



UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADOS

**Tesis en opción al grado académico de magister en
Gestión de Energías**

TÍTULO:

**EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL BANCO DE PRUEBAS MOTOR
VENTILADOR CENTRIFUGO, PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO
DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS LABORATORIOS DEL ITSA EN EL
AÑO 2013. PROPUESTA DE UN SISTEMA DE CONTROL**

Autor: Ing. Pilatásig Panchi, Marco Antonio

Tutor:

Ing. PhD Marrero Ramírez Secundino

LATACUNGA – ECUADOR

Diciembre– 2013



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

Latacunga – Ecuador

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado aprueban el presente Informe en consideración de Posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el maestrante: Pilatásig Panchi Marco Antonio, con el título de tesis: EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL BANCO DE PRUEBAS MOTOR VENTILADOR CENTRIFUGO, PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS LABORATORIOS DEL ITSA EN EL AÑO 2013. PROPUESTA DE UN SISTEMA DE CONTROL, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa de Tesis.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Diciembre 2013.

Para constancia firman:

.....
Msc. Rosa Terán
PRESIDENTE

.....
Msc. Edison Yépez
MIEMBRO

.....
PhD. Vicente Córdova
MIEMBRO

.....
Msc. Gabriel Hernández
OPOSITOR

AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS

Latacunga, Diciembre del 2013

En mi calidad de Director de Tesis presentado por el Ing. Pilatásig Panchi Marco Antonio. Egresado de la Maestría en Gestión de Energías, previa a la obtención del mencionado grado académico, cuyo título es. **“EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL BANCO DE PRUEBAS MOTOR VENTILADOR CENTRIFUGO, PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS LABORATORIOS DEL ITSA EN EL AÑO 2013. PROPUESTA DE UN SISTEMA DE CONTROL”.**

Considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos necesarios suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador.

Atentamente

PhD. Secundino Marrero Ramírez
DIRECTOR DE TESIS

RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE LA TESIS

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado; **“EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL BANCO DE PRUEBAS MOTOR VENTILADOR CENTRIFUGO, PARA LA REDUCCIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS LABORATORIOS DEL ITSA EN EL AÑO 2013. PROPUESTA DE UN SISTEMA DE CONTROL”**. Ha sido desarrollado con base a una investigación, exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de página, en las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente, este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración me responsabilizo, del contenido, veracidad, y alcance científico de proyecto de grado, en mención

Latacunga, Diciembre del 2013

.....
Marco Antonio Pilatásig Panchi
Número de C.I. 0502375876

AGRADECIMIENTO

Debo agradecer primeramente a Dios y a la Santísima Virgen de las Mercedes, por haberme dado la vida, por guiar mis pasos por el camino del bien, para ser buen hijo, esposo y padre, mil gracias.

A mi amada esposa y compañera, porque siempre estuvo en los momentos en los que más la necesitaba, brindándome apoyo, amor y comprensión. A la razón de mi existir, a mi adorado hijo Sebastián, que llegó a mi vida para llenarme de felicidad y dulzura. LOS AMO CON TODO MI CORAZON.

Un agradecimiento profundo al PhD. Secundino Marrero, por ser la guía y brindarme los conocimientos necesarios para el desarrollo de mi tesis de grado, mil gracias.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de investigación a las personas más importantes de mi vida, mi esposa Jessy y mi hijo Sebastián, por el apoyo incondicional que me brindaron, la paciencia, y por el tiempo que quizá no les pude dar en el momento oportuno, el logro que alcancé es sacrificio de los tres. A mis inolvidables abuelitos que desde el cielo me ayudan a seguir por el camino del bien, recordando siempre sus sabios consejos que me inculcaron en mi niñez y juventud, para ser una persona de bien y útil a la sociedad

INDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	ii
AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS	iii
RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE LA TESIS	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
RESUMEN.....	xiii
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.2. Formulación del Problema	4
1.3. Objeto de estudio.....	4
1.4. Justificación.....	4
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Generales.....	5
1.5.2. Específicos	5
1.6. Hipótesis.....	5
2.1. Antecedentes	6
2.2. Marco Teórico	7
2.2.1 Motor eléctrico trifásico.....	7
2.2.2 Principio de Funcionamiento	8
2.2.3 Tipos y características del motor eléctrico trifásico.....	9
2.2.4 Motores Síncronos	9
2.2.5 Motor Asíncrono	10
2.2.6 Eficiencia energética	11
2.2.7 Variador de Frecuencia	12
2.2.7.1 Principio de Funcionamiento.....	12
2.2.8 Micromaster 440	13
2.2.8.1 Características	14
2.2.9 Sinamics G110	14
2.2.9.1 Características	15
2.2.10 Control Escalar V/F.....	16
2.2.11 Control Vectorial.....	17
2.2.11.1 Control Por Campo Orientado (FOC)	17
2.2.11.2 Control sin Sensores	19
2.2.12 Ventiladores	21
2.2.12.1 Ventilador Centrífugo.....	22

2.2.12.2	Ventilador Centrífugo con álabes curvados hacia adelante.....	22
2.2.12.3	Ventilador Centrífugo con alabes rectos	23
2.2.12.4	Ventilador Centrífugo con alabes curvados hacia atrás	23
2.2.13	Curva Característica	24
2.2.14	Punto de Trabajo	25
2.2.15	Curvas de Potencia.....	25
2.2.16	Curva Característica del Sistema	26
2.2.17	Leyes de los ventiladores	27
2.2.17.1	Variación de Diámetro	27
2.2.17.2	Variación de velocidad	28
2.2.18	Presión.....	28
2.2.18.1	Presión Estática (Pe).....	29
2.2.18.2	Presión Dinámica (Pd).....	29
2.2.18.3	Presión Total (Pt).....	29
2.2.18.4	Unidades	30
2.2.19	Reguladores de flujo	30
3.1.	Diseño de la investigación.....	35
3.2.	Técnicas e Instrumentos	35
3.2.1.	Observación.....	35
3.2.2.	Ficha Técnica	35
3.3.	Operacionalización de las variables	37
3.4.	Modalidad de investigación.....	37
3.2.1.	De Campo	37
3.2.2.	Bibliográfica Documental	38
3.2.3.	Modelación y simulación	38
3.5.	Tipos de Investigación.....	38
3.2.1.	Experimental	38
3.5.1.1.	Curva Característica	38
3.5.1.2.	Obtención de Potencia eléctrica del motor con Damper	41
3.5.1.3.	Obtención de Potencia eléctrica del motor con variador de frecuencia Sinamics G110.....	42
3.5.1.4.	Obtención de Potencia del motor utilizando el variador de frecuencia Micro Master 440	43
3.5.1.5.	Obtención de Potencia eléctrica con el modo de control V/f Lineal	44

3.5.1.6.	Obtención de Potencia eléctrica con el modo de control V/f lineal con control de flujo de corriente	45
3.5.1.7.	Obtención de Potencia eléctrica con el modo de control V/f cuadrático	45
3.5.1.8.	Obtención de Potencia eléctrica con el modo de control Economizador de energía	45
3.5.1.9.	Obtención del Rendimiento	45
3.5.1.10.	Obtención de la Función de Transferencia	46
3.5.1.11.	Modelamiento del controlador PID	46
3.5.1.12.	Sintonización del controlador	46
4.1.	Presión a la salida del ventilador	48
4.2.	Presión a la salida del Sistema	49
4.3.	Punto de Trabajo	50
4.4.	Obtención de Potencia Eléctrica del motor con DAMPER	51
4.5.	Obtención de Potencia Eléctrica con variador de frecuencia Sinamics G110	53
4.6.	Obtención de Potencia eléctrica del motor con variador Micromaster	440
	56
4.6.1.	Modo de control V/f Lineal	57
4.6.2.	Modo de control V/f con control de flujo	58
4.6.3.	Modo de control V/f cuadrático	58
4.6.4.	Modo de control V/f con economizador	59
4.7.	Función de Transferencia	60
4.8.	Diseño del controlador	68
4.9.	Rendimiento	71
4.10.	Estudio de una aplicación Industrial	72
CAPITULO V: PROPUESTA		75
5.1.	Título de la Propuesta	75
5.2.	Justificación	75
5.3.	Objetivo	76
5.4.	Estructura de la propuesta	76
5.5.	Desarrollo de la propuesta	76
5.6.	Evaluación socio-económico-ambiental de la propuesta	77
5.7.	Resultados de la valoración económica	78
5.7.1.	Cálculo del VAN	79
CONCLUSIONES		80
RECOMENDACIONES		81

BIBLIOGRAFÍA	82
--------------------	----

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Características del Motor Trifásico.....	36
Tabla 3.2 Características del ventilador centrífugo.....	36
Tabla 3.3 Características del Conducto de acrílico.....	36
Tabla 3.4 Operacionalización de las variables.....	37
Tabla 4.1 Presión estática a la salida del ventilador.....	48
Tabla 4.2 Presión a la salida del sistema.....	49
Tabla 4.3 Potencia eléctrica que consume el motor con Damper.....	51
Tabla 4.4 Parámetros de configuración del Sinamics G110.....	53
Tabla 4.5 Potencia eléctrica que consume el motor con el variador G110.....	54
Tabla 4.6 Parámetros de configuración del Micromaster 440.....	56
Tabla 4.7 Potencia eléctrica en modo de control V/f Lineal.....	57
Tabla 4.8 Potencia eléctrica en modo de control V/f con control de flujo.....	58
Tabla 4.9 Potencia eléctrica en modo de control V/f cuadrático.....	58
Tabla 4.10 Potencia eléctrica con modo economizador.....	59
Tabla 4.11 Valores de entrada y salida.....	60
Tabla 4.12 Porcentaje de rendimiento.....	72
Tabla 4.13 Características de motor de 5HP.....	73
Tabla 4.14. Ventilador centrífugo.....	73
Tabla 5.1 Desglose de costos fijos.....	77
Tabla 5.2 Costo mano de obra.....	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Motores de inducción asíncronos.....	10
Figura 2. 2 Micromaster 440.....	13
Figura 2.3 Control Escalar V/f.....	17
Figura 2.4 Control directo (a) e indirecto (b).....	19
Figura 2.5 Control directo de par.....	21

Figura 2.6 Ventilador centrífugo.....	22
Figura 2.7 Alabes rectos, curvados hacia atrás y adelante.....	24
Figura 2.8 Curva característica del ventilador centrífugo.....	24
Figura 2.9 Punto de trabajo de un ventilador centrífugo.....	25
Figura 2.10 Curvas de Potencia de un ventilador centrífugo.....	26
Figura 2.11 Curva característica del sistema de ductos.....	27
Figura 2.12 Diámetro del rodete.....	28
Figura 2.13 Representación de presiones en un ducto.....	29
Figura 2.14 Ventilador centrífugo con Damper a la salida.....	31
Figura 2.15 Curva de rendimiento del ventilador.....	32
Figura 3.1 Banco de pruebas motor – ventilador.....	35
Figura 3.2 Manómetro en forma de U.....	39
Figura 3.3 Medición de presiones estática, dinámica y total.....	39
Figura 3.4 Obtención de presión dinámica a la salida del sistema.....	40
Figura 3.5 Obtención de presión estática.....	41
Figura 3.6 Parámetros de configuración para el variador G110.....	42
Figura 3.7 Parámetros de Configuración del Micro Master 440.....	44
Figura 4.1 Curva Presión estática – %Caudal.....	49
Figura 4.2 Curva Presión dinámica – Caudal.....	50
Figura 4.3 Punto de Trabajo.....	51
Figura 4.4 Potencia eléctrica – Caudal.....	52
Figura 4.5 Potencia eléctrica – Caudal con variador G110.....	55
Figura 4.6 Ahorro de Potencia eléctrica con variador G110.....	55
Figura 4.7 Curvas de potencias con el Micromaster 440.....	59
Figura 4.8 Componentes del Banco de pruebas.....	60
Figura 4.9 Curva Voltaje - Caudal.....	61
Figura 4.10 Curva Voltaje – Caudal utilizando Matlab.....	61
Figura 4.11 Identificador de sistemas.....	62
Figura 4.12 Importar Datos al Identificador de Sistemas.....	63
Figura 4.13 Estimación de la Función de Transferencia.....	64
Figura 4.14 Estimación de la Función de Transferencia.....	65
Figura 4.15 Función de transferencia estimada.....	66

Figura 4.16 Modelos de salida del sistema.....	67
Figura 4.17 Respuesta en el dominio del tiempo.....	67
Figura 4.18 Diseño del controlador PID.....	68
Figura 4.19 Ingreso de ganancia proporcional.....	68
Figura 4.20 Respuesta del sistema para $K_p=0.1$	69
Figura 4.21 Respuesta oscilatoria.....	69
Figura 4.22 Respuesta del sistema con datos iniciales del PID.....	70
Figura 4.23 Respuesta del sistema con el PID sintonizado.....	71
Figura 4.24 Rendimiento del ventilador centrífugo.....	72
Figura 4.25 Ahorro energético utilizando el software FanSave.....	74
Figura 5.1 Componentes iniciales del banco de pruebas motor – ventilador centrífugo.....	76
Figura 5.2 Componentes del Banco de pruebas propuesto.....	76
Figura 5.3 Ahorro económico para aplicaciones industriales.....	78
Figura 5.4 Ahorro de emisiones de CO ₂ por kWh.....	78

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADOS
MAESTRIA EN GESTION DE ENERGIA

Título: Implementación de un control V/f cuadrático en el Variador de Frecuencia Micro Master 440 para el Banco de Pruebas Motor – Ventilador Centrífugo.

Autor: Pilatásig Panchi Marco Antonio

Tutor: PhD. Marrero Secundino

RESUMEN

En el laboratorio de Máquinas Eléctricas del Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico ITSA, existe un banco de pruebas de flujo de aire. El mismo cuenta con un motor trifásico y un ventilador centrífugo de álabes hacia delante. Para regular el flujo de aire se utiliza un Damper, ocasionando que el motor trabaja siempre a plena carga. Mediante la investigación bibliográfica documental, se obtuvo información para determinar el punto de trabajo del ventilador centrífugo, las curvas de potencia y rendimiento del mismo. En la investigación experimental, se realizó mediciones de Caudal y potencia eléctrica, utilizando los variadores de frecuencia Sinamics G110 y Micromaster 440. El Sinamics G110, presenta sólo un modo de control denominado V/f (voltaje frecuencia) lineal, en cambio, el Micromaster 440 presenta los modos de control: V/f lineal, V/f con control de flujo de corriente, V/f cuadrático y V/f con modo economizador. Dentro de los resultados obtenidos, el punto de trabajo en el cual el ventilador centrífugo funciona de manera correcta es de 467 m³/h, a una presión de 65 Pascales. El modo de control V/f cuadrático, permite obtener el mayor ahorro de potencia eléctrica. Se encontró que al conectar el variador de frecuencia Sinamics G110 al banco de pruebas, la potencia que consume es 92W, presentando un ahorro de potencia de 47W. Al conectar el Micromaster 440, con el modo de control V/f cuadrático, consume 32W y el ahorro es de 107W.

DESCRIPTORES: EFICIENCIA ENERGÉTICA, VARIADOR DE FRECUENCIA, CONTROL V/F CUADRÁTICO

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
UNIT GRADUATE
MASTER OF ENERGY MANAGEMENT**

TITLE: Implementation of a quadratic V/f control in the Micro Master 440 frequency converter for the Centrifugal Testing Bench Power Unit – Ventilator

Author: Pilatásig Panchi Marco Antonio

Tutor: PhD. Marrero Secundino

ABSTRACT

In the laboratory of Electrical Machines at the Superior Aeronautic Technological Institute ITSA, there is an airflow test bench. It has a three-phase electrical motor and a centrifugal fan with blades forward. To regulate the airflow, a Damper is used, causing the engine always to operate at full load. Through documentary literature research, information was obtained to determine the operating point of the centrifugal fan, power curves and performance. In the experimental phase, measurements of flow and electric power were performed using a Sinamics G110 and a Micromaster 440 frequency inverters. The Sinamics G110 inverter has only one linear control mode called V / f (voltage frequency), meanwhile the Micromaster 440 has several control modes: linear V / f, V / f control flow, V / f and quadratic V / f with economizer mode. Among the results obtained, it was found that the operating point at which the centrifugal fan works properly is $467 \text{ m}^3 / \text{h}$ at a pressure of 65 Pascals. The control mode V / f quadratic, presented the greater savings of electrical power. Connecting the Sinamics G110 inverter to the test bench, the power consumed was 92W, presenting a power saving of 47W. When connecting the Micromaster 440 set to the V / f quadratic control mode, the test bench consumes 32W, saving 107W.

KEYWORDS: ENERGY EFFICIENCY, INVERTER CONTROL V / F QUADRATIC

INTRODUCCIÓN

El ITSA es un Instituto de Educación Superior, que cuenta con la Tecnología de Electrónica e Instrumentación, para lo cual dentro de la formación de los estudiantes cuenta con laboratorios de Máquinas Eléctricas y Control Industrial, en el cual existe un banco de pruebas de flujo de aire, con un motor trifásico y un ventilador centrífugo de álabes hacia adelante. Para regular el flujo de aire se utiliza un Damper, con el motor trabajando siempre a plena carga

Los ventiladores son elementos indispensables en muchas aplicaciones técnicas, es por ello que existen diversos tipos de ventiladores según la aplicación deseada. Se pueden clasificar los ventiladores según su función o sus características y la elección de un ventilador adecuado implica conocer además dos variables concretas: caudal que se desea mover y aumento de presión que se quiere generar. El propósito de este trabajo es obtener una curva que muestre la relación existente entre estas dos variables, la denominada curva de rendimiento. Para ello se han realizado una serie de mediciones y de ellas se han extraído los valores necesarios de presión y caudal.

En primer lugar se analiza el problema a investigar, se realiza la contextualización a nivel macro, meso y micro, además se debe indicar el objeto de estudio, la justificación e importancia de la investigación y se plantea los objetivos.

Luego se muestra antecedentes de la investigación, trabajos de graduación, artículos científicos en los que se presentan opiniones y explicaciones de la problemática planteada en esta investigación, también se busca información teórica en libros, revistas o manuales para extraer información necesaria para la construcción del Marco Teórico.

Se analiza la metodología de investigación, como es el caso de la modalidad, técnicas e instrumentos y tipos de investigación de los cuales se escoge las que se ajustan al trabajo investigativo

Posteriormente se analiza los datos recolectados por los instrumentos como son las tablas y gráficos estadísticos, que muestran la curva característica del ventilador, la potencia, el rendimiento, la obtención de la función de transferencia del proceso y el modelo del control PID con su respectiva sintonización.

Finalmente, se plantea la propuesta “Implementación de un control V/f cuadrático en el Variador de Frecuencia Micro Master 440 para el Banco de Pruebas Motor – Ventilador Centrífugo”, con su respectivo análisis socio – económico – ambiental, conclusiones y recomendaciones, determinadas en función de los resultados de la investigación

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema

El uso de motores más eficientes puede conducir a ahorros significativos de energía eléctrica, ya que la misma es un factor importante en el crecimiento económico de un país. En general, los motores eléctricos son eficientes y confiables cuando se usan apropiadamente, pero muchos factores en su diseño y operación pueden desperdiciar energía y causar fallas prematuras.

Precisamente por su uso tan generalizado en la mayoría de las instalaciones existentes, es que la disminución de su eficiencia, aunque sea en pequeñas magnitudes, trae grandes repercusiones en la factura eléctrica de las industrias en particular y un sobre consumo de energía eléctrica. Esto se podría cuantificar en millones de dólares, si se considera el peso de los motores asincrónicos.

Los motores de inducción son los más usados en las industrias por ser, entre otros aspectos, los de mayor fiabilidad, mejor prestación de servicios, requieren menores mantenimientos y reparaciones, así como por su larga vida útil, es por eso que debido a su gran importancia económica y energética, es esencial optimizar la eficiencia y confiabilidad de los mismos.

En el Ecuador la gran parte de Industrias utilizan motores de inducción, por las ventajas anteriormente mencionadas, la provincia de Cotopaxi no es la excepción y en Latacunga existen empresas como: Familia Sancela, Novacero, Aglomerados Cotopaxi, etc. Además dentro de las Instituciones de Nivel Superior, también se utilizan mencionados motores para el desarrollo de las prácticas de laboratorio.

La investigación se realizó en el Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico (ITSA), localizado en la ciudad de Latacunga, debido a que es un Centro Educativo de Nivel Superior y permite las facilidades para realizar la respectiva investigación, lo que no sucede con las empresas industriales.

En el laboratorio de Máquinas Eléctricas y Control Industrial del ITSA, existe un banco de pruebas de Flujo de aire, en el cual se evaluó el consumo eléctrico que presenta la utilización de motores de inducción en accionamiento de ventiladores centrífugos controlados con Damper, lo que involucra que el motor esté trabajando en todo instante al 100% de su potencia nominal.

1.2. Formulación del Problema

La baja eficiencia energética de los motores de inducción en accionamiento de ventiladores centrífugos controlado por Damper, provocan alto consumo de energía eléctrica en los laboratorios del Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico (ITSA) de la ciudad de Latacunga en el año 2013.

1.3. Objeto de estudio

Accionamiento Motor – ventilador

1.4. Justificación

En la industria cerca del 60% de la energía eléctrica se "consume" en motores eléctricos. De éstos, el 70% corresponden a motores trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla.

La eficiencia de este tipo de motor está dada en la razón entre la potencia que se obtiene nominalmente en el eje del motor (potencia mecánica) y la potencia absorbida por el motor (potencia eléctrica). De esta forma, la diferencia entre ambas potencias corresponderá a las pérdidas eléctricas y mecánicas asociadas a la conversión de energía que se produce en cada motor eléctrico.

Una de las aplicaciones de los ventiladores centrífugos en el Campo Industrial es en los sistemas de aire acondicionado, al realizar la investigación se pretende disminuir el consumo energético de los motores de inducción en el accionamiento de ventiladores centrífugos controlados por Damper, mediante la utilización de variadores de frecuencia, para la evaluación de este accionamiento se utiliza un banco de pruebas existente en el Laboratorio de Control Industrial

1.5.Objetivos

1.5.1. Generales

1. Evaluar la eficiencia energética de los motores de inducción en accionamiento de ventiladores centrífugos controlados por Damper en el laboratorio de Máquinas Eléctricas y Control Industrial del ITSA, en el año 2013.
2. Proponer un sistema de control para mejorar la eficiencia energética de los motores de inducción en accionamiento de ventiladores centrífugos controlados por Damper, para los laboratorios del ITSA.

1.5.2. Específicos

- Evaluar el estado del arte de la eficiencia energética de los sistemas motor- ventilador.
- Analizar el funcionamiento y las curvas características de los ventiladores centrífugos
- Determinar el consumo energético generado por los motores de inducción en accionamiento de ventiladores centrífugos controlados por Damper y variadores de frecuencia
- Proponer un sistema de control para motores de inducción en función de la eficiencia energética.

1.6. Hipótesis

Si se implementa un sistema de control en el banco de pruebas motor – ventilador centrífugo, entonces se disminuye el consumo de energía eléctrica

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Diego Renato Estévez Suárez y Patricio Raúl Freile Salguero (2006), realizaron el diseño y construcción de un banco de pruebas con capacidad de 2200 cfm para estudio de principios de ventilación industrial, en el cual determinaron que la potencia al freno entregada por un motor eléctrico es una característica particular del mismo, y su relación con la potencia de entrada no es lineal.

Hasmukh Patel y Richard Hof (2008), presentan métodos teóricos para eliminar armónicos de las formas de onda del inversor, presentan soluciones para eliminar hasta cinco armónicos. Usan filtros en la etapa de salida del inversor para atenuar los armónicos de orden superior no eliminados.

Plunkett (2010), explica el método de control de ancho de pulso “PWM” de la fuente de tensión para minimizar el pico de la corriente de salida. Su método de control también genera unas referencias de ángulo del rotor y de la amplitud de la señal del estator usando las señales de realimentaciones de par y de flujo.

S. Alepuz, v. Delos, J. M^a Horrillo, J. horrillo y J. Triadó, (2008), presentan la técnica del control vectorial, aplicada a los motores de inducción, que permite alcanzar niveles de prestaciones dinámicas similares a las obtenidas en los motores de corriente continua.

Kadhim, Rezak y O’Kelly (2010), muestran un sistema basado en un microprocesador para el cálculo en línea de los ángulos de disparo, el cual posee una gran flexibilidad y versatilidad.

Hass y Blaschke (2007), desarrollaron los principios del control vectorial o por campo orientado (FOC), el cual tuvo su origen en la década de los años 70

Chang y Yeh, (2008), presentan un método de control de campo orientado sin sensores de la corriente de estator. Usando un estimador parcial de estado para estimar el par/corriente y un predictor de tensión para el vector de tensión del inversor.

Chang-Ming Liaw, Kuei-Hsiang y Faa-Jeng Lin (2011), realizaron un diseño e implementación de un controlador adaptativo con modelo de referencia discreta para lograr que el sistema de control del motor de inducción por orientación de campo sea insensible al cambio de parámetros. Dicho control solo requiere de información modelo de referencia y salida del sistema, no requiere identificación en tiempo real de ningún parámetro explícito.

J. González, D. Rodríguez, F.I. Guerras, J. Fernández, K.M. Argüelles, S. Velarde, R. Ballesteros, (2010), presentan los resultados obtenidos con la simulación numérica del ventilador centrífugo utilizando un código CFD que resuelve las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes promediadas según las tensiones de Reynolds (URANS).

2.2. Marco Teórico

2.2.1 Motor eléctrico trifásico

Marwin Prada, (2010), menciona que el motor eléctrico es una máquina eléctrica rotativa, capaz de convertir la energía eléctrica trifásica suministrada, en energía mecánica. La energía eléctrica trifásica origina campos magnéticos rotativos en el bobinado del estator (o parte fija del motor).

Nelson Chourio (2010), muestra que los motores eléctricos trifásicos, se fabrican en las más diversas potencias, desde una fracción de caballo hasta varios miles de caballos de fuerza (HP), se los construye para prácticamente, todas las tensiones y frecuencias (50 y 60 Hz) normalizadas y muy a menudo, están equipados para trabajar a dos tensiones nominales distintas. Se emplean para accionar máquinas-herramienta, bombas, montacargas, ventiladores, grúas, maquinaria elevada, sopladores, etc.

2.2.2 Principio de Funcionamiento¹

Cuando la corriente atraviesa los arrollamientos de las tres fases del motor, en el estator se origina un campo magnético que induce corriente en las barras del rotor.

Dicha corriente da origen a un flujo que al reaccionar con el flujo del campo magnético del estator, originará un par motor que pondrá en movimiento al rotor. Dicho movimiento es continuo, debido a las variaciones también continuas, de la corriente alterna trifásica.

