aire que es enfriado y comprimido en cada una de sus etapas.

Como casi en todas partes del mundo, las condiciones ambientales del municipio de Barrancabermeja varían constantemente. Una de estas variables ambientales es la humedad relativa. Desafortunadamente, la eficiencia del enfriador evaporativo es afectada por la humedad relativa del aire ambiente entrante de la unidad.

Esta monografía de análisis indica la forma de realizar la variación del flujo de agua de las bombas del enfriador evaporativo de la central Merilétrica mediante la adaptación de un control analógico. Esta variación realizada del flujo de agua está de acuerdo al cambio de las condiciones de la humedad relativa y la temperatura ambiente, mediante el uso de válvulas de control a la descarga de las bombas, manteniendo un mínimo flujo de recirculación de agua al enfriador evaporativo con el propósito de no afectar la vida útil de las bombas.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 MARCO TEORICO

1.1.1 Descripción general de la planta Merilétrica. La Planta de Generación Eléctrica Merilétrica E.S.P. – Barrancabermeja usa un Generador enfriado con hidrógeno y una Turbina de Combustión a gas natural (CTG) para producir y suministrar energía eléctrica a alto voltaje (230-kilovoltios) al Sistema Interconectado Nacional. El propósito primario del paquete de CTG es impulsar el generador eléctrico asociado, el cual suministra potencia a la red local de transmisión eléctrica de 230 kV. La energía suministrada para el equipo auxiliar viene de transformadores auxiliares que convierten los 230 kV de la red a 4160 VAC (para el motor de arranque) y 480 VAC para el resto de equipos de soporte de CTG y equipos generales de planta. Una pequeña porción de la energía generada es reciclada para suministrar las cargas eléctricas auxiliares necesarias para operar la planta.

El paquete de CTG está montado en un patín rectangular, el cual está equipado con varios subsistemas auxiliares, y componentes, estos proveen la mayoría de combustible, lubricación, enfriamiento y controles necesarios. Los sistemas auxiliares son suministrados como unidades empacadas e incluyen distribución de energía para componentes movidos por motor, iluminación y aire acondicionado.

Un sistema de control electrónico integrado provee monitoreo y control de varios parámetros de turbina y sistemas auxiliares durante todas las fases de la operación de turbina. El sistema de control también provee respuesta automática a cambios y notifica al operador de parámetros del paquete, respuestas y alarmas.

1.1.2 Definición de Turbina de Combustión. Turbina de combustión, también denominada turbina de gas, es un motor que utiliza el flujo de gas como medio de trabajo para convertir energía térmica en energía mecánica, los gases de combustión que se producen en la cámara de combustión son dirigidos a través de tuberías cortas llamadas transiciones las cuales dirigen el chorro de dicho gas contra los álabes (paletas) de la turbina. El impulso de los gases sumado a la expansión de estos a través de toda la turbina, hacen girar su eje. Una turbina de combustión a gas incluye un compresor que bombea aire comprimido a la cámara de combustión. El combustible, en forma gaseosa o nebulizada, también se inyecta en dicha cámara, donde se produce la combustión mediante ignitores de alto voltaje que crean la chispa inicial.

En la turbina o en el compresor, una fila de álabes fijos y una fila correspondiente de álabes móviles unidos al rotor se denominan etapa. Las máquinas grandes emplean compresores y turbinas de flujo axial con varias etapas.

La eficiencia del ciclo de una turbina de combustión está limitada por la necesidad de funcionamiento constante a temperaturas altas en la cámara de combustión y en las primeras etapas de la turbina. Una turbina de gas pequeña de ciclo simple puede tener una eficiencia termodinámica relativamente baja en comparación con un motor de gasolina corriente. Los avances en los materiales resistentes al calor, los recubrimientos protectores y los sistemas de enfriamiento han hecho posibles grandes unidades con una eficiencia en ciclo simple del 34% o más.

1.1.3 Descripción general de la turbina de combustión W501FD2. La turbina de combustión Siemens Westinghouse tiene un *compresor* de flujo axial de 16 etapas con álabes guía de posición variables llamado IGV, cuyo fin es proporcionar mayor o menor entrada de aire de acuerdo a los requerimientos de carga. Incluye también una *cámara de combustión* con enfriamiento avanzado con capacidad de combustible dual. Dentro de este sistema de combustión se encuentran instalados de forma anular a la carcasa de la turbina 16 combustores individuales, cada uno con cuatro entradas diferentes de gas llamadas etapas. Por último una *turbina de reacción* de cuatro etapas es la encargada de convertir la energía calórica de los gases en expansión, proceso previo de la combustión del gas natural y el aire, en energía mecánica del rotor, la cual es aprovechada por el generador para convertirla en energía eléctrica.

Sistemas de la planta. El ensamblaje principal de la turbina de combustión y el generador cuenta con sistemas de apoyo esenciales para su correcto funcionamiento. Entre estos sistemas se encuentran los siguientes:

- Sistema de admisión de aire al turbocompresor
- Sistema de suministro de gas
- Sistema de aire de instrumentos
- Sistema de aceite de sellos
- Sistema de distribución de potencia eléctrica
- Sistema de respaldo UPS

1.1.4 Evolución de las máquinas térmicas. A continuación se muestra una breve síntesis de la evolución de las máquinas térmicas durante la historia.

- 1769: J. Watt inventa la máquina de vapor.
- 1816: R. Stirling inventa el motor de aire caliente.
- 1839: J. Ericsson desarrolla varios modelos de motores de aire caliente

- 1876: N. Otto desarrolla el motor de combustión interna (a gasolina)
- 1883: C. Laval desarrolla las turbinas de vapor
- 1892: R. Diesel inventa el motor a compresión (Diesel)
- 1930: F. Whittle inventa la turbina a gas para aviones
- 1944: En Alemania se desarrollan los motores para cohetes (von Braun)

1.1.5 Diagrama termodinámico del ciclo Brayton o simple. Se denomina ciclo Brayton a un ciclo termodinámico de compresión, calentamiento y expansión de un fluido compresible, generalmente aire, que se emplea para producir trabajo neto y su posterior aprovechamiento como energía mecánica o eléctrica.

En la mayoría de los casos el ciclo Brayton opera con fluido atmosférico o aire, en ciclo abierto, lo que significa que toma el fluido directamente de la atmósfera para someterlo primero a un ciclo de compresión, después a un ciclo de calentamiento y, por último, a una expansión.

Este ciclo produce en la turbina de expansión más trabajo del que consume en el compresor y se encuentra presente en las turbinas de gas utilizadas en la mayor parte de los aviones comerciales y en las centrales termoeléctricas, entre otras aplicaciones.

Al emplear como fluido termodinámico el aire, el ciclo Brayton puede operar a temperaturas elevadas, por lo que es idóneo para aprovechar fuentes térmicas de alta temperatura y obtener un alto rendimiento termodinámico.

Sobre el ciclo básico existen variantes que lo complican para mejorar alguna de sus prestaciones, como la potencia o el rendimiento. Ejemplos de estas variantes son el ciclo Brayton con regenerador, el ciclo Brayton de múltiples etapas (de compresión u expansión), o la combinación de un ciclo Brayton con un ciclo Rankine para dar lugar al denominado ciclo combinado.

1.1.6 El gas natural. El gas natural es un combustible fósil compuesto por una mezcla de hidrocarburos, principalmente ´metano´, que en condiciones de reservorio, se encuentra en estado gaseoso o en disolución con el petróleo. Las características del gas natural y en particular su poder calorífico dependen de los respectivos poderes caloríficos y de la cantidad presente de cada uno de los componentes del gas.

2. EL ENFRIADOR EVAPORATIVO

2.1 DESCRIPCION DEL ENFRIADOR EVAPORATIVO

Un enfriador evaporativo es usado en donde la operación de la turbina se realice durante los meses cálidos y en donde la humedad relativa es comúnmente baja. El aire frío es más denso y da a la máquina una rata de flujo-masa y presión más alta, resultando en una mayor eficiencia a la salida de la turbina.

Además de lograr potencia extra, el uso del enfriador evaporativo mejora el impacto medioambiental de la máquina mediante el aumento de vapor de agua en el aire de entrada, reduciendo así la cantidad de óxido de nitrógeno producido en la combustión y reduciendo las emisiones de la turbina. También hay una pequeña mejora en la carga del polvo debido al efecto del “aire de lavado” que se mueve a través del enfriador.

Un número de componentes conforman la sección del enfriador evaporativo entre ellas un filtro de aire. Cada componente es brevemente descrito y su función se indica más adelante.

2.1.1 Bloques de media del enfriador evaporativo: Los bloques de media son el contacto directo, estos están formados por una celulosa transversal acanalada la cual esta impregnada con sales insolubles. Estos bloques se mantienen en el lugar frente a las placas dentro de la sección del enfriador. El aire que entra al enfriador pasa através de agua saturada en la media y es enfriado por medio de intercambio de calor.

2.1.2 Bloques eliminadores de vapor. Los eliminadores de vapor están directamente instalados aguas abajo del bloque de la media del enfriador. Estos paneles protegen a la turbina de las gotas de agua que pueden ser tiradas desde la media del enfriador evaporativo. El agua separada de la corriente de aire por el eliminador de vapor se drena por efecto de la gravedad hacia un depósito o sumidero.

2.1.3 Almohadillas de distribución. Localizadas en la parte superior de la media en cada manifold de distribución de agua, estas almohadillas aseguran que el agua sea distribuida uniformemente a través de la parte superior de la media.

2.1.4 Bombas. Las bombas conducen el agua desde el depósito hacia el manifold de distribución, localizados directamente encima de las almohadillas de distribución y de la media del enfriador evaporativo. Las bombas están orientadas horizontalmente y con un tamaño máximo para la recirculación y purga.

2.1.5 Válvula de flotador. Cada depósito esta equipado con una válvula de flotador para mantener un nivel de agua adecuado.

2.1.6 Válvula de compuerta y flujómetro de purga. El flujómetro de purga es un equipo estándar. El agua de purga descargada al desagüe es regulada por una válvula de compuerta y monitoreada por un flujo metro de purga. Cuando se requiere un mayor control de la calidad del agua, se debería considerar el uso de un controlador de conductividad.

2.1.7 Controlador de conductividad. Cuando el flujómetro de purga no es usado, el controlador de conductividad es suministrado opcionalmente para el control de la purga. El controlador de conductividad mide la conductividad (calidad del agua) del agua usando una sonda hasta que la medida supere el set point deseado. Este abre una válvula solenoide y deja pasar el agua hasta que retorne el rango de control. El sistema de control de conductividad incorpora una de caja de control, una sonda, flujómetros y válvulas para ajustes.

2.1.8 Interruptor de temperatura de aire (opcional). Los interruptores de temperatura pueden ser para monitorear la temperatura del aire que entra y/o sale de la sección del enfriador. Se usa para limitar la operación del enfriador y esta configurado a un valor específico. Por ejemplo, puede ser usado para apagar las bombas si la temperatura ambiente llega a una temperatura específica para asegurar que se evite la formación de hielo.

2.1.9 Iluminación. La iluminación es suministrada para propósitos de rutinas de mantenimiento e inspección.

2.1.10 Medidores (opcional). Un medidor opcionalmente esta localizado en cada bomba para que registre la presión del agua en la bomba.

2.1.11 Interruptor de flujo. El interruptor se encuentra en línea con la tubería de suministro de agua, encima de la bomba para indicar la condición de “no flujo”. En cualquier momento el flujo a la unidad cae por debajo de un cierto valor de gpm preestablecido, una señal es enviada desde la caja de control del enfriador evaporativo hacia el panel de control maestro del cliente indicando que una condición de “no flujo” existe.

2.2 DESCRIPCION ELECTRICA DEL ENFRIADOR EVAPORATIVO

El sistema eléctrico de este filtro de aire consiste de los siguientes componentes:

- 1-Caja de control del enfriador evaporativo
- 2-Lampara (interna o externa).
- 3-Componentes explicados opcionales.

2.2.1 Fuente de Alimentación

La fuente de alimentación eléctrica es suministrada al cliente para cada uno de los componentes.

Directo a 3EA-62895-01 caja de control enfriador evaporativo.

460VAC, 3Fases, 60Hz-directamente para los motores de las dos bombas.
120VAC, 1Fase, 60Hz usados directamente para el evaporador, lámparas, panel calentador, interruptores de flujo y temperatura.

2.3 OPERACIÓN DEL ENFRIADOR EVAPORATIVO

El agua limpia suministrada por el cliente entra por la parte baja de la sección del enfriador evaporativo y se vacía dentro de un tanque de almacenamiento. El agua que esta en el tanque es bombeada al manifold de distribución localizado internamente sobre la parte superior de la media del enfriador. El manifold de distribución humedece la media por inyección de agua através de unos pequeños orificios espaciados entre su longitud. Esta agua entra en las almohadillas de distribución instaladas sobre la media, suministrando una distribución uniforme de agua sobre toda la superficie superior de la media.

La media esta hecha de capas corrugadas de material fibroso, con canales internos formados entre las capas. Hay dos canales alternos en la media, uno es usado para el agua y el otro para el aire. El agua baja por la gravedad através de los canales, y se esparce através de la media por acción de absorción. Cualquier exceso de agua fluye hacia el tanque. El nivel de agua dentro del tanque se mantiene por una válvula flotador la cual permite la recirculación del agua. La bomba continuamente recircula agua hacia la media. La cantidad de agua usada en el enfriador evaporativo es regulada por válvulas de compuerta y flujómetros.

La formación de incrustaciones en la composición del agua (agua con minerales) puede obstaculizar el proceso de evaporación. Para prevenir

dicha formación, un porcentaje de agua debe descargarse por el drenaje, manteniendo diluido el mineral contenido. Varios métodos de control son utilizados para mantener los ciclos de concentración deseados en el sistema de enfriamiento evaporativo.

El método mas simple es el de instalar una válvula y abrirla continuamente a un flujo de agua predeterminado hacia el drenaje. La cantidad exacta de la purga dependerá del pH y de la dureza del agua, y de la intensidad de evaporación. El fabricante de la turbina especificara los requerimientos de purga. El agua de purga es regulada por una válvula de compuerta y monitoreada por un flujómetro.

Un método opcional de control de purga es el que utiliza un controlador de conductividad. Los sistemas de enfriamiento evaporativo fluctúan debido a las condiciones de humedad y temperatura externa. Estas fluctuaciones pueden ser compensadas por un controlador basado en la conductividad del agua. Esto se logra instalando un controlador de conductividad en el sistema. Usando una sonda, el controlador de conductividad mide la conductividad hasta sobrepasar la medida deseada en el set point. Esta abre una válvula solenoide y regula del sistema. El sistema incorpora un flujómetro y válvulas para ajustes. Un interruptor de temperatura límite es comúnmente utilizado para limitar la operación del enfriador y se programa con una configuración específica. Si la evaporación ocurre a una temperatura muy baja, puede aparecer formación de hielo.

Figura 1. Esquema Básico de un enfriador evaporativo



Fuente: Internet

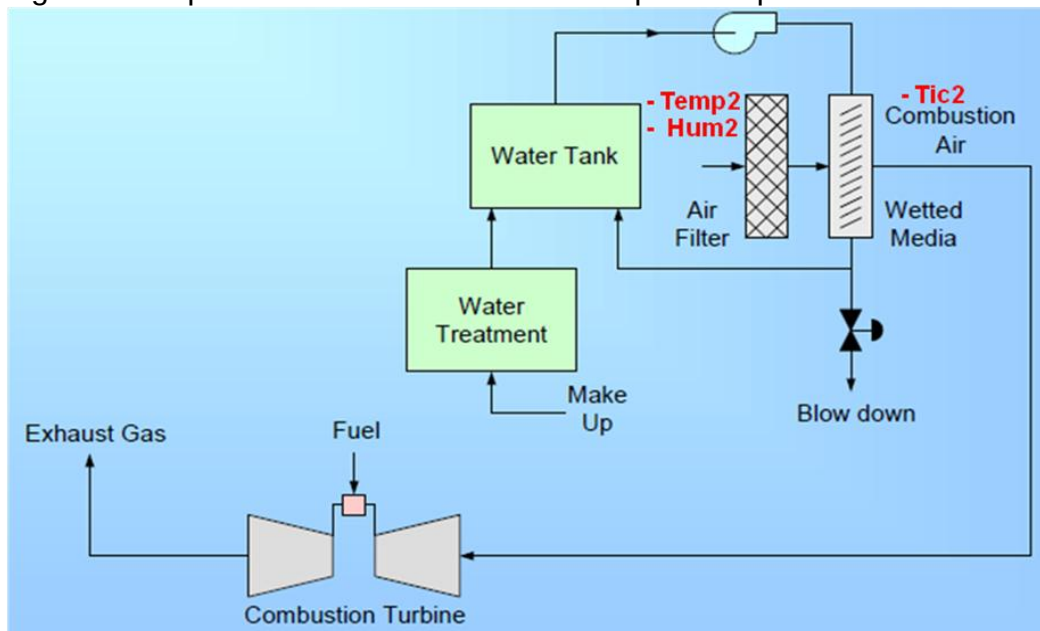
2.4 TEORIA Y OPERACIÓN DE ENFRIADORES EVAPORATIVOS

2.4.1 Enfriador Evaporativo en Turbinas

Los enfriadores evaporativos son usados en turbinas de gas para incrementar la densidad de la combustión del aire, de este modo se incrementa la potencia en la salida. El incremento de la densidad del aire es realizado por la evaporación de agua en el aire de entrada, el cual disminuye su temperatura e incrementa su densidad. El vapor de agua pasa a través de la turbina, causando un incremento insignificante en el consumo de combustible.

El agua usada en los enfriadores evaporativos a menudo contiene sólidos disueltos como el sodio y el potasio, los cuales en combinación con el azufre del combustible, son los ingredientes principales en la corrosión en el recorrido del gas caliente. Por esta razón, la calidad del agua y la prevención del arrastre de agua se consideran importantes en el uso de los enfriadores evaporativos. La prevención del arrastre de agua se logra por la correcta instalación y operación del enfriador evaporativo. Los requerimientos de calidad del agua dependen de la cantidad del arrastre de agua esperada o permitida y puede variar mediante el uso de agua desionizada o el uso de agua con significantes concentraciones de sodio y potasio.

Figura 2. Esquema Básico del Enfriador Evaporativo para Turbinas



Fuente: PB Power

2.4.2 Conceptos Básicos

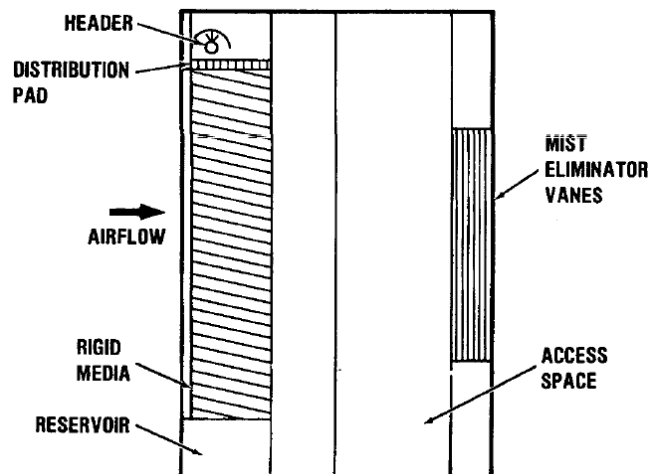
El enfriador evaporativo involucra transferencia de masa y calor, los cuales ocurren cuando el agua y la mezcla insaturada de aire-agua del aire entrante están en contacto. Esta transferencia es una función de las diferencias en temperaturas y presiones de vapor entre el agua y el aire. Ambas transferencias, la de calor y la de masa son operativas en el enfriador evaporativo porque la transferencia de calor desde el aire al agua evapora el agua, y la evaporación del agua hacia el aire constituye transferencia de masa.

El flujo de calor puede ser descrito como latente o sensible. Cualquier término usado depende del efecto. Si el efecto es únicamente elevar o bajar la temperatura, es calor sensible. El calor latente por otro lado, produce un cambio de estado, congelación, fusión, condensación, evaporación. En el enfriamiento evaporativo, el calor sensible del aire es transferido al agua, llegando a ser el calor latente el agua que se evapora. El vapor de agua llega a ser parte del aire y lleva calor latente con él. La temperatura de aire de bulbo seco se disminuye porque le da calor sensible. La temperatura de aire de bulbo húmedo no es afectada por la absorción del calor latente en el vapor de agua, porque el vapor de agua entrega el aire en la temperatura de aire de bulbo húmedo.

2.4.3 Media Rígida en los Enfriadores Evaporativos

Los enfriadores evaporativos usados hoy en aplicaciones de turbinas de gas son los del tipo de media rígida húmeda. (fig. 1).

Figura 3. Esquemático Media Rígida del Enfriador evaporativo



Fuente: Internet

Figura 4. Media Rígida del Enfriador evaporativo



Fuente: Planta Merilétrica

En este tipo de enfriador evaporativo, el medio de evaporación es una almohadilla porosa saturada. El agua es introducida a través de una cabecera en la cima de la media, en la parte superior de una tubería invertida, y es desviada hacia abajo sobre la almohadilla de distribución en la parte superior de la media. El agua se drena a través de la almohadilla de distribución hacia la media por acción de la gravedad, baja a través de ella y humedece grandes áreas de la superficie de la media en contacto con el aire que pasa a través del enfriador.

Un enfriador evaporativo puede ser re-circulante o no re-circulante. El enfriador evaporativo mantiene el agua en un depósito y usa una bomba para suministrar agua a la tubería de la cabecera. El agua se drena a través de la media hasta llegar al depósito. El agua que reemplaza al agua evaporada y al agua perdida en la purga fluye hacia el depósito. Para un enfriador no re-circulante, el agua nueva es continuamente introducida directamente hacia la cabecera desde el suministro de agua externo del enfriador, una vez pasa a través de la media, esta agua es descartada. El flujo de agua en la cabecera debería ser el mismo para ambos tipos de enfriadores.

2.4.4 Parámetros de Operación

En la determinación del efecto del enfriador evaporativo en el rendimiento de la turbina, la temperatura de bulbo seco (TDB1) del aire que abandona el enfriador evaporativo debe ser conocida. Esta se calcula usando la siguiente ecuación:

$$T_{DB2} = T_{DB1} - \frac{N}{100\%} (T_{DB1} - T_{WB})$$

TDB2= Temperatura de bulbo seco del aire que sale del enfriador, °F, en nuestro caso es la temperatura de entrada al compresor.

TDB1= Temperatura de bulbo seco del aire entrante al enfriador, °F. Es la misma temperatura ambiente.

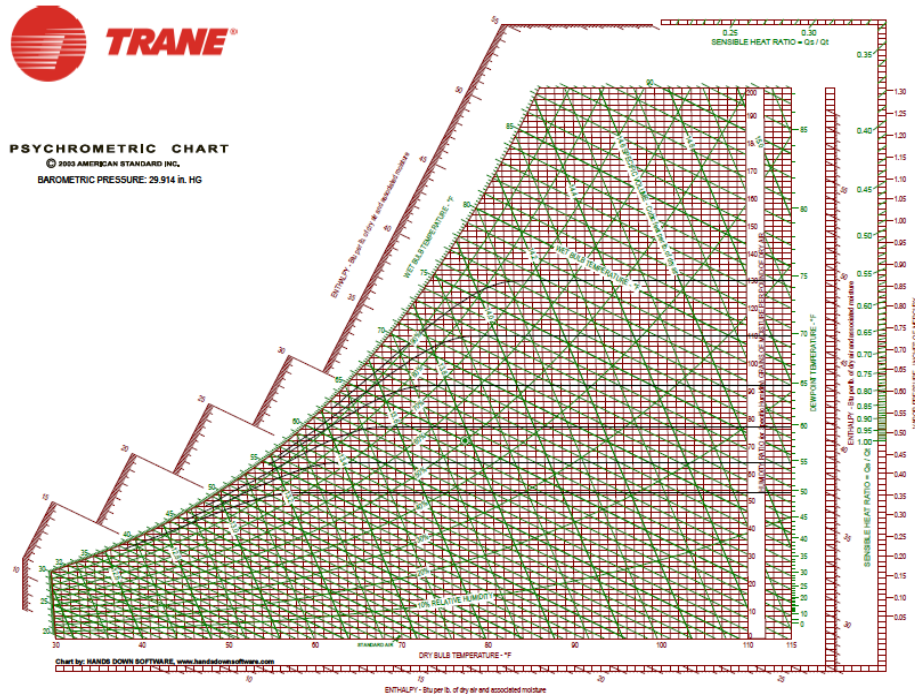
TWB= Temperatura de bulbo húmedo ambiente, °F. La cual sería en teoría la mínima temperatura que alcanzaría el enfriador si su eficiencia fuera del 100%.

N= Eficiencia del enfriador especificada por el fabricante. Para nuestro caso es del 85%.

En muchas aplicaciones, la humedad relativa (RH) del aire entrante es más conocida que la temperatura de bulbo húmedo. La temperatura de bulbo húmedo puede ser hallada usando la carta psicométrica en la fig. 5. Por ejemplo, asuma que se desea considerar el efecto de un enfriador evaporativo en el rendimiento de una turbina con las siguientes condiciones:

- RH= 20%
- Temperatura ambiente (TDB1)= 105° F
- Efectividad del enfriador evaporativo (N/100%)= 0.90

Figura 5. Carta Sicrométrica



Fuente: Trane

Esta es la temperatura del aire de entrada en la a la combustión de la turbina bajo las condiciones descritas. Si el enfriador evaporativo a ser usado es no recirculante, este es el único cálculo que se necesita. Si el enfriador es de tipo recirculante, es necesario determinar la purga y los flujos de agua a suministrar.

La purga es un desperdicio continuo de agua desde el depósito para retirar los minerales acumulados. Este controla el nivel de concentración de los sólidos disueltos, y/o dureza del agua en el depósito. La rata de purga es determinada por la condición inicial del agua, la rata de evaporación y el grado de concentración permitido. El agua de reposición es el agua agregada al depósito para reponer la perdida de agua de la purga y la evaporación.

Para calcular la rata de purga (B), es necesario primero calcular la rata de la evaporación de agua. Usando las condiciones dadas y la temperatura de bulbo seco calculada (TDB2), se emplea la Eq. (2).

$$E = \frac{\dot{V} [m_2 - m_1] P_a}{D} \text{ gpm} \quad (2)$$

E = Rata de evaporación de agua, gpm

V = Flujo volumétrico de aire hacia la turbina de gas, ft³/min.

m₂ = Humedad del aire saliente del enfriador, lb humedad/lb aire seco

m₁ = Humedad del aire entrante hacia el enfriador, lb humedad/lb aire seco

P_a = Densidad del aire a la temperatura ambiente, lb/ft³

D = Peso del agua, lb/gal.

Para determinar los valores para m₂ y m₁, ir a la fig. 5 a los 105°F y subir a la línea de los 20% RH. Moverse perpendicularmente hacia la derecha y leer 0.0094 lb humedad/lb de aire seco (m₂).

Retornar a la línea de 20% de RH y moverse diagonalmente a la izquierda hasta intersectar la línea de 75.6°F. Ahora muévase perpendicularmente a la derecha y lea 0.0162 lb humedad/lb de aire seco (m₂).

De la carta psicrométrica, fig. 5, el volumen específico de aire en 105°F y 20% de humedad relativa es 14.442 ft³/lb. Por lo tanto, P_a= 0.0692 lb/ft³.

Asuma que la rata de flujo de aire (V) de la combustión de la turbina de gas es 30,000 cfm. Tome D= 8.33 lb/gal. Y retorne a la ecuación (2):

E= [30,000 cfm (0.0162 lb/lb aire seco. - 0.0094 lb/lb aire seco.) 0.0692 lb/ft³] ÷ 8.33 lb/gal.

Por lo tanto,

E= 1.7 gal/min. (La rata al cual el agua se evapora en el aire de entrada.)

Las ratas de alimentación y purga pueden ahora ser determinadas si la dureza del agua de alimentación es conocida. Si el agua de alimentación ha sido probada y encontrada para tener, por ejemplo, una dureza de 150 ppm en CaCO₃, se puede determinar la rata de purga.

Para estimar la rata de purga, la rata de purga (B) debería igualar 4 veces a la rata de evaporación (E).

B= 4(E gpm) = 4(1.7)=6.8 gpm

La rata del agua de alimentación se encuentra de:

$$A=B+E \text{ gpm} = 6.8 + 1.7 = 8.5 \text{ gpm} \quad (4)$$

La dureza del agua en el depósito, medida como CaCO_3 , puede ser calculada de la ecuación (5).

$$H = AX / B \text{ ppm} \quad (5)$$

$$= [(8.5 \text{ gpm}) (150 \text{ ppm}) / 6.8 \text{ gpm}] \text{ ppm} = 187.5 \text{ ppm}$$

El mismo procedimiento puede ser usado para calcular las concentraciones de los sólidos disueltos en el depósito de las concentraciones conocidas en el agua de alimentación.

Una pregunta frecuente acerca de los enfriadores evaporativos tiene que ver con el uso de agua de reposición que se desecha como el agua caliente de algunos procesos industriales.

Si el agua tiene los niveles de dureza, o los niveles de los sólidos disueltos bajos, la pregunta llegaría a ser si esta se podría usar a pesar de su elevada temperatura.

La siguiente discusión sobre enfriamiento adiabático o no adiabático intenta responder a esta pregunta. La temperatura del agua usada en los enfriadores evaporativos es limitada por el tipo de la media.

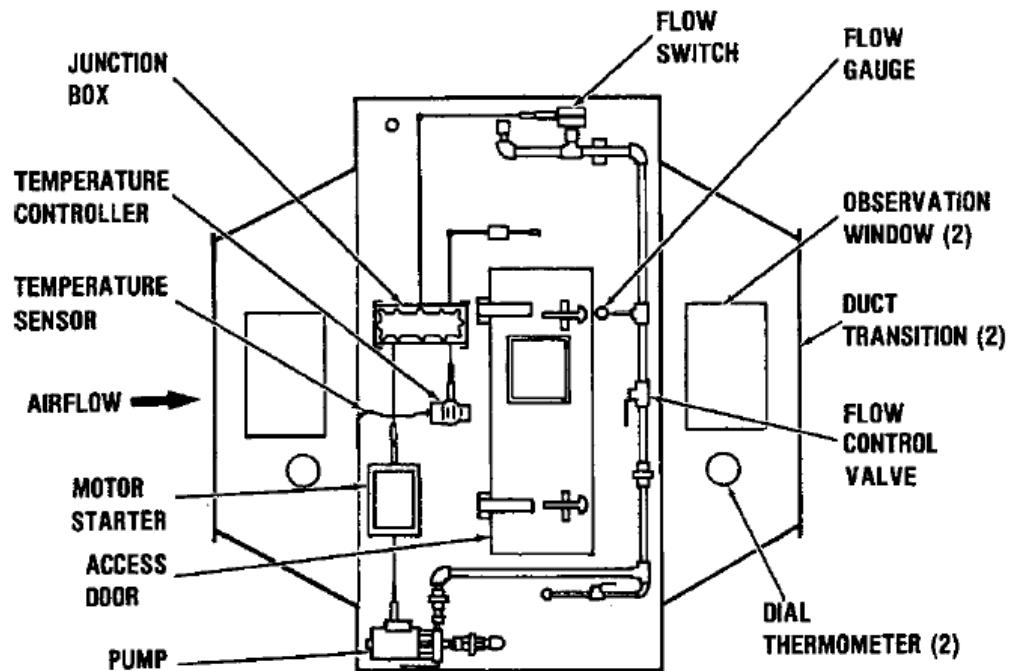
Si se usa una media rígida en base a celulosa, la cual es típicamente la instalada en los enfriadores evaporativos usados en turbinas de gas, la temperatura del agua sobre los 130°F podría llegar a dañarla.

2.5 DISEÑO

Básicamente, el diseño del enfriador evaporativo envuelve el empaquetado de la media en una cubierta apropiada y la incorporación de muchas características comunes las cuales previenen (o minimizan) el arrastre de agua en el aire que sale del enfriador y reduce su mantenimiento.

Un enfriador evaporativo típico se muestra en la fig. 8.

Figura 6. Enfriador Evaporativo Típico



Fuente: Internet

2.5.1 Partes Principales

2.5.1.1 Cabecera: Entrega el agua a la almohadilla de distribución en la cima del enfriador. Debe estar localizado hacia el frente (aire de entrada) del enfriador (fig.1), el cual entrega más agua al frente del enfriador que una cabecera ubicada en el centro de la almohadilla.

2.5.1.2 Retenedores de Media: deben estar empaquetados. Estas son superficies sobre la parte inferior de la media las cuales aseguran el empaque de la media en la cubierta, mostradas como superficies "A" en la fig. 9. Una celda cerrada de material **neopreno** con 1/16 de pulgada de densidad, lo cual es recomendado para las empaquetaduras.

La media debe estar en contacto con las empaquetaduras. Esto previene el arrastre de agua en el aire que sale, causado por el goteo de agua entre la media y las superficies retenedoras.

Figura 7. Despiece de un Enfriador Evaporativo Típico

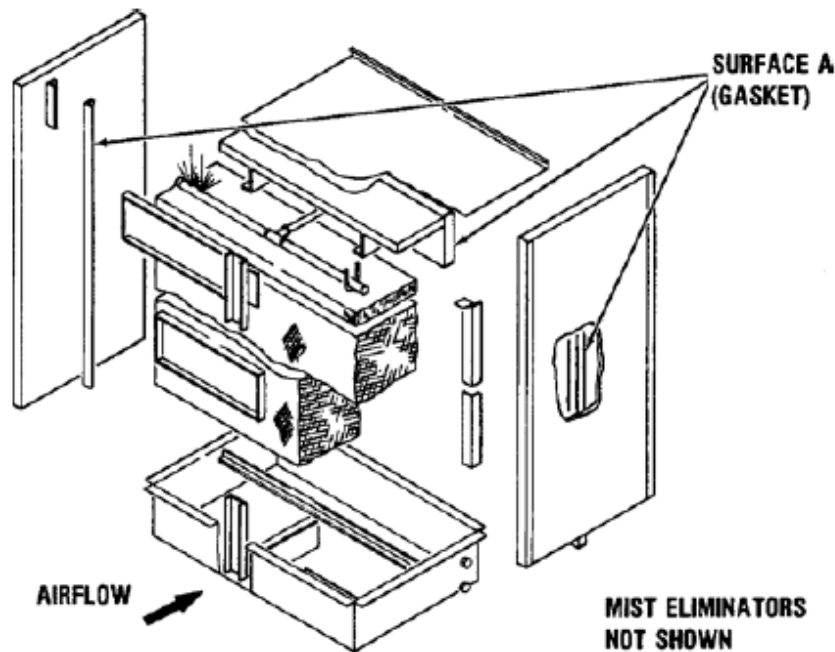


FIG. 9 EVAPORATIVE COOLER EXPLODED VIEW

Fuente: Internet

2.5.1.3 Eliminador de niebla: Usados en la parte interna del enfriador. Estos están destinados a remover las gotas de agua en el aire de entrada, si es necesario. Este eliminador de niebla debería tener un mínimo en el impedimento del paso de gotas con tamaño a 100 micrones, lo que significa que el eliminador de niebla tiene una eficiencia de remoción del 99.9% sobre las gotas de 100 micrones o más.

Figura 8. Eliminador Mixto de niebla tipo alabe

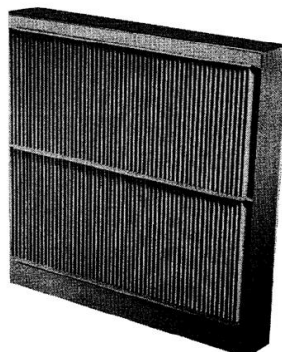


FIG. 10 VANE-TYPE MIST ELIMINATOR

Fuente: Internet

2.5.1.4 Ventana de Observación: instalada sobre un lado de la cubierta del enfriador entre la media y el eliminador de niebla, para permitir la observación del área del aire saliente de la media. Las grandes cantidades de agua saliente de la media indican una condición de trastornos que deben ser investigados.

Las secciones de ductos aguas arriba y aguas abajo del enfriador deben tener una ventana de observación.

2.5.1.5 Termómetros: Ubicados en los conductos aguas arriba y aguas abajo del enfriador para monitorear la efectividad del enfriador.

2.5.1.6 Sensor de Temperatura: Mide la temperatura de bulbo seco entrante. Debe estar en la corriente de aire sobre el lado del aire de entrada del enfriador. Se recomienda ajustarse a 55°F, por debajo de esta temperatura el enfriador se apaga.

2.5.1.7 Indicadores de Flujo de Agua y Válvulas: Usado para monitorear y ajustar el flujo de agua a la cabecera.

2.5.1.8 Pared Móvil en la cubierta del Enfriador: Reduce la dificultad de instalación o remoción de la media. Esta característica es altamente benéfica. Sin ella, la instalación de la media en campo sería difícil y a menudo conlleva al daño de la media. La pared es retirada de la media para removerla y ésta se empuja contra la media después de que ha sido reinstalada, comprimiendo las tiras de media hasta dejarlas muy juntas.

La compresión es necesaria para prevenir el goteo de agua entre las tiras, lo que conduciría al arrastre de agua.

2.5.1.9 Monitor de Flujo de Agua: Debe producir una señal de alarma para notificar al operador si el flujo de agua hacia el enfriador es interrumpido.

2.5.1.10 Bomba de Recirculación: Instalada al exterior del enfriador. Esto facilita el funcionamiento de la bomba y el motor mientras la turbina esta en operación.

2.5.1.11 Velocidad de Frente en la Media: 500 pies/minuto. Se pueden usar velocidades altas que estén sobre los 625 pies/minuto, pero el uso de las bajas velocidades reduce el riesgo de arrastre de agua desde la media.

Figura 9. Accesorios del Enfriador Evaporativo



Fuente: Planta Merilétrica

Figura 10. Motor y bombas del sistema



Fuente: Planta Merilétrica

Estas características, excepto para los termómetros, son estándares usados en los enfriadores evaporativos de la empresa del autor. Los termómetros son de la preferencia de muchos operadores y son suministrados cuando se especifican por el usuario. Las empaquetaduras que retienen la media algunas veces no están incluidas, el enfriador funcionara satisfactoriamente si ellas. Sin embargo, los retenedores verticales sobre la pared lateral del enfriador son obligatorios.

2.6 FLUJO DE AGUA

Los fabricantes del enfriador evaporativo recomiendan ratas de flujo de agua hacia la cabecera del enfriador en rangos de 1 a 2 gal/min por cada pie cuadrado de área de superficie de la almohadilla de distribución (fig. 1) para enfriadores arriba de los 6 pies de altura, y 1-1/4 a 3 gal/min para enfriadores que superen los 12 pies de altura. Una rata de flujo de 1 gal/min./ft² por área de superficie de la almohadilla de distribución para enfriadores evaporativos que superen los 6 pies de altura ha sido mostrada para trabajar satisfactoriamente. Las ratas de flujo más altas tienen la ventaja de minimizar la velocidad de formación de barro en la superficie de la media, pero las ratas de flujos mas bajos minimizan el potencial de arrastre de agua. Estos flujos recomendados son considerados un resultado práctico de la consideración de estos dos efectos.

De acuerdo con el principal fabricante de media rígida usada en los enfriadores evaporativos, estas ratas de flujo podrían ser reducidas en un 20% y conservar una total efectividad en los enfriadores evaporativos. Sin embargo, los flujos más bajos no son recomendados debido a que el margen del factor de seguridad es del 20%.

Un flujo de agua muy bajo será indicado por unos puntos secos sobre la superficie aguas arriba de la media. Si hay puntos secos, el flujo de agua hacia la cabecera se debe incrementar gradualmente. Si los puntos secos no desaparecen después de 15 a 20 minutos, el flujo de agua debe ser incrementado mucho más. Este procedimiento se debe seguir hasta que desaparezcan los puntos secos.

Aunque el barro se formara en la media de cualquier enfriador evaporativo, la formación de barro pesado en el frente de la media después de varias semanas o pocos meses de operación, también puede indicar un flujo de agua muy bajo. Con puntos secos, el flujo de agua debe ser incrementado. En ambos casos, observe en el lado aguas abajo de la media para encontrar rastros de arrastre de agua.

Los eliminadores de niebla removerán el agua arrastrada, pero se debe minimizar el soplado de agua desde la media. En la primera oportunidad, la media debe ser retirada del enfriador, y lavada para retirar el barro. El flujo de agua hacia la cabecera debe ser configurado al tiempo en el que el enfriador llega a ser operativo. Si el flujo es inicialmente configurado correctamente, no es necesario ajustarlo después. El flujo de agua no debe ser ajustado por los cambios en la temperatura ambiente. Son innecesarios los ajustes del flujo de agua, especialmente los hechos por los cambios en la temperatura ambiente los cuales son una causa primaria de los problemas de los enfriadores asociados con el uso de mucha o poco agua.

2.7 ARRASTRE DE AGUA

El arrastre de agua es la presencia de gotas de agua en el aire saliente del enfriador evaporativo. El arrastre de agua será insignificante si el enfriador esta diseñado, instalado, operado, dimensionado, y mantenido correctamente. Sin embargo, el arrastre de agua parece ser afectado por un largo número de parámetros y, estas condiciones pueden aparecer en la instalación de muchos enfriadores evaporativos, parece prudente aceptar la inevitabilidad del arrastre de agua en enfriadores evaporativos que no usan los eliminadores de niebla tipo veleta.

Por lo tanto, con el fin de eliminar el arrastre de agua, el fabricante requiere el uso de eliminadores de niebla del tipo veleta para todos los enfriadores evaporativos suministrados con sus turbinas de gas. El eliminador de niebla esta instalado en el lado descendente de la media. Aunque el eliminador de niebla este instalado después de la media, un rocío saliente de la media todavía debe ser investigado y reducido tanto como sea posible, porque la eficiencia del eliminador de niebla es menor del 100%. Esto significa que algo de agua pasara através del eliminador de niebla. A mayor volumen de agua incidiendo sobre el eliminador, mayor volumen de agua será arrastrado en el aire de entrada de la turbina.

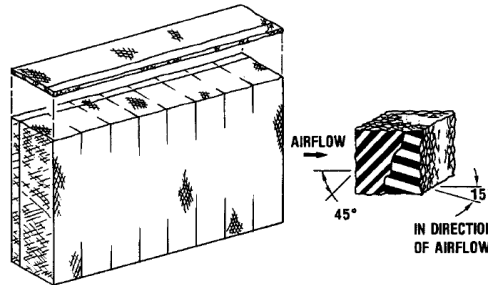
El eliminador de niebla tipo veleta es extremadamente efectivo en remover gotas de agua, reduciendo las gotas de agua en el aire a la máxima medida posible del eliminador y asegurara que el arrastre de agua no ocurra. Las diez causas del arrastre de agua discutidas a continuación se refieren al agua arrastrada en el aire saliente de la media. Estas causas están basadas en investigación de campo ("The american society of mechanical engineers") del arrastre de agua desde la media del enfriador evaporativo:

1. Polaridad incorrecta de la media (Fig. 11): la media puede ser instalada incorrectamente por el fabricante o removida en algún punto

antes de la instalación del enfriador evaporativo y puesta incorrectamente.

2. Media estropeada: El daño puede ocurrir cuando la media esta siendo reinsertada dentro del enfriador evaporativo después que ha sido retirada en campo. El daño usualmente ocurre en los bordes de la media cuando las tiras de la media son forzadas a dejarlas en su posición. Esto puede impedir la correcta alineación de las tiras de la media y puede ser la causa de grietas abiertas entre la media. Los daños también ocurren cuando las tiras de la media son colocadas en el suelo y posteriormente pisadas. Esto aplasta la media, y a menudo el arrastre de agua ocurre en el punto del daño.

Figura 11. Polaridad de la Media Evaporativa



Fuente: Internet

3. Media alineada incorrectamente: Las medias instaladas verticalmente no puede ser presionadas con otras en el área de la entrada de aire. La desalineación excesiva, $\frac{3}{4}$ de pulgada o más, puede permitir el arrastre de agua. Además no deben haber grietas abiertas en la media.
4. Media sin sellos contra retenedores: la media debe estar sellada firmemente contra los retenedores que mantienen las partes superiores y laterales de la media sobre la parte inferior del enfriador.
5. Flujo de agua excesivo: gran cantidad de agua entregada a la cabecera inundara la media y causara arrastre de agua. El flujo de agua no debe ser más que el necesario para humedecer todas las superficies internas de la media sin inundarlas.

6. Distribución de agua no uniforme en la cabecera: Los agujeros en la cabecera de agua pueden llegar a ser obstruidos, causando una distribución de agua no uniforme en la almohadilla de la media, lo que significa que un lado del enfriador recibirá demasiada agua.
7. Hoja del deflector instalado incorrectamente. Si el enfriador evaporativo usa una hoja de deflector de goma, esta hoja debe estar instalada en la parte superior de la almohadilla de la media.
8. Flujo de aire no uniforme en la media: El resultado más probable es el inadecuado diseño de la canalización. La canalización de entrada debe ser diseñada para que la distribución del flujo de aire atraviese la media tanto como sea posible.
9. Depósitos de barro en la media: Si el enfriador evaporativo ha estado en servicio por mucho tiempo, puede tener depósitos de barro sobre la superficie de la media, provocando arrastre de agua y por lo tanto requiriendo un reemplazo de la media.
10. Media saturada: El arrastre de agua puede estarse presentando al comienzo de la turbina cuando la media del enfriador evaporativo esta saturada.