Solo debe hacerse notar que el rotor no puede ir a la misma velocidad que la del campo magnético giratorio. Esto se debe a que a cada momento recibe impulsos del campo, pero al cesar el empuje, el rotor se retrasa. A este fenómeno se le llama deslizamiento.

Después de ese momento vendrá un nuevo empuje y un nuevo deslizamiento, y así sucesivamente. De esta manera se comprende que el rotor nunca logre alcanzar la misma velocidad del campo magnético giratorio.

Es por lo cual recibe el nombre de asíncrono o asincrónico. El deslizamiento puede ser mayor conforme aumenta la carga del motor y lógicamente, la velocidad se reduce en una proporción mayor.

Los motores de corriente alterna y los de corriente continua se basan en el mismo principio de funcionamiento, el cual establece que si un conductor por el que circula una corriente eléctrica se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, éste tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción del campo magnético.

El conductor tiende a funcionar como un electroimán debido a la corriente eléctrica que circula por el mismo adquiriendo de esta manera propiedades magnéticas, que provocan, debido a la interacción con los polos ubicados en el estator, el movimiento circular que se observa en el rotor del motor.

¹ (Yedra, 2010)

Partiendo del hecho de que cuando pasa corriente por un conductor produce un campo magnético, además si lo ponemos dentro de la acción de un campo magnético potente, el producto de la interacción de ambos campos magnéticos hace que el conductor tienda a desplazarse produciendo así la energía mecánica. Dicha energía es comunicada al exterior mediante un dispositivo llamado flecha.

2.2.3 Tipos y características del motor eléctrico trifásico²

Si el rotor tiene la misma velocidad de giro que la del campo magnético rotativo, se dice que el motor es síncrono. Si por el contrario, el rotor tiene una velocidad de giro mayor o menor que dicho campo magnético rotativo, el motor es asíncrono de inducción.

Los motores eléctricos trifásicos están conformados por dos grandes grupos:

1. Motores Síncronos
2. Motores Asíncronos

2.2.4 Motores Síncronos³

Este motor tiene la característica de que su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que lo alimenta. Es utilizado en aquellos casos en donde se desea una velocidad constante.

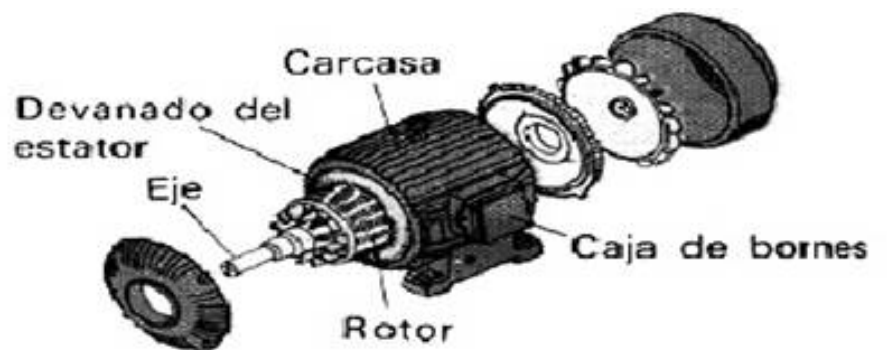
Las máquinas síncronas funcionan tanto como generadores y como motores. En nuestro medio sus aplicaciones son mínimas y casi siempre están relacionadas en la generación de energía eléctrica. Para el caso referente a la máquina rotativa síncrona, todas las centrales Hidroeléctricas y Termoeléctricas funcionan mediante generadores síncronos trifásicos. Para el caso del motor se usa principalmente cuando la potencia demandada es muy elevada, mayor que 1MW (mega vatio).

² (Hinojosa, 2010)

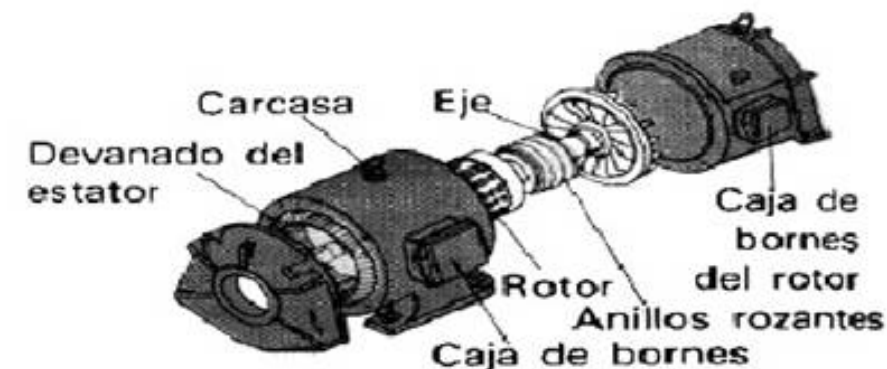
³ (Vargas, 2010)

2.2.5 Motor Asíncrono⁴

Los motores asíncronos o motores de inducción, son las máquinas de impulsión eléctrica más utilizadas, pues son sencillas, seguras y baratas. Los motores asíncronos se clasifican según el tipo de rotor, en motores de rotor en jaula de ardilla (o motores con inducido en cortocircuito) y en motores de rotor bobinado o de anillos rozantes.



a) Motor de rotor en jaula ardilla



b) Motor de rotor bobinado con anillos rozantes

Figura 2.1 Motores de inducción asíncronos

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos91/motor-electrico-trifasico/motor-electrico-trifasico.shtml>

En los motores asíncronos trifásicos, la energía eléctrica se suministra al bobinado del estator. Como consecuencia de ello, aparece un par aplicado al rotor, y éste girará.

⁴ (Villalobos, 2010)

2.2.6 Eficiencia energética⁵

La eficiencia energética es el consumo inteligente de la energía. Las fuentes de energía son finitas, y por lo tanto, su correcta utilización se presenta como una necesidad del presente para que podamos disfrutar de ellas en un futuro.

Ser más eficiente no significa renunciar a nuestro grado de bienestar y calidad de vida. Simplemente se trata de adoptar una serie de hábitos responsables, medidas e inversiones a nivel tecnológico y de gestión. Gracias a estas informaciones y consejos, el consumidor puede aprender **cómo llevar un estilo de vida más sostenible disponiendo de los mismos servicios.**

Pero practicar un consumo más responsable e inteligente de la energía que consumimos es tarea de todos. Si bien es cierto que la acción de una sola persona apenas se nota, **la repercusión global sí es importante cuando son varias las personas que utilizan los recursos de manera eficiente.**

La Eficiencia Energética se logra por medio de la aplicación de una serie de acciones, procedimientos y capacitaciones que logran optimizar la correlación entre la energía consumida y los productos o servicios finales. La implementación de medidas e inversiones de equipos tecnológicos de bajo consumo, de gestión y de hábitos culturales en la comunidad.

El uso racional de los recursos es otra de nuestras preocupaciones, nos hemos especializado en gestión de eficiencia energética, tanto para consumos industriales como domésticos. La aplicación de nuevas tecnologías de bajo consumo y alta eficiencia permiten mantener nuestros estándares actuales con un consumo significativamente menor.

Los electrodomésticos tienen una gran parte en el ahorro de energía doméstico, la mayoría de ellos en Europa tienen un etiquetado especial denominado etiqueta energética que viene a mencionar la eficiencia en el consumo y respetuoso con el medio ambiente.

⁵ (Brandao, 2012)

2.2.7 Variador de Frecuencia⁶

Un variador de frecuencia es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna(AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad. Los variadores de frecuencia son también conocidos como drivers de frecuencia ajustable (AFD), drivers de CA, microdrivers o inversores. Dado que el voltaje es variado a la vez que la frecuencia, a veces son llamados drivers VVVF (variador de voltaje variador de frecuencia).

2.2.7.1 Principio de Funcionamiento

Los dispositivos variadores de frecuencia operan bajo el principio de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna (CA) está determinada por la frecuencia de CA suministrada y el número de polos en el estator, de acuerdo con la relación:

$$RPM = \frac{120 \times f}{p} \quad (1)$$

Donde:

RPM = Revoluciones por minuto

f = frecuencia de suministro CA

p = Número de polos (adimensional)

Las cantidades de polos más frecuentemente utilizadas en motores síncronos o en Motor asíncrono son 2, 4, 6 y 8 polos que, siguiendo la ecuación citada, resultarían en 3000 RPM, 1500 RPM, 1000 RPM y 750 RPM respectivamente para motores sincrónicos únicamente y a la frecuencia de 50 Hz. Dependiendo de la ubicación geográfica funciona en 50Hz o 60Hz.

⁶ (Fraile, 2013)

2.2.8 Micromaster 440⁷

Los convertidores de la serie MICROMASTER 440 son convertidores de frecuencia para la regulación de par y velocidad en motores trifásicos. Los diferentes modelos, que se suministran, cubren un margen de potencia desde 0,12kW hasta 200 kW (con par constante (CT)) o hasta 250 kW (con par variable (VT)).

Los convertidores están controlados por microprocesador y utilizan tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de última generación. Esto los hace fiables y versátiles. Un método especial de modulación por ancho de impulsos con frecuencia de pulsación seleccionable permite un funcionamiento silencioso del motor. Extensas funciones de protección ofrecen una protección excelente tanto del convertidor como del motor.



Figura 2. 2 Micromaster 440
Fuente: Manual de Operación

El MICROMASTER 440, con sus ajustes por defecto realizados en fábrica, es ideal para una gran gama de aplicaciones sencillas de control de motores. El MICROMASTER 440 también puede utilizarse para aplicaciones más avanzadas de control de motores haciendo uso de su funcionalidad al completo. El MICROMASTER 440 puede utilizarse tanto en aplicaciones donde se encuentre aislado como integrado en sistemas de automatización.

⁷ (SIEMENS, 2006)

2.2.8.1 Características

- Fácil de instalar
- Puesta en marcha sencilla
- Diseño robusto en cuanto a CEM
- Puede funcionar en alimentación de línea IT
- Tiempo de respuesta a señales de mando rápido y repetible
- Amplio número de parámetros que permite la configuración de una gama extensa de aplicaciones
- Conexión sencilla de cables
- 3 relés de salida
- 2 salidas analógicas (0 – 20 mA)
- 6 entradas digitales NPN/PNP aisladas y conmutables
- 2 entradas analógicas:
 - ADC1: 0 – 10 V, 0 – 20 mA y -10 a +10 V
 - ADC2: 0 – 10 V, 0 – 20 mA
- Tecnología BiCo
- Diseño modular para configuración extremadamente flexible
- Altas frecuencias de pulsación (según convertidor, hasta 16 kHz) para funcionamiento silencioso del motor
- Interface interna RS485
- Información de estado detallada y funciones de mensaje integradas

2.2.9 Sinamics G110⁸

Los convertidores SINAMICS G110 son convertidores de frecuencia para regular la velocidad en motores trifásicos. Los diferentes modelos que se suministran cubren un margen de potencia de 120 W a 3,0 kW en redes monofásicas.

Los convertidores están controlados por microprocesador y utilizan tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de última generación. Esto los hace fiables y versátiles. Un método especial de modulación por ancho de impulsos con

⁸ (SIEMENS, SINAMICS G110, 2003)

frecuencia de pulsación seleccionable permite un funcionamiento silencioso del motor. Extensas funciones de seguridad ofrecen una protección excelente tanto del convertidor como del motor.

Con sus ajustes por defecto realizados en fabrica, SINAMICS G110 es ideal para una gran gama de aplicaciones sencillas de control de motores V/f.

Haciendo uso del gran número de parámetros de ajuste de que dispone, también puede utilizarse SINAMICS G110 en aplicaciones más avanzadas para control de accionamientos.

Los valores de parámetros para el SINAMICS G110 se pueden modificar con el panel BOP (Basic Operator Panel) o bien mediante la interface USS.

SINAMICS G110 existe en dos variantes:

- Variante USS
- Variante analógica

Ambos modelos con o sin filtro EMC y disipador plano.

El SINAMICS G110 puede utilizarse tanto en aplicaciones donde se encuentre aislado como integrado en sistemas de automatización.

2.2.9.1 Características

- Fácil de instalar
- Puesta en marcha sencilla
 - puesta en servicio rápida
 - función "reposición a valores de fábrica" (reajusta los parámetros a sus valores por defecto)
- 1 entrada digital con separación galvánica
- 3 entradas digitales sin separación galvánica
- 1 entrada analógica AIN: 0 – 10 V (solo en la variante analógica)se puede utilizar como cuarta entrada digital.
- Altas frecuencias de pulsación para funcionamiento silencioso del motor

- La información de estado y alarmas se visualizan en el panel BOP (obtenible como opción)
- BOP opcional con funcionalidad de copia de parámetros para juegos de Parámetros
- Interface interna RS485 (solo en la variante USS)
- Kit de conexión para el enlace PC-convertidor (RS232)

2.2.10 Control Escalar V/F⁹

La técnica del control vectorial, aplicada a los motores de inducción, permite alcanzar niveles de prestaciones dinámicas similares a las obtenidas en los motores de corriente continua.

Para lograr trabajar a flujo constante se puede ajustar para cada condición de operación dos parámetros controlables, que son la amplitud y frecuencia del voltaje de alimentación. Un simple esquema de control V/F se muestra en la Figura. 2.3. En este tipo de control la relación entre la magnitud del voltaje y la frecuencia se conoce como ley de mando.

Los primeros convertidores que utilizaron esta técnica sólo permitían un margen muy limitado de velocidades porque al mantener constante la relación V/F no se ha tenido en cuenta que los devanados también tienen resistencia óhmica, que no varía con la frecuencia. El resultado es que a bajas frecuencias disminuye el par. Una posible solución es aumentar un poco más la tensión a frecuencias bajas, o aumentarla en proporción al consumo y la resistencia de los devanados.

En los ventiladores y las bombas centrífugas apenas se necesita par a bajas velocidades y lo que suele hacerse es reducir más la tensión para consumir menos energía. Muchos inversores permiten seleccionar la relación entre la tensión y la frecuencia según sea la carga mecánica. Las técnicas de control V/F están basadas en los modelos estáticos del motor de inducción para la operación a flujo constante

⁹ (Alzate, 2011)

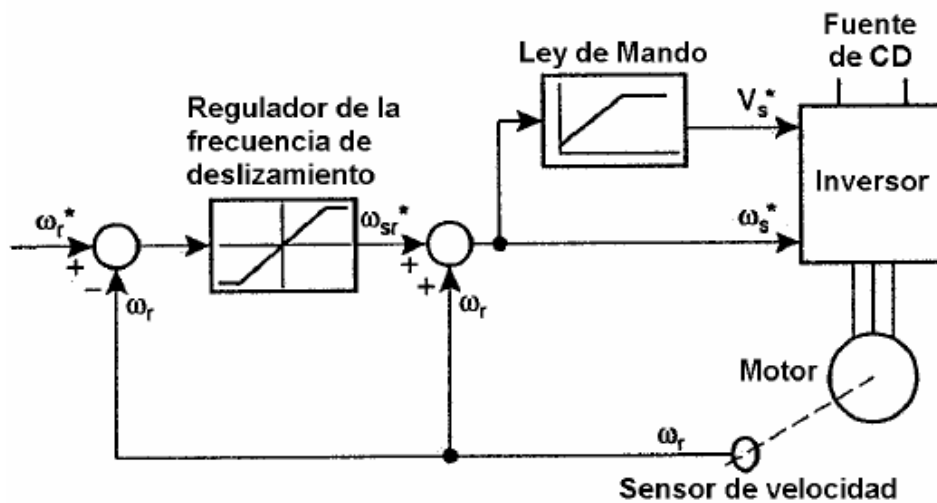


Figura 2.3 Control Escalar V/f
Fuente: Alzate, A. (2011).

2.2.11 Control Vectorial

2.2.11.1 Control Por Campo Orientado (FOC)¹⁰

Las técnicas de control vectorial han hecho posible la aplicación de motores de inducción para aplicaciones de alta prestaciones donde solamente se podían lograr, hasta entonces, con motores de corriente directa. Los esquemas de control vectorial permiten controlar el motor de inducción de la misma manera que el motor de corriente directa de excitación independiente. Como en el motor de CD, se logra un control independiente del flujo y el par (por lo que el control vectorial se conoce también como control desacoplado).

El control de este último se logra regulando la componente de la corriente que tiene que ver con el par (i_{qs}) y el del flujo, controlando (i_{ds}). Los esquemas básicos los métodos indirecto y directo de control vectorial se muestran en la Figura 2.4 a y b. El método directo es mostrado en la Figura 2.4 (a).

¹⁰ (Mejía, 2009)

La generación del vector de corriente depende de las señales de flujo del estator o del entrehierro. El flujo del entre hierro puede ser medido directamente (sensores de efecto Hall) o estimando mediante los valores de voltaje y corrientes del estator.

Las componentes del flujo del estator pueden ser directamente calculadas a través de sus magnitudes. En este método la velocidad del rotor no es un requerimiento para obtener la información del ángulo espacial del campo o flujo del rotor (este ángulo también se conoce como ángulo de desacople).

En el método indirecto que se muestra en la Figura 2.4(b) es más simple de implementar debido a se prescinde de medir o estimar el vector de flujo. El vector de la corriente se calcula con la medición de la velocidad del rotor y el valor de las referencias de flujo y par (con las cuales se determina la frecuencia del deslizamiento).

Anteriormente se mencionó el Control Vectorial por Campo Orientado, que este nombre genérico se le da al caso de cuando la orientación del flujo es el flujo del rotor. De hecho el sistema de Control Vectorial puede estar orientado al flujo del estator o también al el flujo del entrehierro.

El método de control de la máquina de inducción muy utilizado en la práctica debido a su facilidad de implantación, es el control vectorial indirecto. En este controlador tanto el flujo de rotor como el par son controlados en bucle abierto, existiendo sólo un bucle de control en lazo cerrado para la velocidad de giro de la Máquina.

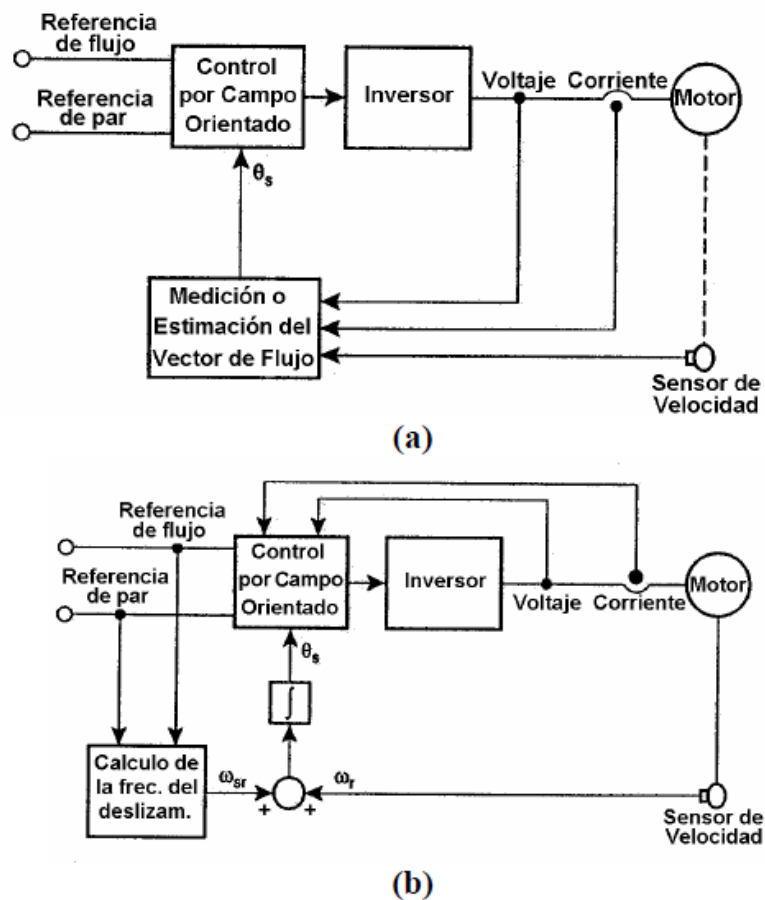


Figura 2.4 Control directo (a) e indirecto (b)
Fuente: Mejia, A. (2009).

2.2.11.2 Control sin Sensores¹¹

Los esquemas de control requieren de sensor de velocidad para su operación en lazo cerrado. El sensor de velocidad posee varios inconvenientes desde el punto de vista de costo, confiabilidad e inmunidad al ruido.

Actualmente han sido propuestos varios métodos para la estimación de la velocidad, utilizando voltaje, corrientes y frecuencia del estator. Este tema se conoce como Control de Velocidad sin Sensores (Speed Sensorless Control) en el cual se está investigando.

Estas técnicas se pueden clasificar en:

¹¹ (Asher, 1998)

- Control de velocidad en lazo abierto con compensación del deslizamiento.
- Control a lazo cerrado con estimación de la velocidad.

En el primer caso la velocidad sincrónica del motor se regula, mientras que la frecuencia del deslizamiento se utiliza solamente para compensar los cambios de la carga. Y en el segundo caso, la velocidad del motor se estima y se utiliza como señal de retroalimentación a lazo cerrado. ***Control directo del par (DTC):***

La principal diferencia con los otros métodos de control anteriores es que el DTC no existe un modulador PWM separado, sino que la posición de los interruptores del convertidor de potencia es determinada directamente por el estado electromagnético del motor.

Para ello es necesario disponer de un modelo muy exacto del motor junto con una elevadísima capacidad de cálculo.

La Figura 2.5 muestra un esquema básico de control directo del par el cual permite una respuesta dinámica mucho más rápida, que inclusive puede llegar a duplicar las prestaciones de los esquemas de control vectorial anteriores.

El bloque de histéresis del par y del flujo compara los valores reales de estas variables con sus valores actuales y elabora la posición óptima de los interruptores del convertidor de potencia para seleccionar el vector de voltaje más indicado. El objetivo es obligar al vector de flujo del estator variar en la forma que se establece los valores de referencia del par y flujo del estator.

Para determinar la secuencia de conmutación del inversor, el DTC utiliza las últimas tecnologías de los microprocesadores, los procesadores digitales de señales (DSP), juntos con circuitos de propósito específicos (ASIC). Todas las señales de control se transmiten por fibra óptica para conseguir elevadas velocidades de transmisión.

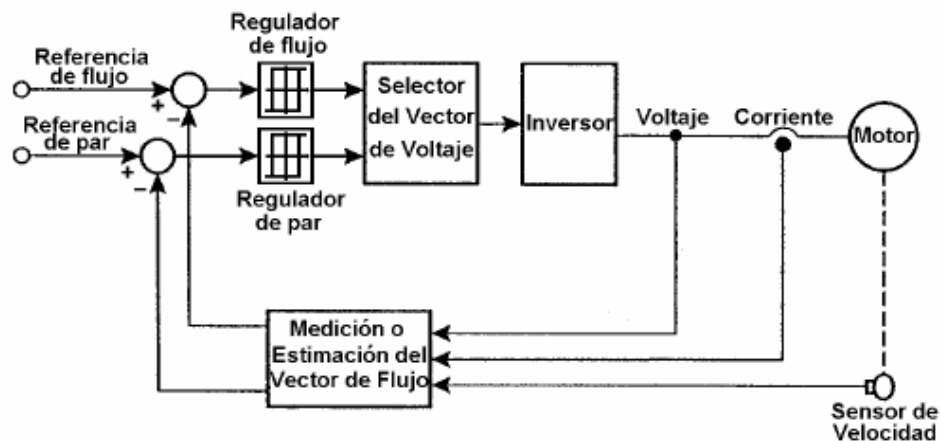


Figura 2.5 Control directo de par
Fuente: Alzate, A. (2011).

2.2.12 Ventiladores¹²

Un ventilador es una máquina rotativa que pone el aire, o un gas, en movimiento. Se puede definir también como una turbomáquina que transmite energía para generar la presión necesaria para mantener un flujo continuo de aire.

Dentro de una clasificación general de máquinas, los ventiladores son turbomáquinas hidráulicas, tipo generador, para gases.

Un ventilador consta en esencia de un motor de accionamiento, generalmente eléctrico, con los dispositivos de control propios de los mismos: arranque, regulación de velocidad, conmutación de polaridad, etc. y un propulsor giratorio en contacto con el aire, al que le transmite energía. Este propulsor adopta la forma de rodete con álabes, en el caso del tipo centrífugo, o de una hélice con palas de silueta y en número diverso, en el caso de los axiales.

El conjunto, o por lo menos el rodete o la hélice, van envueltos por una caja con paredes de cierre en forma de espiral para los centrífugos y por un marco plano o una envoltura tubular en los axiales. La envoltura tubular puede llevar una reja radial de álabes fijos a la entrada o salida de la hélice, llamada directriz, que guía el aire, para aumentar la presión y el rendimiento del aparato.

¹² (wikipedia, 2013)

2.2.12.1 Ventilador Centrífugo¹³

En los ventiladores centrífugos la trayectoria del fluido sigue la dirección del eje del rodete a la entrada y perpendicular al mismo a la salida. Si el aire a la salida se recoge perimetralmente en una voluta, entonces se dice que el ventilador es de voluta.

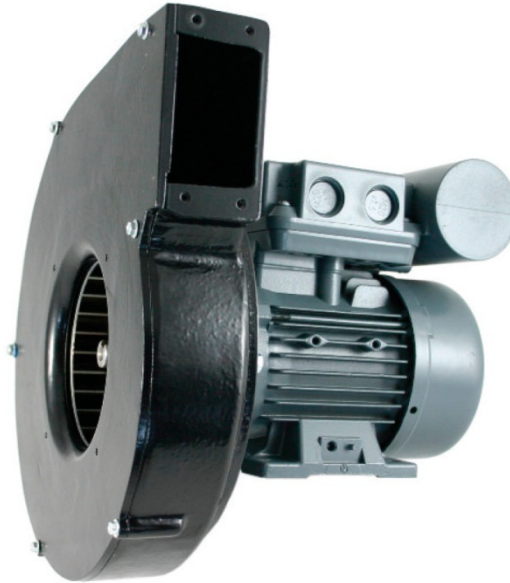


Figura 2.6 Ventilador centrífugo
Fuente: (Jorgensen, 1999)

Estos ventiladores tienen tres tipos básicos de rodetes:

1. Álabes curvados hacia adelante,
2. Álabes rectos,
3. Álabes inclinados hacia atrás / curvados hacia atrás.

2.2.12.2 Ventilador Centrífugo con álabes curvados hacia adelante

Los ventiladores de álabes curvados hacia adelante (también se llaman de jaula de ardilla) tienen una hélice o rodete con álabes curvadas en el mismo sentido del giro. Estos ventiladores necesitan poco espacio, poseen baja velocidad periférica y

¹³ (Jorgensen, 1999)

son silenciosos. Se utilizan cuando la presión estática necesaria es de baja a media, tal como la que se encuentran en los sistemas de calefacción, aire acondicionado o renovación de aire, etc. No es recomendable utilizar este tipo de ventilador con aire polvoriento, ya que las partículas se adhieren a los pequeños álabes curvados y pueden provocar el desequilibrado del rodete.