2.8 INSTALACION

Generalmente, en el sistema de aire de entrada de una turbina de gas, es recomendable que el enfriador evaporativo sea ubicado después de la entrada de aire limpio, no antes. Este arreglo protegerá la media del polvo y de otros contaminantes en el aire que inciden en ella. Los enfriadores evaporativos de media rígida no han sido probados para eficiencia de filtración, pero se conoce que pueden remover cantidades considerables de partículas en el aire. El efecto que tiene sobre la eliminación de partículas en la operación del enfriador evaporativo dependerá de un número de factores, incluyendo el promedio de la concentración de polvo en el aire, la máxima concentración anticipada de polvo en el aire, y si el enfriador evaporativo es recirculante o no recirculante.

2.9 ENFRIADORES EVAPORATIVOS RECIRCULANTES

Las concentraciones de polvo en la luz (menos de 1 ppm en el aire) no crearan problemas operacionales para el enfriador evaporativo. El enfriador

debería seguir un aire limpio si el promedio de concentraciones de polvo excede 1 ppm. Las concentraciones más altas, especialmente de polvo y tormentas de arena exceden los 500-600 ppm, pueden dejar sedimentos pesados en el depósito y generar daños en las bombas reduciendo la recirculación del flujo de agua. Para obtener flujos de agua mayores de los recomendados para una operación normal, se necesita limpiar la suciedad de la media del enfriador evaporativo. Esto altos flujos aumentan el riesgo de arrastre de agua desde la media y de mayor carga de agua en el eliminador de niebla, lo que aumenta el riesgo de arrastre de agua en el enfriador evaporativo.

El crecimiento orgánico también llega a ser un problema para los enfriadores recirculantes expuestos a la luz del sol. Los crecimientos formados sobre la media y el depósito necesitan tratamiento químicos para controlarlos.

2.10 ENFRIADOR EVAPORATIVO NO RECIRCULANTE

Estos no tienen el problema de los sedimentos de los enfriadores recirculantes, pero esta sujeto a los mismos problemas de cargas de polvo. Los flujos de agua más altos y los riesgos de arrastre de agua aplican tanto para los enfriadores recirculantes como para los no recirculantes. El crecimiento orgánico también ocurre sobre la media.

3. CONTROL DE VELOCIDAD DE BOMBAS DE FLUIDO

Los variadores de frecuencia son equipos que son factibles de utilizar para controlar la velocidad de los motores de inducción que mueven bombas, de tal manera de controlar mediante este mecanismo, el caudal de la bomba.

El ahorro de energía que se logra mediante un variador de velocidad depende, esencialmente, de dos factores:

- a) El caudal medio Q_m . Mientras menor sea el caudal medio que el usuario necesite, medido en forma proporcional respecto del caudal nominal o máximo que la bomba es capaz de suministrar, mayor será el ahorro de energía que se obtiene con un variador de frecuencia. La definición matemática de caudal medio es la convencional:

$$Q_m = \frac{1}{T} \sum Q_i T_i$$
$$T = \sum T_i$$

Q_i : caudal medido en el intervalo de tiempo T_i
 Q_m : caudal medio
 T : intervalo total de tiempo.

- b) Desviación dQ con respecto al caudal medio. La hipótesis de que el caudal es constante no es, en general, válida. Por ello, es necesario definir la desviación dQ del caudal con respecto al valor del caudal medio Q_m .

$$dQ = \frac{1}{T} \sum [\text{abs}(Q_m - Q_i)] T_i$$

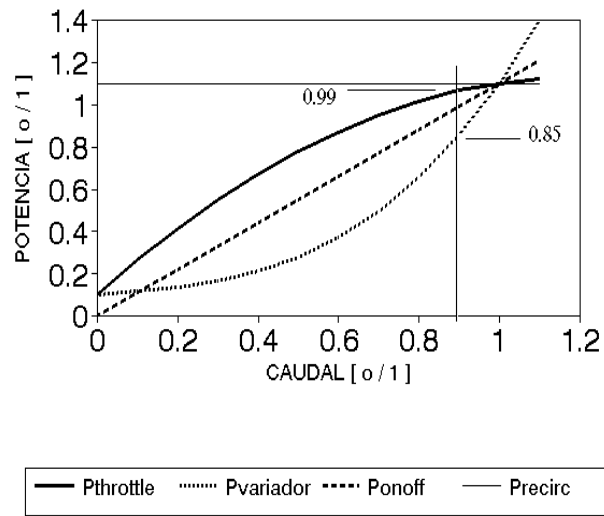
Los sistemas de bombeo de fluidos son diseñados para 100% de caudal, pero muchas veces el sistema podría operar con menos caudal. Existe, por tanto, una energía eléctrica gastada en impulsar un caudal que no es estrictamente necesario. Para regular el caudal existen al menos 4 opciones:

- a) Recirculación. Parte del caudal, el innecesario, es recirculado. Claramente esta alternativa no implica ahorro de energía.
- b) Estrangulación (Throttle). El caudal es reducido mediante válvulas de estrangulación. Esta alternativa, si existe, implica un ahorro de energía que es necesario evaluar.

- c) Detención (On-off). El caudal es reducido deteniendo la bomba durante el tiempo necesario; esta alternativa implica un ahorro de energía. Es impracticable si se desea regular el caudal en valores relativamente pequeños.
- d) Variador de frecuencia. El caudal es regulado mediante la variación de la velocidad de la bomba, empleando convertidores de frecuencia en la alimentación del motor eléctrico. Se demostrará que esta alternativa es la que mayor ahorro de energía implica.

La figura siguiente muestra las 4 formas básicas de variar el caudal de una bomba.

Figura 12. Consumo de Potencia vs Caudal



Fuente: Internet

Se observa lo siguiente:

- a) Para caudal nominal ($Q=1$), todos los sistemas implican el mismo consumo ($P=1.1$).
- b) Si se necesita sólo un 90% del caudal nominal de diseño:
 - b1) Si se emplea recirculación el consumo no disminuye.

b2) Si se disminuye el caudal mediante obstrucción (throttle), la disminución de consumo será apenas apreciable.

b3) Si se emplea el control on-off (apagando la bomba un 10% del tiempo, lo que puede ser impracticable por muchas razones, entre ellas, por disminuir la vida útil de la bomba), el consumo de electricidad se reduce en un 10% aproximadamente.

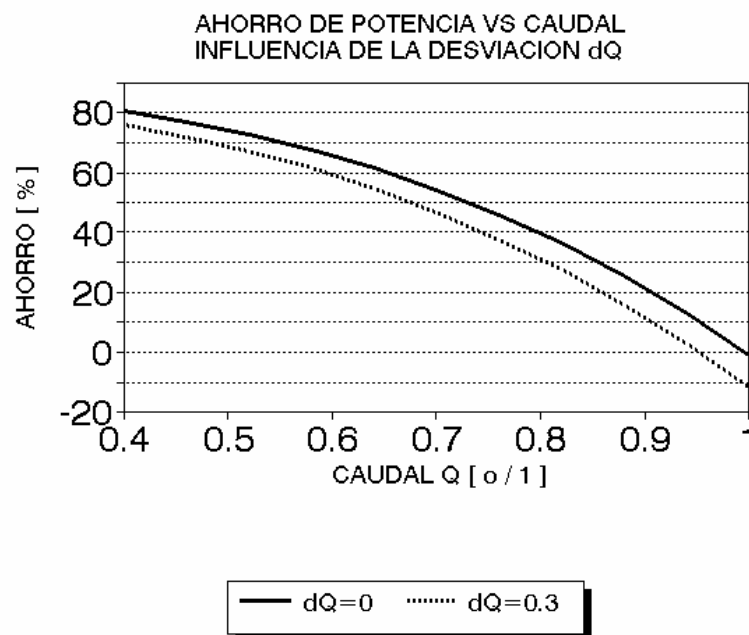
b4) Si se reduce la velocidad de giro de la bomba mediante un variador de la frecuencia de alimentación del motor, el consumo se reduce a 0.85, es decir, se apreciará aproximadamente un 20% de ahorro con respecto a la potencia nominal de la bomba.

c) El valor del caudal medio es la variable fundamental necesaria para calcular el ahorro de energía.

$$\text{Ahorro} = \left(2.2 - 2.2Q - dQ \frac{0.1}{0.3} \right) * 100 \%$$

$$1.1 > Q > 0.8 \quad 0.3 > dQ > 0$$

Figura 13. Ahorro de Potencia vs Caudal



Fuente: Internet

3.1 APLICACIÓN DE VELOCIDAD VARIABLE EN SISTEMAS DE BOMBEO

A medida que la electrónica avanza y la generación de energía es cada vez más costosa, se torna rentable y necesario hacer cada vez más eficientes los procesos de producción, éste es el caso de aquellos procesos que involucren bombas y que haciendo uso de los controles de frecuencia (Variadores) pueden ser más eficientes y por lo tanto ahorrar energía. Los sistemas de velocidad variables se pueden aplicar en aquellos sistemas en donde se requiere regular el flujo a diferentes cargas. Los organismos operadores de agua potable tienen un gran potencial de ahorro de energía mediante la aplicación de velocidad variable a sus sistemas de bombeo directo a la línea, ya que éste es el caso donde la carga es variable.

3.2 REGULACIÓN DEL FLUJO EN BOMBAS CENTRÍFUGAS

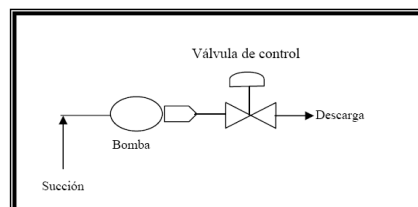
En muchas ocasiones es preciso trabajar durante mucho tiempo en condiciones de caudal inferiores al nominal. En esta situación se pueden realizar planteamientos que permitan ahorros energéticos considerables, implantando el sistemas de regulación de caudal más apropiado. Los métodos de regulación de caudal se obtienen mediante:

- ✓ Modificación de la curva presión-caudal del sistema sobre el que trabaja la bomba.
- ✓ Modificación de la curva presión-caudal de la bomba.
- ✓ Modificación simultánea de ambas características (sistema y bomba).
- ✓ Arranque o paro de la bomba.

3.2.1 Modificación de la curva del sistema sobre el que trabaja la bomba

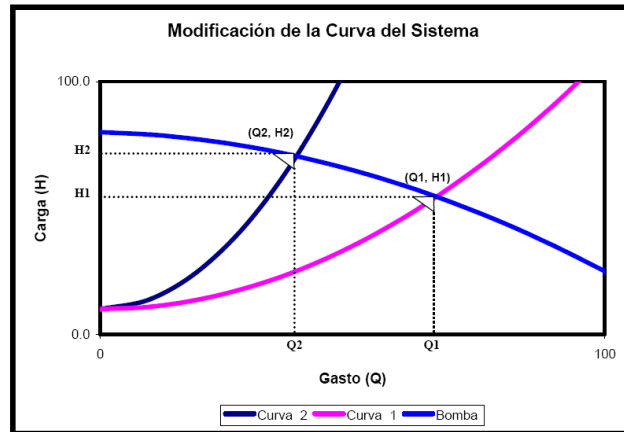
Éste es el método más utilizado, se trata en esencia de regular el flujo mediante la actuación de una o más válvulas, de tal forma que se modifique la curva de comportamiento del sistema de conducción.

Figura 14. Control de flujo por válvulas.



Fuente: Internet

Figura 15. Control por modificación de la curva del sistema.



Fuente: Internet

Nótese que al estrangular la válvula de control para reducir el gasto de Q_1 , a Q_2 , la curva del sistema cambia de la curva 1 a la curva 2, (fig. 15), y la carga se ve incrementada de H_1 a H_2 . Resultando una potencia hidráulica:

$$Ph_2 = Q_2 \times H_2$$

3.2.2 Modificación de la curva de la bomba

Otra alternativa de control, consiste en variar la curva “Carga-Capacidad”, de la bomba. Esto se logra, variando la velocidad de operación de la bomba, como se muestra en la figura 16.

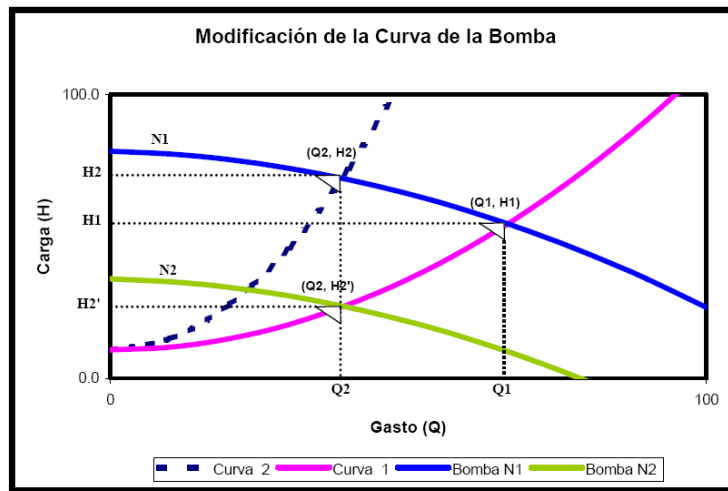
Nótese que ahora, variando la velocidad de la bomba de N_1 a N_2 , podemos pasar de un gasto Q_1 a un gasto Q_2 , sin incrementar la carga, por el contrario, la nueva carga H_2' , es menor a la carga inicial H_1 y mucho menor a la que se obtendría con la válvula de estrangulación H_2 .

En este caso, la potencia hidráulica será:

$$Ph_2' = Q_2 \times H_2'$$

La cual es mucho menor que Ph_2 .

Figura 16. Control de gasto por variación de velocidad en la bomba.



Fuente: Internet

3.2.3 Modificación simultánea de las curvas del sistema y la bomba

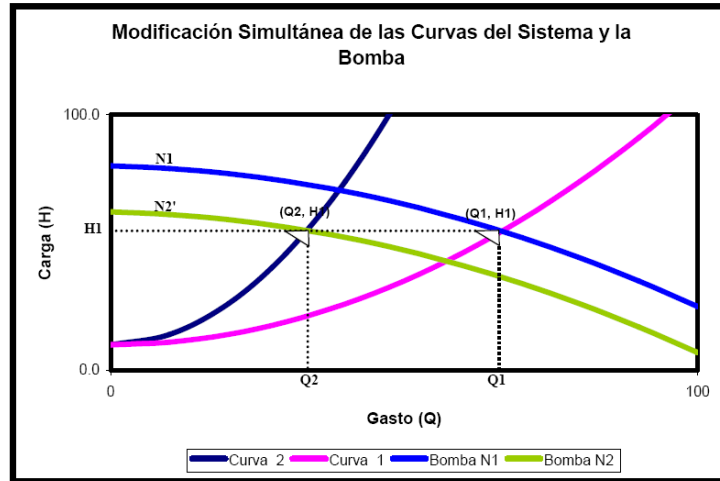
Uno de los casos más frecuentes es aquel en donde por requerimientos del proceso, la curva “Carga-Capacidad” del sistema varía, debido a que en el sistema existen varios usuarios y cada uno de ellos demanda más o menos gasto como función de sus propias necesidades. Esto, visto desde la bomba, representa variaciones en la curva del sistema, por lo que continuamente varía el gasto y la carga.

En sistema de control que garantice el mismo gasto a los usuarios a pesar de que algún otro usuario haya cambiado su régimen de demanda, lo encontramos en la variación de la curva de la bomba, simultáneamente con la variación de la curva del sistema, de manera tal que se mantenga la carga del sistema en cualquier condición de operación. La figura 17 ilustra el proceso. Obsérvese como ante una variación de la curva del sistema, el control ajusta la velocidad de la bomba para mantener la carga H_1 , y suministrar el gasto Q_2 que el sistema realmente está demandando. La potencia hidráulica en este caso es:

$$Ph1' = Q_2 \times H_1$$

Ejemplos de este tipo de aplicaciones los tenemos en: sistemas públicos de agua potable, sistemas de enfriamiento industriales y sistemas de aire acondicionado tipo chiller.

Figura 17. Variación simultánea de las curvas del sistema y la bomba



Fuente: Internet

3.2.4 Arranque y paro de la bomba

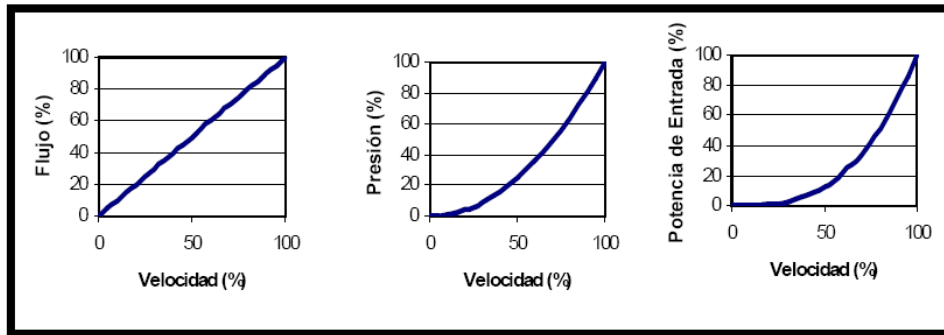
Este es un sistema muy conveniente cuando se cuenta con un acumulador, tal como hidroneumático o tanque elevado. Así la bomba operará con válvula de descarga siempre abierta y cuando se halla llegado a la presión nominal en el hidroneumático o al nivel alto en el tanque elevado, la bomba parará, para volver a arrancar cuando la presión o el nivel, según el caso, haya llegado al nivel bajo.

El sistema es energéticamente eficiente. Tiene la limitante de que necesita del acumulador, y no siempre es posible contar con él.

3.3 LEYES DE AFINIDAD

Las bombas centrífugas se comportan de acuerdo a las leyes de afinidad, las cuales se ilustran en la figura 18.

Figura 18. Leyes de Afinidad en Bombas Centrífugas



Fuente: Internet

Las leyes de afinidad nos indican que:

- El flujo tiene un comportamiento lineal con la velocidad
- La presión tiene un comportamiento cuadrático con la velocidad
- La potencia de entrada tiene un comportamiento cúbico con la velocidad

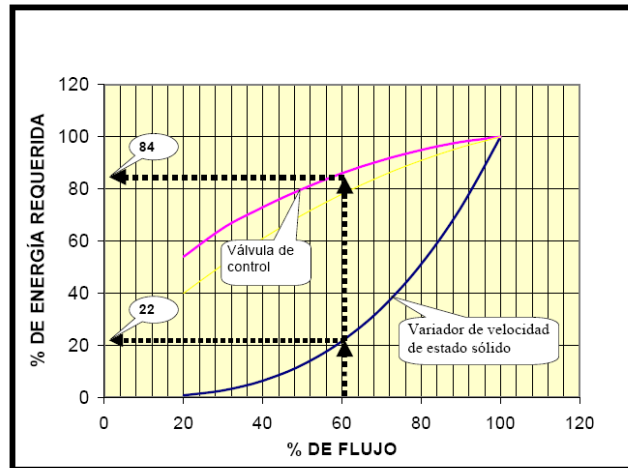
Figura 19. Vista General bomba enfriador evaporativo



Fuente: Planta Merilétrica

3.3.1 Comparación energética entre métodos de regulación de caudal

Figura 20. Comparación entre métodos de regulación de flujo.



Fuente: Internet

4. DISEÑO METODOLOGICO

Durante los cambios de las condiciones atmosféricas, las bombas de agua del enfriador permanecen encendidas a un flujo de agua constante establecido por la central, permitiendo de esta forma la saturación del enfriador. Cuando esta condición se hace efectiva, un arrastre de agua puede suceder aguas arriba del enfriador pudiendo causar de esta forma cavitación en las superficies lisas a la entrada del compresor encargadas de suavizar el flujo de aire y en las primeras etapas del compresor de la turbina; dañando de esta forma los componentes esenciales del compresor y causando una pérdida de eficiencia y de potencia de la unidad.

Una forma de evitar este suceso, es realizar la variación del flujo de agua de las bombas del enfriador evaporativo de aire mediante el monitoreo de la humedad relativa y temperatura ambiente y adaptación de variadores de velocidad para los motores de las bombas del enfriador evaporativo.

Las siguientes son las Etapas del diseño del controlador para el flujo de agua hacia el enfriador.

4.1 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA A CONTROLAR

La identificación de sistemas consiste en la determinación de un modelo que represente lo más fielmente posible al sistema dinámico, a partir del conocimiento previo sobre éste y de los datos medidos.

En muchas ocasiones no se puede obtener teóricamente la función de transferencia de una planta, debido a diversos factores. En estos casos podemos hacer una identificación del sistema a partir de mediciones hechas a la entrada de la planta y a la salida de la planta. Para este efecto, el programa MATLAB tiene una herramienta llamada SYSTEM IDENTIFICATION.

En todo sistema podemos distinguir tres tipos de señales que son:

Señales de entrada: Son aquellas señales que pueden ser controladas y de las cuales depende básicamente el funcionamiento del sistema.

Señales de salida: Son señales que nos indican como se está comportando el sistema.

Señales de perturbación: Son señales que afectan el comportamiento del sistema pero que no pueden ser controladas.

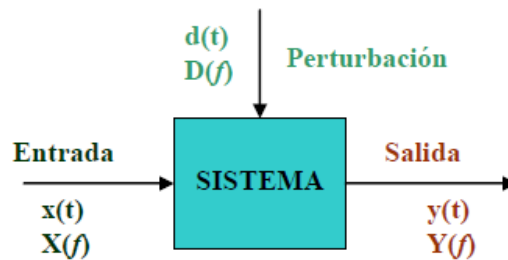
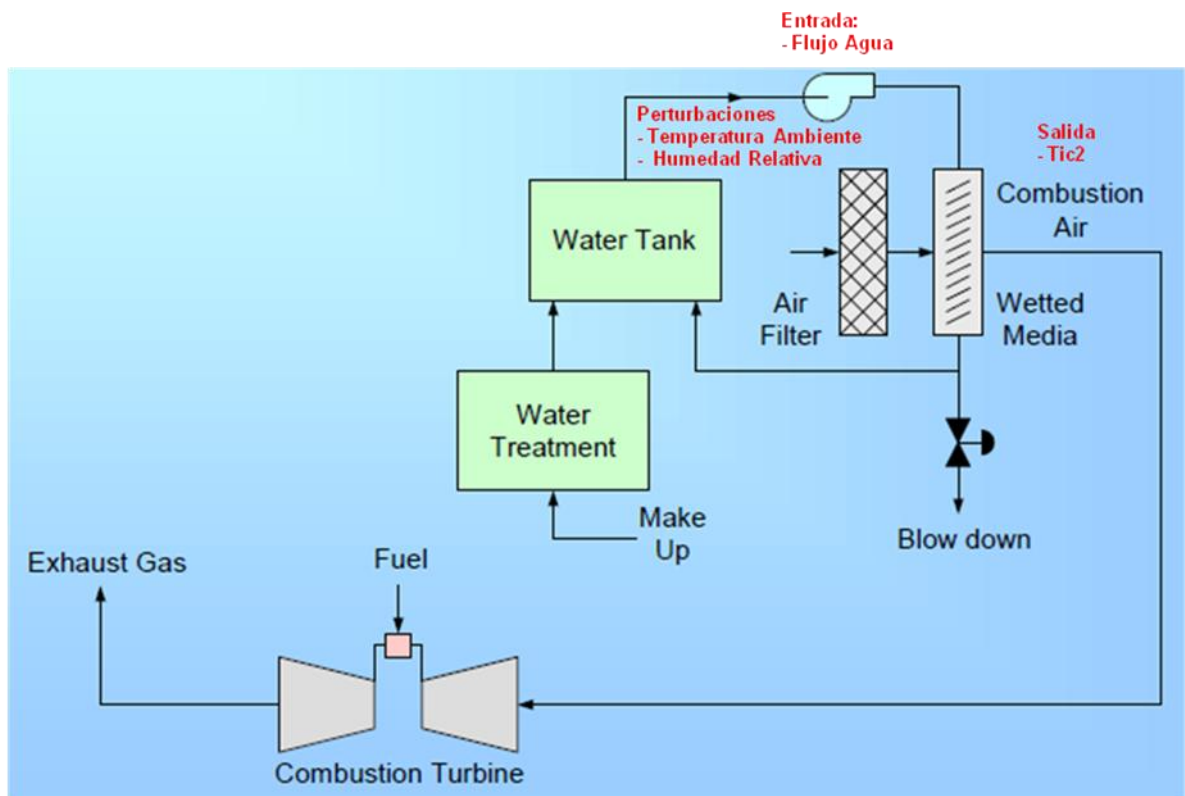


Figura 21. Esquema general de las señales del sistema



Fuente: Internet – Planta Meriléctrica

Las señales del sistema están en el dominio del tiempo pero pueden ser manipuladas matemáticamente para llevarlas al dominio de la frecuencia. Aunque, para efecto de identificación las señales son muestreadas solo a

tiempos discretos que usualmente están igualmente distanciados en unidades de tiempo. En consecuencia el problema de modelamiento es describir como están relacionadas las señales entre sí.

La relación básica entre las señales es una ecuación diferencial lineal.

Matemáticamente notamos que la salida al instante t puede ser calculada como una combinación lineal de las entradas y salidas anteriores. Esta dependencia de lo que sucedió anteriormente es lo que se entiende por dinámica. En consecuencia, el problema de la identificación de un sistema consiste en determinar los coeficientes de cualquiera de las dos ecuaciones previas.

Respecto al orden de la función de transferencia del modelo existen dos alternativas: imponer el orden o dejarlo libre a determinar.

Según las mediciones a procesar, la identificación experimental puede hacerse por los siguientes métodos:

- 1.- Utilizando la respuesta ante señales de ensayo sobre el sistema.
- 2.- Procesando mediciones históricas de funcionamiento de la planta.
- 3.- Identificación en línea. Su aplicación es posible sin perturbar significativamente las condiciones de trabajo del sistema.
- 4.- Identificación en tiempo real.

De las anteriores se procedió a utilizar mediciones históricas del funcionamiento de la planta.

Se puede establecer una clasificación según las características del modelo que se pretende obtener:

- **De modelo paramétrico.** Se pretende obtener los valores de los coeficientes de las funciones o matrices de transferencia, o los elementos de las matrices de representación en el espacio de estado.
- **De modelo no paramétrico.** Sería el caso de las gráficas de módulo y fase en las respuestas frecuenciales, en los cuales se usarían los diagramas de Bode, Nyquist, Nichols y las respuestas a impulso o escalón.

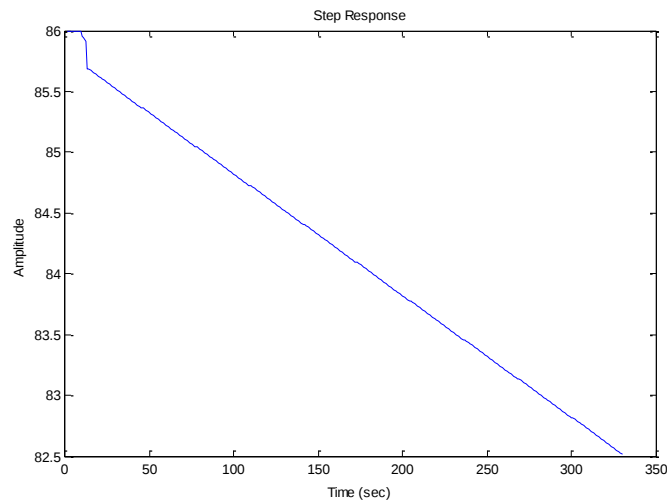
4.2 PROCEDIMIENTO PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

Con los datos obtenidos de los históricos de la planta, se crearon en el workspace de matlab las variables de entrada y salida para la identificación del sistema.

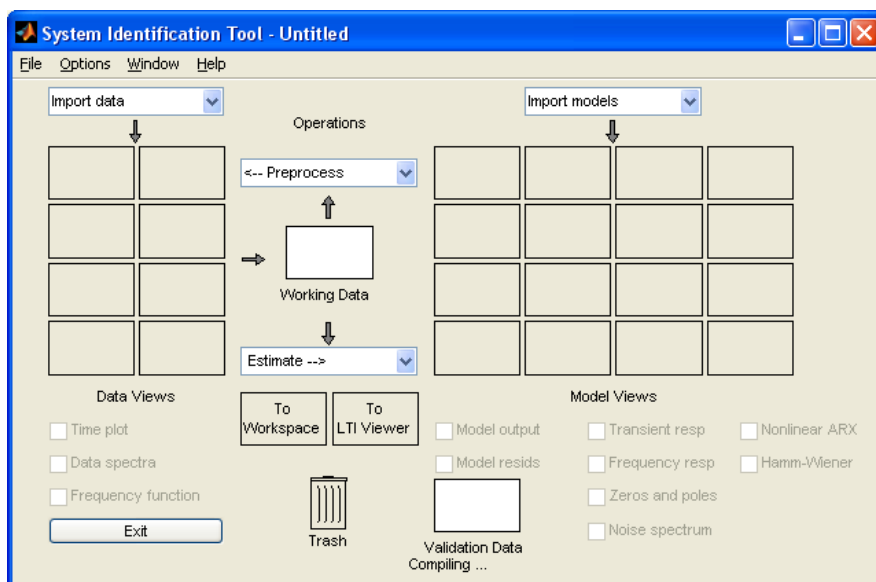
f = flujo de agua a la entrada del sistema (gpm)

tic2b = Temperatura del aire a la entrada del compresor (°F)

Se grafica el vector temperatura tic2b, el cual corresponde a la salida del sistema.



1. En la ventana principal de Matlab abrir la herramienta de identificación "System Identification" usando el comando "ident".



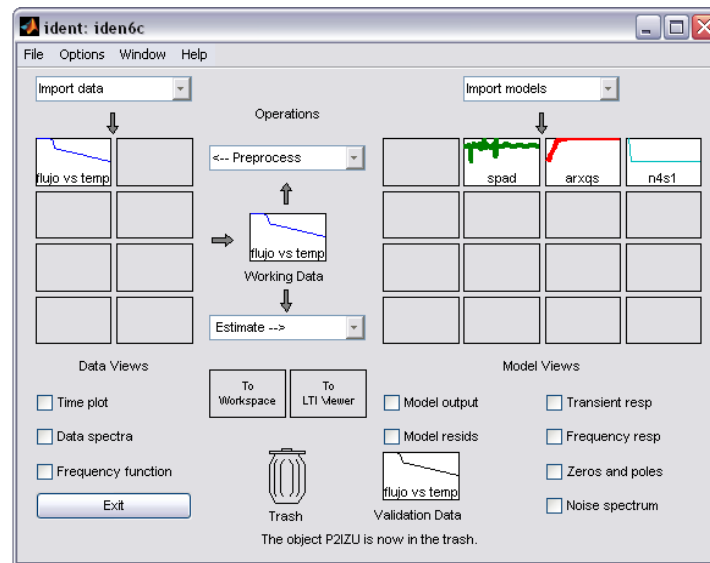
2. Se importaron los datos de entrada y salida (Import Data- Time Domain Data) de la siguiente manera:

The screenshot shows the 'Import Data' dialog box with the following settings:

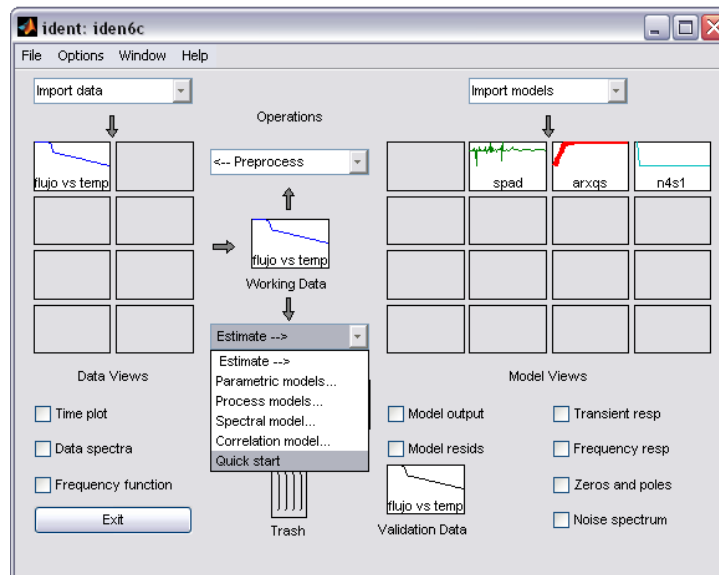
- Data Format for Signals:** Time-Domain Signals
- Input Properties:** InterSample: zoh, Period: inf
- Workspace Variable:** Input: f, Output: tic2b
- Channel Names:** Input: u1, Output: u2
- Data Information:** Data name: flujo vs temp, Starting time: 0, Sampling interval: 1
- Physical Units of Variables:** Input: gpm, Output: °F
- Notes:** flujo vs temp

- Input: Entrada_Salida: **f**
- Output: Entrada_Salida: **tic2b**
- Starting Time: 0.
- Sampling Interval: 1
- More: Permite asignar nombres y unidades a las señales de entrada y salida.

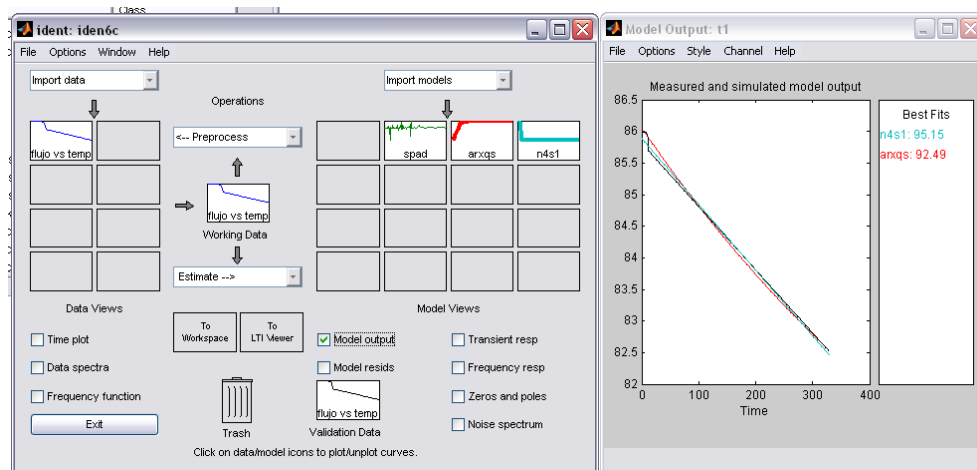
3. Se arrastran los datos importados hacia el área de trabajo (Working Data). Los datos importados pueden ser visualizados seleccionando la casilla "Time Plot".



4. Identificar el sistema seleccionando en el menú desplegable: Estimate – Quick Start: Haciendo esto, la toolbox ident realizara la identificación del sistema que más se aproxime a los datos reales suministrados de entrada / salida.



5. Un buen porcentaje de aproximación debe ser mayor al **85%**. Esta acción generará un gráfico en la zona “Model Views”. Se pueden intentar varias alternativas.



6. Arrastrar el mejor modelo obtenido en el “workspace” (To Workspace). El Mejor modelo que se obtuvo fue el n4S1, el cual se encuentra en ecuaciones de estado.

State-space model:

$$\begin{aligned} x(t+T_s) &= A x(t) + B u(t) + K e(t) \\ y(t) &= C x(t) + D u(t) + e(t) \end{aligned}$$

A = $\begin{bmatrix} & x1 \\ x1 & 1 \end{bmatrix}$ B = $\begin{bmatrix} & u1 & u2 \\ x1 & 8.9335e-007 & 4.4872e-005 \end{bmatrix}$ C = $\begin{bmatrix} & x1 \\ y1 & -3.7573 \end{bmatrix}$	D = $\begin{bmatrix} & u1 & u2 \\ y1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ K = $\begin{bmatrix} & y1 \\ x1 & -0.017624 \end{bmatrix}$ x(0) = $\begin{bmatrix} x1 & -22.872 \end{bmatrix}$
--	---

Estimated using N4SID from data set T / RH
 Loss function 0.000931824 and FPE 0.000960495
 Sampling interval: 1

7. Como el modelo obtenido se encuentra en variables de estado, se necesita convertirlo a una función de transferencia en el dominio de la frecuencia. Entonces se debe generar la función de transferencia a partir del modelo en ecuaciones de estado en la ventana principal de Matlab mediante los siguientes comandos:

```
>>n1=tf(n4s1)
>>n1=n1(1,1)
>>n1=d2c(n1,'zoh')
```

La ecuación obtenida de la identificación del sistema del enfriador evaporativo es la siguiente:

```
>> n1
```

Transfer function from input "u1" to output "y1":

$$\frac{-3.357e-006}{s + 1.554e-015}$$

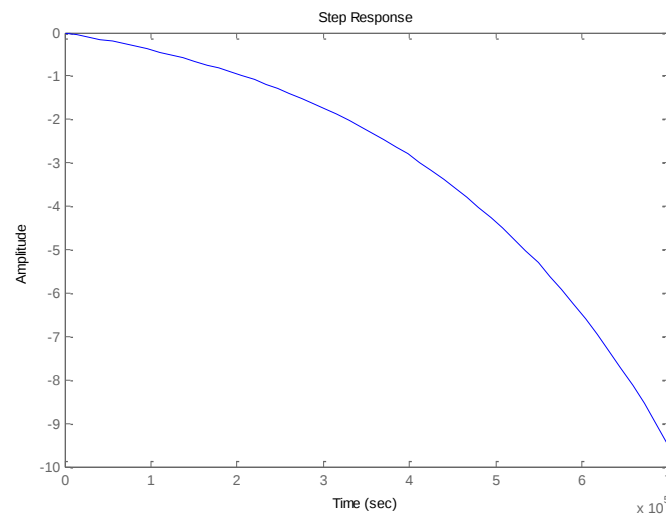
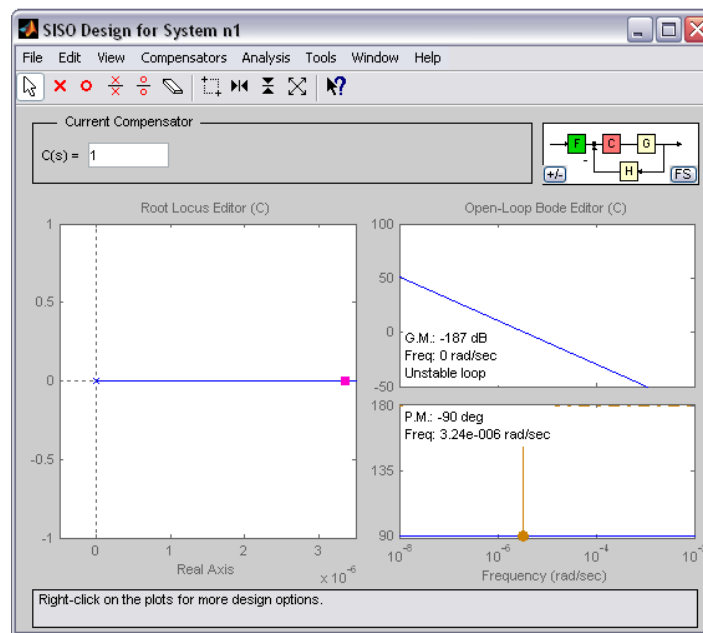
Como se puede apreciar es un sistema de primer orden.

4.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR MEDIANTE MATLAB

Una vez identificado y obtenido el sistema y su función de transferencia, se procede a diseñar el controlador desde la toolbox de matlab SISOTOOL.

1. Mediante el comando en el workspace, abrimos la ventana en sisotool con la función de transferencia de la planta que se acabo de identificar.

```
>>sisotool(n1)
```



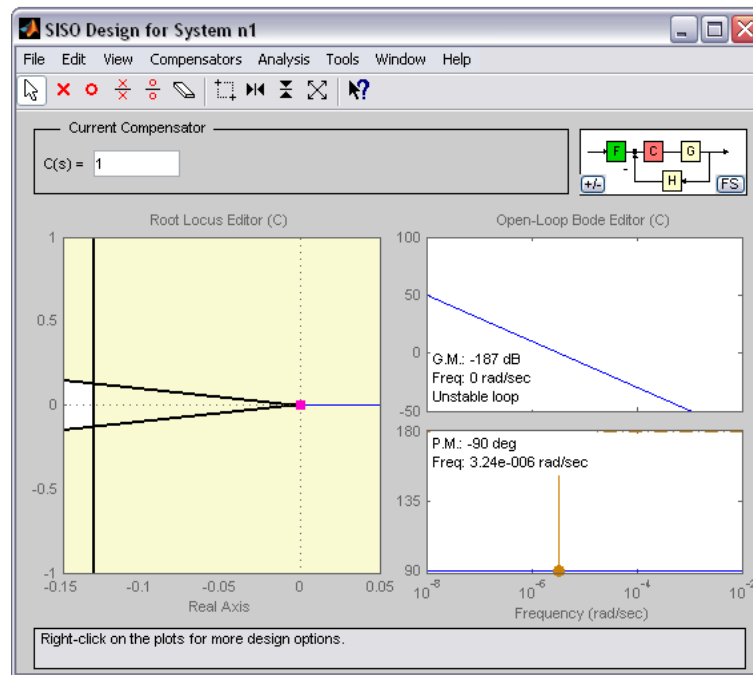
Respuesta del sistema a una entrada escalón unitario.

Como se aprecia en la figura se compara con la respuesta del sistema antes del modelado dando como resultado una similitud muy grande.

2. Una vez cargada la función de transferencia en se establecen los límites de diseño así:

Tiempo de asentamiento < 30 segundos

Porcentaje de Overshoot < 4.33%



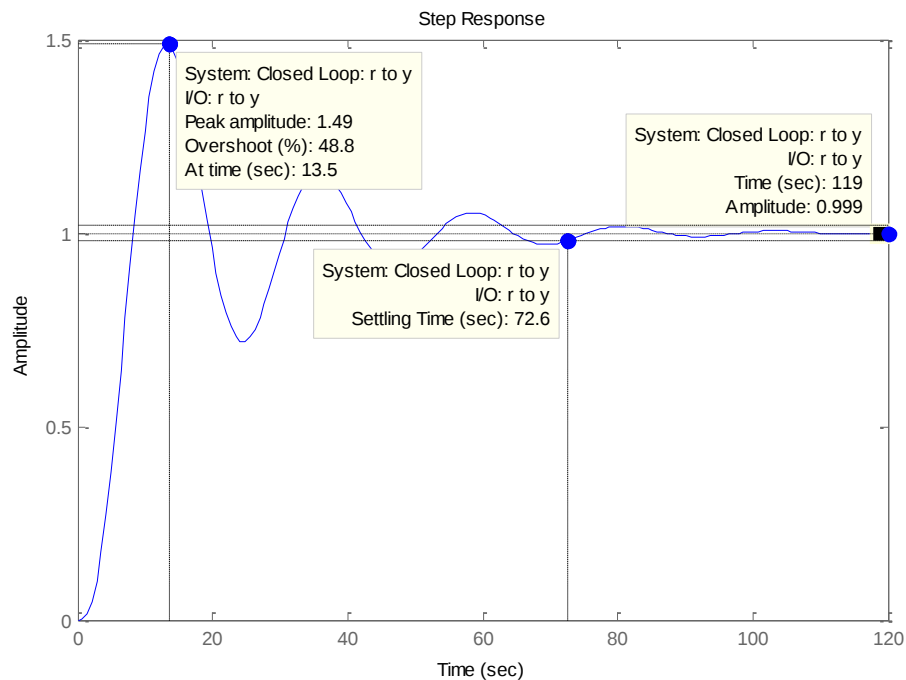
Polos: se agrega un polo complejo muy cercano al origen para mejorar la respuesta en régimen permanente.

$-0.3 \pm j 0.2i$

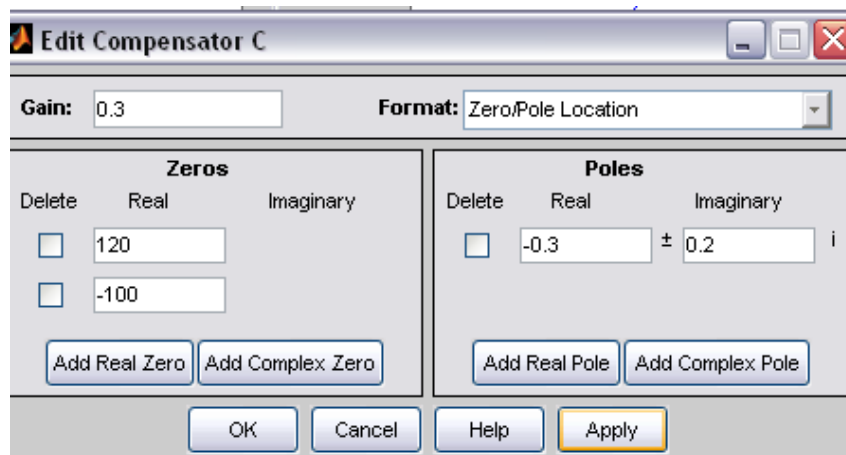
Ceros: Se agrega un cero real negativo y uno positivo para mejorar la rapidez del sistema.