Estos ventiladores tienen un rendimiento bajo fuera del punto de proyecto. Además, como su característica de potencia absorbida crece rápidamente con el caudal, ha de tenerse mucho cuidado con el cálculo de la presión necesaria en la instalación para no sobrecargarlo.

2.2.12.3 Ventilador Centrífugo con alabes rectos

Los ventiladores centrífugos radiales tienen el rodete con los álabes dispuestos en forma radial. La carcasa está diseñada de forma que a la entrada y a la salida se alcancen velocidades de transporte de materiales. Existen una gran variedad de diseños de rodetes que van desde los de "alta eficacia con poco material" hasta los de "alta resistencia a impacto". La disposición radial de los álabes evita la acumulación de materiales sobre las mismas. Este tipo de ventilador es el comúnmente utilizado en las instalaciones de extracción localizada en las que el aire contaminado con partículas debe circular a través del ventilador. En este tipo de ventiladores la velocidad periférica es media y se utiliza en muchos sistemas de extracción localizada.

2.2.12.4 Ventilador Centrífugo con alabes curvados hacia atrás

Los ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia atrás tienen un rodete con los álabes inclinados en sentido contrario al de rotación. Este tipo de ventilador es el de mayor velocidad periférica y mayor rendimiento con un nivel sonoro relativamente bajo y una característica de consumo de energía del tipo "no sobrecargable".

En un ventilador "no sobrecargable", el consumo máximo de energía se produce en un punto próximo al de rendimiento óptimo de forma que cualquier cambio a

partir de este punto debido a cambios de la resistencia del sistema resultará en un consumo de energía menor. La forma de los álabes condiciona la acumulación de materiales sobre ellas.

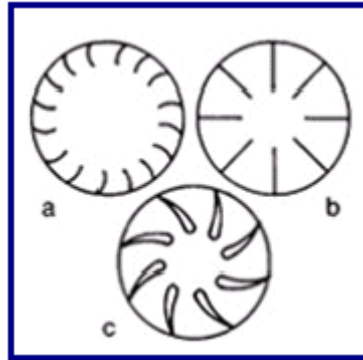


Figura 2.7 Alabes rectos, curvados hacia atrás y adelante
Fuente: (Ecoda, 2010)

2.2.13 Curva Característica¹⁴

Según sea el ventilador, su curva característica adopta una u otra forma, Los ventiladores centrífugos, en general, son capaces de manejar presiones altas con caudales más bien bajos.

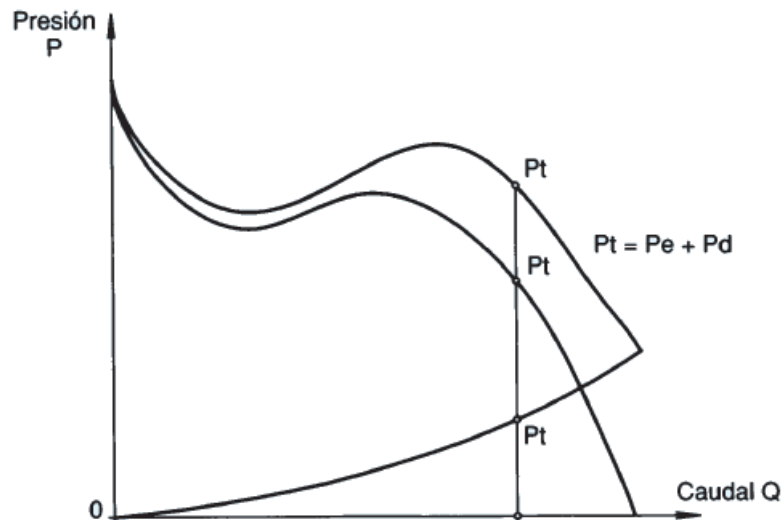


Figura 2.8 Curva característica del ventilador centrífugo
Fuente: (Ecoda, 2010)

¹⁴ (Ecoda, 2010)

2.2.14 Punto de Trabajo¹⁵

Para conocer el punto en que trabajará un ventilador, una vez determinada la pérdida de carga que debe vencer el mismo, no hay más que, sobre el eje de ordenadas, señalar la pérdida de carga en mm.c.d.a. (milímetros de columna de agua).

Si se dispone de la característica resistente del sistema, se puede encontrar de forma fácil el punto de trabajo de un ventilador acoplado al mismo, al superponer las curvas características del ventilador y resistente del conducto.

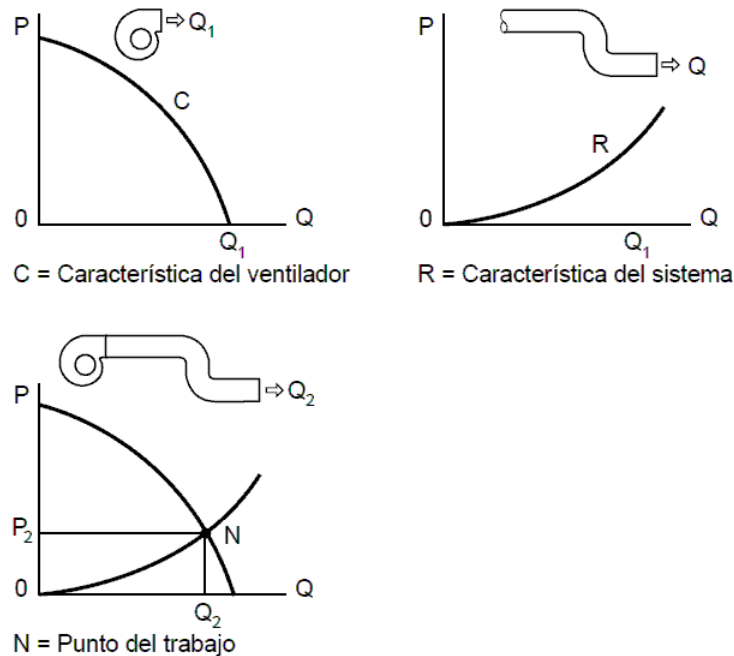


Figura 2.9 Punto de trabajo de un ventilador centrífugo

Fuente: (Escoda, 2010)

2.2.15 Curvas de Potencia

Cada motor de ventilador tiene su propio valor de potencia nominal (HP), éste puede trabajar entregando distintos valores de potencia al eje (BHP), dentro de su rango para alcanzar determinadas condiciones de operación

La potencia requerida para manejar el ventilador a un punto de operación particular (BHP) está definida por la siguiente ecuación:¹⁶

¹⁵ (Escoda, 2010)

$$BHP = \frac{\text{Torque} \times RPM}{63.025} \quad (2)$$

El torque está en (lb-in)

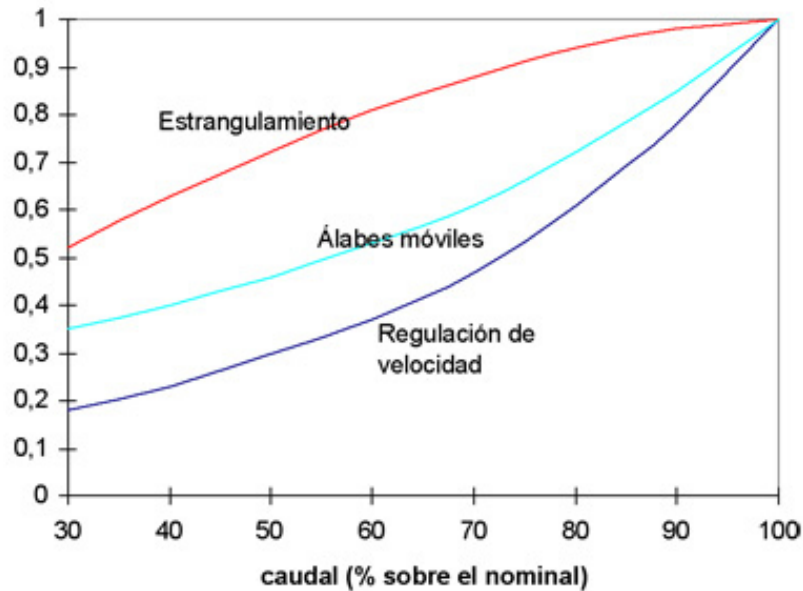


Figura 2.10 Curvas de Potencia de un ventilador centrífugo
Fuente: MATHSON, T.U.S.A.

2.2.16 Curva Característica del Sistema

Para saber exactamente en qué condiciones funciona el ventilador, debemos conocer la curva resistencia del sistema de ductos a instalarse, es decir, la curva que relaciona la pérdida de carga de la instalación con el caudal de aire que pasa con ella.

Físicamente se ha establecido que la pérdida de presión de un flujo conducido a través de conductos varía proporcionalmente al cuadrado del caudal según la fórmula:

$$P_2 = P_1 \left[\frac{Q_2}{Q_1} \right]^2 \quad (3)$$

¹⁶MATHSON, T.U.S.A. Fundamentos de ventilación. 1era Ed. Wisconsin, Greenheck, Julio 1999. Pg16

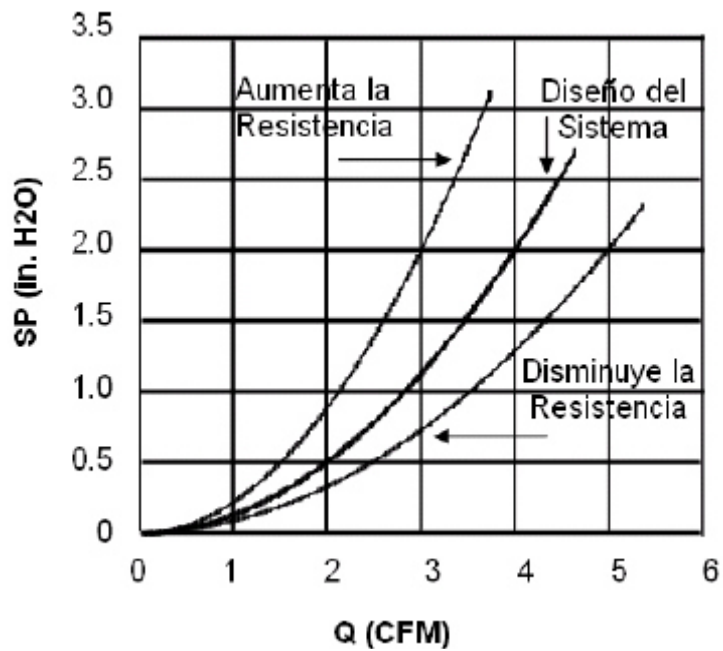


Figura 2.11 Curva característica del sistema de ductos
Fuente: MATHSON, T.U.S.A.

2.2.17 Leyes de los ventiladores

El rendimiento de un ventilador a velocidades, diámetro del rotor, densidades de aire variables, puede ser pronosticado por una serie de ecuaciones conocidas como Leyes de los Ventiladores¹⁷

2.2.17.1 Variación de Diámetro

El caudal de aire (Q) varía proporcionalmente con el cubo de la relación del diámetro del rodete (D).

$$Q_2 = Q_1 \left[\frac{D_2}{D_1} \right]^3 \quad (4)$$

La presión (P) varía proporcionalmente con el cuadrado de la relación del diámetro del rodete (D).

$$P_2 = P_1 \left[\frac{D_2}{D_1} \right]^2 \quad (5)$$

El punto de potencia del motor (BHP) varía proporcionalmente con la relación de los diámetros del rodete (D) elevada a la potencia 5

¹⁷ ESCODA, S. Manual práctico de ventilación. 2da ed. Barcelon, Soler & Palau, s.f. pp 9-12

$$BHP_2 = BHP_1 \left[\frac{D_2}{D_1} \right]^5 \quad (6)$$

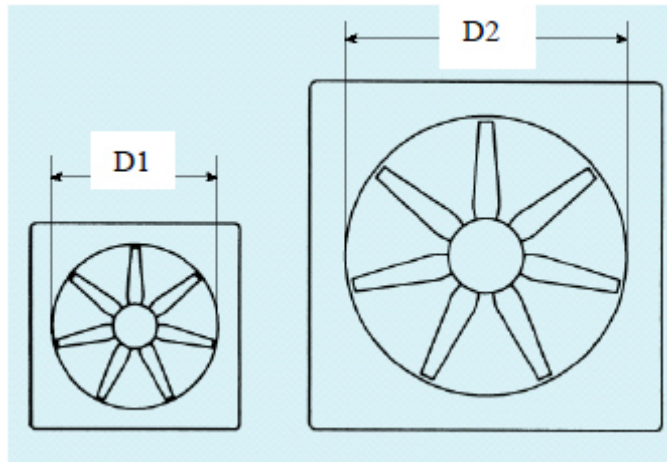


Figura 2.12 Diámetro del rodete
Fuente: (Escoda, 2010)

2.2.17.2 Variación de velocidad

El caudal de aire (Q) varía directamente con la relación de las velocidades angulares del rodete (w)

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{w_2}{w_1} \right) \quad (7)$$

La Presión (P) varía de acuerdo al cuadrado de la relación de las velocidades angulares del rodete (w)

$$P_2 = P_1 \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2 \quad (8)$$

El Punto de la Potencia del Motor (BHP) varía de acuerdo a la relación de las velocidades angulares del rodete (w) elevadas al cubo

$$BHP_2 = BHP_1 \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^3 \quad (9)$$

2.2.18 Presión¹⁸

¹⁸ (Palau, 2012)

El aire, para circular, necesita de una determinada fuerza que le empuje. Esta fuerza, por unidad de superficie, es lo que se llama Presión. Existen tres clases de presión:

2.2.18.1 Presión Estática (P_e)

Es la que ejerce en todas las direcciones dentro del conducto, en la misma dirección del aire, en dirección contraria y en dirección perpendicular, sobre las paredes del mismo. Si el conducto fuese cerrado, como un recipiente con el aire en reposo, también se manifestaría este tipo de Presión.

La Presión Estática puede ser positiva, si es superior a la atmosférica o bien negativa, si está por debajo de ella.

2.2.18.2 Presión Dinámica (P_d)

Es la presión que acelera el aire desde cero a la velocidad de régimen. Se manifiesta solo en la dirección del aire y viene relacionada con la dirección del mismo, aproximadamente por las fórmulas:

$$P_d = \frac{v^2}{16} \text{ (mm c. d. a)} \quad (10)$$

$$V = 4\sqrt{P_d} \left(\frac{m}{s}\right) \quad (11)$$

2.2.18.3 Presión Total (P_t)

Es la presión que ejerce el aire sobre un cuerpo que se opone a su movimiento. Esta presión es suma de las dos anteriores.

$$P_t = P_d + P_e \quad (12)$$

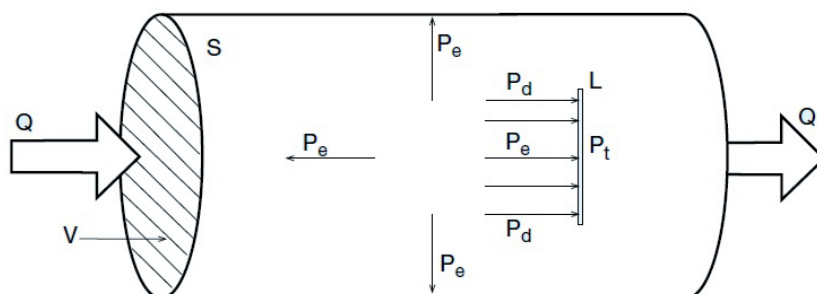


Figura 2.13 Representación de presiones en un ducto

Fuente: Palau, S. Y. (2012).

2.2.18.4 Unidades¹⁹

Las unidades de presión usadas en ventilación son:

1 mm c.d.a. (milímetro columna de agua)

1 Pascal, Pa

Ambas, y la unidad industrial de presión, la atmosfera o Kp/cm², se equivalen de la siguiente forma:

$$1 \text{ atmosfera} = 1 \text{ Kp/cm}^2$$

$$= 10.000 \text{ mm c.d.a.}$$

$$= 98 \times 1.000 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mm c.d.a.} = 9'81 \text{ Pascal}$$

$$= 0'0001 \text{ atmosferas}$$

En la práctica, aproximadamente:

$$1 \text{ mm c.d.a.} = 10 \text{ Pa}$$

2.2.19 Reguladores de flujo

Existen tres dispositivos principales para la regulación del flujo. Estos son: dámper en la carcasa y aletas tanto en la entrada como en la descarga del ventilador.

Los alabes de entrada ajustan el flujo de dos maneras:

- Creando un remolino en el flujo de aire que afecta la forma en que el flujo ingresa al ventilador e impacta los alabes.
- Restringiendo la entrada del flujo de aire.

Los alabes de entrada y dampers en la carcasa deben ser diseñados de tal forma que la pre-rotación del fluido sea en la misma dirección de la rotación del ventilador y a una distancia suficiente para que esta tenga influencia en la entrada del flujo hacia el ventilador y pueda reducir la potencia en el frenado.

¹⁹ (Palau, Sistemas de ventilación, pp7, 2012)

Normalmente, los ventiladores con alabes de entrada ofrecen un mejor ahorro de energía durante el funcionamiento del ventilador en condiciones de carga parcial, en contraposición a los ventiladores con dampers en la carcasa operando en condiciones similares. Los alabes de entrada proporcionan un mejor control con un óptimo ahorro de energía en comparación con otros dampers.

Los dampers de descarga, cuando son usados para controlar el flujo de aire, se utilizan para mejorar la distribución del flujo en la descarga del ventilador. Los dampers de salida provocan una resistencia al flujo de aire y mueven el punto de operación a lo largo de la curva de rendimiento del ventilador. Debido a que no cambian las condiciones del aire de entrada, los dampers de salida no ofrecen ahorros de energía a menos que el punto sea ajustado.

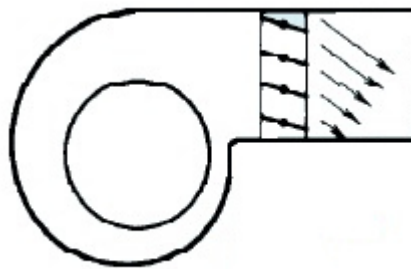


Figura 2.14 Ventilador centrífugo con Damper a la salida
Fuente: Palau, S. Y. (2012).

2.2.20 Rendimiento de un ventilador²⁰

La calidad aérea y mecánica de un ventilador se juzga por su rendimiento, que se define como el cociente entre la potencia utilizada y suministrada

El rendimiento así obtenido es el que emplean los diferentes utilizadores para comparar varios aparatos entre sí. Por el contrario los especialistas y los constructores recurren a rendimientos parciales para comparar aisladamente los diferentes factores que influyen.

En la Figura 2.14 se muestra la curva del rendimiento de un ventilador.

²⁰ (Serna, 2011)

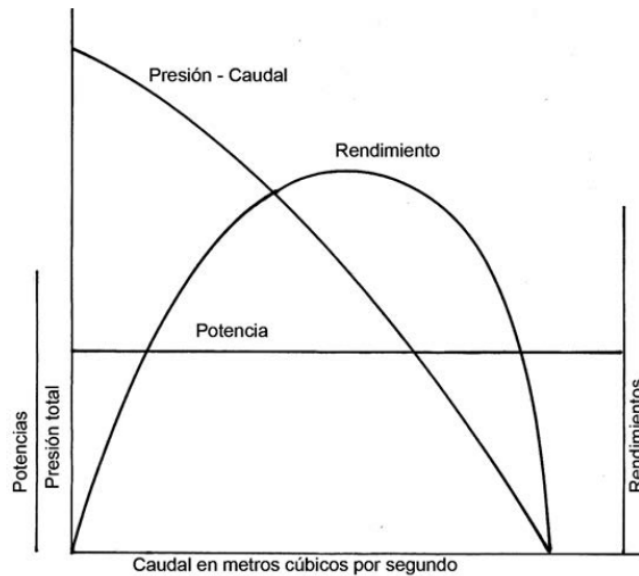


Figura 2.15 Curva de rendimiento del ventilador

Fuente: Serna, J. L. (2011).

2.2.21 Análisis económico

En esta parte se utiliza herramientas financieras como es el VAN (Valor Actual Neto) y el TIR (Tasa Interna de Retorno), para determinar si es factible económicamente y en qué tiempo se recupera la inversión

Valor Presente Neto VAN²¹

El Valor Presente Neto (VPN) es el método más conocido a la hora de evaluar proyectos de inversión a largo plazo. El Valor Presente Neto permite determinar si una inversión cumple con el objetivo básico financiero: MAXIMIZAR la inversión. El Valor Presente Neto permite determinar si dicha inversión puede incrementar. Ese cambio en el valor estimado puede ser positivo, negativo o continuar igual. Si es positivo significará que el valor de la firma tendrá un incremento equivalente al monto del Valor Presente Neto. Si es negativo quiere decir que la firma reducirá su riqueza en el valor que arroje el VPN. Si el resultado del VPN es cero, la empresa no modificará el monto de su valor.

²¹ (negocios, 2012)

La fórmula que se emplea para el cálculo del VAN es la siguiente:

$$VAN = \sum_{t=0}^{t=n} (It - Et) \frac{1}{(1+i)^n} \quad (13)$$

De dónde:

Et = Egresos totales.

It = Ingresos totales.

$\frac{1}{(1+i)^n}$ = Factor de actualización

Tasa Interna de Retorno

La TIR es la tasa de descuento (TD) de un proyecto de inversión que permite que el BNA sea igual a la inversión (VAN igual a 0). La TIR es la máxima TD que puede tener un proyecto para que sea rentable, pues una mayor tasa ocasionaría que el BNA sea menor que la inversión (VAN menor que 0).

Entonces para hallar la TIR se necesitan:

- tamaño de inversión.
- flujo de caja neto proyectado.
- La ecuación de la TIR es la siguiente:

$$0 = \sum_{t=0}^{t=n} (It - Et) \frac{1}{(1+i)^n} \quad (14)$$

Periodo de recuperación de la inversión PRI²²

Mide en cuanto tiempo se recuperará el total de la inversión a valor presente, es decir, nos revela la fecha en la cual se cubre la inversión inicial en años, meses y días, para calcularlo se utiliza la siguiente Fórmula:

²² (Eugene, 2001)

$$PRI = a + \frac{(b-c)}{d} \quad (15)$$

Donde:

a = Año inmediato anterior en que se recupera la inversión.

b = Inversión Inicial

c = Flujo de Efectivo Acumulado del año inmediato anterior en el que se recupera la inversión.

d = Flujo de efectivo del año en el que se recupera la inversión.

CAPITULO III METODOLOGIA

3.1. Diseño de la investigación

Se refiere a los tipos de investigación que se utiliza, para dar solución al problema, “alto consumo de energía eléctrica en el banco de pruebas del motor – ventilador centrífugo”, localizado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas y control Industrial del ITSA.

3.2. Técnicas e Instrumentos

Dentro de las técnicas e instrumentos de recolección de información que se utiliza en el trabajo de investigación, se tiene la observación y la ficha técnica.

3.2.1. Observación

Mediante esta técnica de investigación se puede determinar los componentes que forman parte en el banco de pruebas del motor – ventilador centrífugo, que se encuentra en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas y Control Industrial del ITSA, los mismos que se muestran en la Figura 3.1

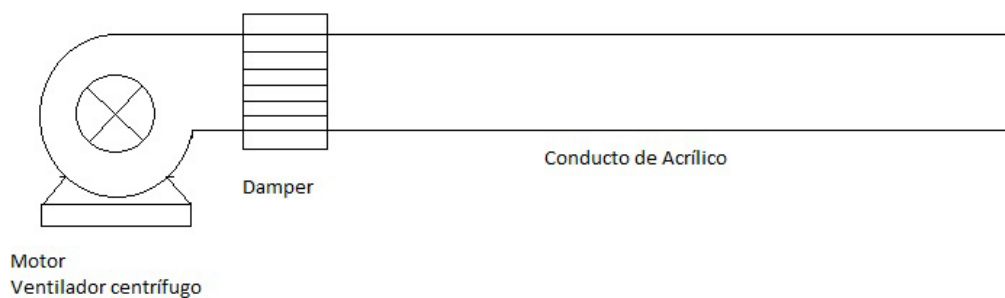


Figura 3.1 Banco de pruebas motor – ventilador
Fuente: El Autor

3.2.2. Ficha Técnica

Con la utilización de la ficha técnica se obtiene las características eléctricas del ventilador centrífugo y motor trifásico, así como las del conducto de acrílico, dicha información es importante, para conocer cuál es la potencia nominal del

motor trifásico, según los datos de la placa. Las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3, muestran toda esta información.

Tabla 3.1 Características del Motor Trifásico

MARCA	SIEMENS
Motor trifásico A.C.	1LA3063 - 4AB 90 – ZA11
IEC	63
IP	44
V - Y	220/380
Corriente (A)	1.23/0.71
Potencia (kW)	0.21
Cos ϕ	0.73
Frecuencia (Hz)	60
Velocidad (RPM)	1.630

Fuente: El Autor

Tabla 3.2 Características del Ventilador Centrífugo

Modelo	ACT 32544
Diámetro exterior	120mm
Ancho	52mm
Diámetro del eje	9mm

Fuente: El Autor

Tabla 3.3 Características del Conducto de acrílico

Diámetro exterior	80mm
Diámetro interior	74mm
Espesor	3mm
Longitud	700mm
Máxima temperatura	82°C

Fuente: El Autor

3.3. Operacionalización de las variables

Tabla 3.4 Operacionalización de las variables

VARIABLE INDEPENDIENTE: Eficiencia Energética

Concepto	Categoría	Indicadores	Item	Técnicas	Instrumentos
La eficiencia energética es el consumo inteligente de la energía.	Portadores energéticos	Consumo de energía eléctrica del motor	kWh	Medición	Vatímetro
		Consumo de energía eléctrica del banco de pruebas	kWh	Medición	Vatímetro
	Dimensión del motor	Eficiencia del motor	%	Cálculos	Ecuaciones
		Eficiencia del Banco de Pruebas	%	Cálculos	Ecuaciones

VARIABLE DEPENDIENTE: Consumo de energía eléctrica

Concepto	Categoría	Indicadores	Item	Técnicas	Instrumentos
Es el gasto total de energía eléctrica para realizar un proceso determinado	Perdidas de potencia	Potencia	kW	Medición	Vatímetro
	Potencia útil	Potencia	kW	Cálculos	Ecuaciones
	Prefactibilidad	Costo	\$	Cálculos	Ecuaciones

Fuente: El Autor

3.4. Modalidad de investigación

3.2.1. De Campo

Esta técnica permite obtener información primaria, como es el caso de las mediciones de voltaje y corriente que consume el motor conectado al ventilador centrífugo, así como también el flujo de aire a la salida del ventilador y de la tubería, cuando se varía el flujo a través de un Damper y por medio del variador de frecuencia.

3.2.2. Bibliográfica Documental

Sirve para conocer el procedimiento de obtención del punto de trabajo, la curva característica del ventilador, curva de potencia, etc, también se obtuvo información para determinar la función de transferencia del banco de pruebas, utilizando la librería de Matlab “Identificador de Sistemas”, el diseño del controlador PID, se lo realiza utilizando Simulink .

3.2.3. Modelación y simulación

Se utiliza para determinar la función de transferencia del sistema variador de frecuencia, motor trifásico, ventilador centrífugo y tubería, para el posterior diseño del sistema de control de velocidad del motor, la sintonización del controlador PID se lo realiza mediante el criterio de Ziegler y Nichols.

3.5. Tipos de Investigación

3.2.1. Experimental

3.5.1.1. Curva Característica

En esta etapa de la investigación lo primero que se va a realizar es la determinación de la curva característica del ventilador centrífugo con álabes hacia adelante, para encontrar el punto de trabajo.

Se realiza es la obtención de la curva característica del sistema (conducto de acrílico), para lo cual se necesita medir la presión dinámica en tres puntos del conducto de acrílico, en los extremos y en el centro y luego se determina el promedio de las mediciones, el instrumento que se utiliza es el manómetro en forma de U, cuya indicación es en mm.c.d.a (milímetros de columna de agua), como muestra la Figura 3.2

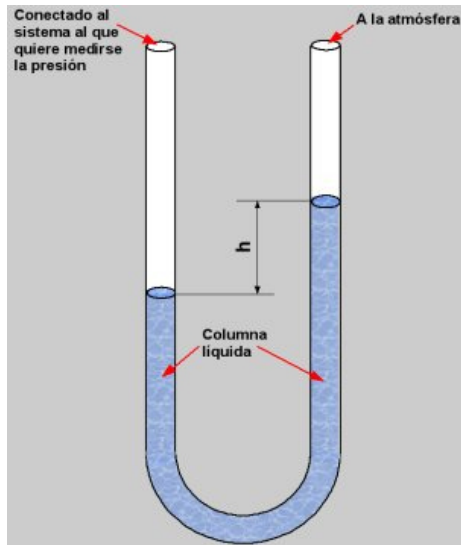


Figura 3.2 Manómetro en forma de U
Fuente:

Para la medición de presión estática, dinámica y total se utiliza un manómetro en forma de U como indica la Figura 3.3

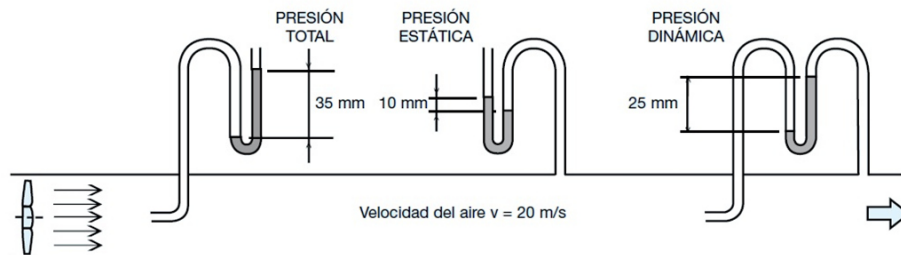


Figura 3.3 Medición de presiones estática, dinámica y total
Fuente: Ecodia, S. (2010).

El procedimiento para obtener la curva característica del sistema es:

- Cerrar el Damper completamente
- Medir la presión dinámica con el manómetro en forma de U en los extremos y en el centro del conducto de acrílico
- Obtener el promedio de las tres mediciones.
- Abrir el Damper a 20%, 40%, 60%, 80% y 100% y repetir los tres pasos anteriores.



Figura 3.4 Obtención de presión dinámica a la salida del sistema
Fuente: Laboratorio de Máquinas Eléctricas

El Caudal se determina con la siguiente fórmula:

$$Q = 3600 * V * S \quad \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (16)$$

Donde V es la velocidad del aire y se determina con la fórmula 11:

Pd: es la Presión dinámica y se determina con la siguiente equivalencia:

$$1mm \text{ c. d. a} = 10Pa$$

S: es la sección del conducto y se determina con:

$$S = \pi r^2 \quad (17)$$

Como el diámetro del conducto es de 74 mm, entonces el radio es 37mm

Para determinar la curva característica del ventilador se realiza el siguiente procedimiento:

- Se cierra el Damper completamente
- Se mide la presión estática a la salida del ventilador, como muestra la Figura 3.3

- Abrir el Damper a 20%, 40%, 60%, 80% y 100% y repetir los tres pasos anteriores



Figura 3.5 Obtención de presión estática
Fuente: Laboratorio de Máquinas Eléctricas

Con la ayuda de Matlab se realiza la interpolación cúbica de las curvas características del ventilador y el sistema y luego se determina el Punto de Operación (Q).

3.5.1.2. Obtención de Potencia eléctrica del motor con Damper

Para la determinación de la potencia eléctrica que consume el motor, cuando está conectado el ventilador centrífugo, damper y conducto de acrílico, se mide la corriente en una de las fases y el voltaje entre las dos fases, para luego aplicar la siguiente fórmula:

$$Potencia = \sqrt{3} * V * I * \cos\theta \quad (18)$$

Para este caso, $\cos\theta$ representa el factor de potencia (FP) y es igual a 0.73, se realiza cinco ensayos para 20, 40, 60, 80 y 100% de salida del Damper y los datos obtenidos se almacenan en una tabla y posteriormente se realiza el promedio de los datos obtenidos, para el análisis respectivo.

3.5.1.3. Obtención de Potencia eléctrica del motor con variador de frecuencia Sinamics G110

Para este paso se conecta el motor eléctrico al variador de frecuencia Sinamics G110, mediante el Panel de Operación Básica (BOP), se configura los parámetros de acuerdo a las características que tiene la placa del motor, como muestra la Figura 3.6.

El variador de frecuencia Sinamics G110, sólo cuenta con el modo de control V/f lineal, o conocido como control Escalar, que permite variar la frecuencia de 0 a 60 Hz, en función de la variación del voltaje de entrada de 0 a 10V

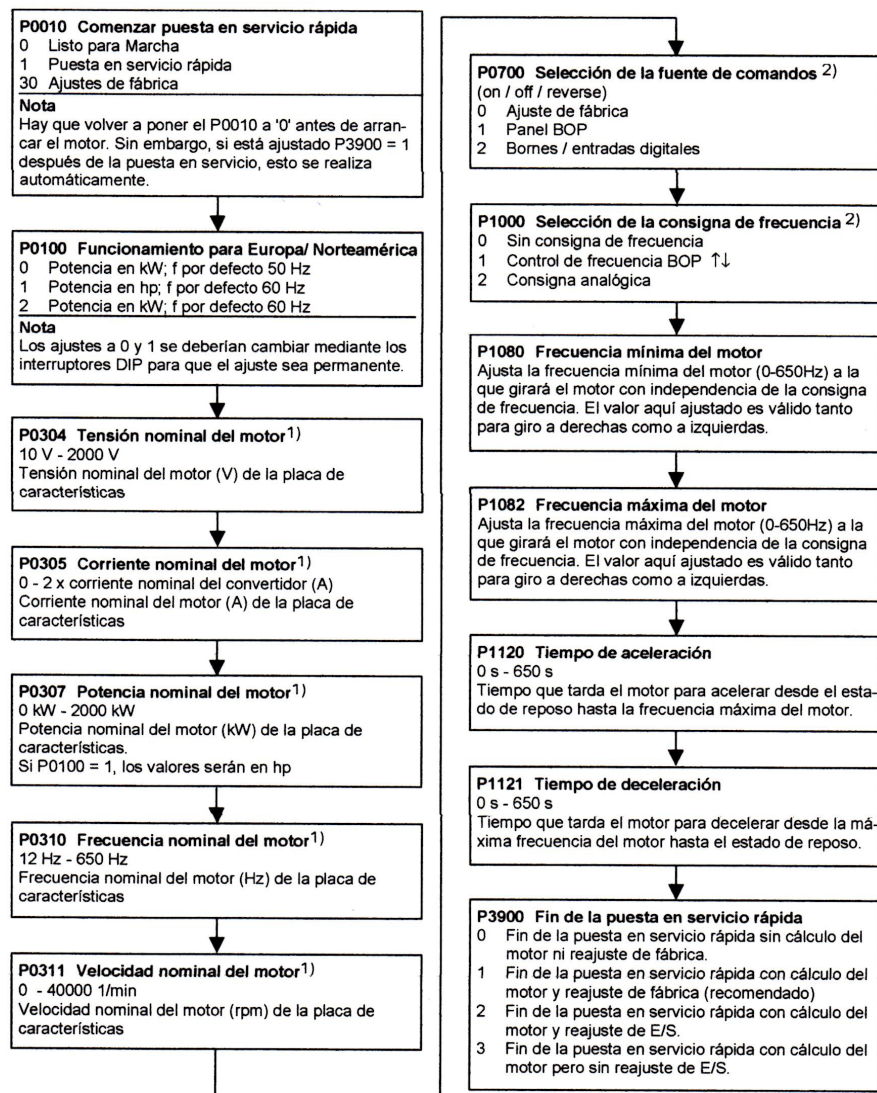


Figura 3.6 Parámetros de configuración para el variador G110
Fuente: Manual de Operación

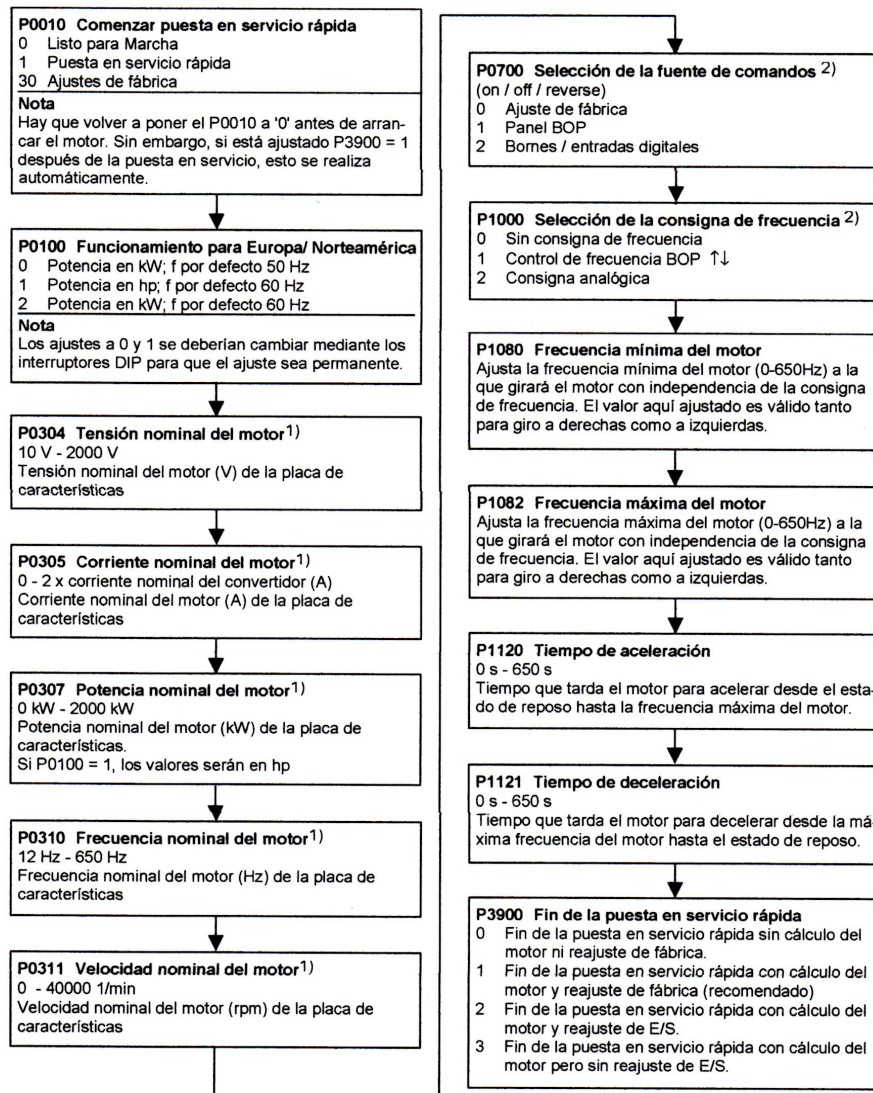


Figura 3.7 Parámetros de Configuración del Micro Master 440
Fuente: Manual de Operación

3.5.1.5. Obtención de Potencia eléctrica con el modo de control V/f Lineal

En el parámetro de configuración P1300 se coloca el valor de 0 que viene por defecto y se mide 5 veces la corriente en una de las fases y el voltaje en las dos, para diferentes porcentajes de caudal, luego se determina la potencia eléctrica, los datos se almacene en una tabla y posteriormente se determina el promedio de los datos obtenidos en cada ensayo.

3.5.1.6. Obtención de Potencia eléctrica con el modo de control V/f lineal con control de flujo de corriente

En el parámetro de configuración P1300 se coloca el valor de 1 y se realiza los pasos detallados en el numeral 3.5.1.5

3.5.1.7. Obtención de Potencia eléctrica con el modo de control V/f cuadrático

En el parámetro de configuración P1300 se coloca el valor de 2 y se realiza los pasos detallados en el numeral 3.5.1.5

3.5.1.8. Obtención de Potencia eléctrica con el modo de control Economizador de energía

En el parámetro de configuración P1300 se coloca el valor de 4 y se realiza los pasos detallados en el numeral 3.5.1.5

3.5.1.9. Obtención del Rendimiento

Para la determinación del rendimiento se utiliza los datos que se obtienen en los ítems anteriores y se aplica la siguiente fórmula:

$$\eta_v = \frac{P_t \cdot Q}{Pot_v} \quad (19)$$

Donde P_t : representa la presión total

Q : el caudal.

Pot_v : potencia que consume el ventilador

Se grafica la curva rendimiento en función de la potencia eléctrica que consume el ventilador para posteriormente realizar el análisis

3.5.1.10. Obtención de la Función de Transferencia

La determinación de la función de transferencia del proceso es muy importante, ya que con esta información se realiza la modelación del controlador PID y su respectiva sintonización.

Para obtener la función de transferencia se debe considerar los siguientes pasos:

- Identificar la señal de entrada y salida del proceso.
- Graficar los datos anteriores en Excel.
- Interpolar la gráfica y obtener la ecuación de la misma.
- Validar la ecuación utilizando Matlab.
- Utilizar el asistente para Identificar sistemas de Matlab e importar los datos.
- Estimar la función de transferencia hasta un valor cercano al 100%

3.5.1.11. Modelamiento del controlador PID

Utilizando Simulink, se elabora el modelo en lazo cerrado para el banco de pruebas motor – ventilador centrífugo, el mismo que debe tener los siguientes componentes:

- Señal de entrada
- Punto suma para la realimentación
- Controlador PID
- Función de transferencia del proceso.
- Realimentación unitaria

3.5.1.12. Sintonización del controlador

Para sintonizar el controlador PID se utiliza el segundo método de Ziegler y Nichols, que es el método de oscilación cuyo procedimiento es el siguiente:

- Incrementar la ganancia proporcional desde 1 hasta que la señal de salida sea oscilatoria.
- Registrar el valor de ganancia que ocasiona la salida oscilatoria.
- Determinar el periodo de las oscilaciones.
- Determinar los valores de K_p , T_i , T_d .

CAPITULO IV
ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza la presentación de los datos obtenidos para la determinación de la curva característica del ventilador y el sistema, la potencia eléctrica cuando se controla el flujo de aire utilizando Damper y cuando se conecta al motor los variadores de frecuencia Sinamics G110 y Mocromaster 440, el rendimiento y la modelación matemática de la función de transferencia del banco de pruebas para el posterior diseño y simulación del controlador PID.

4.1. Presión a la salida del ventilador

Con la ayuda del manómetro en forma de U, se obtuvo los datos de Presión estática (P_e) obtenidos a la salida del ventilador, a distintos porcentajes de apertura del Damper y considerando 5 ensayos, para verificar que las mediciones no cambien notablemente. La Tabla 4.1, muestra la Presión estática (P_e), dinámica (P_d) y total (P_t), así como el caudal expresado en (m^3/h).

Tabla 4.1 Presión estática a la salida del ventilador

DAMPER	PRESION (Pa)			Caudal (Q)
	Pt	Pe	Pd	(m^3/h)
100%	30	10	120	630,98
80%	40	24	108	598,60
60%	60	48	84	527,91
40%	88	84	44	382,08
20%	100	98	18	244,38
0%	102	102	0	0,00

Fuente: El Autor

Con los datos de la Tabla 4.1 se grafica la presión estática y total en función del Caudal, como muestra la Figura 4.1

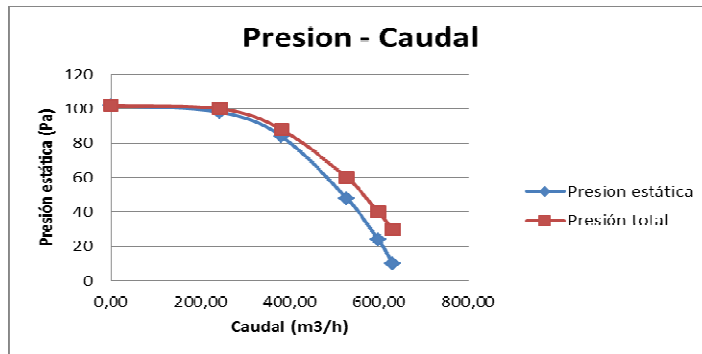


Figura 4.1 Curva Presión estática – %Caudal
Fuente: El Autor

Análisis de datos: Cuando el Damper que se encuentra conectado a la salida del ventilador se encuentra completamente cerrado se obtiene el máximo valor de la Presión estática y conforme se regula la salida del Damper para que se incremente el Caudal de aire, la Presión estática tiende a disminuir; dicha presión se encuentra expresada en Pascales (Pa), debido a que el ventilador es solo de 210w, por esta razón se utilizó un manómetro en forma de U cuya medida de presión está representada en milímetros de columna de agua (mmcda), y 1mm c.d.a = 10 Pa

4.2. Presión a la salida del Sistema

En la Tabla 4.2 se presenta el promedio de las mediciones de la presión dinámica considerando 3 puntos del conducto de acrílico (extremos y centro) y cinco ensayos para distintos valores de caudal.

Tabla 4.2 Presión a la salida del sistema

DAMPER	PRESION (Pa)			Caudal (m3/h)
	PT	PE	PD	Q
100%	118	10	108	598,60
80%	86	10	76	502,15
60%	68	10	58	438,67
40%	48	10	38	355,07
20%	28	10	18	244,38
0%	10	10	0	0,00

Fuente: El Autor

A continuación se muestra la gráfica que relaciona la potencia dinámica en función del Caudal, expresado en m³/h

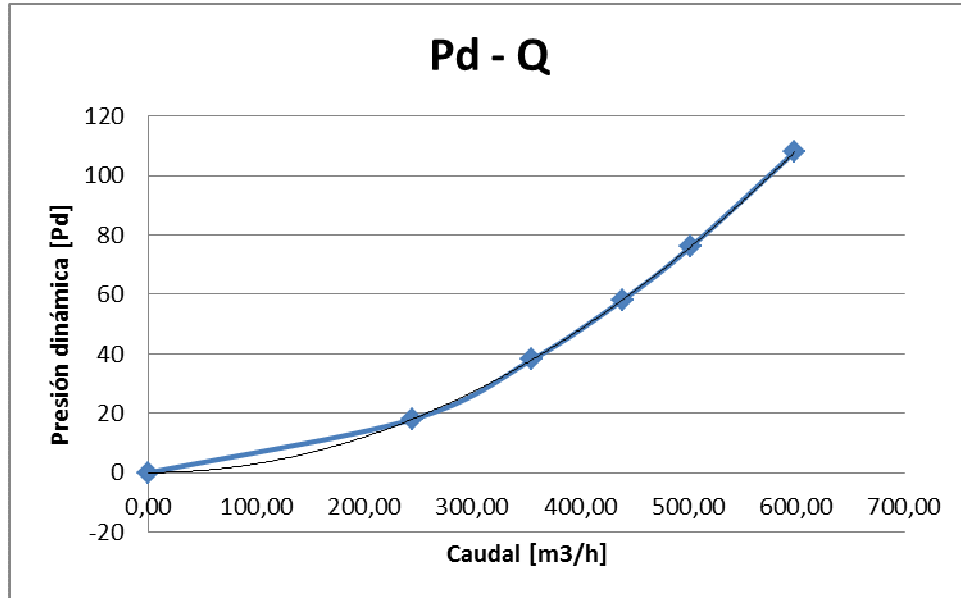


Figura 4.2 Curva Presión dinámica – Caudal

Fuente: El Autor

Análisis de datos: Cuando el Damper que se encuentra conectado a la salida del ventilador se encuentra completamente cerrado la Presión dinámica es igual a cero y conforme se regula la salida del mismo para que se incremente el Caudal de aire, la Presión dinámica tiende a incrementar. Cuando el Damper se encuentra abierto al 100% la Presión dinámica es igual a 118 Pascales (Pa) y el Caudal es de 598,60 m³/h

4.3. Punto de Trabajo

Utilizando Matlab se ingresa los datos de las presiones estática y dinámica obtenidos en el numeral 4.1 y 4.2 respectivamente, para obtener el punto de trabajo, como muestra la Figura 4.3

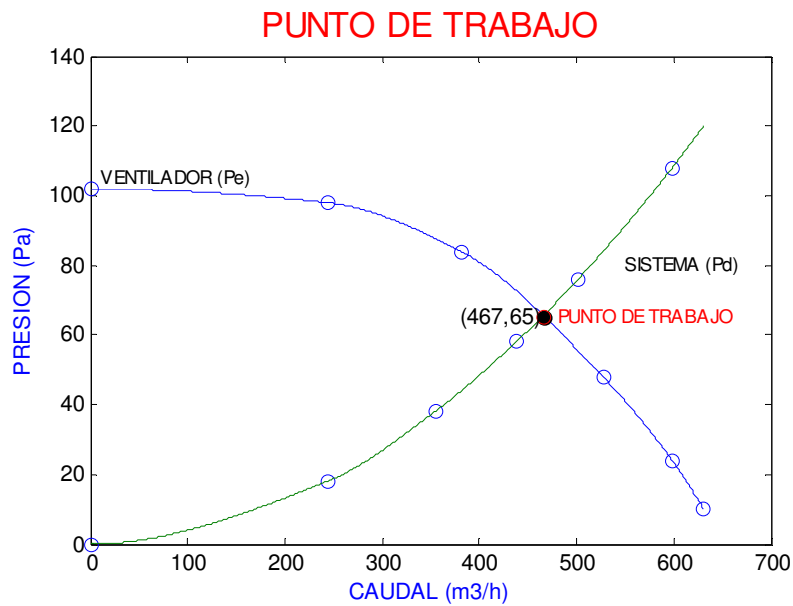


Figura 4.3 Punto de Trabajo
Fuente: El Autor

Análisis de datos: Con el conjunto ventilador centrífugo y conducto de acrílico de aproximadamente 70cm, la presión estática que debe existir a la salida del ventilador es de 65Pa, lo que producirá un caudal de aproximadamente 467 m³/h, lo que indica que el motor no debe trabajar al 100% de su potencia nominal, más adelante se determinará según el punto de trabajo cual es la potencia adecuada.

4.4. Obtención de Potencia Eléctrica del motor con DAMPER

La Tabla 4.3 presenta el promedio de las mediciones de corriente y voltaje realizadas para distintos valores de caudal, considerando que se realizaron 5 ensayos para cada uno.

Tabla 4.3 Potencia eléctrica que consume el motor con Damper

Caudal (m ³ /h)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (w)
598,6	0,58	216	158,22
502,15	0,53	216	144,58
438,67	0,5	216	136,39
355,07	0,47	216	128,21
244,38	0,45	216	122,75
0	0,42	216	114,57

Fuente: El Autor

La Figura 4.4 presenta la curva Potencia versus caudal.

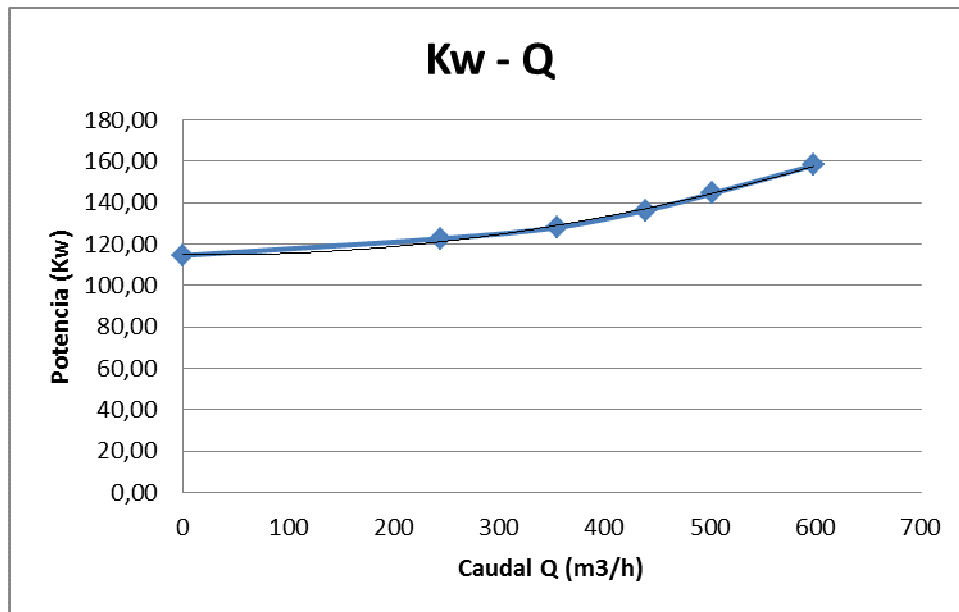


Figura 4.4 Potencia eléctrica – Caudal
Fuente: El Autor

Análisis de datos: La gráfica anterior muestra claramente que el banco de pruebas del ventilador centrífugo consume una potencia de 14.57W a pesar de que no existe Caudal de aire, ocasionando un consumo innecesario de energía eléctrica y cuando el Damper se encuentra abierto al 100% la potencia eléctrica es aproximadamente igual a 158.22W. De estos dos valores se toma el promedio que es 137W.