Una vez agregados los polos y ceros al controlador se puede apreciar la respuesta del sistema así:

The screenshot shows the 'Edit Compensator C' dialog box. The 'Gain' is set to 1 and the 'Format' is 'Zero/Pole Location'. The 'Zeros' section has two real zeros at 120 and -100. The 'Poles' section has a complex pole at $-0.3 \pm j 0.2$. There are buttons for 'Add Real Zero', 'Add Complex Zero', 'Add Real Pole', and 'Add Complex Pole'. At the bottom are 'OK', 'Cancel', 'Help', and 'Apply' buttons.



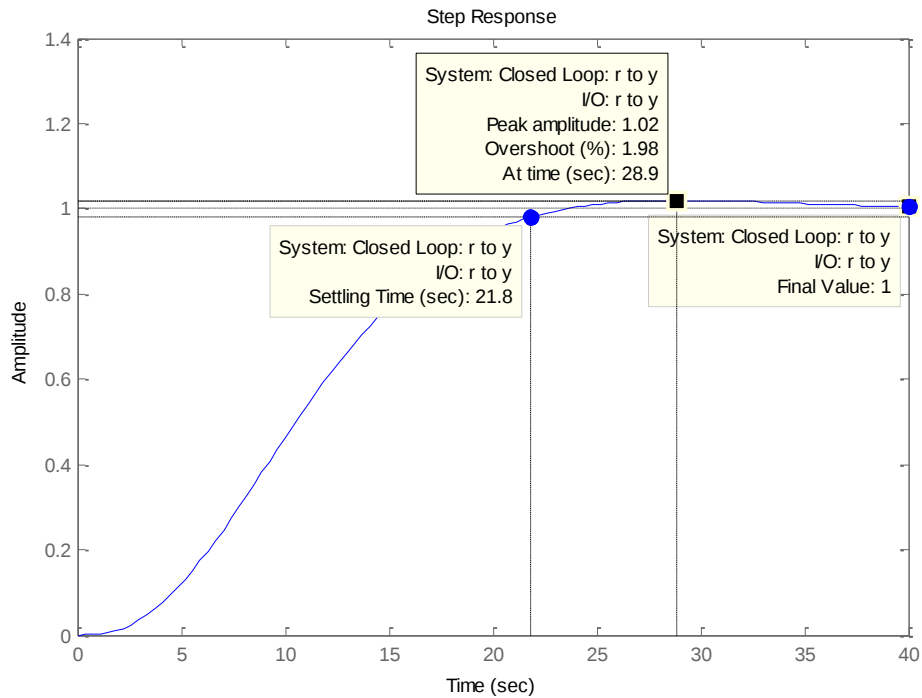
Obtenida la respuesta del sistema se aprecia que existe un Overshoot y tiempo de asentamiento mayor al de los parámetros de diseño por lo que se debe disminuir la ganancia del sistema para que este sea menos oscilatorio y de esta forma mejorar el tiempo de asentamiento.



Controlador obtenido del sistema n1

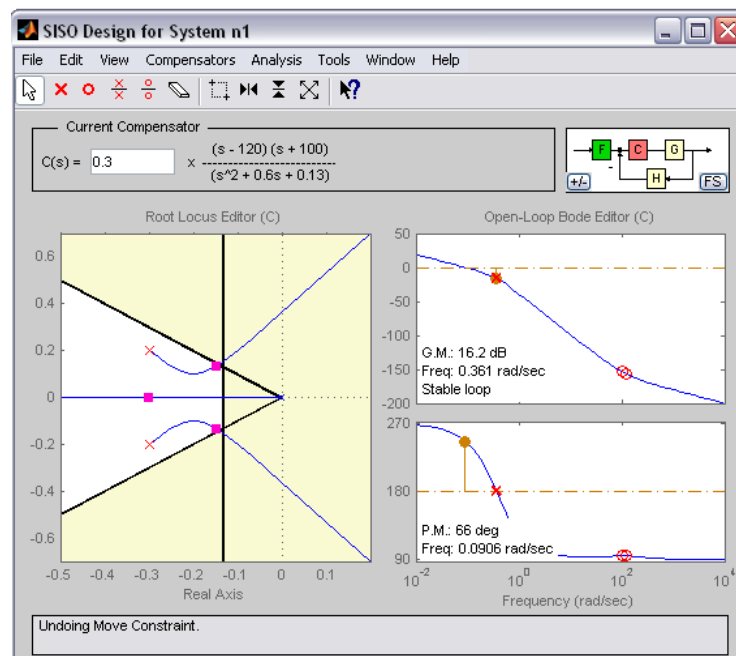
>> Cn1

$$\frac{0.3 (s-120) (s+100)}{(s^2 + 0.6s + 0.13)}$$



Como apreciamos en la figura, se mejoró notablemente el tiempo de asentamiento en 21.8 segundos y el Overshoot en 1.98%. El valor final es de 1 por lo que concluimos que el error en régimen permanente es de 0%.

El diagrama de Bode y fase queda de la siguiente forma:



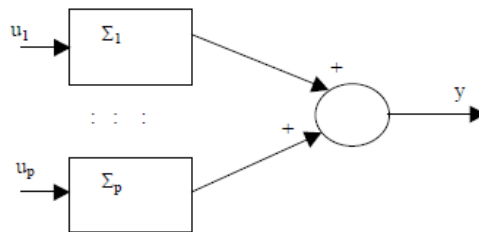
4.4 PERTURBACIONES DEL SISTEMA

Una vez obtenido el controlador del sistema, se procedió a encontrar las funciones de transferencia de cada una de las perturbaciones.

Las perturbaciones del sistema son:

Humedad Relativa y Temperatura Ambiente

Para hallar las funciones de transferencia de estas perturbaciones, las cuales van ligadas una de la otra, es posible aplicar el principio de superposición, considerando cada salida como suma de salidas elementales correspondientes a una sola entrada.



Entonces, las relaciones de entrada y salida quedan así:

$$Y = G1(s)*u1 + G2(s)*u2$$

Donde;

Y = Temperatura de entrada al compresor (tic2b)

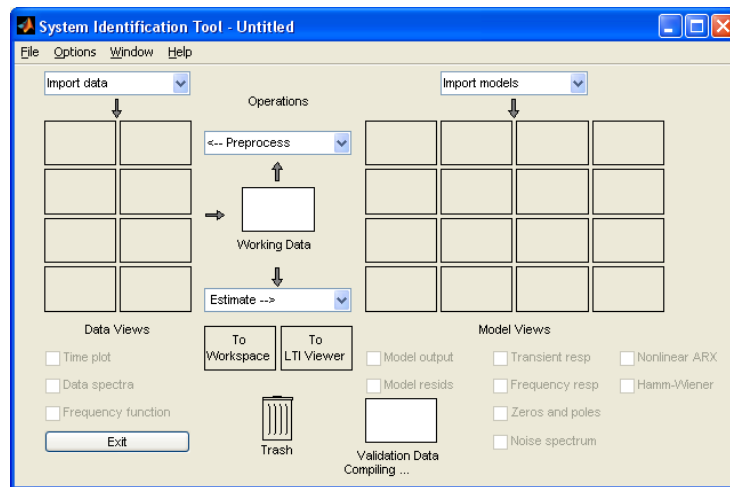
U1 = Temperatura ambiente (tamb2b)

U2 = Humedad Relativa (hum2b)

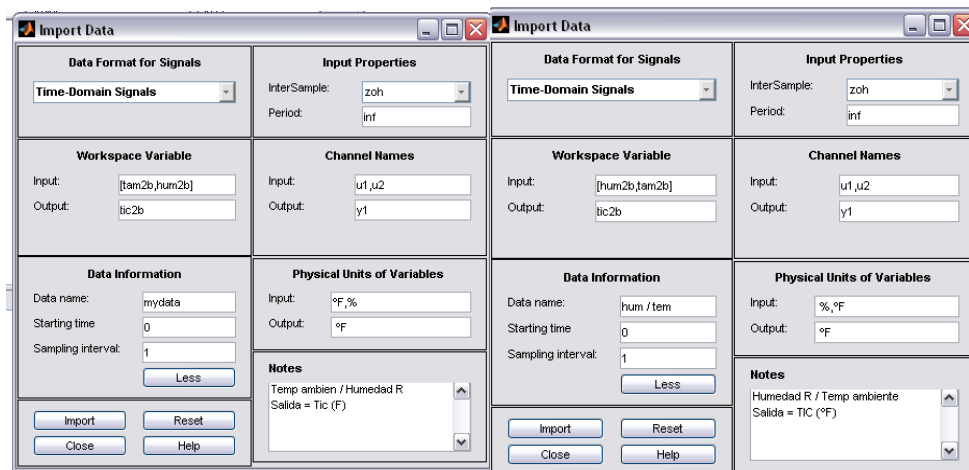
Estas perturbaciones se pueden identificar utilizando la toolbox **ident** de Matlab y calcular el modelo **[tic2b / tamb2b]**, teniendo **[hum2b]** como una perturbación. Por otro lado se obtiene, **[tic2b / hum2b]**, teniendo **[tamb2b]** como perturbación

Procedimiento para hallar los modelos de las perturbaciones por el principio de superposición.

1. En la ventana principal de Matlab abrir la herramienta de identificación "System Identification" usando el comando "ident".



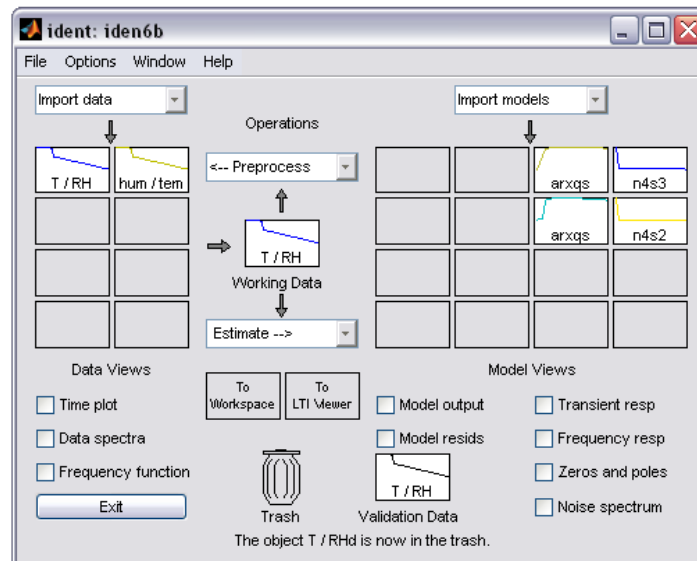
- Se importaron los datos de entrada y salida (Import Data- Time Domain Data) para las dos perturbaciones de la siguiente manera:



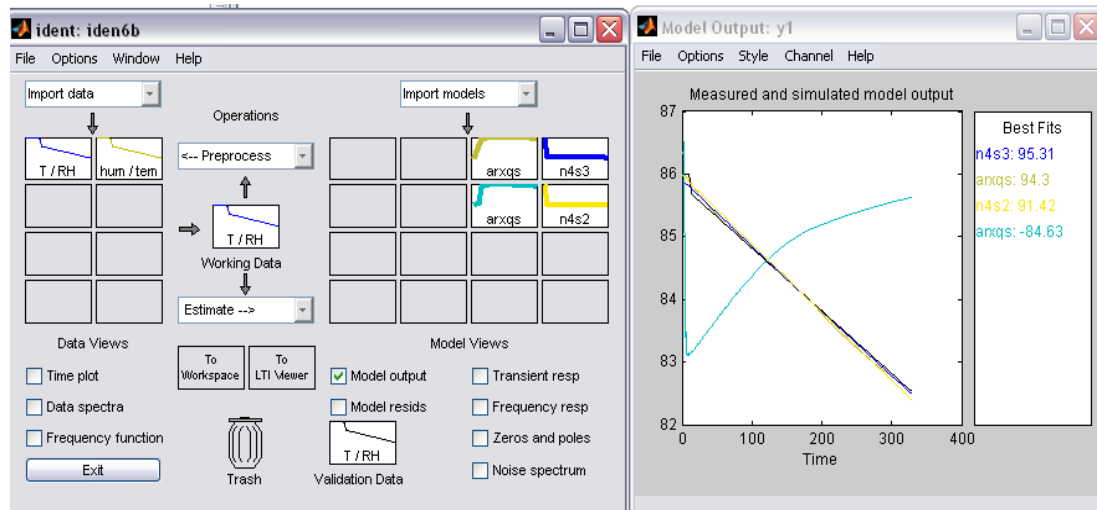
- Inputs: **[tam2b,hum2b]**
- Output: **tic2b**
- Starting Time: 0.
- Sampling Interval: 1

- Input: **[hum2b,tam2b]**
- Output: **tic2b**
- Starting Time: 0.
- Sampling Interval: 1

3. Luego se arrastraron los datos importados hacia el área de trabajo (Working Data). Los datos importados pueden ser visualizados seleccionando la casilla "Time Plot".
4. Se Identificó el sistema seleccionando en el menú desplegable: Estimate – Quick Start: Haciendo esto, la toolbox ident realizara la identificación del sistema que más se aproxime a los datos reales suministrados de entrada / salida.



5. Un buen porcentaje de aproximación debe ser mayor al **85%**. Esta acción generará un gráfico en la zona "Model Views". Se pueden intentar varias alternativas.



Los mejores modelos calculados son:

n4s3

Correspondiente a las señales:

Inputs: **[tamb2,hum2b]**

Output: **tic2b**

n4s2

Correspondiente a las señales:

Inputs: **[hum2b,tamb2]**

Output: **tic2b**

6. Se arrastraron los mejores modelos obtenidos en el “workspace” (To Workspace). Los mejores modelos obtenidos fueron n4s3 y n4s2, los cuales se encuentra en ecuaciones de estado.

Modelo en el espacio de estado para n4s3 (Temperatura Ambiente)

$$\begin{aligned}x(t+T_s) &= A x(t) + B u(t) + K e(t) \\ y(t) &= C x(t) + D u(t) + e(t)\end{aligned}$$

$A =$ $\begin{bmatrix} & x1 \\ x1 & 1 \end{bmatrix}$ $B =$ $\begin{bmatrix} & u1 & u2 \\ x1 & 8.9335e-007 & 4.4872e-005 \end{bmatrix}$ $C =$ $\begin{bmatrix} & x1 \\ y1 & -3.7573 \end{bmatrix}$	$D =$ $\begin{bmatrix} & u1 & u2 \\ y1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ $K =$ $\begin{bmatrix} & y1 \\ x1 & -0.017624 \end{bmatrix}$ $x(0) =$ $\begin{bmatrix} x1 & -22.872 \end{bmatrix}$
--	---

Modelo en el espacio de estado para n4s2 (Humedad Relativa)

$$x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t)$$

$$y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)$$

A = $\begin{bmatrix} & x1 \\ x1 & 1 \end{bmatrix}$ B = $\begin{bmatrix} & u1 & u2 \\ x1 & 1.6678e-005 & 1.4552e-005 \end{bmatrix}$ C = $\begin{bmatrix} & x1 \\ y1 & -4.5762 \end{bmatrix}$	D = $\begin{bmatrix} & u1 & u2 \\ y1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ K = $\begin{bmatrix} & y1 \\ x1 & -0.060299 \end{bmatrix}$ x(0) = $\begin{bmatrix} x1 & -18.795 \end{bmatrix}$
--	---

Estimated using N4SID from data set hum / tem
 Loss function 0.000344212 and FPE 0.000354804
 Sampling interval: 1

- Ahora los modelos obtenidos se encuentran en variables de estado, estos se necesitan en funciones de transferencia en el dominio de la frecuencia. Entonces se debe generar la función de transferencia a partir del modelo en ecuaciones de estado en la ventana principal de Matlab mediante los siguientes comandos:

Temperatura Ambiente

```
>>n7=tf(n4s3)
>>n7=n7(1,1)
>>n7=d2c(n7,'zoh')
```

La ecuación obtenida de la identificación de la perturbación temperatura ambiente para el enfriador evaporativo es la siguiente:

```
>> n7
```

Transfer function from input "u1" to output "y1":

$$\frac{-3.357e-006}{s + 1.554e-015}$$

Humedad Relativa

```
>>n8=tf(n4s2)
>>n8=n8(1,1)
>>n8=d2c(n8,'zoh')
```

La ecuación obtenida de la identificación de la perturbación humedad relativa para el enfriador evaporativo es la siguiente:

```
>> n8
```

Transfer function from input "u1" to output "y1":

$$\frac{-7.632e-005}{s - 4.219e-015}$$

Como se puede apreciar es un sistema de primer orden.

4.5 SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN SIMULINK

Una vez identificado el sistema, diseñado su controlador e identificados los modelos de las perturbaciones, se procede a realizar la simulación en la toolbox de Matlab Simulink.

A continuación se resumen las funciones de transferencia halladas del sistema, controlador y perturbaciones:

Planta:

$$\frac{-3.357e-006}{s + 1.554e-015}$$

Controlador PID:

$$\frac{0.3 (s-120) (s+100)}{(s^2 + 0.6s + 0.13)}$$

Perturbación Humedad:

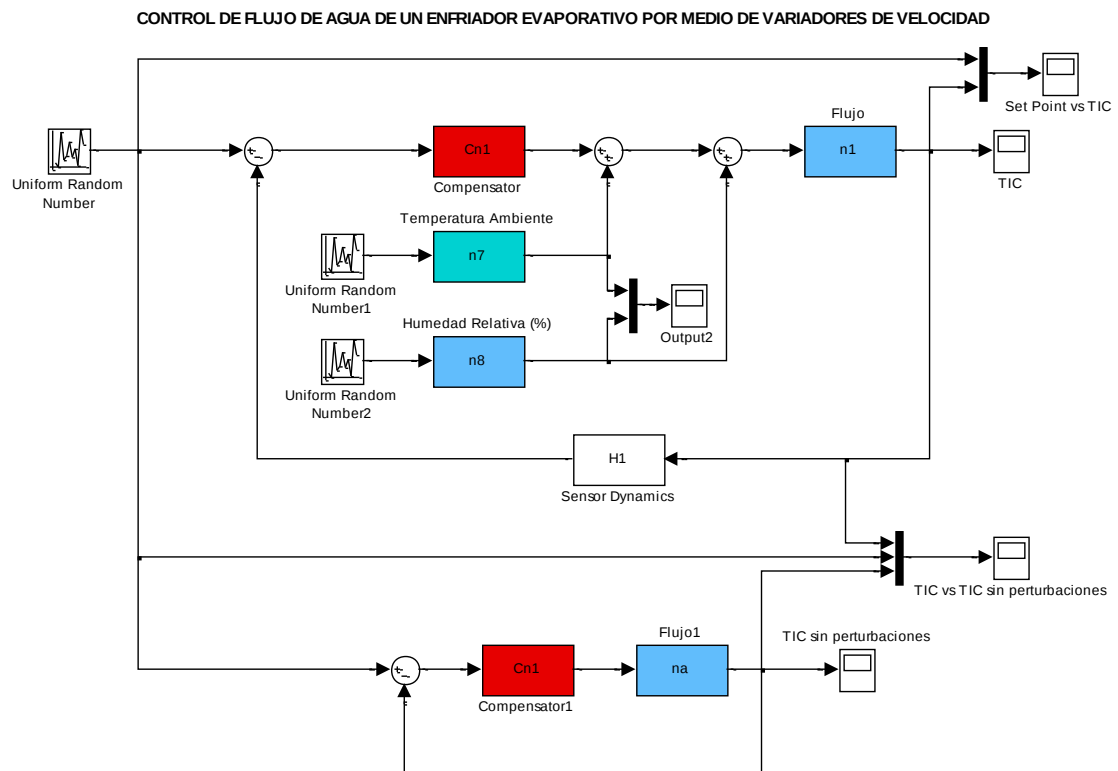
$$-7.632e-005$$

$$s - 4.219e-015$$

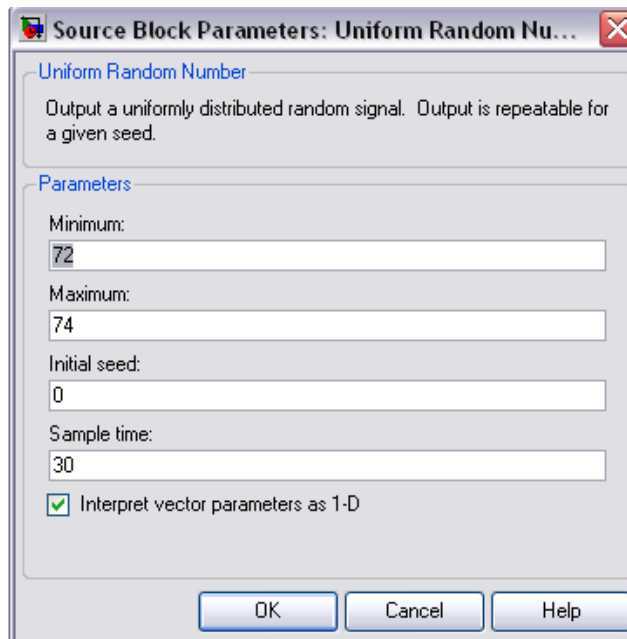
Perturbación Temperatura:

$$-3.357e-006$$

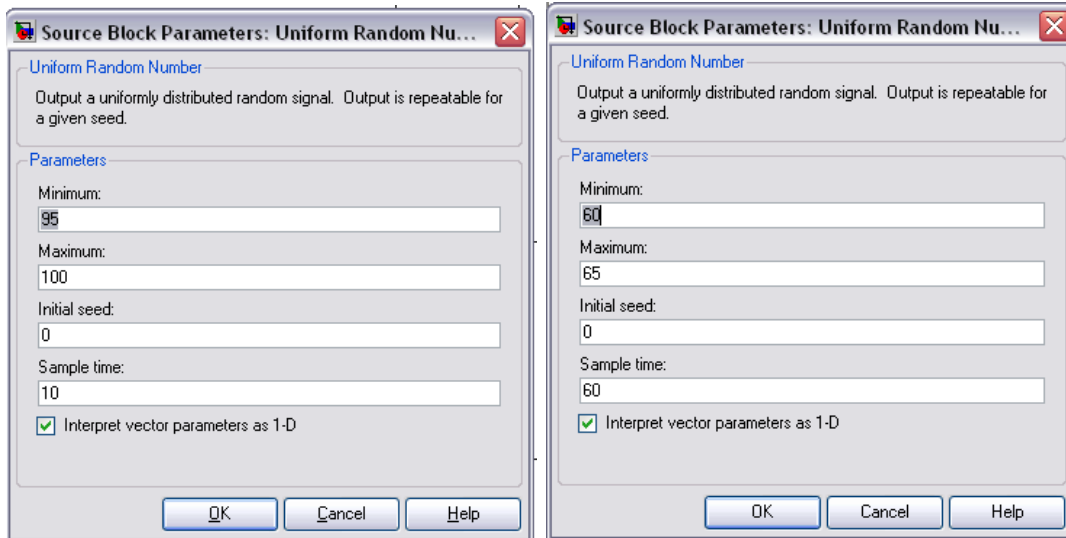
$$s + 1.554e-015$$



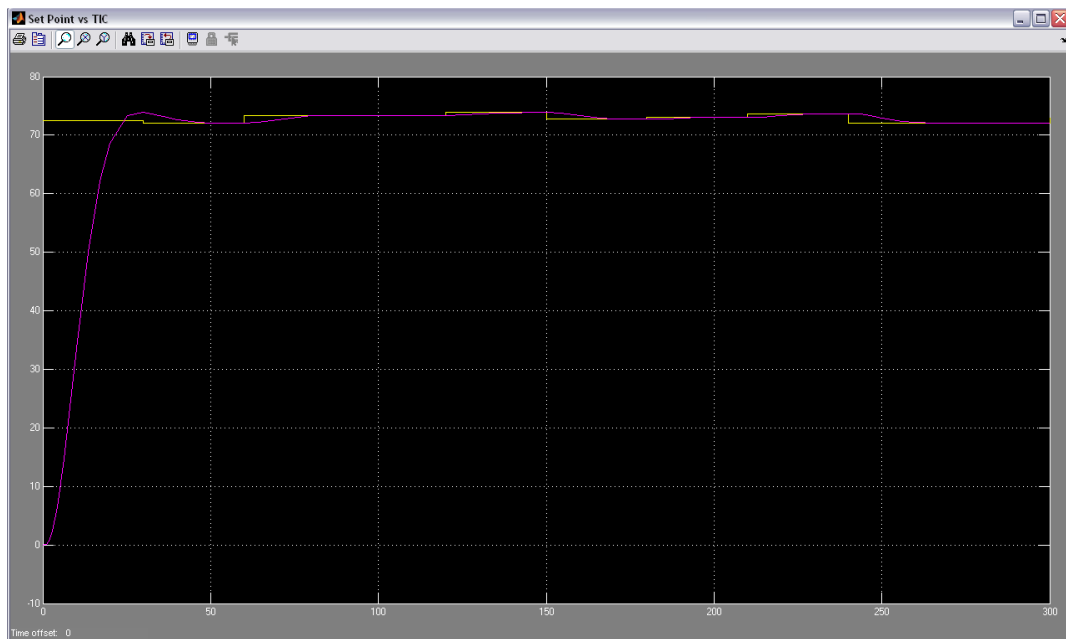
Realizamos una simulación de temperatura de entrada al compresor variando cada 30 segundos entre 72 y 74 °F.



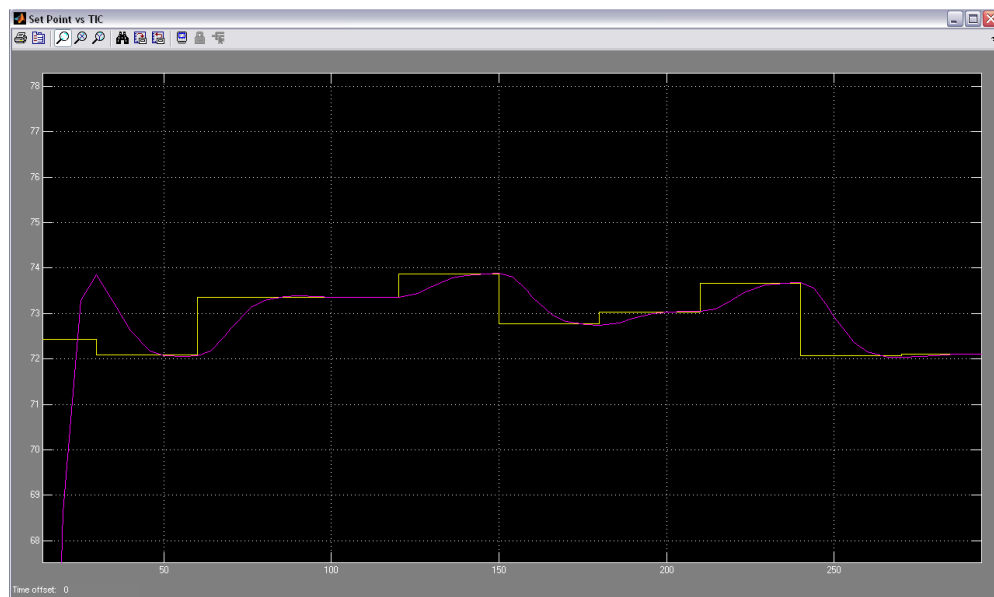
La temperatura ambiente variando cada 30 segundos entre 95 y 100 °F y La humedad relativa variando cada 60 segundos entre 60 y 65 %.



La respuesta del sistema es la siguiente:



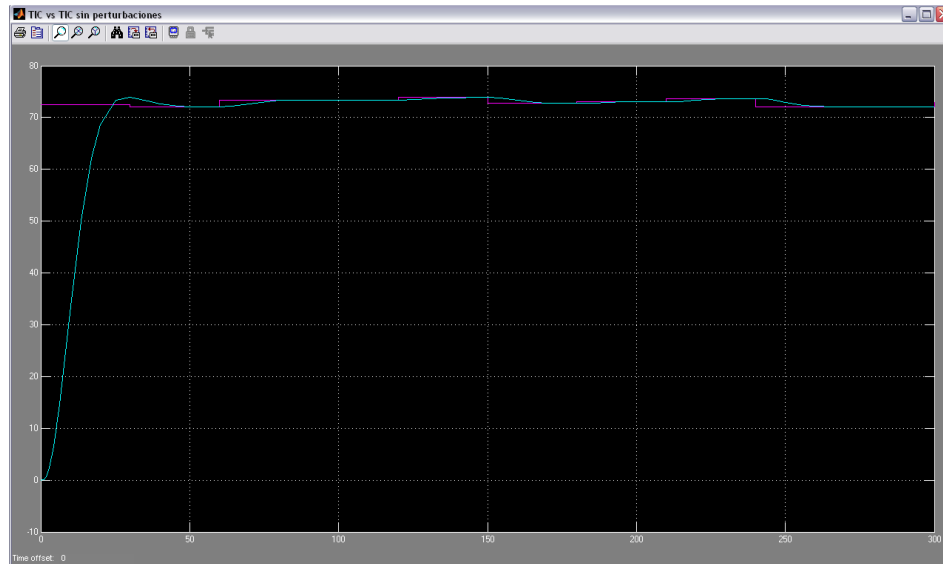
Se realiza zoom a la parte de control que nos interesa,



Apreciamos que el sistema responde adecuadamente a los cambios de temperatura que se están provocando aguas abajo del enfriador evaporativo. De esta manera se realiza el control del flujo de agua ya que al variar esta

temperatura se está realizando directamente el control de velocidad de las bombas centrífugas.

Las perturbaciones del sistema no provocan variaciones significativas al sistema modelado. Esto lo podemos apreciar en una grafica en donde comparamos los dos sistemas idénticos uno con perturbaciones y el otro sin él. La respuesta del sistema sin perturbaciones es la siguiente:



4.6 MODELO DE ESPACIO DE ESTADOS

Son representaciones comunes de los sistemas dinámicos. Describen el mismo tipo de relación lineal entre las entradas y las salidas como en los modelos anteriores, pero adecuadas de tal forma que sólo usan un retraso, es decir ecuaciones en diferencias de primer orden. En estos modelos se utilizan variables de estados que son obtenidos a partir de los datos de entrada-salida resultantes del experimento.

La representación de los modelos en espacio de estados resulta:

$$\begin{aligned}x(t+Ts) &= A x(t) + B u(t) + K e(t) \\ y(t) &= C x(t) + D u(t) + e(t)\end{aligned}$$

Donde $x(t)$ es el vector de variables de estado. El orden del modelo se corresponde con la dimensión de este vector.

4.7 AJUSTE DE PARÁMETROS EN EL VARIADOR DE VELOCIDAD

Los parámetros equivalentes en un controlador industrial son:

- $K_p = 100/BP$
- $K_i = 1/T_i$
- $K_d = T_d$

<u>Proporcional: P</u> $G_c(s) = K_p$	<u>Integrador: I</u> $G_c(s) = \frac{K_I}{s}$	<u>Diferenciador: D</u> $G_c(s) = K_D s$
<u>Proporcional Integrador: PI</u> $G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s}$	<u>Proporcional Diferenciador: PD</u> $G_c(s) = K_p + K_D s$	<u>Proporcional Integrador Diferenciador: PID</u> $G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$

Se tiene el compensador PID, para este caso es el siguiente:

$$\frac{0.3 (s-120) (s+100)}{(s^2 + 0.6s + 0.13)}$$

4.8 VARIADOR DE VELOCIDAD PARA MOTORES ASINCRONOS

Debido a que el flujo de agua hacia el enfriador evaporativo es enviado por bombas centrífugas, estas cumplen con las leyes de afinidad la cual dice que la velocidad de la bomba es proporcional al flujo en su descarga. De esta manera al realizar la variación de frecuencia en el motor, se variara proporcionalmente el flujo de agua hacia el enfriador evaporativo. Ver figura 18.

Se selecciona como operador del control diseñado, el variador de velocidad Altivar 71 de la línea de Telemecanique, utilizado en diferentes aplicaciones de la industria entre las cuales se encuentra la de la gestión de fluidos. A su vez éste trae incorporado un regulador PID fácil de configurar, lo cual nos facilita la operación del proceso, otro factor importante es que con el uso del

variador suprimimos la utilización de válvulas para la regulación del flujo de agua y por ende el uso de tuberías y accesorios y señales neumáticas. Por otro lado obtenemos ahorro de energía (ver figura 18) y aumentamos la vida útil de las bombas gracias al arranque y frenado suave que este variador proporciona.

El control de velocidad se hará mediante el ingreso de las constantes derivativas, integral y proporcional. Mediante el cálculo de las constantes por medio de la ecuación hallada del controlador.

Partiendo de la ecuación siguiente se tiene:

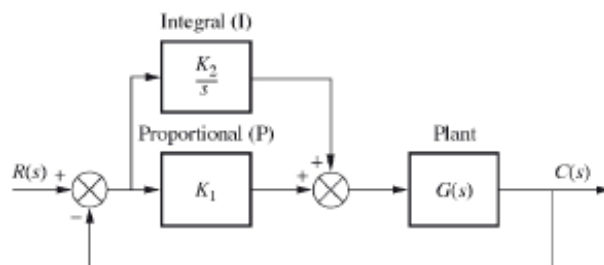
$$C = Kp + \frac{Ki}{s} + Kds$$

Por lo tanto tenemos:

$$C = \frac{Kd \left(s^2 + \frac{Kp}{Kd}s + \frac{Ki}{Kd} \right)}{s}$$

Entonces los parámetros equivalentes en el controlador industrial son:

- $K_p = 100/BP$
- $K_i = 1/T_i$
- $K_d = T_d$



Una vez obtenidas las constantes (BP, Ti, Td), se proceden a ingresarlas al controlador del variador de velocidad Altivar (ver anexos), de esta manera se realizará el control sobre la velocidad de las bombas y por ende del flujo de agua de acuerdo a las leyes de afinidad de las bombas centrifugas.

Figura 22. Variador de Velocidad Altivar



Fuente: Telemecanique

5. CONCLUSIONES

Es necesario realizar un análisis del proceso como tal antes de establecer los parámetros en el controlador y como estos lo afectarían.

Se deben tener en cuenta los fenómenos físicos de cada sistema ya que estos involucran una serie de factores que influyen en el controlador a escoger. Ejemplo. Inercia térmica.

Para concluir de manera satisfactoria la realización del proyecto fue necesario establecer correctamente cuáles eran las entradas del sistema y sus perturbaciones.

La identificación del sistema mediante la herramienta de matlab se hace necesaria cuando los sistemas a identificar son grandes y complejos los cuales hacen que matemáticamente sea muy engorroso o casi imposible realizarlos. Para realizar esto se utilizaron mediciones históricas del comportamiento de ciertas variables.

Fue necesario establecer cuál era la mejor opción de control, en este caso se eligió un variador de velocidad en comparación con una válvula de control por costos y tiempo de instalación.

El control de flujo de agua se realiza mediante el control de la velocidad del variador, estableciendo así en este un flujo de agua correspondiente a la temperatura deseada en el sistema.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. http://itmpwr.com/equipment_siemensw5.htm
2. Mecánica de Fluidos, Irving H. Shames. Mc Graw Hill. Tercera Edición.
3. Ingeniería de control moderna, Katsuhiko Ogata, Pearson Prentice Hill. Tercera Edición.

ANEXO A.

CARACTERISTICAS TECNICAS DEL VARIADOR DE VELOCIDAD ALTIVAR 71 TELEMECANIQUE

ALTIVAR 71 TELEMECANIQUE



DESCRIPCION

200... 240 V monofásico

200... 240 V/380... 690 V trifásico, 50/60 Hz

- Regulación de velocidad mediante control vectorial de flujo, con o sin sensor
- Rango de velocidad: de 1 a 1.000 en modo de bucle cerrado con retroalimentación de codificador, de 1 a 100 en modo de bucle abierto
- Terminal gráfico: texto sencillo, botón de navegación, teclas de función configurables, menú "Simply Start", etc.
- Protección del motor y del variador
- "Power Removal", funciones de seguridad ATEX
- Más de 150 funciones disponibles: Regulador de PID, control de frenos adecuado para viajar, izamiento y movimientos de rotación, etc.
- Filtro EMC clase A integrado
- Modbus y CANopen integrados
- Tarjetas de extensión de E/S, tarjetas de interfaz para el codificador
- Tarjetas de comunicación: Fipio, Ethernet, Modbus Plus, Profibus DP, DeviceNet, Uni-Telway, INTERBUS
- Tarjeta programable Controller Inside

APLICACIONES

Aplicaciones de alto rendimiento (torque constante):

- Manejo de materiales
- Izado
- Máquinas para madera
- Máquinas para procesos
- Máquinas textiles
- Embalaje

CARACTERISTICAS TECNICAS

Características

Variadores de velocidad

Altivar 71

Características de entorno

Conformidad con las normas		Los variadores Altivar 71 se han desarrollado respetando los niveles más severos de las normas internacionales y las recomendaciones relativas a los equipos eléctricos de control industrial (IEC, EN), de las cuales: baja tensión, IEC/EN 61800-5-1, IEC/EN 61800-3 (inmunidad y emisión CEM conducidas y radiadas)	
Inmunidad CEM		IEC/EN 61800-3, entornos 1 y 2 IEC/EN 61000-4-2 nivel 3; IEC/EN 61000-4-3 nivel 3 IEC/EN 61000-4-4 nivel 4; IEC/EN 61000-4-5 nivel 3 IEC/EN 61000-4-6 nivel 3; IEC/EN 61000-4-11 (1)	
CEM emisiones conducidas y radiadas para variadores	ATV 71H037M3...HU22M3 ATV 71H075N4...HU40N4 ATV 71P075N4Z...PU40N4Z	IEC/EN 61800-3, entornos 1 y 2, categorías C1, C2, C3 EN 55011 clase A grupo 1, IEC/EN 61800-3 categoría C2 Con filtro CEM adicional (2): ● EN 55011 clase B grupo 1, IEC/EN 61800-3 categoría C1	
	ATV 71HU30M3...HU75M3 ATV 71HU55N4...HC50N4 ATV 71PU55N4Z...PU75N4Z	EN 55011 clase A grupo 2, IEC/EN 61800-3 categoría C3 Con filtro CEM adicional (2): ● EN 55011 clase A grupo 1, IEC/EN 61800-3 categoría C2 ● EN 55011 clase B grupo 1, IEC/EN 61800-3 categoría C1	
	ATV 71H...M3X	Con filtro CEM adicional (2): ● EN 55011 clase A grupo 1, IEC/EN 61800-3 categoría C2 ● EN 55011 clase B grupo 1, IEC/EN 61800-3 categoría C1	
	ATV 71H...Y	EN 55011 clase A grupo 2, IEC/EN 61800-3 categoría C3	
	ATV 71W075N4...WU40N4	EN 55011 clase A grupo 1, IEC/EN 61800-3 categoría C2	
	ATV 71WU55N4...WD75N4	EN 55011 clase A grupo 2, IEC/EN 61800-3 categoría C3 Con filtro CEM adicional (2): EN 55011 clase A grupo 1, IEC/EN 61800-3 categoría C2	
Marcado CE		Los variadores están marcados CE en virtud de las directivas europeas de baja tensión (2006/95/CE) y CEM (2004/108/CE)	
Homologaciones	ATV 71H...M3 ATV 71HD11M3X...HD45M3X ATV 71HD55M3XD, HD75M3XD ATV 71H075N4...HD75N4 ATV 71HD90N4D...HC50N4D ATV 71H...Y	UL, CSA, C-Tick, NOM 117 y GOST DNV con el kit dedicado, ver págs. 29 y 30	
	ATV 71W...N4	UL, CSA, C-Tick, NOM 117 y GOST	
	ATV 71P...N4Z	UL, CSA, C-Tick, NOM 117	
Contaminación ambiental máx. Definición de los aislamientos	ATV 71H...M3 ATV 71HD11M3X, HD15M3X ATV 71H075N4...HD18N4 ATV 71P...N4Z	Grado 2 según IEC/EN 61800-5-1	
	ATV 71HD18M3X...HD75M3X ATV 71HD22N4...HC50N4 ATV 71H...Y ATV 71W...N4	G 2 según IEC/EN 61800-5-1 Grado 3 en virtud de la marca UL según UL840	clasificación VW3 A9 4
Grado de protección		IEC/EN 61800-5-1, IEC/EN 60529	
	ATV 71H...M3 ATV 71HD11M3X...HD45M3X ATV 71H075N4...HD75N4 ATV 71HU22Y...HD90Y	IP21 e IP41 en la parte superior IP20 sin el obturador de la parte superior de la carcasa IP54 en la parte inferior (radiador) IP21 con el accesorio VW3 A9 1, UL tipo 1 con el accesorio VW3 A9 2, ver págs. 33 y 34	onales
	ATV 71HD55M3X, HD75M3X ATV 71HD90N4...HC50N4 ATV 71HC11Y...HC63Y	IP00, IP41 en la parte superior e IP30 en la parte frontal y en los laterales. IP54 en la parte inferior (radiador) IP31 con el accesorio VW3 A9 1, UL tipo 1 con el accesorio VW3 A9 2, ver págs. 33 y 34	onales
	ATV 71W...N4	UL tipo 12/IP54	
Resistencia a las vibraciones	ATV 71H...M3 ATV 71HD11M3X...HD45M3X ATV 71HU22Y...HD90Y ATV 71H075N4...HD75N4 ATV 71W...N4 ATV 71P...N4Z	1,5 mm cresta a cresta de 3...13 Hz, 1 g de 13...200 Hz, según IEC/EN 60068-2-6	
	ATV 71HD55M3X, HD75M3X ATV 71HD90N4...HC50N4 ATV 71HC11Y...HC63Y	1,5 mm cresta a cresta de 3...10 Hz, 0,6 g de 10...200 Hz, según IEC/EN 60068-2-6	

Características (continuación)

Variadores de velocidad Altivar 71

Características de accionamiento

Rango de frecuencia de salida	ATV 71H●●●M3 ATV 71HD11M3X...HD37M3X ATV 71H075N4...HD37N4 ATV 71W075N4...WD37N4 ATV 71P●●●N4Z	Hz	0...1.600
	ATV 71HD45M3X...HD75M3X ATV 71HD45N4...HC50N4 ATV 71H●●●Y ATV 71WD45N4...WD75N4	Hz	0...500
Frecuencia de corte configurable	ATV 71H●●●M3 ATV 71HD11M3X, HD15M3X ATV 71H075N4...HD30N4 ATV 71W075N4...WD30N4 ATV 71P075N4Z...PD11N4Z	kHz	Frecuencia de corte nominal: 4 kHz sin desclasificación en régimen permanente Ajustable en funcionamiento de 1...16 kHz Superados los 4 kHz, ver las curvas de desclasificación en págs. 251 y 265
	ATV 71HD18M3X, HD45M3X ATV 71HD37N4...HD75N4 ATV 71WD37N4...WD75N4	kHz	Frecuencia de corte nominal: 2,5 kHz sin desclasificación en régimen permanente Ajustable en funcionamiento de 1...16 kHz Superados los 2,5 kHz, ver las curvas de desclasificación en págs. 251 y 265
	ATV 71HD55M3X, HD75M3X ATV 71HD90N4...HC50N4	kHz	Frecuencia de corte nominal: 2,5 kHz sin desclasificación en régimen permanente Ajustable en funcionamiento de 2,5...8 kHz Superados los 2,5 kHz, ver las curvas de desclasificación en págs. 254 a 256
	ATV 71HU22Y...HD30Y	kHz	Frecuencia de corte nominal: 4 kHz sin desclasificación en régimen permanente Ajustable en funcionamiento de 2,5...6 kHz Superados los 4 kHz, ver las curvas de desclasificación en pág. 252
	ATV 71HD37Y...HC63Y	kHz	Frecuencia de corte nominal: 2,5 kHz sin desclasificación en régimen permanente Ajustable en funcionamiento de 2,5...4,9 kHz Superados los 2,5 kHz, ver las curvas de desclasificación en págs. 252 y 258
Rango de velocidad	ATV 71H●●●M3 ATV 71H●●●M3X ATV 71●●●●N4 ATV 71H●●●Y ATV 71P●●●N4Z		Motor asíncrono: ● 1...1.000 en lazo cerrado con retomo mediante codificador ● 1...100 en lazo abierto sin retomo de velocidad Motor síncrono: ● 1...50 en lazo abierto sin retomo de velocidad
	ATV 71H●●●M3383 ATV 71H●●●M3X383 ATV 71H●●●N4383		Motor asíncrono: ● 1...1.000 en lazo cerrado con retomo mediante codificador ● 1...100 en lazo abierto sin retomo de velocidad Motor síncrono: ● 1...1.000 en lazo cerrado con retomo mediante codificador ● 1...50 en lazo abierto sin retomo de velocidad
Precisión de velocidad	Para una variación de par de 0,2 Cn a Cn		±0,01% de la velocidad nominal, en lazo cerrado con retomo mediante codificador ±10% del deslizamiento nominal, sin retomo velocidad
Precisión de par			±5% en lazo cerrado con retomo mediante codificador ±15% lazo abierto sin retomo de velocidad
Sobrepasar transitorio			170% del par nominal motor (valor típico a ±10%) durante 60 s 220% del par nominal motor (valor típico a ±10%) durante 2 s
Par de frenado			30% del par nominal motor sin resistencia de frenado (valor típico) Hasta 150% con resistencia de frenado o de elevación opcional, ver págs. 137 y 139
Corriente transitoria máxima			150% de la corriente nominal del variador durante 60 s (valor típico) 165% de la corriente nominal del variador durante 2 s (valor típico)
Par permanente en 0 Hz	ATV 71H037M3...HD45M3X ATV 71H075N4...HD75N4 ATV 71HU22Y...HD90Y ATV 71W●●●N4 ATV 71P●●●N4Z		El variador Altivar 71 puede proporcionar de forma permanente el valor de cresta de la corriente nominal del variador
	ATV 71HD55M3X, HD75M3X ATV 71HD90N4...HC50N4 ATV 71HC11Y...HC63Y		El variador Altivar 71 puede proporcionar de forma permanente el 80% del valor de la cresta de la corriente nominal del variador
Ley de mando motor	ATV 71H●●●M3 ATV 71H●●●M3X ATV 71●●●●N4 ATV 71H●●●Y ATV 71P●●●N4Z		Motor asíncrono: ● Control vectorial de flujo (CVF) con sensor (vector de corriente) ● Control vectorial de flujo (CVF) sin sensor (vector de tensión o corriente) ● Ley tensión/frecuencia (2 o 5 puntos) ● Sistema ENA (Energy Adaptation System) para las cargas de equilibrado Motor síncrono: ● Control vectorial sin retomo de velocidad
	ATV 71H●●●M3383 ATV 71H●●●M3X383 ATV 71H●●●N4383		Motor asíncrono: ● Control vectorial de flujo (CVF) con sensor (vector de corriente) ● Control vectorial de flujo (CVF) sin sensor (vector de tensión o corriente) ● Ley tensión/frecuencia (2 o 5 puntos) ● Sistema ENA (Energy Adaptation System) para las cargas de equilibrado Motor síncrono: ● Control vectorial con retomo de velocidad ● Control vectorial sin retomo de velocidad (sólo casos específicos)
Lazo de frecuencia			Regulador PI con estructura ajustable para una respuesta de velocidad adaptada a la máquina (precisión, rapidez)
Compensación de deslizamiento			Automática con cualquier carga. Posibilidad de eliminación o ajuste No disponible en ley tensión/frecuencia