Si se utiliza el banco de pruebas por un lapso de 4 horas diarias durante los cinco días a la semana, los días aproximados en el año será 252 y el total de horas anuales es 1008 horas

El consumo de energía anual del banco de pruebas utilizando Damper y trabajando el motor a la potencia requerida es:

$$\text{Energía} = 137\text{W} * 1008\text{h} = 138.1\text{kWh}$$

El Laboratorio de Control Industrial y Máquinas Eléctricas, tiene la necesidad de implementar 10 bancos de prueba, entonces la energía anual consumida sería 1380.9 kWh

4.5. Obtención de Potencia Eléctrica con variador de frecuencia Sinamics G110

Para este paso se conectó el motor eléctrico al variador de frecuencia Sinamics G110 y se configuró los parámetros de acuerdo a las características que tiene la placa del motor, como muestra la siguiente Tabla 4.4

Tabla 4.4 Parámetros de configuración del Sinamics G110

<i>OPCIONES DE SELECCIÓN</i>	<i>OPCION</i>	<i>OPCIONES DE SELECCION</i>	<i>OPCION</i>
P0010 Puesta en servicio 0= Listo para MARCHA 1= Puesta en servicio rápida 2= Ajuste de fábrica	1	P0700 Fuente de ordenes 0= Ajuste de fábrica 1= Panel BOP 2= Bornes/ Terminales	1
P0100 Europa/ Norteamérica 0= Potencia KW; f por defecto 50 Hz 1= Potencia hp; f por defecto 60 Hz 2= Potencia KW; f por defecto 60 Hz	2	P1000 Selección de frecuencia 0= Sin consigna de frecuencia 1= Consigna frecuencia desde BOP 2= Consigna Analógica 3= Consigna de frecuencia fija	1
P0304 Tensión normal del motor (V) 10-220V Tensión propia del motor tomada de la placa de características	220	P1080 Frecuencia min. Del motor Ajuste mínimo de frecuencia del motor, el valor ajustado aquí es para giro horario y anti horario.	0
P0305 Corriente nominal del motor (A) Corriente nom. del motor tomada de la placa de características	1.23	P1082 Frecuencia máx. Del motor Ajuste máximo de frecuencia del motor, el valor ajustado aquí es para giro horario y anti horario	60
P0307 Potencia nominal del motor (kW) Potencia nom. del motor tomada de la placa de características	0.21	P1120 Tiempos de aceleración Tiempo que lleva el motor acelerar de la parada a la frecuencia máxima ajustada.	5

P0310 Frecuencia nominal del motor (Hz) Frecuencia nom. del motor tomada de la placa de características	60	P1121 Tiempos de desaceleración Tiempo que lleva el motor desacelerar de la frecuencia máxima del motor a la parada.	5
P0311 Velocidad nominal del motor (rpm) Velocidad nom. del motor tomada de la placa de características	1630	P3900 Fin de puesta en servicio 0= Fin e puesta en servicio 1= Fin de puesta de servicio con calculo motor 2= Fin de puesta en servicio	1

Fuente: El Autor

La Tabla 4.5 presenta el promedio de las mediciones de corriente y voltaje realizadas para distintos valores de caudal, considerando que se realizaron 5 ensayos para cada uno.

Tabla 4.5 Potencia eléctrica que consume el motor con el variador G110

Caudal (m ³ /h)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
598,6	0,56	216	152,76
502,15	0,47	180	106,84
438,67	0,38	170	81,58
355,07	0,34	120	51,53
244,38	0,28	80	28,29
0	0	40	0,00

Fuente: El Autor

La Figura 4.5 muestra la curva que relaciona la potencia eléctrica en función del Caudal, cuando se conecta el variador de frecuencia Sinamics G110

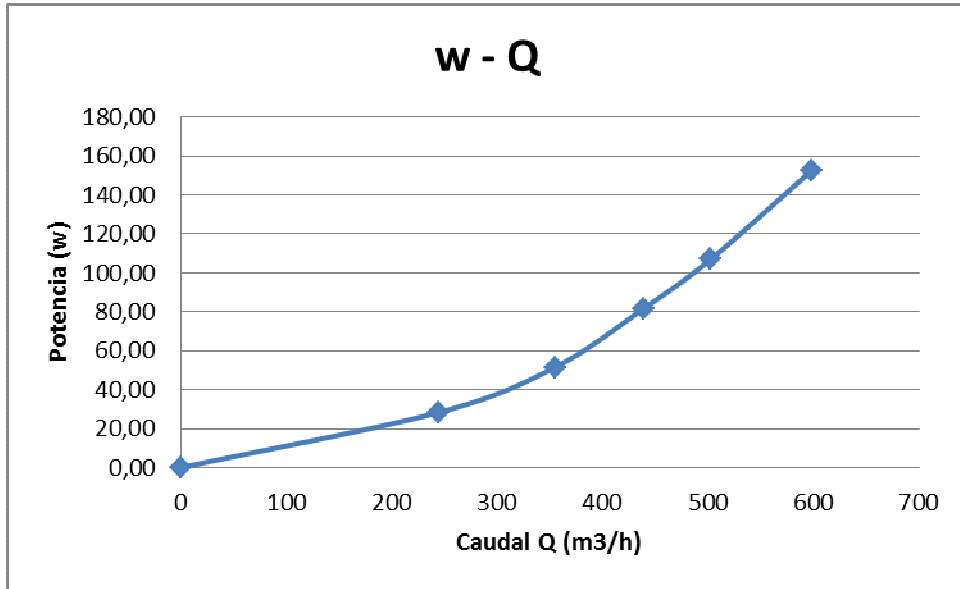


Figura 4.5 Potencia eléctrica – Caudal con variador G110

Fuente: El Autor

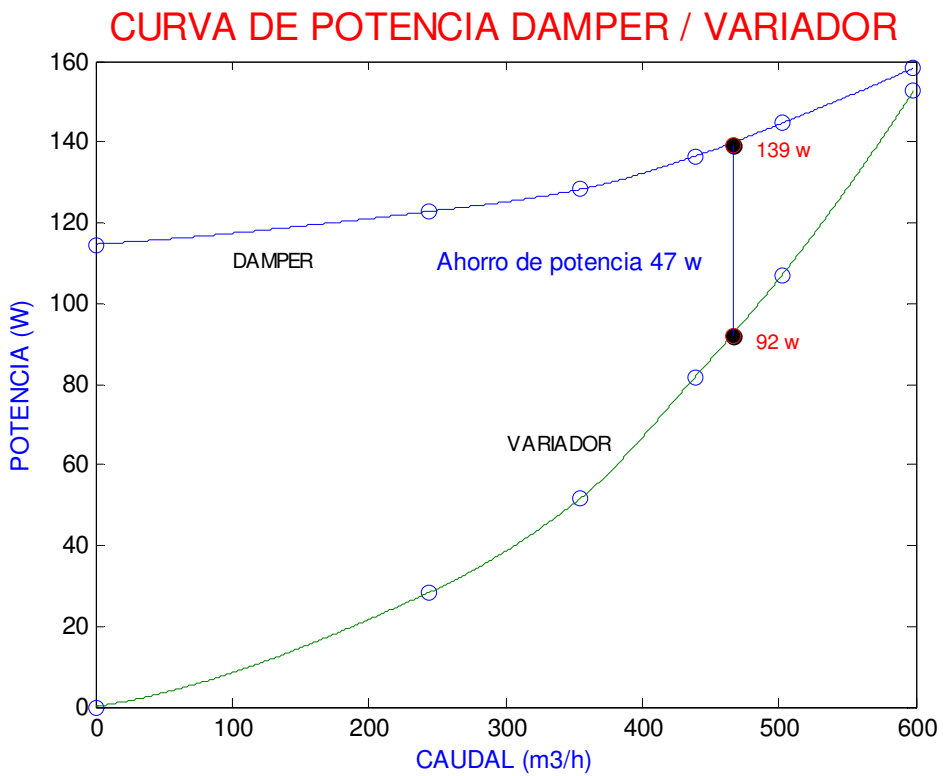


Figura 4.6 Ahorro de Potencia eléctrica con variador G110

Fuente: El Autor

Análisis de datos: El banco de pruebas del ventilador centrífugo al ser reemplazado el Damper por un Variador de Frecuencia Sinamics G110, presenta un ahorro de potencia de 47W, cuando trabaja en el punto de trabajo. Si se multiplica por las 1008 horas al año se obtiene un ahorro de energía de:

Ahorro de Energía anual = $47W \cdot 1008h = 47.37 \text{ kWh}$

Si se implementa 10 bancos de prueba el ahorro de energía anual es: 473 kWh

El consumo de energía en el año cuando se implemente los 10 bancos de prueba será igual a 927.36 kWh

4.6. Obtención de Potencia eléctrica del motor con variador Micromaster 440

Para este paso se conectó el motor eléctrico al variador de frecuencia Micromaster 440 y se configuró los parámetros de acuerdo a las características que tiene la placa del motor, como muestra la siguiente Tabla 4.6

Tabla 4.6 Parámetros de configuración del Micromaster 440

<i>OPCIONES DE SELECCIÓN</i>	<i>OPCION</i>	<i>OPCIONES DE SELECCION</i>	<i>OPCION</i>
P0010 Puesta en servicio 0= Listo para MARCHA 1= Puesta en servicio rápida 2= Ajuste de fábrica	1	P0700 Fuente de ordenes 0= Ajuste de fábrica 1= Panel BOP 2= Bornes/ Terminales	1
P0100 Europa/ Norteamérica 0= Potencia KW; f por defecto 50 Hz 1= Potencia hp; f por defecto 60 Hz 2= Potencia KW; f por defecto 60 Hz	2	P1000 Selección de frecuencia 0= Sin consigna de frecuencia 1= Consigna frecuencia desde BOP 2= Consigna Analógica 3= Consigna de frecuencia fija	1
P0304 Tensión normal del motor (V) 10-220v Tensión propia del motor tomada de la placa de características	220	P1080 Frecuencia min. Del motor Ajuste mínimo de frecuencia del motor, el valor ajustado aquí es para giro horario y anti horario.	0

P0305 Corriente nominal del motor (A) Corriente nom. del motor tomada de la placa de características	1.23	P1082 Frecuencia máx. Del motor Ajuste máximo de frecuencia del motor, el valor ajustado aquí es para giro horario y anti horario	60
P0307 Potencia nominal del motor (KW) Potencia nom. del motor tomada de la placa de características	0.21	P1120 Tiempos de aceleración Tiempo que lleva el motor acelerar de la parada a la frecuencia máxima ajustada.	5
P0310 Frecuencia nominal del motor (Hz) Frecuencia nom. del motor tomada de la placa de características	60	P1121 Tiempos de desaceleración Tiempo que lleva el motor desacelerar de la frecuencia máxima del motor a la parada.	5
P0311 Velocidad nominal del motor (rpm) Velocidad nom. del motor tomada de la placa de características	1630	P3900 Fin de puesta en servicio 0= Fin e puesta en servicio 1= Fin de puesta de servicio con calculo motor 2= Fin de puesta en servicio	1

Fuente: El Autor

4.6.1. Modo de control V/f Lineal

En el parámetro P1300 se coloca 0. En la Tabla 4.7 se presenta el promedio de las mediciones de voltaje y corriente para distintos valores de caudal, considerando que se realizó 5 ensayos.

Tabla 4.7 Potencia eléctrica en modo de control V/f Lineal

Caudal (m3/h)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
598,6	0,28	216	76,93
502,15	0,28	180	63,65
438,67	0,27	138	47,06
355,07	0,26	95	30,95
244,38	0,26	55	17,92
0	0	0	0,00

Fuente: El Autor

4.6.2. Modo de control V/f con control de flujo

En el parámetro P1300 se coloca 1. En la Tabla 4.8 se presenta el promedio de las mediciones de voltaje y corriente para distintos valores de caudal, considerando que se realizó 5 ensayos.

Tabla 4.8 Potencia eléctrica en modo de control V/f con control de flujo

Caudal (m ³ /h)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
598,6	0,25	200	63,15
502,15	0,25	159	50,20
438,67	0,24	121	36,67
355,07	0,24	84	25,46
244,38	0,23	46	13,36
0	0,00	0	0,00

Fuente: El Autor

4.6.3. Modo de control V/f cuadrático

En el parámetro P1300 se coloca 2. En la Tabla 4.9 se presenta el promedio de las mediciones de voltaje y corriente para distintos valores de caudal, considerando que se realizó 5 ensayos.

Tabla 4.9 Potencia eléctrica en modo de control V/f cuadrático

Caudal (m ³ /h)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
598,6	0,27	216	73,65
502,15	0,25	160	50,52
438,67	0,21	109	28,91
355,07	0,18	66	15,00
244,38	0,15	32	6,06
0	0,00	0	0,00

Fuente: El Autor

4.6.4. Modo de control V/f con economizador

En el parámetro P1300 se coloca 4. En la Tabla 4.10 se presenta el promedio de las mediciones de voltaje y corriente para distintos valores de caudal, considerando que se realizó 5 ensayos.

Tabla 4.10 Potencia eléctrica con modo economizador

Caudal (m ³ /h)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
598,6	0,27	212	72,29
502,15	0,25	162	51,15
438,67	0,21	109	28,91
355,07	0,18	64	14,55
244,38	0,15	32	6,06
0	0,00	0	0,00

Fuente: El Autor

En la Figura 4.7 se muestra las curvas de potencia eléctrica en función del caudal, para el ventilador con Damper y cuando se conecta el variador de frecuencia Micromaster 440, para los distintos modo de control.

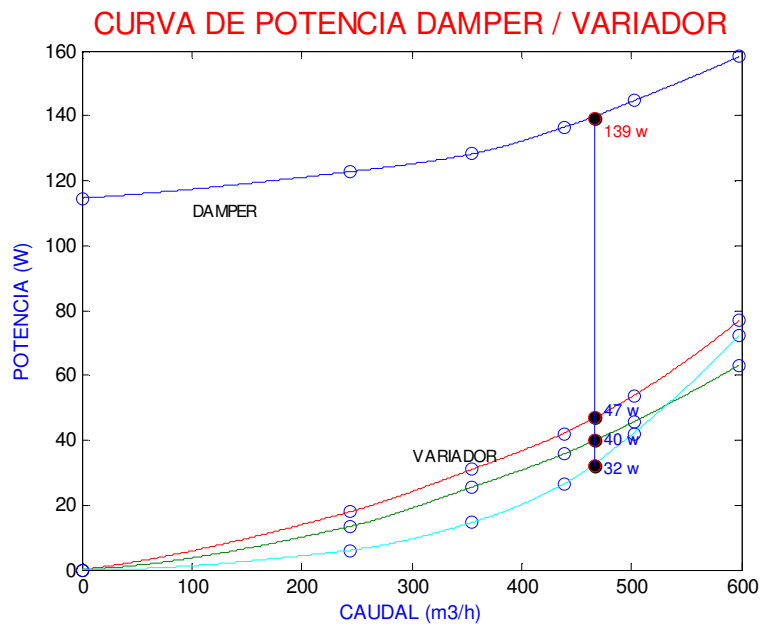


Figura 4.7 Curvas de potencias con el Micromaster 440

Fuente: El Autor

Análisis de datos: En la Figura 4.8 se puede notar claramente que el modo de control más adecuado es el Control V/f cuadrático, debido a que en el punto de trabajo sólo consume 32w, el consumo de energía anual del banco de pruebas con el variador Micromaster 440 es igual a 32.25 kWh

El ahorro de energía en el banco de pruebas al año sería: $(139-32)W * 1008h = 107.85 \text{ kWh}$

Si se implementa 10 bancos el ahorro de energía eléctrica es: 1078.5 kWh

4.7. Función de Transferencia

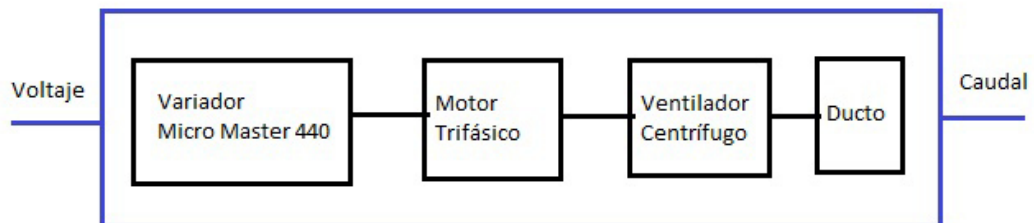


Figura 4.8 Componentes del Banco de pruebas
Fuente: El Autor

Para determinar la función de transferencia se debe identificar la entrada y la salida del proceso, para este caso la entrada es el voltaje y la señal de salida es el Caudal, los datos se muestran en Tabla 4.11

Tabla 4.11 Valores de entrada y salida

Voltaje (V)	Caudal (m3/h)
0	0
2	305,47
4	477,59
6	659,89
8	748,25
10	788,72

Fuente: El Autor

Con los datos de voltaje y caudal se procede a graficarlos para posteriormente encontrar una ecuación que permitirá determinar el comportamiento del caudal en función del voltaje, como se muestra en la Figura 4.9

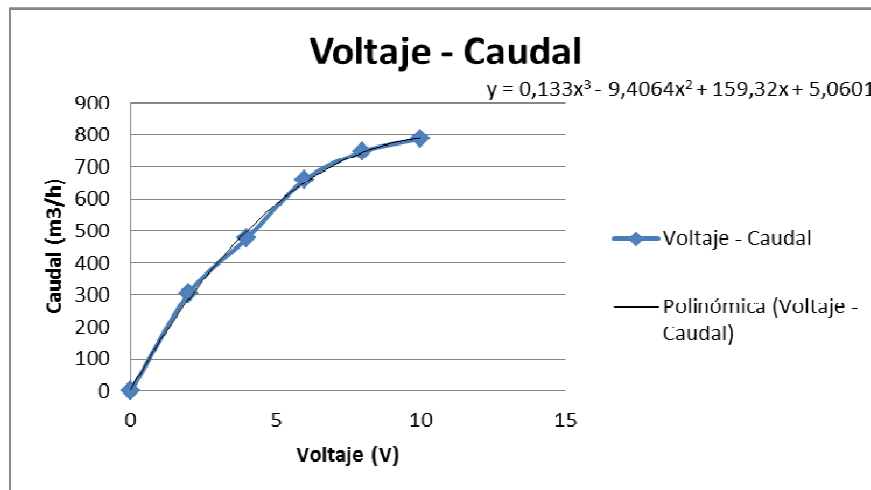


Figura 4.9 Curva Voltaje - Caudal
Fuente: El Autor

Con la ayuda de Matlab se ingresa la ecuación para una variación de x desde 0 a 10, en incrementos de 0.2, se creará 2 vectores con 52 elementos cada uno y luego se grafica los mismos, como se muestra en la Figura 4.10

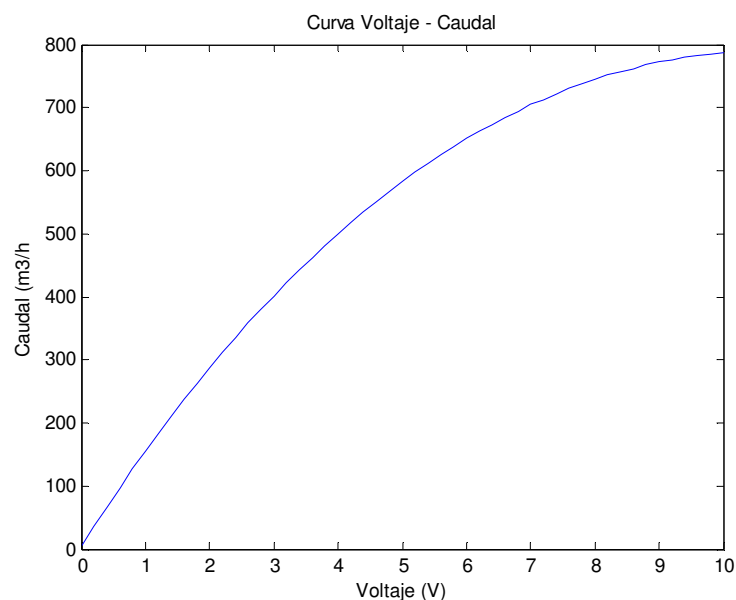


Figura 4.10 Curva Voltaje – Caudal utilizando Matlab
Fuente: El Autor

Una vez validada la ecuación que se obtuvo en Excel, se procede a inicializar el Identificador de Sistemas que contiene Matlab, colocando en la ventana de comandos **ident** y aparecerá una ventana como la de la Figura 4.11

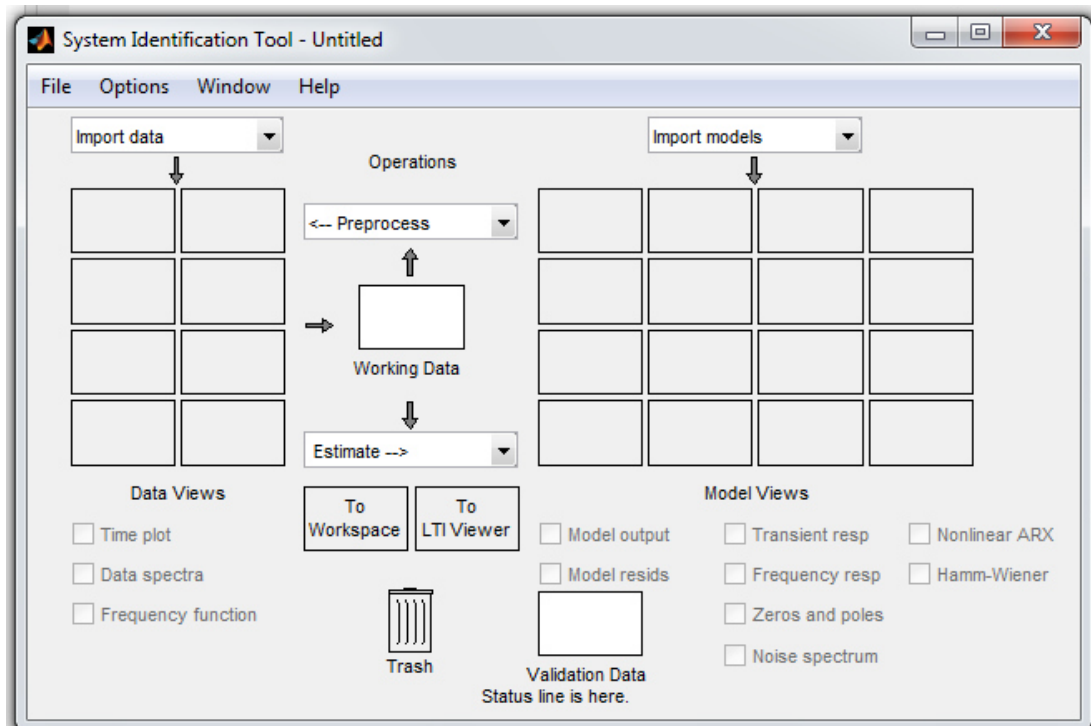


Figura 4.11 Identificador de sistemas
Fuente: El Autor

A continuación se graba los vectores de entrada y salida con el nombre trabajo.mat. Para verificar si los datos se guardaron correctamente, se carga el archivo colocando en la ventana de comandos **load trabajo**

En el archivo trabajo.mat, existen dos vectores, el vector a, representa los valores de entrada y el vector b los valores de salida.

Ahora en la ventana del Identificador de Sistemas, se escoge la opción importar datos en el dominio del tiempo como muestra la Figura 4.12

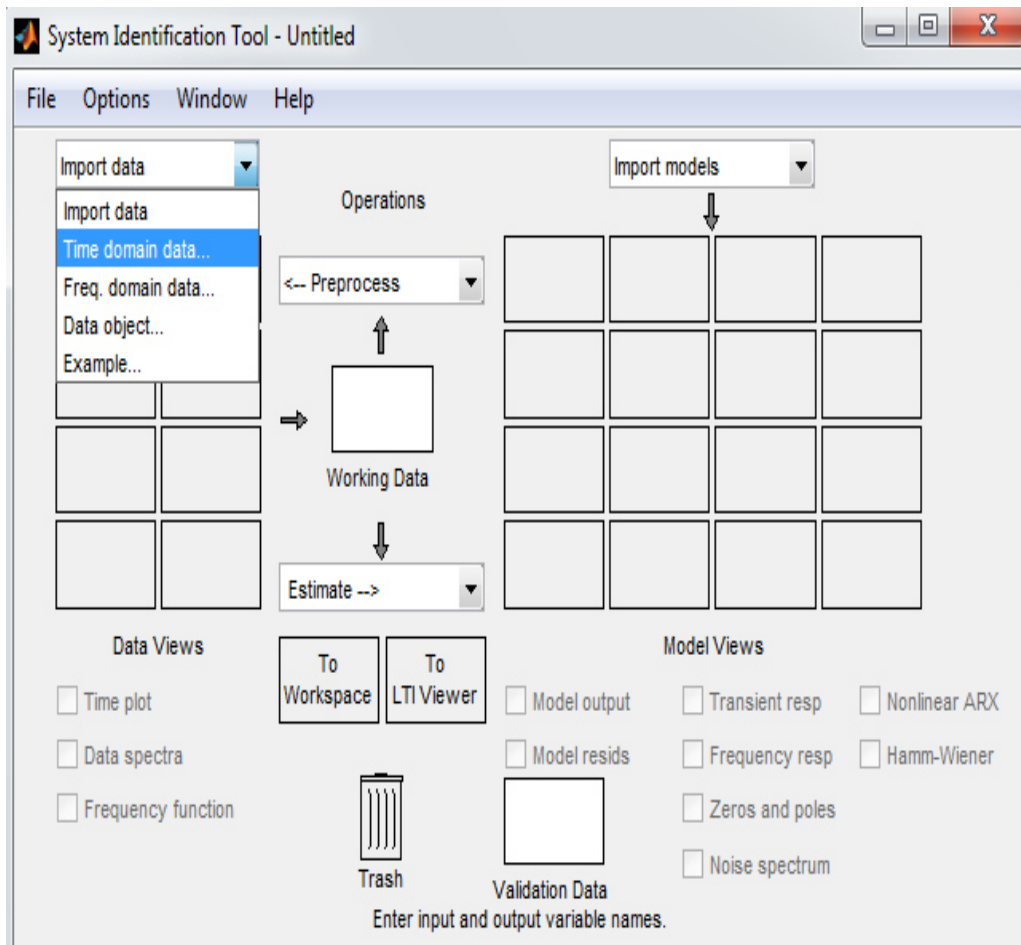


Figura 4.12 Importar Datos al Identificador de Sistemas
Fuente: El Autor

Posteriormente aparece una ventana para definir los parámetros como el vector de entrada y salida, las etiquetas, el tiempo de inicio, tiempo de muestreo y las unidades de las magnitudes que son: voltios y m³/h.

Una vez ingresados todos los datos se presiona el botón **Import** y aparece una ventana en la cual se carga una gráfica con el nombre de los datos que es “**variador**”

Ahora de la pestaña **Estimate**, se escoge la opción **Transfer Function Models**, como muestra la Figura 4.13

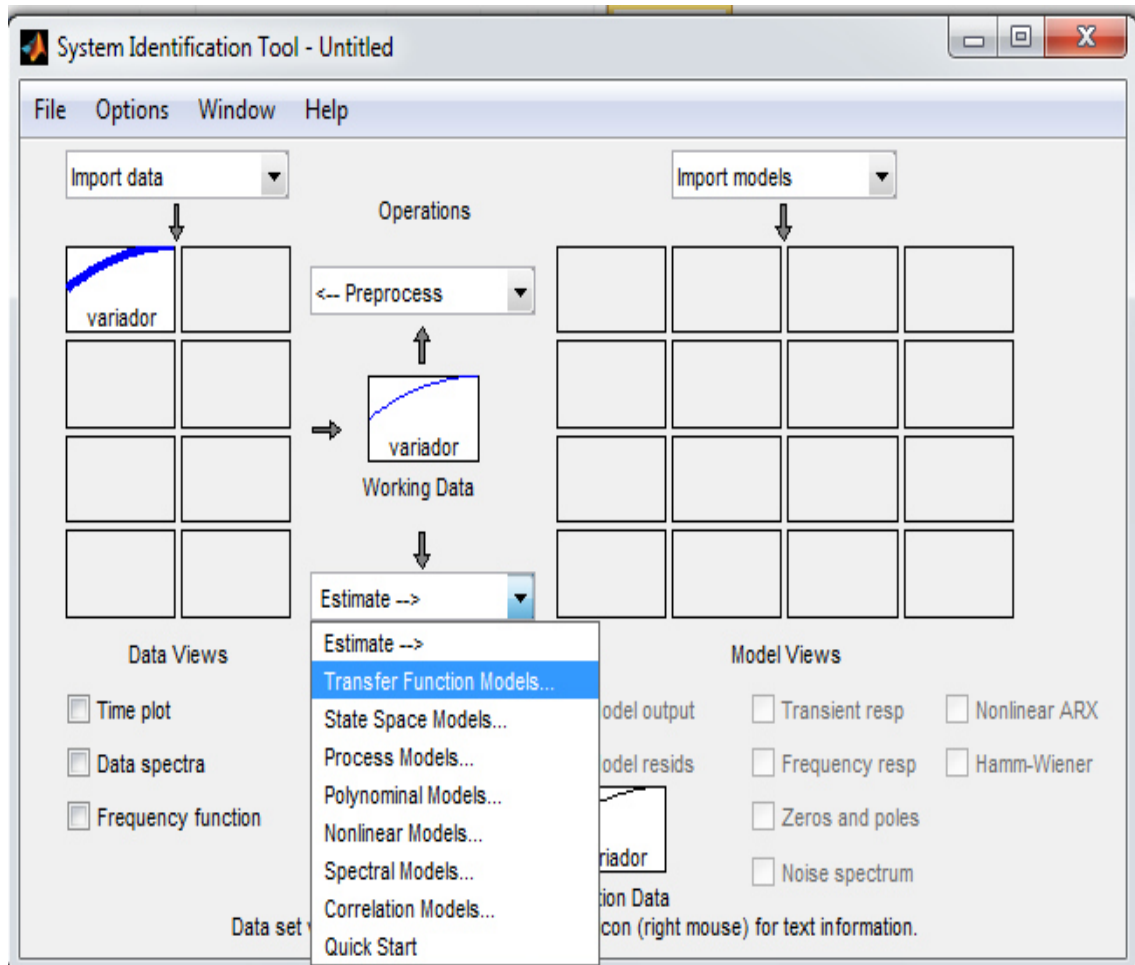


Figura 4.13 Estimación de la Función de Transferencia
Fuente: El Autor

Luego aparece una ventana en la que se debe ingresar las características de la función de transferencia, o sea, el número de ceros y polos. Como la ecuación que se determinó utilizando Excel es un polinomio de grado 3, entonces esto indica que en el denominador de la función de transferencia existe tres raíces o tres polos y se va a considerar solo un cero en el numerador.

Se presiona el botón **Estimate** y aparece una ventana en la que las estimaciones realizadas y el porcentaje de coincidencia con la función de transferencia real

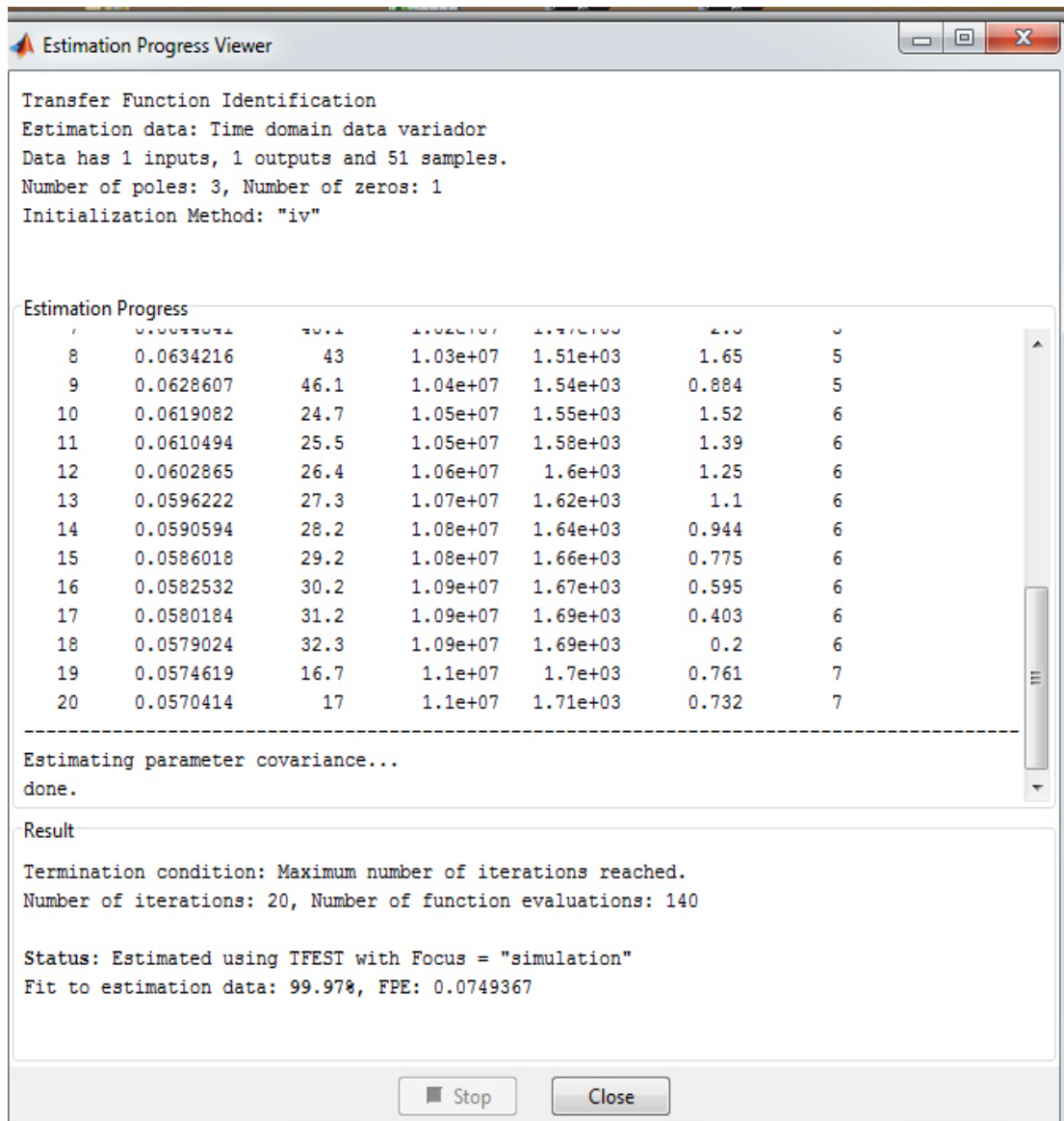


Figura 4.14 Estimación de la Función de Transferencia
Fuente: El Autor

Como se puede apreciar en la Figura 4.14 el porcentaje de estimación es del 99.97%, lo que quiere decir que es casi la Función de Transferencia real. Para que tenga validez la función de transferencia debería ser lo más cercana al 100%, de no ser así, se debe ingresar nuevamente los datos del número de polos y ceros, conociendo el comportamiento dinámico del proceso a utilizar.

La Función de Transferencia se muestra en la Figura 4.15

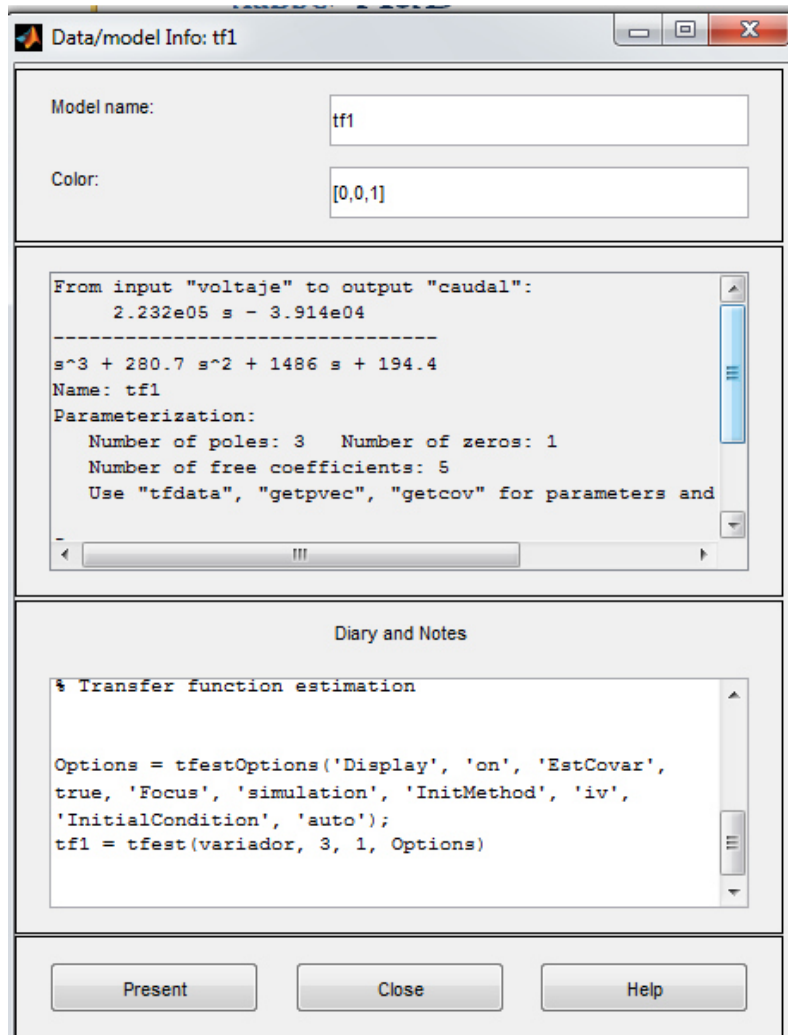


Figura 4.15 Función de transferencia estimada
Fuente: El Autor

Como la Función de Transferencia presenta en el numerador coeficientes numéricos muy altos, se realiza otra estimación en la cual ya no se va a considerar ningún cero

Al estimar la función de Transferencia sin ceros, se tiene un 97.97% de coincidencia con la Función de Transferencia Real. La función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{0.37}{s^3 + 1.8s^2 + 0.45s + 0.16} \quad (20)$$

A continuación se presenta el modelo de salida simulado y en función de las mediciones de voltaje y caudal

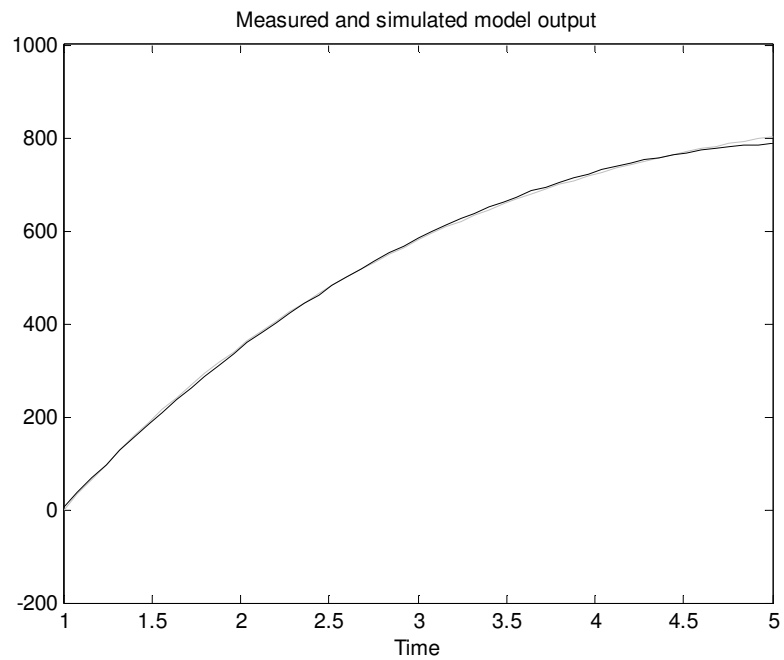


Figura 4.16 Modelos de salida del sistema
Fuente: El Autor

En esta Figura se puede notar claramente la similitud que tiene la función de transferencia obtenida con el Identificador de Sistemas y la real.

La Figura 4.17 presenta la respuesta del sistema en el dominio del tiempo.

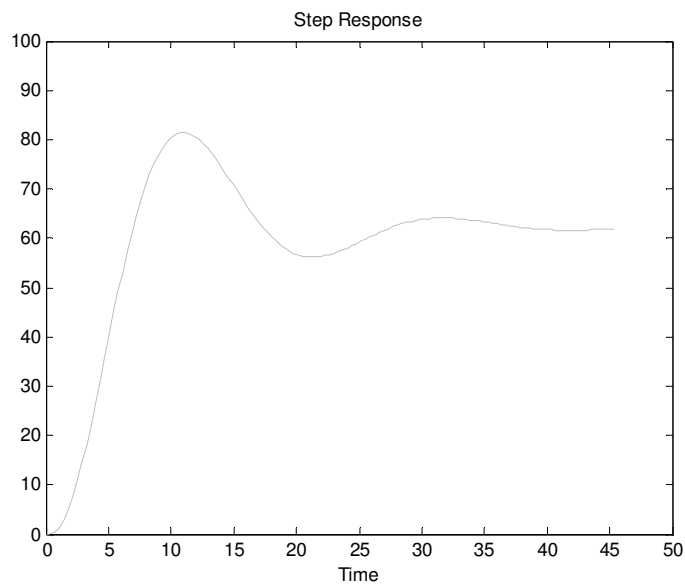


Figura 4.17 Respuesta en el dominio del tiempo
Fuente: El Autor

4.8. Diseño del controlador

Con la función de transferencia determinada, se procede a diseñar el controlador PID utilizando Simulink, como muestra la Figura 4.18

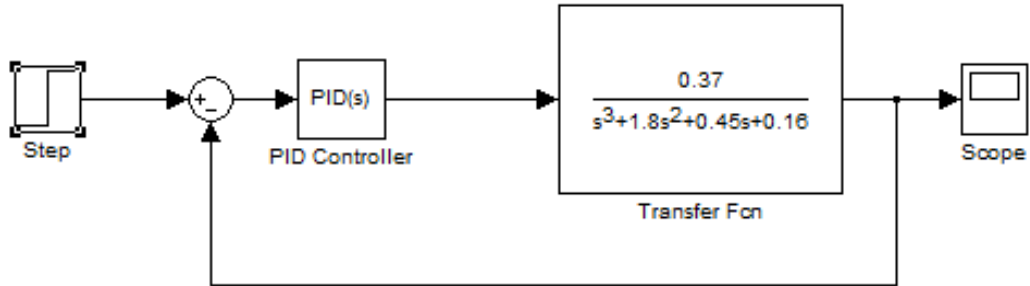


Figura 4.18 Diseño del controlador PID
Fuente: El Autor

Ahora el siguiente paso es la sintonización del control PID, utilizando el método de Zieglers y Nichols.

Primero: Como la ganancia de la función de transferencia es 10.37 y si se agrega más ganancia proporcional el sistema se volverá inestable, por lo que se colocará ganancias menores que 1, por ejemplo 0.1, como muestra la Figura 4.19

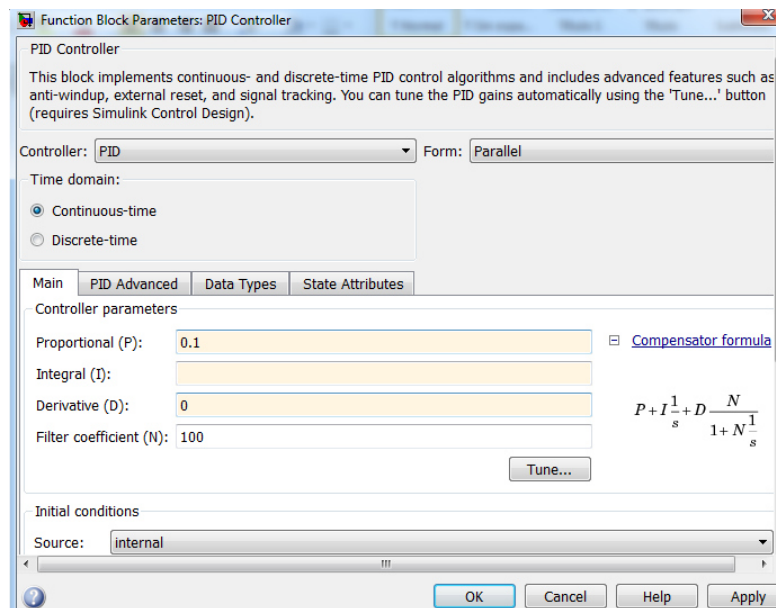


Figura 4.19 Ingreso de ganancia proporcional
Fuente: El Autor

La respuesta del sistema ante la entrada escalón y con la ganancia proporcional igual a 0.1 es inestable como se muestra en la Figura 4.20

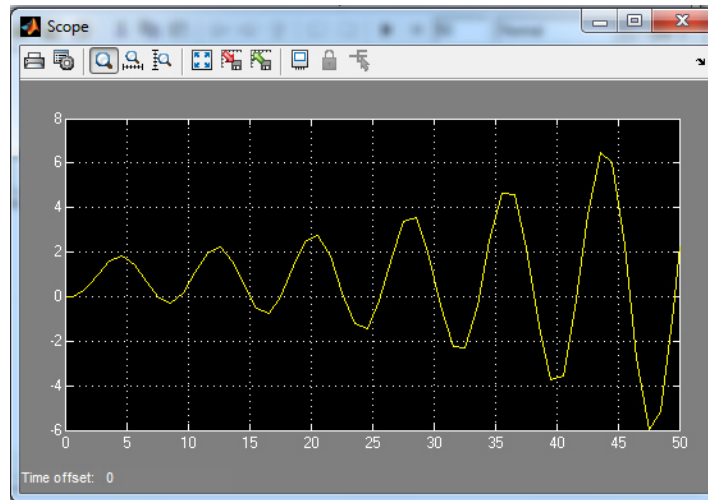


Figura 4.20 Respuesta del sistema para $K_p=0.1$
Fuente: El Autor

El sistema se vuelve oscilatorio para una $K_p=0.65$, como muestra la Figura 4.21

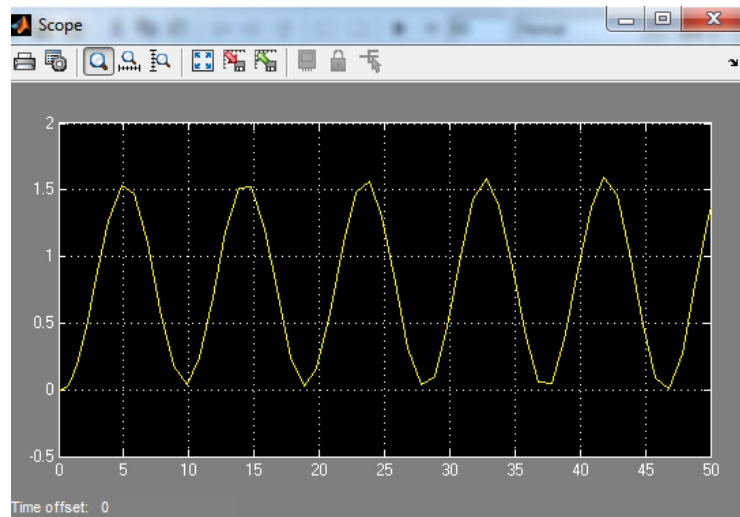


Figura 4.21 Respuesta oscilatoria
Fuente: El Autor

La ganancia proporcional $K_p=0.065$ se convierte en ganancia crítica K_c , debido a que en el valor de 0.065 el sistema se vuelve oscilatorio.

De la Figura 4.23 se determina el periodo de las oscilaciones $T_c = 9$ s

Para encontrar los valores del controlador PID se evalúa K_c y T_c , como se muestra a continuación.

$$K_p = 0.6K_c$$

$$T_i = T_c/2$$

$$T_d = T_c/8$$

Obteniendo los siguientes datos:

$$K_p = 0.039$$

$$T_i = 0.075$$

$$T_d = 0.018$$

La respuesta de salida se muestra en la Figura 4.22

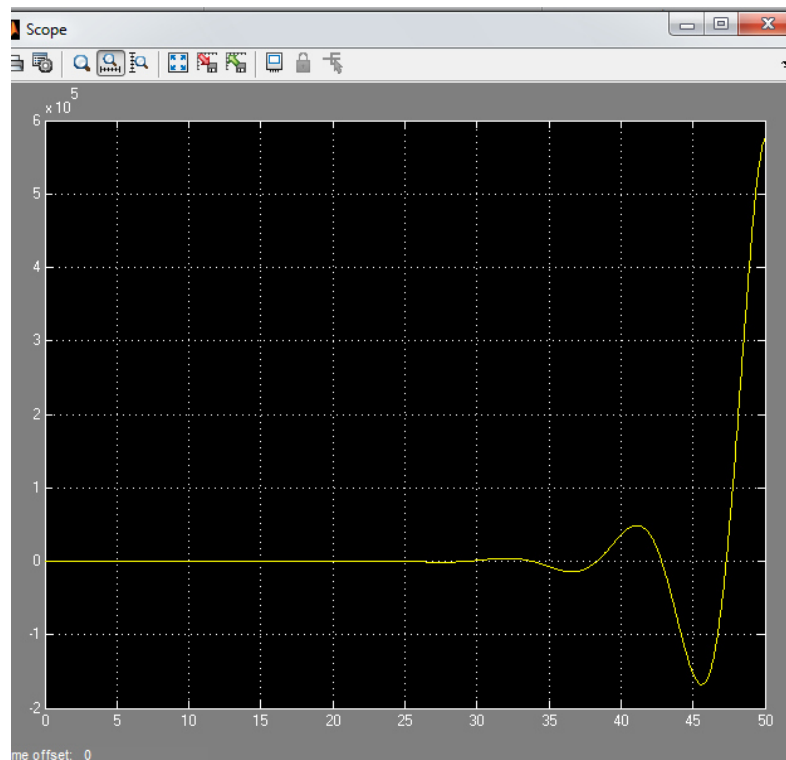


Figura 4.22 Respuesta del sistema con datos iniciales del PID

Fuente: El Autor

Como el método de sintonía es empírico, se realiza el ajuste fino pero en forma manual.

La Figura 4.23 muestra la salida sintonizada, de acuerdo a la característica del proceso

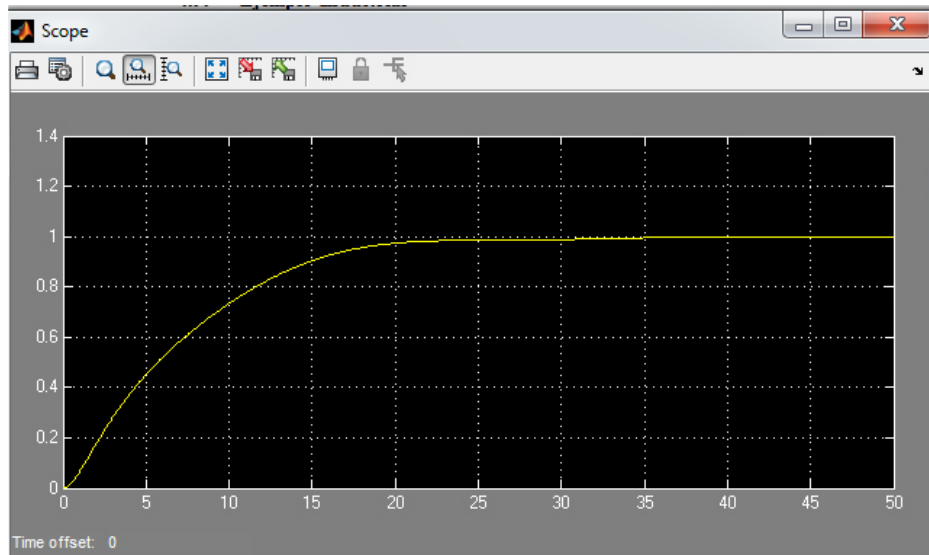


Figura 4.23 Respuesta del sistema con el PID sintonizado
Fuente: El Autor

Análisis de datos: De acuerdo a la función de transferencia que presenta la dinámica del proceso, se diseñó el controlador PID, en el cual se muestra que la señal de salida se estabiliza en aproximadamente 35 segundos, la curva no presenta porcentaje de sobreimpulso y el error residual es cero, lo que implica que la variable a controlar que es el caudal llegará al punto de referencia.