Características (continuación)

Variadores de velocidad Altivar 71

Características eléctricas de potencia

Alimentación	Tensión	V	200 – 15%...240 + 10% monofásica para ATV 71H075M3...HU75M3 200 – 15%...240 + 10% trifásica para ATV 71H...M3 y ATV 71H...M3X 380 – 15%...480 + 10% trifásica para ATV 71...N4 y ATV 71P...N4Z 500 – 15%...690 + 10% trifásica para ATV 71H...Y
	Frecuencia	Hz	50 – 5%...60 + 5%
Señalización			1 indicador rojo: encendido, indica la presencia de tensión del variador
Tensión de salida			Tensión trifásica máxima igual a la tensión de la red de alimentación
Nivel de ruido del variador			Según la directiva 86-188/CEE
ATV 71H037M3...HU15M3 ATV 71H075N4...HU22N4 ATV 71W075N4...WU22N4		dBA	43
ATV 71HU22M3...HU40M3 ATV 71HU30N4, HU40N4 ATV 71WU30N4, WU40N4		dBA	54,5
ATV 71HU55M3 ATV 71HU55N4, HU75N4 ATV 71WU55N4, WU75N4		dBA	55,6
ATV 71HU75M3 ATV 71HD11N4 ATV 71WD11N4		dBA	57,4
ATV 71HD11M3X, HD15M3X ATV 71HD15N4, HD18N4 ATV 71WD15N4, WD18N4		dBA	60,2
ATV 71HD18M3X, HD22M3X ATV 71HD22N4 ATV 71HU22Y...HD30Y ATV 71WD22N4		dBA	59,9
ATV 71HD30M3X...HD45M3X, ATV 71HD30N4, HD37N4 ATV 71WD30N4, WD37N4		dBA	64
ATV 71HD45N4...HD75N4 ATV 71HD37Y...HD90Y ATV 71WD45N4...WD75N4		dBA	63,7
ATV 71HD55M3X ATV 71HD90N4		dBA	60,5
ATV 71HD75M3X ATV 71HC11N4		dBA	69,5
ATV 71HC13N4, HC16N4		dBA	66
ATV 71HC20N4...HC50N4 ATV 71HC11Y...HC63Y		dBA	77
ATV 71P075N4Z...PU22N4Z		dBA	0 Con kit de ventilación: 43
ATV 71PU30N4Z, PU40N4Z		dBA	0 Con kit de ventilación: 54,5
ATV 71PU55N4Z, PU75N4		dBA	0 Con kit de ventilación: 55,6
ATV 71PD11N4Z		dBA	0 Con kit de ventilación: 57,4
Aislamiento galvánico			Entre potencia y control (entradas, salidas, fuentes)

Características (continuación)

Variadores de velocidad Altivar 71

Características de los cables de conexión

Tipo de cable para	Montaje en armario	Cable IEC unifilar, temperatura ambiente 45 °C, cobre 90 °C XLPE/EPR o cobre 70 °C PVC
	Montaje en armario con kit IP21 o IP31	Cable IEC 3 hilos, temperatura ambiente 40 °C, cobre 70 °C PVC
	Montaje en armario con kit NEMA tipo 1	Cable UL 508 3 hilos excepto para inductancia de cable UL 508 2 hilos, temperatura ambiente 40 °C, cobre 75 °C PVC

Características de conexión (bornas de alimentación, motor, bus continuo y resistencia de frenado)

Bornas del variador		L1/R, L2/S, L3/T, U/T1, V/T2, W/T3	PC/–, PO (1), PA/+	PA, PB
Capacidad de conexión máxima y par de apriete	ATV 71H037M3...HU40M3 ATV 71H075N4...HU40N4 ATV 71W075N4...WU40N4 ATV 71P075N4Z...PU40N4Z	4 mm², AWG 10 1,4 Nm, 12,3 lb.in		
	ATV 71HU55M3 ATV 71HU55N4, HU75N4 ATV 71WU55N4, WU75N4 ATV 71PU55N4Z, PU75N4Z	6 mm², AWG 8 3 Nm, 26,5 lb.in		
	ATV 71HU75M3 ATV 71HD11N4 ATV 71WD11N4 ATV 71PD11N4Z	16 mm², AWG 4 3 Nm, 26,5 lb.in		
	ATV 71HD11M3X, HD15M3X ATV 71HD15N4, HD18N4 ATV 71WD15N4, WD18N4	35 mm², AWG 2 5,4 Nm, 47,7 lb.in		
	ATV 71HD18M3X, HD22M3X ATV 71HD22N4...HD37N4 ATV 71HU22Y...HD30Y ATV 71WD22N4...WD37N4	50 mm², AWG 1/0 12 Nm, 102,2 lb.in		
	ATV 71HD30M3X...HD45M3X ATV 71HD45N4...HD75N4 ATV 71HD37Y...HD90Y ATV 71WD45N4...WD75N4	150 mm², 300 kcmil 41 Nm, 360 lb.in		
	ATV 71HD55M3X ATV 71HD90N4	2 × 100 mm², 2 × 250 kcmil M10, 24 Nm, 212 lb.in	2 × 100 mm², 2 × 250 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	60 mm², 250 kcmil M8, 12 Nm, 106 lb.in
	ATV 71HD75M3X, HC11N4	2 × 100 mm², 2 × 250 kcmil M10, 24 Nm, 212 lb.in	2 × 150 mm², 2 × 250 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	60 mm², 250 kcmil M8, 12 Nm, 106 lb.in
	ATV 71HC13N4 ATV 71HC11Y...HC16Y	2 × 120 mm², 2 × 250 kcmil M10, 24 Nm, 212 lb.in	2 × 120 mm², 2 × 250 kcmil M10, 24 Nm, 212 lb.in	120 mm², 250 kcmil M10, 24 Nm, 212 lb.in
	ATV 71HC16N4	2 × 150 mm², 2 × 350 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	2 × 150 mm², 2 × 350 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	120 mm², 250 kcmil M10, 24 Nm, 212 lb.in
	ATV 71HC20N4...HC28N4 ATV 71HC20Y...HC31Y	4 × 185 mm², 3 × 350 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	4 × 185 mm², 3 × 350 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	–
	ATV 71HC31N4	4 × 185 mm², 4 × 500 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	8 × 185 mm², 4 × 500 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	–
	ATV 71HC40N4	R/L1.1, S/L2.1, T/L3.1, R/L1.2, S/L2.2, T/L3.2 2 × 2 × 185 mm², 2 × 2 × 500 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	8 × 185 mm², 4 × 500 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	–
		U/T1, V/T2, W/T3 4 × 185 mm², 4 × 500 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in		
	ATV 71HC50N4 ATV 71HC40Y...HC63Y	R/L1.1, S/L2.1, T/L3.1, R/L1.2, S/L2.2, T/L3.2 2 × 4 × 185 mm², 2 × 3 × 500 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	8 × 185 mm², 5 × 500 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in	–
		U/T1, V/T2, W/T3 6 × 185 mm², 5 × 500 kcmil M12, 41 Nm, 360 lb.in		

Características (continuación)

Variadores de velocidad Altivar 71

Características eléctricas de control

Fuentes internas disponibles		Protegidas contra los cortocircuitos y las sobrecargas: ● 1 fuente $\pm 10,5 \text{ V} \pm 5\%$ para el potenciómetro de consigna (de 1 a 10 k Ω), intensidad máxima 10 mA ● 1 fuente $\pm 24 \text{ V}$ (mín. 21 V, máx. 27 V), intensidad máxima 200 mA
Alimentación +24 V externa (1) (no suministrada)		$\pm 24 \text{ V}$ (mín. 19 V, máx. 30 V) Potencia 30 W
Entradas analógicas	AI1-/AI1+	1 entrada analógica diferencial bipolar $\pm 10 \text{ V}$ (tensión máxima de no destrucción 24 V) Tiempo máximo de muestreo: 2 ms $\pm 0,5$ ms Resolución: 11 bits + 1 bit de signo Precisión: $\pm 0,6\%$ para una variación de temperatura de 60 °C Linealidad: $\pm 0,15\%$ del valor máximo
	AI2	1 entrada analógica configurable a través de software en tensión o en corriente: ● Entrada analógica en tensión $\pm 0 \dots 10 \text{ V}$, impedancia 30 k Ω (tensión máxima de no destrucción 24 V) ● Entrada analógica en corriente X-Y mA programando X e Y de 0 a 20 mA, con impedancia 242 Ω Tiempo máximo de muestreo: 2 ms $\pm 0,5$ ms Resolución: 11 bits Precisión: $\pm 0,6\%$ para una variación de temperatura de 60 °C Linealidad: $\pm 0,15\%$ del valor máximo
	Otras entradas	Ver tarjetas opcionales
Salidas analógicas	AO1	1 salida analógica configurable a través de software en tensión o en corriente o en salida lógica: ● Salida analógica en tensión $\pm 0 \dots 10 \text{ V}$, impedancia de carga mín. 470 Ω ● Salida analógica en corriente X-Y mA programando X e Y de 0 a 20 mA, impedancia de carga máx. 500 Ω Tiempo máximo de muestreo: 2 ms $\pm 0,5$ ms Resolución: 10 bits Precisión: $\pm 1\%$ para una variación de temperatura de 60 °C Linealidad: $\pm 0,2\%$ ● Salida lógica: 10 V, 20 mA máx.
	Otras salidas	Ver tarjetas opcionales
Salidas de relé configurables	R1A, R1B, R1C	1 salida lógica de relé, un contacto "NC" y un contacto "NA" con punto común Poder de conmutación mínima: 3 mA para $\pm 24 \text{ V}$ Poder de conmutación máxima: ● En carga resistiva ($\cos \varphi = 1$): 5 A para $\sim 250 \text{ V}$ o $\pm 30 \text{ V}$ ● En carga inductiva ($\cos \varphi = 0,4$ y $L/R = 7 \text{ ms}$): 2 A para $\sim 250 \text{ V}$ o $\pm 30 \text{ V}$ Tiempo de respuesta máx.: 7 ms $\pm 0,5$ ms Duración de vida eléctrica: 100.000 maniobras
	R2A, R2B	1 salida lógica de relé, un contacto "NA" Poder de conmutación mínima: 3 mA para $\pm 24 \text{ V}$ Poder de conmutación máxima: ● En carga resistiva ($\cos \varphi = 1$): 5 A para $\sim 250 \text{ V}$ o $\pm 30 \text{ V}$ ● En carga inductiva ($\cos \varphi = 0,4$ y $L/R = 7 \text{ ms}$): 2 A para $\sim 250 \text{ V}$ o $\pm 30 \text{ V}$ Tiempo de respuesta máx.: 7 ms $\pm 0,5$ ms Duración de vida eléctrica: 100.000 maniobras
	Otras salidas	Ver tarjetas opcionales
Entradas lógicas LI	LI1...LI5	5 entradas lógicas $\pm 24 \text{ V}$ programables, compatibles con autómata de nivel 1, norma IEC/EN 61131-2 Impedancia: 3,5 k Ω Tensión máxima: 30 V Duración máxima de muestreo: 2 ms $\pm 0,5$ ms La multi-asignación permite combinar varias funciones en una misma entrada (ejemplo: LI1 asignada a marcha adelante y velocidad preseleccionada 2, LI3 asignada a marcha atrás y velocidad preseleccionada 3)
	LI6	1 entrada lógica configurable por conmutador en entrada lógica o en entrada para sondas PTC Entrada lógica, características idénticas a las entradas LI1...LI5 Entrada para 6 sondas PTC máx. montadas en serie: ● Valor nominal $< 1,5 \text{ k}\Omega$ ● Resistencia de disparo 3 k Ω , valor de reinicialización 1,8 k Ω ● Protección en cortocircuito $< 50 \Omega$ Esta entrada lógica jamás debe utilizarse para la protección de un motor ATEX de aplicaciones en atmósfera explosiva (2)
	Lógica positiva (fuente)	Estado 0 si $\leq 5 \text{ V}$ o entrada lógica no cableada, estado 1 si $\geq 11 \text{ V}$
	Lógica negativa (Sink)	Estado 0 si $\geq 16 \text{ V}$ o entrada lógica no cableada, estado 1 si $\leq 10 \text{ V}$
	Otras entradas	Ver tarjetas opcionales
Entrada de seguridad	PWR	1 entrada para la función de seguridad "Power Removal" y/o para la protección térmica del motor ATEX en las aplicaciones en atmósfera explosiva (2): ● Alimentación: $\pm 24 \text{ V}$ (máx. 30 V) ● Impedancia: 1,5 k Ω ● Estado 0 si $< 2 \text{ V}$, estado 1 si $> 17 \text{ V}$
Capacidad de conexión máxima y par de apriete de las entradas/salidas		2,5 mm ² (AWG 14) 0,6 Nm

Características (continuación)

Variadores de velocidad Altivar 71

Características eléctricas de control (continuación)

Rampas de aceleración y deceleración		Forma de las rampas: ● Lineales ajustables por separado de 0,01 a 9.999 s ● En S, en U o personalizadas Adaptación automática del tiempo de rampa de deceleración en caso de rebasamiento de las posibilidades de frenado, posibilidad de eliminar esta adaptación (uso de una resistencia de frenado)	
Frenado de parada		Por inyección de corriente continua: ● Mediante orden en una entrada lógica programable ● Automáticamente desde que la frecuencia de salida estimada es < 0,1 Hz, duración ajustable de 0 a 60 s o permanente, corriente ajustable de 0 a 1,2 In (en lazo abierto únicamente)	
Principales protecciones y seguridades del variador		Protección térmica: ● Contra los calentamientos excesivos ● De la etapa de potencia Protección contra: ● Los cortocircuitos entre las fases del motor ● Los cortes de fases de entrada ● Las sobreintensidades entre las fases de salida y la tierra ● Las sobretensiones en el bus continuo ● Un corte del circuito de control ● Un rebasamiento de la velocidad límite Seguridad: ● De sobretensión y subtensión de la red ● De ausencia de fase de red, en trifásica	
Protección del motor (ver pág. 296)		Protección térmica integrada en el variador mediante cálculo permanente de la I_t teniendo en cuenta la velocidad: ● Memorización del estado térmico del motor al desconectar el variador ● Función modificable a través de terminales de diálogo, en función de que el motor sea motoventilado o autoventilado Protección contra los cortes de fases del motor Protección con sondas PTC	
Resistencia dieléctrica	ATV 71H●●●M3 ATV 71H●●●M3X	Entre bornas de tierra y potencia: ∞ 2.830 V Entre bornas de control y potencia: ∞ 4.230 V	
	ATV 71●●●●N4 ATV 71P●●●N4Z	Entre bornas de tierra y potencia: ∞ 3.535 V Entre bornas de control y potencia: ∞ 5.092 V	
	ATV 71H●●●Y	Entre bornas de tierra y potencia: ∞ 3.110 V Entre bornas de control y potencia: ∞ 5.345 V	
Resistencia de aislamiento de tierra		> 1 MΩ (aislamiento galvánico) ∞ 500 V durante 1 minuto	
Resolución de frecuencia	Visualizadores	Hz	0,1
	Entradas analógicas	Hz	0,024/50 Hz (11 bits)

Características de seguridad funcional y aplicaciones ATEX (1)

Protección	De la máquina	Función de seguridad "Power Removal" (PWR) que fuerza la parada y/o impide el arranque imprevisto del motor, conforme a EN 60954-1 categoría 3 y al proyecto de norma IEC/EN 61800-5-2	
	Del proceso de sistema	Función de seguridad "Power Removal" (PWR) que fuerza la parada y/o impide el arranque imprevisto del motor, conforme a IEC/EN 61508 nivel SIL2 y al proyecto de norma IEC/EN 61800-5-2	
	Del motor ATEX (1)	La entrada de seguridad PWR de la función de seguridad "Power Removal" se conecta al dispositivo de conmutación que se integra en el detector térmico del motor ATEX (o conectada al dispositivo de conmutación del dispositivo de mando en el caso de utilización de sondas ATEX tipo PTC)	
Tiempo de respuesta		ms	≤ 100 en STO (Safe Torque Off), eliminación de par segura

Características (continuación)

Variadores de velocidad Altivar 71

Características de los puertos de comunicación

Protocolo Modbus

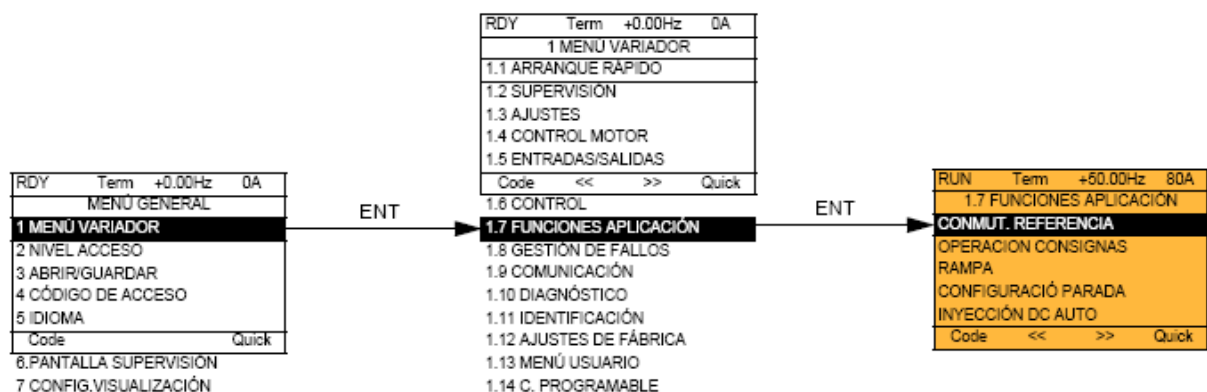
Tipo de conexión		Toma terminal Modbus RJ45	Toma de red Modbus RJ45
Estructura	Interface físico	RS 485 2 hilos	
	Modo de transmisión	RTU	
	Velocidad de transmisión	Configurable con el terminal o el software de programación PowerSuite: 9.600 bits/s o 19.200 bits/s	Configurable con el terminal o el software de programación PowerSuite: 4.800 bits/s, 9.600 bits/s, 19.200 bits/s o 38,4 kbit/s
	Formato	Fijo = 8 bits, paridad par, 1 stop	Configurable con el terminal o el software de programación PowerSuite: – 8 bits, paridad impar, 1 stop – 8 bits, paridad par, 1 stop – 8 bits, sin paridad, 1 stop – 8 bits, sin paridad, 2 stop
	Polarización	Sin impedancia de polarización Deben suministrarse por el sistema de cableado (por ejemplo, en el maestro)	
	Dirección	1 a 247, configurables con el terminal o el software de programación PowerSuite Se pueden configurar 3 direcciones que permiten acceder respectivamente a los datos del variador, de la tarjeta programable "Controller Inside" y de la tarjeta de comunicación Estas 3 direcciones son idénticas para las tomas de terminal y de red	
Servicios	Perfiles del aparato	2 perfiles: CiA402 ("Device Profile Drives and Motion Control") y Perfil I/O	
	Mensajería	Read Holding Registers (03) 63 palabras como máximo Write Single Register (06) Write Multiple Registers (16) 61 palabras como máximo Read/Write Multiple Registers (23) 63/59 palabras como máximo Read Device Identification (43) Diagnostics (08)	
	Supervisión de la comunicación	Posibilidad de detección. "Time out" ajustable de 0,1 s a 30 s	
Diagnóstico	Con LED en ATV 71H●●●M3Z, ATV 71HD11M3XZ, HD15M3XZ, ATV 71H075N4Z...HD75N4Z ATV 71P●●●N4Z	Un LED de actividad en el terminal de 7 segmentos integrado. Un LED para cada puerto	
	Por terminal gráfico	Un LED de actividad Palabra de control recibida Consigna recibida Para cada puerto: ● Número de tramas recibidas, ● Número de tramas erróneas.	