Los valores que permitieron la sintonización del PID son:

$$K_p=0.1$$

$$T_i=0.06$$

$$T_d=0.6$$

4.9. Rendimiento

En este paso se grafica el rendimiento en función del caudal, con la ayuda de los datos de presión total, caudal y potencia que consume el motor, recolectados anteriormente, se aplica la fórmula (19)

Tabla 4.12 Porcentaje de rendimiento

Caudal (m ³ /h)	η (%)
598,6	27.14
502,15	28.56
438,67	31.87
355,07	32.54
244,38	31.37
0	0

Fuente: El Autor

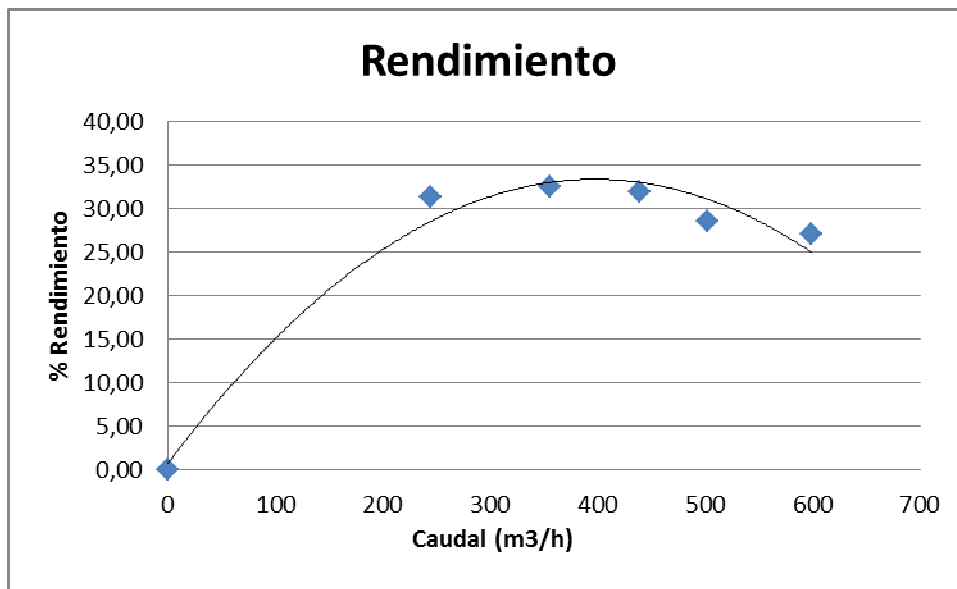


Figura 4.24 Rendimiento del ventilador centrífugo

Fuente: El Autor

Análisis de datos: En la Figura 4.24 se puede apreciar que el máximo rendimiento se obtiene en aproximadamente 400m³/h, si el caudal aumenta o disminuye en gran cantidad el rendimiento decrece, además la curva se asemeja con la obtenida teóricamente mostrada en la sección 2.2.20.

4.10. Estudio de una aplicación Industrial

Para la aplicación industrial se considera un sistema de ventilación en el cual existe el conjunto motor ventilador centrífugo, las características del motor eléctrico se muestra en la Tabla 4.13

Tabla 4.13 Características de motor de 5HP

Motor	B 100 L2/EC
Potencia (KW)	3.7
Potencia (Hp)	5
IP	55
Peso (Kg)	32
Rendimiento (n)	84.5
Factor de Potencia	0.88
Velocidad (rpm)	3470
Voltaje (V)	220
Corriente (I)	13

Fuente: El Autor

Las características del ventilador centrífugo se muestran en la Tabla 4.14

Tabla 4.14. Ventilador centrífugo

Ventilador	centrifugo
Caudal (Q)	0.66m ³ /s
Velocidad (RPM)	3480
Potencia(Hp)	5

Fuente: El Autor

Para realizar una extrapolación con los datos de las Tablas 4.12 y 4.13, se utiliza un software de ABB denominado FanSave, que permite calcular el ahorro energético del ventilador centrífugo, como muestra la Figura 4.26

Calculated savings

Annual energy saving	3	MWh
Annual energy consumption:		
with existing control method	11	MWh
with improved control method	9	MWh
Saving percentage	22,1	%

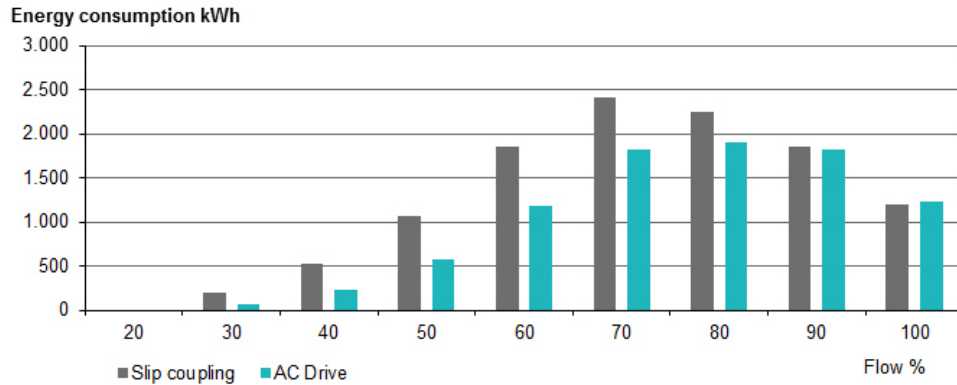


Figura 4.25 Ahorro energético utilizando el software FanSave

Fuente: ABB

Análisis de datos: En la Figura 4.26 se observa el consumo de potencia en kWh para cada porcentaje de Flujo de aire, además el ahorro de energía anual que es de 3 Mwh, solamente cuando se coloca el variador de frecuencia y de 11Mwh cuando se incorpora un sistema de control.

CAPITULO V

PROPUESTA

5.1. Título de la Propuesta

Implementación de un control V/f cuadrático en el Variador de Frecuencia Micromaster 440 para el Banco de Pruebas Motor – Ventilador Centrífugo

5.2. Justificación

En el Laboratorio de Control Industrial y Máquinas Eléctricas del ITSA, es necesario que se implemente un control V/f cuadrático en el Variador de Frecuencia Micromaster 440 para el Banco de Pruebas Motor – Ventilador Centrífugo, debido a que ayuda a disminuir el consumo de energía eléctrica.

De acuerdo a los requerimientos del encargado del Laboratorio de Control Industrial y Máquinas Eléctricas, es necesario la implementación de 10 bancos de prueba para que los estudiantes puedan realizar sus respectivas prácticas de forma adecuada y el consumo de energía eléctrica no sea tan elevado.

En cuanto a la parte de investigación, dicho banco de pruebas sirve para realizar mediciones previas de potencia y energía eléctrica, para luego a través del modelamiento matemático extrapolar datos que serían los utilizados en aplicaciones industriales como es el caso de sistemas de ventilación, sistemas de absorción, etc.

El banco de pruebas tendrá los siguientes componentes:

- Motor trifásico
- Variador de Frecuencia Micromaster 440
- Ventilador centrífugo con alabes hacia adelante
- Conducto de acrílico
- Sensor de Flujo

5.3. Objetivo

Disminuir el consumo de energía eléctrica en el Banco de Pruebas motor – ventilador centrífugo

5.4. Estructura de la propuesta

La estructura de la propuesta se basa en la Implementación de un control V/f cuadrático en el Variador de Frecuencia Micromaster 440 para el Banco de Pruebas Motor – Ventilador Centrífugo

5.5. Desarrollo de la propuesta

Inicialmente el banco de pruebas motor – ventilador centrífugo que se encuentra en el Laboratorio de Control Industrial y Máquinas Eléctricas, está formado con los elementos que se muestra en la Figura 5.1



Figura 5.1 Componentes iniciales del banco de pruebas motor – ventilador centrífugo

Fuente: El Autor

Después de realizada la investigación respectiva, para que el banco de pruebas sea eficiente se implementa un control V/f cuadrático en el variador de frecuencia Micromaster 440 para reducir el consumo de energía eléctrica y un control PID para que controle la dinámica del proceso, como muestra la Figura 5.2

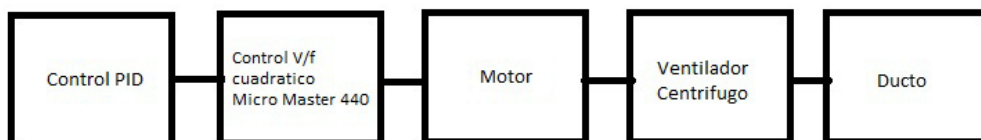


Figura 5.2 Componentes del Banco de pruebas propuesto

Fuente: El Autor

Además se contará con los siguientes recursos:

A. Recurso Material

Tabla 5.1 Desglose de costos fijos

Cantidad	Detalle	Costo (\$)
1	Motor Trifásico	100
1	Variador de Frecuencia	200
1	Ventilador centrífugo	80
1	Tubo acrilico	20
	Total	400

Fuente: El Autor

B. Recurso Humano

Tabla 5.2 Costo mano de obra

Cantidad	Detalle	Costo (\$)
1	Técnico electrónico	35/día

Fuente: El Autor

5.6. Evaluación socio-económico-ambiental de la propuesta

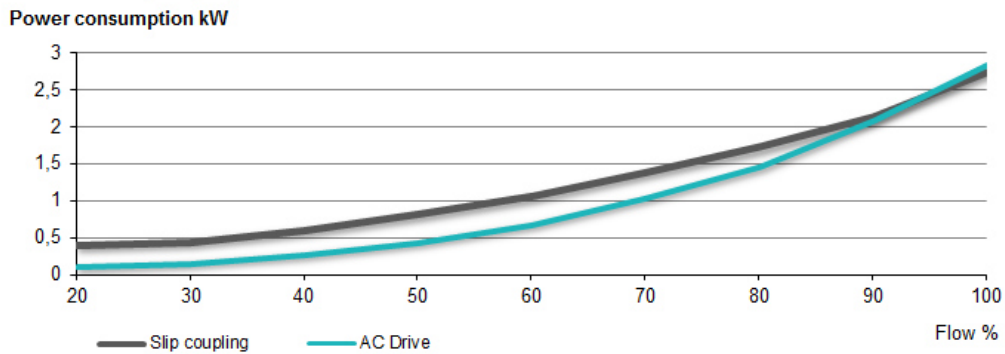
La finalidad de la evaluación socioeconómica de la investigación es el de conocer la probabilidad de que la propuesta contribuya significativamente a la economía y de que su contribución justifique la utilización de los recursos necesarios.

Social. La implementación del variador de frecuencia Micromaster 440 con el modo de control V/f cuadrático, al banco de pruebas motor - ventilador centrífugo, beneficia directamente a los estudiantes de Cuarto y Quinto Nivel de la Carrera de Electrónica del ITSA, debido a que pueden desarrollar prácticas relacionadas al control de velocidad de motores trifásicos con carga, además realizar el control del flujo de aire que genera el ventilador centrífugo, a través de la implementación de un control PID, que puede ser implementado a través de un PLC que existe en el Laboratorio de Control Industrial.

Económica. Con la implementación del variador de frecuencia Micromaster 440 con el modo de control V/f cuadrático, se reduce el consumo de energía eléctrica

107.85 kWh al año, en la actualidad la empresa que proporciona la energía eléctrica tarifa por \$ 0,09 por kWh, dando con ello una reducción anual de \$ 9.7.

Para el caso del ejemplo de aplicación industrial en el que interviene el motor con el ventilador centrífugo, el ahorro se muestra en la Figura 5.3



Economic data

Annual saving	201	\$
Payback period	2,5	years
Annual CO2 reduction	1	t/year

Figura 5.3 Ahorro económico para aplicaciones industriales

Fuente: ABB

Ambiental. Con la implementación del variador de frecuencia Micromaster 440, se reduce la emisión de CO2 como se presenta en la Figura 5.4.

FACTOR DE EMISIÓN DE CONSUMO ELÉCTRICO

	Consumo anual	Unidades de medida física	Factor de emisión (Kg de CO2 eq/kWh)	Kg de CO2 eq
Electricidad	107,85	kWh	0,385	41,52225

Figura 5.4 Ahorro de emisiones de CO2 por kWh

Fuente: ABB

5.7. Resultados de la valoración económica

Las técnicas de valor descontado son diversas, aunque todas ellas, se basan en el descuento al valor presente de las cantidades futuras o flujos de caja. Los flujos de caja son la diferencia neta entre los beneficios y costos en cada uno de los años,

refleja el dinero real en caja. Para su determinación se toma como convenio que las entradas a caja (ingresos) son positivas, y las salidas (gastos) son negativas, lo cual quiere decir que los signos de los flujos de caja resultan del balance anual entre costos y beneficios.

5.7.1. Cálculo del VAN

Es un método de evaluación de proyectos de inversión que consiste en determinar el valor presente de los flujos de fondos del negocio, usando la tasa de descuento acorde al rendimiento mínimo esperado.

Para el cálculo del VAN se utilizan los siguientes datos:

Inversión: \$ 435

Número de años: 4

Tiempo de vida útil del equipo: 10 años

Interés: 0.09

$$VAN = -435 + \frac{150}{(1+0,09)} + \frac{150}{(1+0,09)^2} + \frac{150}{(1+0,09)^3} + \frac{150}{(1+0,09)^4}$$

$$VAN = 63$$

Como el VAN es mayor que 0 la inversión produciría ganancias por encima de la rentabilidad exigida.

La propuesta también se justifica si se tiene en cuenta que la modificación del banco de pruebas permitirá ampliar su uso con fines educativos e investigativos.

El tiempo de recuperación de la inversión se determina utilizando la ecuación (15), considerando:

$$a=1$$

$$b=435$$

$$c=120 \text{ y}$$

$$d=100$$

Donde PRI= 4.1 años

CONCLUSIONES

- Se investigó el estado del arte del banco de pruebas motor - ventilador centrífugo, en artículos, libros, tesis de grado, de los cuales se obtuvo información para elaborar las curvas de potencia, presión y rendimiento en forma experimental
- Cuando se implementa un variador de frecuencia Micromaster 440 con modo de control V/f cuadrático en ahorro de energía eléctrica en el banco de pruebas es de 107 w
- El ventilador centrífugo es una turbo máquina capaz de generar flujo de aire en función de la velocidad de giro del motor, que se encuentra conectado al mismo, la curva característica permitió encontrar en punto de operación del ventilador que es de 467 m³/h a una presión de 65 Pascales.
- Cuando se regula el flujo de aire del banco de pruebas mediante el Damper, consume una potencia de 139 w, considerando el punto de trabajo y conectando el variador de frecuencia Simanics G110, se consume 92w, presentando un ahorro de potencia de 47w
- Después de haber analizado los cuatro tipos de control que tiene el variador de frecuencia Micromaster 440, en función del ahorro energético, se propone el modo de control V/f cuadrático, ya que es el que menos potencia consume a diferencia de los demás, cuyo valor es 32w.
- El aporte docente investigativo para el banco de pruebas motor ventilador centrífugo, está enfocado directamente a la reducción del consumo eléctrico, ya que el motor eléctrico no debe estar trabajando a la potencia nominal en todo instante.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de un control Fuzzy y Fuzzy PID, para analizar el comportamiento del sistema en comparación al control PID.
- De acuerdo a los requerimientos del encargado del laboratorio se recomienda la implementación de los 10 bancos de prueba para que se refleje el ahorro de consumo eléctrico en el laboratorio de Control Industrial del ITSA.
- Mejorar la instrumentación del banco de pruebas, para que en lo posterior se pueda realizar controles a lazo cerrado y analizar el consumo energético

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alzate, A. (2011). Control de velocidad mediante relacion voltaje frecuencia. Scientia et Technica , pp 19-24.
- [2] Asher, G. (1998). Sensorless estimation for vector controlled induction motor drivers. IEE Colloquium.
- [3] Brandao, P. (10 de Agosto de 2012). twenergy.com. Obtenido de <http://twenergy.com/energia-curiosidades/que-es-la-eficiencia-energetica-39>
- [4] Ecodia, S. (2010). Manual Practico de Ventilacion, pp 12. Barcelona: Roselio.
- [5] Escoda, S. (2010). Manual Practico de Ventilacion, pp 4. Barcelona: Rosselio.
- [6] Eugene, B. (2001). Fundamentos de Administración financiera. Mexico: McGraw Hill.
- [7] Fraile, J. (2013 de Diciembre de 2013). wikipedia. Obtenido de http://es.wikipedia.org/wiki/Variador_de_frecuencia
- [8] Hinojosa, E. (10 de Octubre de 2010). monografias.com. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos91/motor-electrico-trifasico/motor-electrico-trifasico.shtml>
- [9] Jesus, F. M. (2008). Maquinas Electricas. MACGRAW-HILL.
- Jorgensen. (1999). An Engineer's Handbook on Fan and their Applications. Howden Buffalo Inc.
- [10] Mejia, A. (2009). Control Vectorial de la Maquina de Induccion. Scientia et Technica , 55-60.
- [11] negocios, c. (20 de Febrero de 2012). crece negocios. Obtenido de <http://www.crecenegocios.com/el-van-y-el-tir/>
- [12] Palau, S. y. (2012). Sistemas de ventilación, pp 6.

- [13] Palau, S. y. (2012). Sistemas de ventilación, pp7.
- [14] Serna, J. L. (2011). Ventiladores centrifugos, pp 96.
- [15] SIEMENS. (2006). MICROMASTER 440. MANUAL DE OPERACION , 16-17.
- [16] SIEMENS. (2003). SINAMICS G110. GUIA RAPIDA , 15-16.
- [17] Vargas, R. (10 de Octubre de 2010). monografias.com. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos91/motor-electrico-trifasico/motor-electrico-trifasico.shtml>
- [18] Villalobos, N. (10 de Octubre de 2010). monografias.com. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos91/motor-electrico-trifasico/motor-electrico-trifasico.shtml>
- [19] wikipedia. (05 de Diciembre de 2013). wikipedia. Obtenido de <http://es.wikipedia.org/wiki/Ventilador>
- [20] Yedra, W. (10 de Octubre de 2010). momografias.com. Obtenido de monografias.com: <http://www.monografias.com/trabajos91/motor-electrico-trifasico/motor-electrico-trifasico.shtml>

ANEXOS

ANEXO A

Determinación de la Función de Transferencia

La función de transferencia que se va a obtener es del conjunto variador de frecuencia – motor trifásico – ventilador – ducto, como muestra la Figura 1.

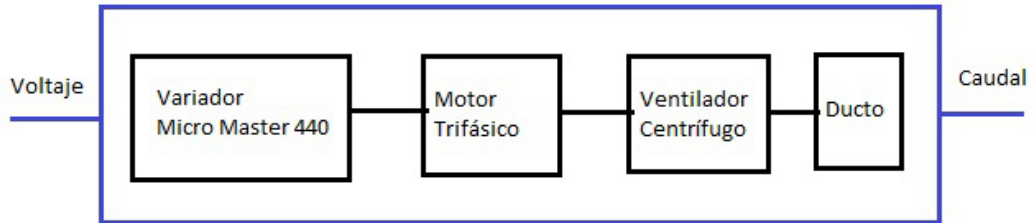


Figura 1 Componentes del Banco de pruebas

Para determinar la función de transferencia se debe identificar la entrada y la salida del proceso, para este caso la entrada es el voltaje y la señal de salida es el Caudal, los datos se muestran en Tabla 1

Tabla 1 Valores de entrada y salida

Voltaje (V)	Caudal (m³/h)
0	0
2	305,47
4	477,59
6	659,89
8	748,25
10	788,72

Con los datos de voltaje y caudal se procede a graficarlos para posteriormente encontrar una ecuación que permitirá determinar el comportamiento del caudal en función del voltaje, como se muestra en la Figura 2

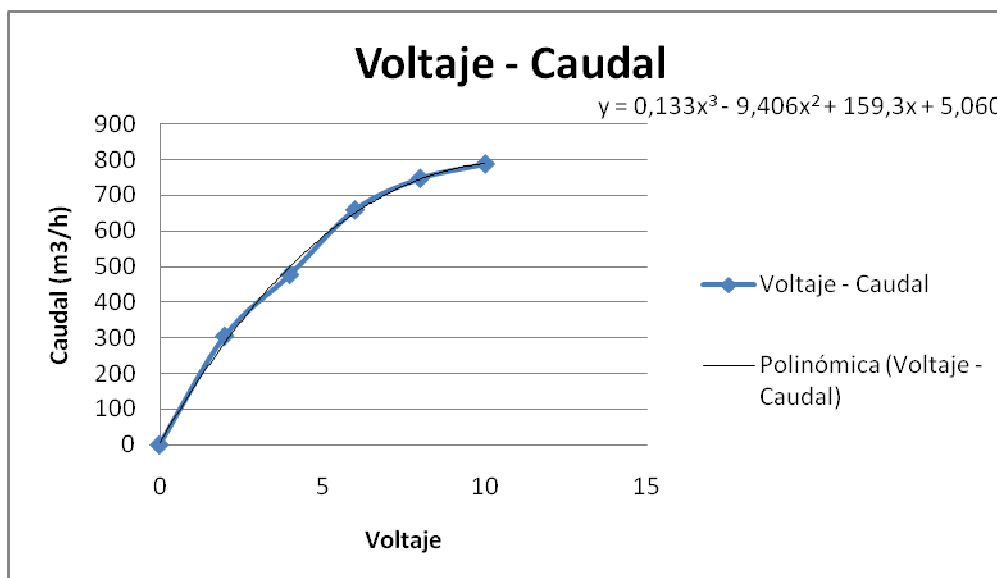


Figura 2 Curva Voltaje - Caudal

Con la ayuda de Matlab se ingresa la ecuación para una variación de x desde 0 a 10, en incrementos de 0.2, se creará 2 vectores con 52 elementos cada uno y luego se grafica los mismos, como se muestra en la Figura 3

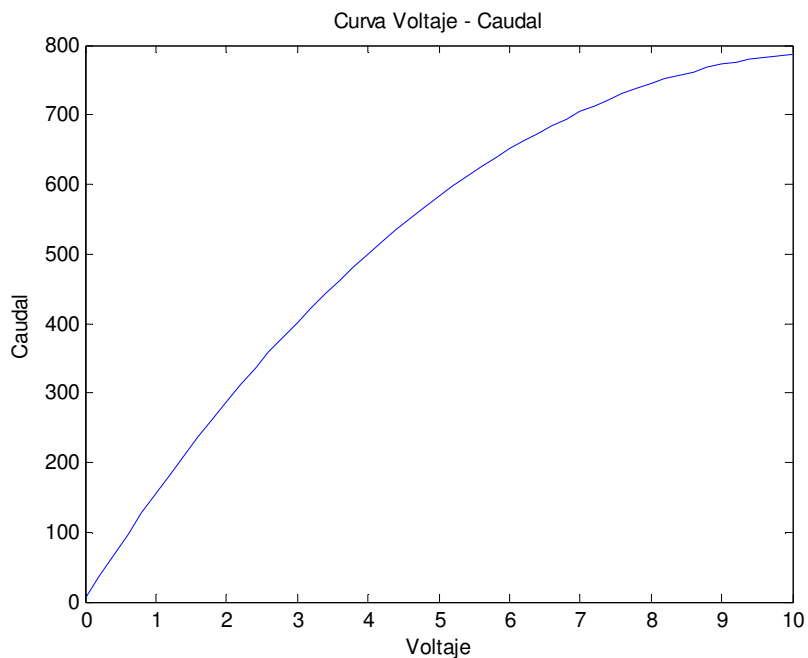


Figura 3 Curva Voltaje – Caudal utilizando Matlab

Una vez validada la ecuación que se obtuvo en Excel, se procede a inicializar el Identificador de Sistemas que contiene Matlab, colocando en la ventana de comandos **ident** y aparecerá una ventana como la de la Figura 4

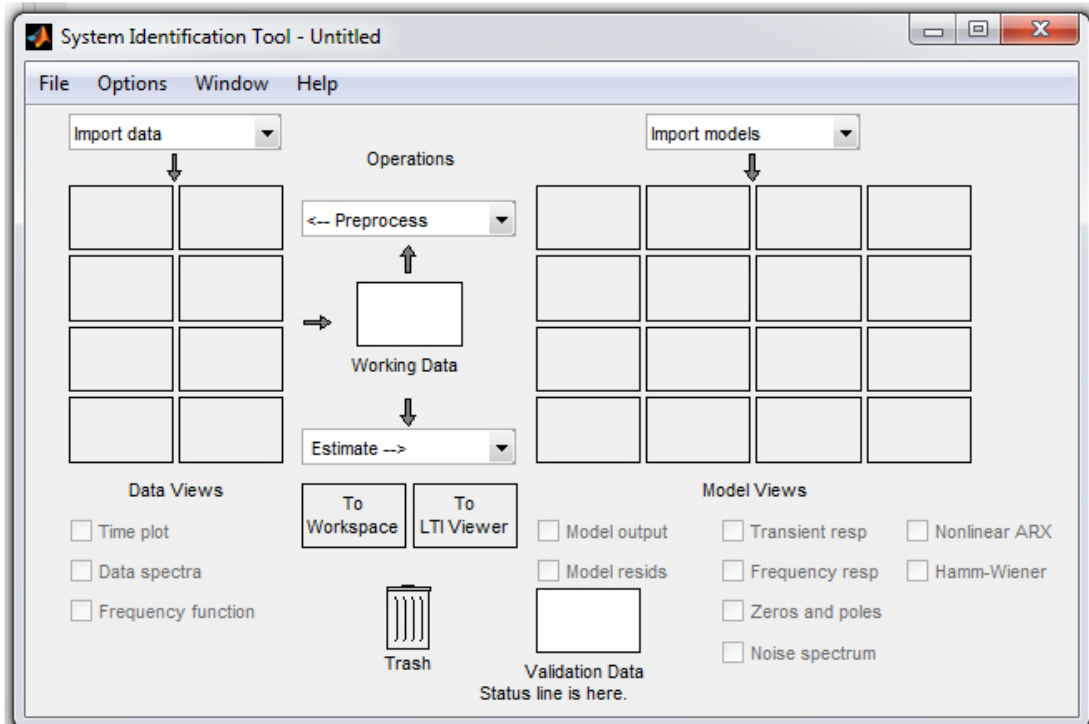


Figura 3.4 Identificador de sistemas

A continuación se graba los vectores de entrada y salida con el nombre trabajo.mat. Para verificar si los datos se guardaron correctamente, se carga el archivo colocando en la ventana de comandos **load trabajo**

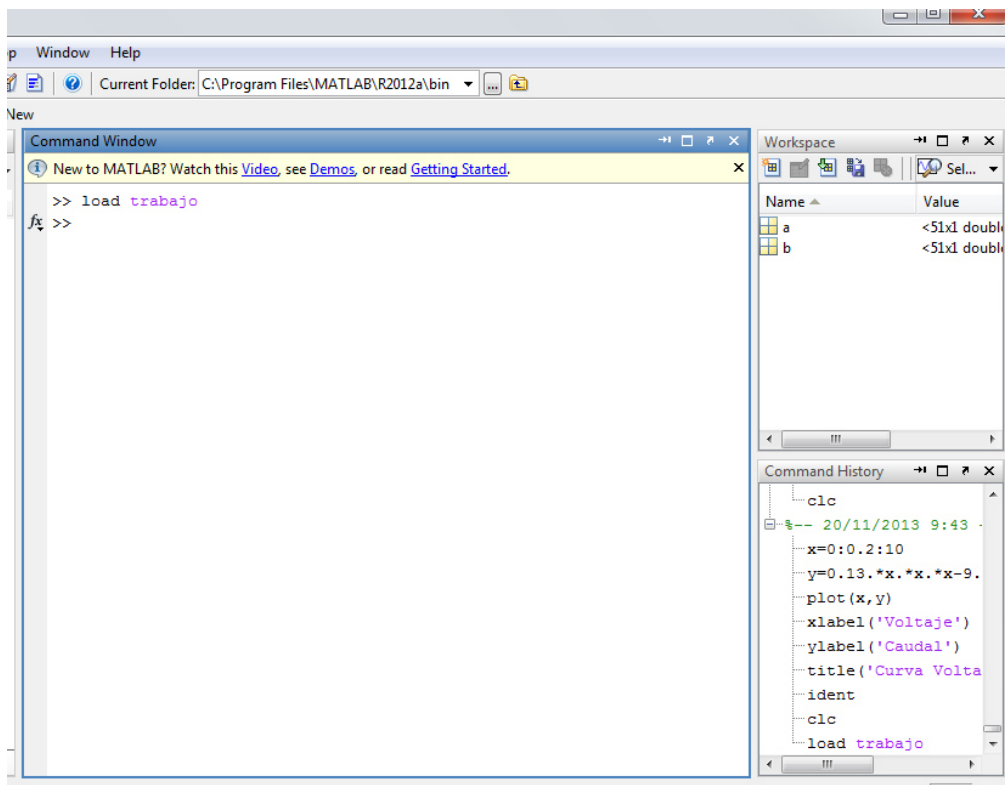


Figura 5 Cargar archivo trabajo.mat

Como se puede observar en el archivo trabajo.mat, existen dos vectores, el vector a, representa los valores de entrada y el vector b los valores de salida.