Protocolo CANopen

Estructura	Conector	Conector tipo SUB-D macho de 9 contactos en adaptador CANopen. Este último se conecta a la toma de red Modbus RJ45
	Gestión de red	Esclavo
	Velocidad de transmisión	20 kbit/s, 50 kbit/s, 125 kbit/s, 250 kbit/s, 500 kbit/s o 1 Mbit/s
	Dirección (Node ID)	1 a 127, configurables con el terminal o el software de programación PowerSuite.
	Número de PDO	3 en recepción y 3 en emisión (PDO1, PDO2 y PDO3)
Servicios	Modos de los PDO	Event-triggered, Time-triggered, Remotely-requested, Sync (cyclic), Sync (acyclic)
	Enlaces PDO	Sí
	Mapping PDO	Configurable (PDO1 y PDO2)
	Número de SDO	1 servidor
	Emergencia	Sí
	Nivel de aplicación CANopen	CiA DS 301, V 4.02
	Perfiles funcionales	2 perfiles: CiA402 ("Device Profile Drives and Motion Control") y Perfil I/O
	Supervisión de la comunicación	Node Guarding, Heartbeat
Diagnóstico	Por LED en ATV 71H●●●M3Z, ATV 71HD11M3XZ, HD15M3XZ, ATV 71H075N4Z...HD75N4Z ATV 71P●●●N4Z	2 LED: "RUN" y "ERROR" en el terminal de 7 segmentos integrado
	Por terminal gráfico y software de programación PowerSuite	2 LED: "RUN" y "ERROR" Palabra de control recibida Consigna recibida Visualización de los PDO recibidos Visualización de los PDO transmitidos Estado del gráfico NMT Contador de PDO recibidos Contador de PDO transmitidos Contador de errores de recepción Contador de errores de transmisión
Archivo de descripción		Un único archivo eds en el CD-ROM de la documentación o accesible en el sitio Internet "www.telemecanique.com" para toda la gama. Contiene la descripción de los parámetros del variador

FUNCIONES MENU VARIADOR DE VELOCIDAD (REGULADOR PID)

Cód.	Nombre
rEF-	[CONMUT. REFERENCIA]
DR I-	[OPERACION CONSIGNAS]
rPl-	[RAMPA]
Stt-	[CONFIGURACIÓ PARADA]
RdC-	[INYECCIÓN DC AUTO]
JOG-	[JOG]
PSs-	[VELOCIDAD. PRESELECC.]
UPd-	[+/- VELOCIDAD]
SrE-	[+/- VEL.ENTORNO A REF.]
SPn-	[MEMO. REFERENCIA]
FL I-	[MAGNETIZACIÓN POR LI]
LSt-	[FINALES DE CARRERA]
bLc-	[CONTROL DE FRENO]
ELn-	[MEDIDA DE LA CARGA]
HSH-	[ELEV. ALTA VELOCIDAD]
PId-	[REGULADOR PID]
Pr i-	[CONSIG.PID PRESELECC.]
tDr-	[CONTROL DE PAR]
tDL-	[LIMITACIÓN PAR]
CL I-	[SEGUNDA LIMIT.INTENS.]
LLC-	[CTRL CONTACT. LÍNEA]
DCC-	[CTRL CONTACT. MOTOR]
LPD-	[POSIC.POR CAPTADOR.]
nLP-	[CONMUT. JUEGO PARÁM.]
nnC-	[CONFIG.MULTIMOTOR]
tAL-	[AUTOAJUSTE POR LI]
tRD-	[GUIADO HILO]
rFt-	[RESCATE]
D Ir-	[CONEXIÓN REGEN.]



REGULADOR PID

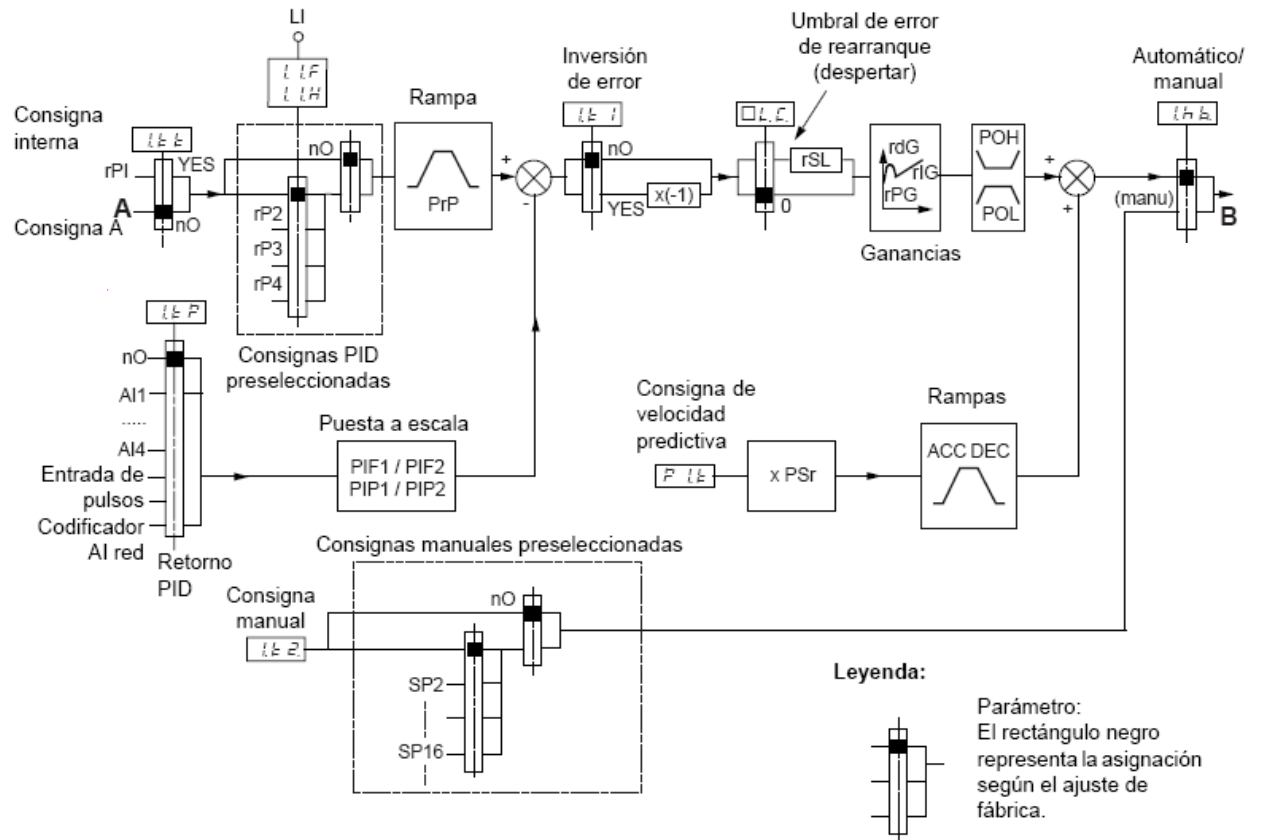
PUESTA EN SERVICIO DEL REGULADOR PID

1. CONFIGURACION EN MODO PID

Regulador PID

Sinóptico

La función se activa mediante la asignación de una entrada analógica al retorno PID (medida).



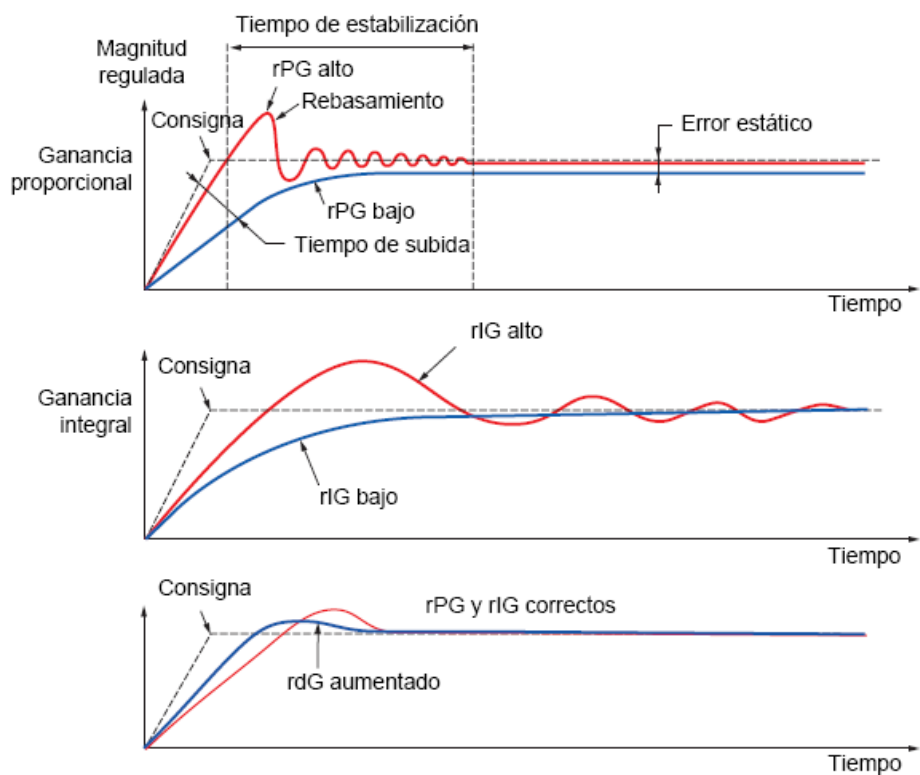
2. REALICE UNA PRUEBA CON LOS AJUSTES DE FÁBRICA

(recomendable en la mayoría de los casos). Para optimizar el proceso, ajuste rPG o rIG paso a paso e independientemente observando el efecto en el retorno PID con la consigna.

3. SI LOS AJUSTES DE FABRICA SON INESTABLES O SI LA CONSIGNA NO SE HA RESPETADO.

Realice una prueba con una consigna de velocidad en modo manual (sin regulador PID) y en carga para el rango de velocidad del sistema:

- En el régimen permanente, la velocidad debe ser estable y conforme a la consigna, y la señal de retorno PID también debe ser estable.
- En el régimen transitorio, la velocidad debe seguir la rampa y estabilizarse rápidamente, y el retorno PID debe seguir la velocidad. En caso contrario, consulte los ajustes del accionamiento y/o señal del captador y el cableado.
- Pase a modo PID.
- Definir brA en “no” (sin autoadaptación de rampa).
- Ajuste las rampas de velocidad(AC2,dE2) al mínimo autorizado para la mecánica y sin que se produzca el disparo por fallo ObF
- Ajuste la ganancia integral (rIG) al mínimo.
- Deje la ganancia Derivada (rdG) a 0.
- Observe el retorno PID y la consigna.
- Realice una serie de marcha y parada o de variación rápida de carga o de consigna.
- Ajuste la ganancia proporcional (rPG) de manera que encuentre el mejor equilibrio entre tiempo y respuesta y estabilidad en las fases transitorias (poco rebasamiento y de 1 a 2 oscilaciones antes de que se estabilice).
- Si la consigna no se sigue en el régimen permanente, aumente progresivamente la ganancia integral (rIG), reduzca la ganancia proporcional (rPG) en caso de inestabilidad (oscilaciones crecientes) y encuentre el equilibrio entre tiempo de respuesta y precisión estática.
- Por último, la ganancia derivada puede permitir disminuir el rebasamiento y mejorar el tiempo de respuesta; como contrapartida, significa un compromiso de estabilidad más difícil de obtener, ya que depende de las tres ganancias.
- Realice pruebas en producción con todo el rango de consigna.



La frecuencia de las oscilaciones depende de la cinemática del sistema.

Parámetro	Tiempo de subida	Rebasamiento	Tiempo de estabilización	Error estático
rPG ↗	↘↘	↗	=	↘
rIG ↗	↘	↗↗	↗	↘↘
rdG ↗	=	↘	↘	=

FUNCIONES PARA CONFIGURACION DEL REGULADOR PID DEL VARIADOR DE VELOCIDAD

Cód.	Nombre/descripción	Rango de ajuste	Ajuste de fábrica
P id -	■ [REGULADOR PID]  Nota: esta función no puede utilizarse con algunas funciones. Respete las precauciones indicadas en la página		
P I F n D R I 1 R I 2 R I 3 R I 4 P I R I U 1 P G	☐ [Retorno PID] ☐ [No] (nO) : sin asignar (función inactiva). En este caso, no es posible acceder a ninguno de los parámetros de la función. ☐ [AI1] (AI1) : entrada analógica ☐ [AI2] (AI2) : entrada analógica ☐ [AI3] (AI3) : entrada analógica, si hay instalada una tarjeta de ampliación ☐ [AI4] (AI4) : entrada analógica, si hay instalada una tarjeta de ampliación ☐ [RP] (PI) : entrada de pulsos, si hay instalada una tarjeta ☐ [AI red] (AIU1) : retorno a través del bus de comunicación ☐ [Codificador] (PG) : entrada de codificador, si hay instalada una tarjeta		[No] (nO)
R I C 1 n D M d b C A n n E t A P P	☐ [Canal AI red] Parámetro accesible si [Retorno PID] (PIF) = [AI red comunicación] (AIU1) . ☐ [No] (nO) : sin asignar ☐ [Modbus] (Mdb) : Modbus integrado ☐ [CANopen] (CAN) : CANopen integrado ☐ [Cons.carta comunicación] (nEt) : tarjeta de comunicación (si está instalada) ☐ [Carta programable] (APP) : tarjeta Controller Inside (si está instalada)		[No] (nO)
P I F 1 ()	☐ [Retorno mínimo PID] Valor del retorno mínimo. Rango de ajuste de 0 a [Retorno máximo PID] (PIF2) (2) .	(1)	100
P I F 2 ()	☐ [Ret. máximo PID] Valor del retorno máximo. Rango de ajuste de [Retorno mínimo PID] (PIF1) a 65.535 (2).	(1)	1.000
P I P 1 ()	☐ [Ref. mínima PID] Valor mínimo del proceso. Rango de ajuste de [Retorno mínimo PID] (PIF1) a [Referencia máxima PID] (PIP2) (2) .	(1)	150
P I P 2	☐ [Ref. máxima PID] Valor máximo del proceso. Rango de ajuste de [Referencia mínima PID] (PIP1) a [Retorno máximo PID] (PIF2) (2) .	(1)	900
P I I n D Y E S	☐ [Act.ref.int.PID] Consigna del regulador PID interno ☐ [No] (nO) : La consigna del regulador PID está determinada por Fr1 o Fr1b con, en ocasiones, las funciones de suma/resta/multiplicación (véase el sinóptico en la página). ☐ [Si] (YES) : la consigna del regulador PID es interna, por el parámetro rPI.		[No] (nO)
r P I ()	☐ [Ref. Interna PID] Consigna interna del regulador PID. También se puede acceder a este parámetro desde el menú [1.2 SUPERVISIÓN] (SUP-) . Rango de ajuste de [Referencia mínima PID] (PIP1) a [Referencia máxima PID] (PIP2) (2) .		0
r P G ()	☐ [Ganancia Prop.(PID)] Ganancia proporcional	de 0,01 a 100	1

Cód.	Nombre/descripción	Rango de ajuste	Ajuste de fábrica
	■ [REGULADOR PID] (continuación)		
<i>r IG</i> ()	☐ [Ganancia Int.(PID)] Ganancia integral	de 0,01 a 100	1
<i>r d G</i> ()	☐ [Ganancia deriv. PID] Ganancia derivada	de 0,00 a 100	0
<i>P r P</i> ()	☐ [Rampa PID] (1) Rampa de aceleración/deceleración del PID, definido para ir de [Referencia mínima PID] (PIP1) a [Referencia máxima PID] (PIP2) y viceversa.	de 0 a 99,9 s	0 s
<i>P IC</i> <i>n O</i> <i>Y E S</i>	☐ [PID inverso] ☐ [No] (nO) ☐ [Si] (YES) Inversión del sentido de corrección (PIC): si PIC = nO, la velocidad del motor se incrementa cuando el error es positivo. Ejemplo: regulación de presión con compresor. Si PIC = YES, la velocidad del motor disminuye cuando el error es positivo. Ejemplo: regulación de temperatura por ventilador de refrigeración.		[No] (nO)
<i>P D L</i> ()	☐ [Salida mínima PID] (1) Valor mínimo de la salida del regulador, en Hz.	de -500 a 500 o de -1.000 a 1.000, según el calibre	0 Hz
<i>P D H</i> ()	☐ [Salida máxima PID] (1) Valor máximo de la salida del regulador, en Hz.	de 0 a 500 o 1.000 según el calibre	60 Hz
<i>P A L</i> ()	☐ [Al. retorno mínimo] (1) Umbral de supervisión mínimo de retorno del regulador. Rango de ajuste de [Retorno mínimo PID] (PIF1) a [Retorno máximo PID] (PIF2) (2).		100
<i>P A H</i> ()	☐ [Al. retorno máximo] (1) Umbral de supervisión máximo de retorno del regulador. Rango de ajuste de [Retorno mínimo PID] (PIF1) a [Retorno máximo PID] (PIF2) (2).		1.000
<i>P E r</i> ()	☐ [Alarma error PID] (1) Umbral de supervisión del error del regulador.	de 0 a 65.535 (2)	100
<i>P I S</i> <i>n O</i> <i>L I 1</i> <i>-</i> <i>-</i> <i>-</i>	☐ [inhibir integral PID] ☐ [No] (nO): función inactiva ☐ [LI1] (LI1) : : ☐ [...] (...): ver condiciones de asignación en la página En el estado 0 de la entrada o del bit asignado, la función está inactiva (la integral del PID está validada). En el estado 1 de la entrada o del bit asignado, la función está activa (la integral del PID está inhibida).		[No] (nO)

Cód.	Nombre/descripción	Rango de ajuste	Ajuste de fábrica
■ [REGULADOR PID] (continuación)			
FPI nD R11 R12 R13 R14 PI LCC Mdb CAN nEt APP PG	☐ [Asign. ref. velocidad] Entrada de velocidad predictiva del regulador PID ☐ [No] (nO): sin asignar (función inactiva) ☐ [AI1] (AI1): entrada analógica ☐ [AI2] (AI2): entrada analógica ☐ [AI3] (AI3): entrada analógica, si hay instalada una tarjeta de ampliación ☐ [AI4] (AI4): entrada analógica, si hay instalada una tarjeta de ampliación ☐ [Entrada de pulsos] (PI): entrada de pulsos, si hay instalada una tarjeta ☐ [Consola] (LCC): terminal gráfico ☐ [Modbus] (Mdb): Modbus integrado ☐ [CANopen] (CAN): CANopen integrado ☐ [Cons.carta comunicación] (nEt): tarjeta de comunicación (si está instalada) ☐ [Carta programable] (APP): tarjeta Controller Inside (si está instalada) ☐ [Codificador] (PG): entrada de codificador, si hay instalada una tarjeta		[No] (nO)
PSr ()	☐ [% ref. velocidad] (1) Coeficiente multiplicador de la entrada de velocidad predictiva. Parámetro no accesible si [Asign. ref. velocidad] (FPI) = [No] (nO)	del 1 al 100%	100%
PAU nD L11 - - -	☐ [Asig. auto/manu] ☐ [No] (nO): el PID siempre está activo ☐ [LI1] (LI1) : : : ☐ [...] (...): ver condiciones de asignación en la página ____ En el estado 0 de la entrada o del bit asignado, el PID está activo. En el estado 1 de la entrada o del bit asignado, la marcha manual está activa.		[No] (nO)
PIN nD R11 R12 R13 R14 PI PG	☐ [Referencia manual] Entrada de velocidad manual ☐ [No] (nO): sin asignar (función inactiva) ☐ [AI1] (AI1): entrada analógica ☐ [AI2] (AI2): entrada analógica ☐ [AI3] (AI3): entrada analógica, si hay instalada una tarjeta de ampliación ☐ [AI4] (AI4): entrada analógica, si hay instalada una tarjeta de ampliación ☐ [Entrada de pulsos] (PI): entrada de pulsos, si hay instalada una tarjeta ☐ [Codificador] (PG): entrada de codificador, si hay instalada una tarjeta Las velocidades preseleccionadas están activas en la referencia manual si están configuradas.		[No] (nO)
L L S ()	☐ [Tpo a Vel. mínima] (1) Tiempo máximo de funcionamiento [Velocidad Mínima] (LSP) (véase la página ____). Después de estar funcionando en LSP durante el tiempo establecido, la parada del motor se genera automáticamente. El motor reanuda si la referencia es superior a LSP y si hay una orden de marcha activa. Atención: el valor 0 corresponde a un tiempo ilimitado de funcionamiento.	de 0 a 999,9 s	0 s

Cód.	Nombre/descripción	Rango de ajuste	Ajuste de fábrica
	■ [REGULADOR PID] (continuación)		
rSL	☐ [Niv.rearranque PID] Si se configuran las funciones "PID" y "Tiempo de funcionamiento a mínima velocidad" tLS al mismo tiempo, puede ser que el regulador PID intente regular una velocidad inferior a LSP. Como resultado se produce un funcionamiento insatisfactorio que consiste en arrancar, girar a LSP y luego parar, y así sucesivamente. El parámetro rSL (umbral de error de rearranque) permite ajustar un umbral de error PID mínimo para reaniciar después de una parada en LSP prolongada. La función está inactiva si tLS = 0 o si rSL = 0.	de 0,0 a 100,0	0
	 ADVERTENCIA FUNCIONAMIENTO INESPERADO DEL EQUIPO Asegúrese de que los rearranques inesperados no sean peligrosos. Si no se tiene en cuenta esta precaución, se pueden producir heridas graves o incluso la muerte.		
Pr1-	■ [CONSIG.PID PRESELECC.] Función accesible si se ha asignado [Retorno PID] (PIF).		
Pr2 nD L11 - - -	☐ [2 ref. PID preselecc.] ☐ [No] (nO): función inactiva ☐ [L11] (L11) : ☐ [...] (...): ver condiciones de asignación en la página En el estado 0 de la entrada o del bit asignado, la función está inactiva. En el estado 1 de la entrada o del bit asignado, la función está activa.		[No] (nO)
Pr4 nD L11 - - -	☐ [4 ref. PID preselecc.] Asegúrese de que [2 ref. PID preselecc.] (Pr2) se ha asignado antes de asignar esta función. ☐ [No] (nO): función inactiva ☐ [L11] (L11) : ☐ [...] (...): ver condiciones de asignación en la página En el estado 0 de la entrada o del bit asignado, la función está inactiva. En el estado 1 de la entrada o del bit asignado, la función está activa.		[No] (nO)
rP2 ()	☐ [Ref.presel.2 PID] (1) Parámetro accesible si se ha asignado [2 ref. PID preselecc.] (Pr2). Rango de ajuste de [Referencia mínima PID] (PIP1) a [Referencia máxima PID] (PIP2) (2).		300
rP3 ()	☐ [Ref.presel.3 PID] (1) Parámetro accesible si se ha asignado [4 ref. PID preselec.] (Pr4). Rango de ajuste de [Referencia mínima PID] (PIP1) a [Referencia máxima PID] (PIP2) (2).		600
rP4 ()	☐ [Ref.presel.4 PID] (1) Parámetro accesible si se ha asignado [4 ref. PID preselec.] (Pr4). Rango de ajuste de [Referencia mínima PID] (PIP1) a [Referencia máxima PID] (PIP2) (2).		900