Ahora en la ventana del Identificador de Sistemas, se escoge la opción importar datos en el dominio del tiempo como muestra la Figura 6

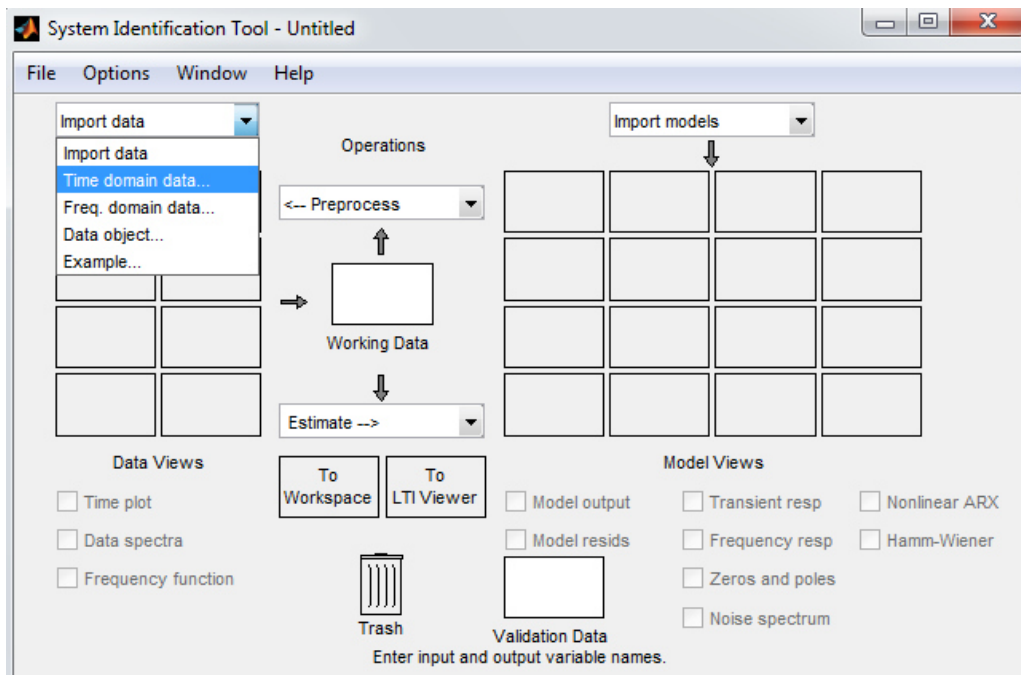


Figura 6 Importar Datos al Identificador de Sistemas

Posteriormente aparece una ventana para definir los parámetros como la entrada, salida, entre otras cosas como presenta la Figura 7

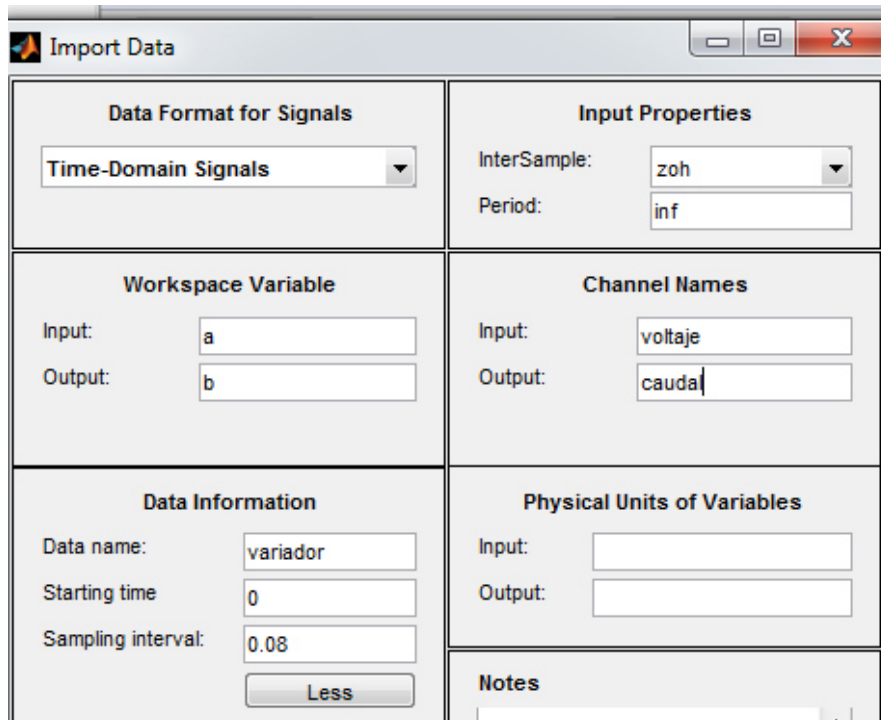


Figura 7 Ingreso de datos de entrada y salida

Una vez ingresados todos los datos se presiona el botón **Import** y aparece una ventana en la cual se carga una gráfica con el nombre de los datos que es “**variador**”

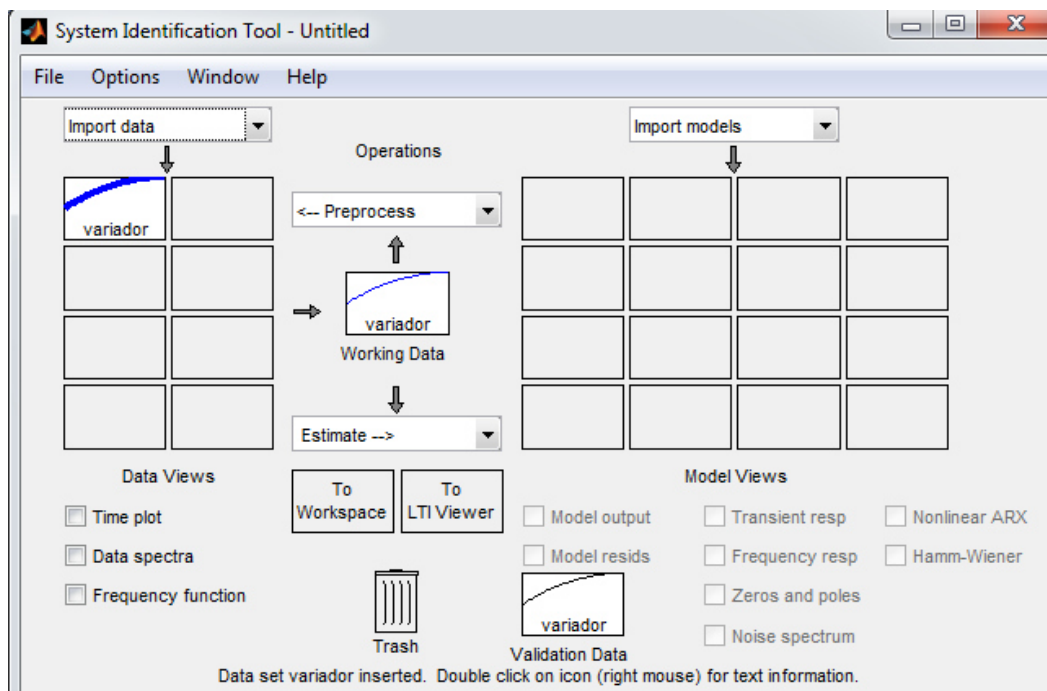


Figura 8 Datos cargados en el Identificador de Sistemas

Ahora de la pestaña **Estimate**, se escoge la opción **Transfer Function Models**, como muestra la Figura 9

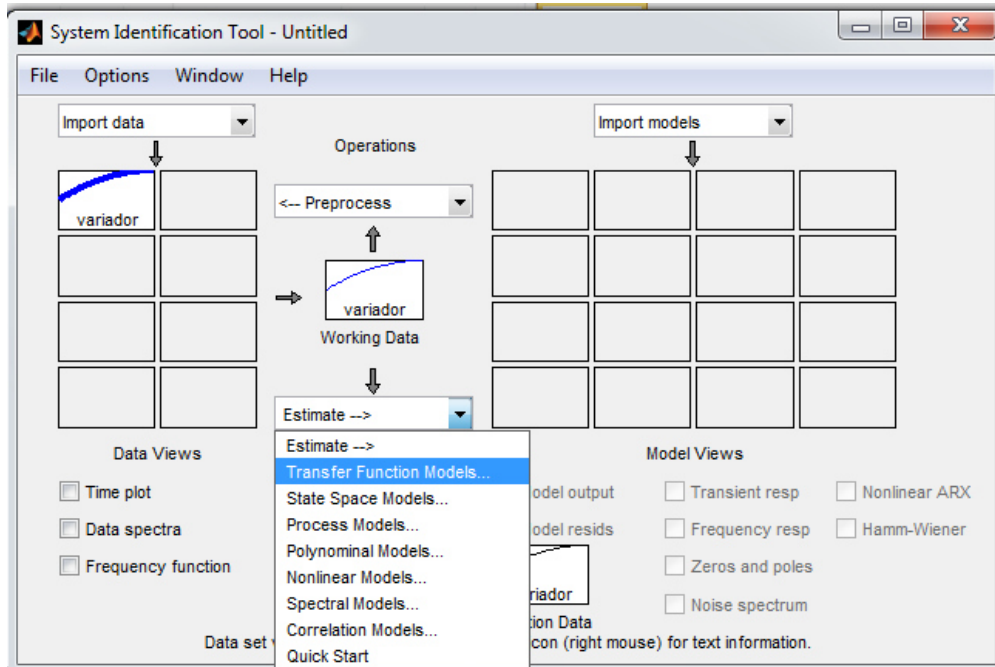


Figura 9 Estimación de la Función de Transferencia

Luego aparece una ventana en la que se debe ingresar las características de la función de transferencia, o sea, el número de ceros y polos. Como la ecuación que se determinó utilizando Excel es un polinomio de grado 3, entonces esto indica que en el denominador de la función de transferencia existe tres raíces o tres polos y se va a considerar solo un cero en el numerador.

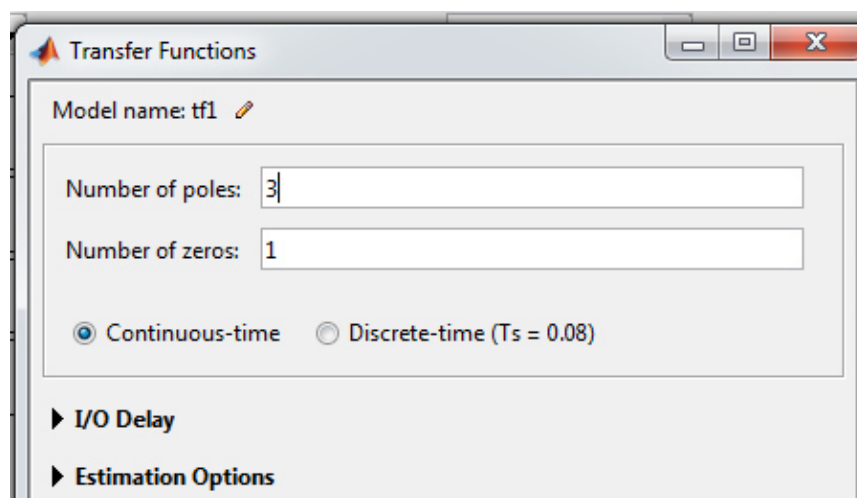


Figura 10 Asignación de polos y ceros

Se presiona el botón **Estimate** y aparece una ventana en la que las estimaciones realizadas y el porcentaje de coincidencia con la función de transferencia real

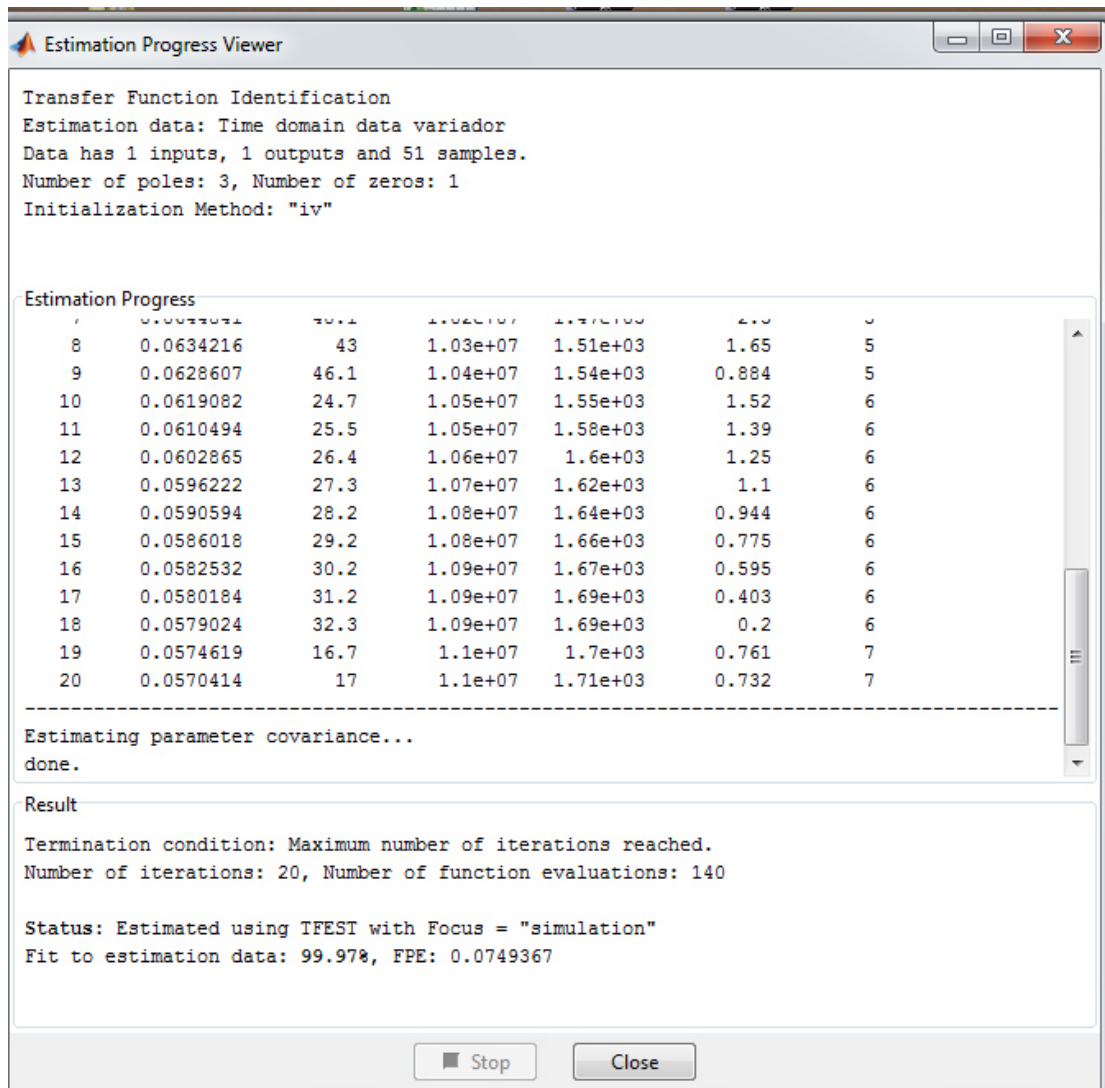


Figura 11 Estimación de la Función de Transferencia

Como se puede apreciar en la Figura 11 el porcentaje de estimación es del 99.97%, lo que quiere decir que es casi la Función de Transferencia real. Para que tenga validez la función de transferencia debería ser lo más cercana al 100%, de no ser así, se debe ingresar nuevamente los datos del número de polos y ceros, conociendo el comportamiento dinámico del proceso a utilizar.

La Función de Transferencia se muestra en la Figura 12

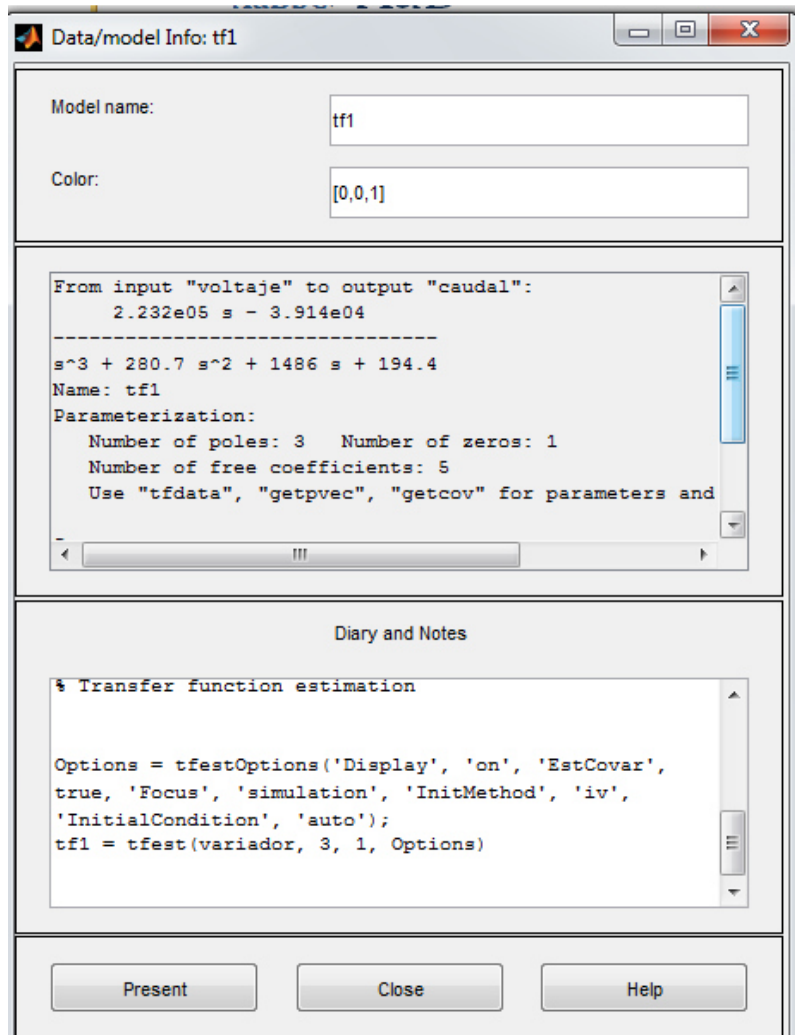


Figura 12 Función de transferencia estimada

Como la Función de Transferencia presenta en el numerador coeficientes numéricos muy altos, se realiza otra estimación en la cual ya no se va a considerar ningún cero

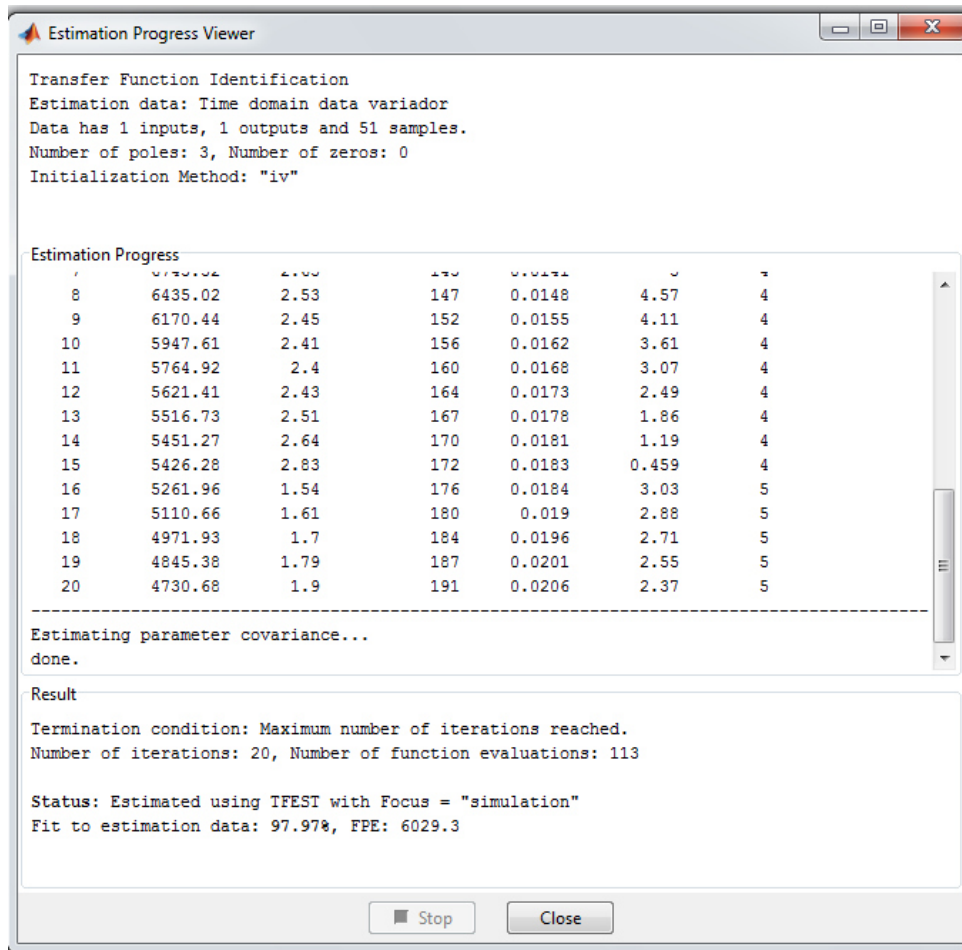


Figura 13 Estimación de la Función de Transferencia solo con polos

Al estimar la función de Transferencia sin ceros, se tiene un 97.97% de coincidencia con la Función de Transferencia Real.

$$G(s) = \frac{0.37}{s^3 + 1.8s^2 + 0.45s + 0.16}$$

A continuación se presenta el modelo de salida simulado y en función de las mediciones de voltaje y caudal

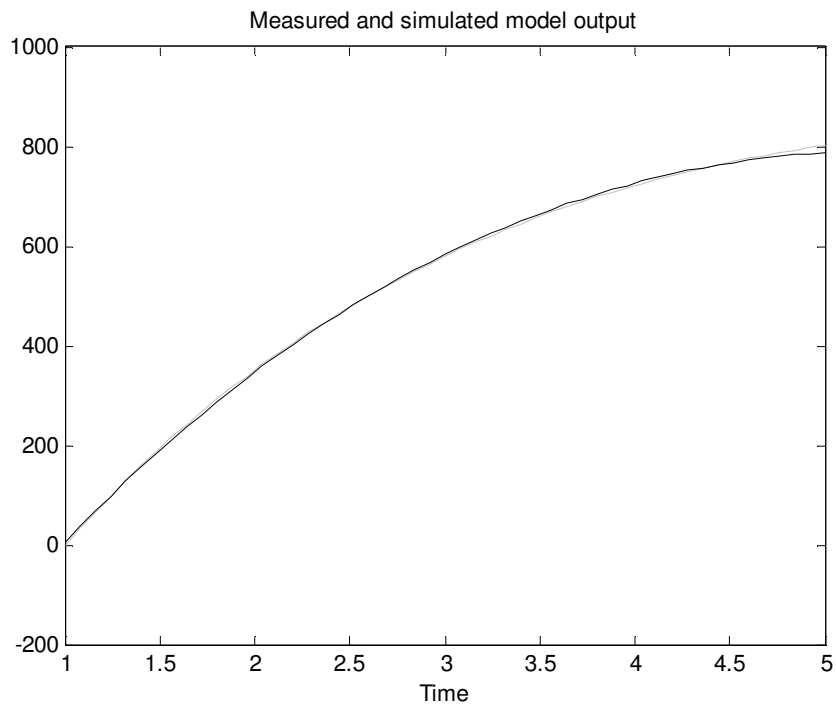


Figura 14 Modelos de salida del sistema

En esta Figura se puede notar claramente la similitud que tiene la función de transferencia obtenida con el Identificador de Sistemas y la real.

La Figura 3.20 presenta la respuesta del sistema en el dominio del tiempo.

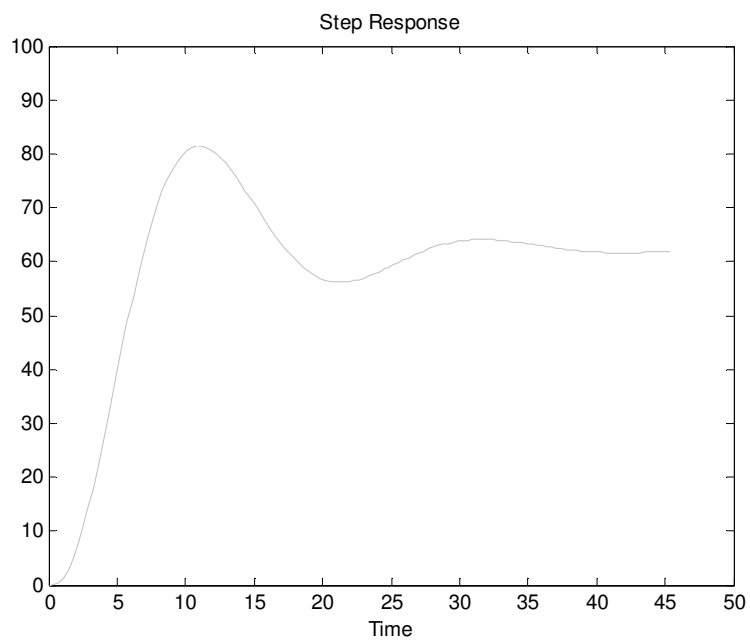


Figura 3.20 Respuesta en el dominio del tiempo

ANEXO B

Métodos de sintonización de controladores PID

Sintonizar un controlador PID significa establecer el valor que deben tener los parámetros de Ganancia (Banda Proporcional), Tiempo Integral (Reset) y Tiempo derivativo (Rate), para que el sistema responda en una forma adecuada. La primera etapa de todo procedimiento de sintonización consiste en obtener la información estática y dinámica del lazo. Existen diversos métodos para ajustar los parámetros de controladores PID, pero todos caen dentro de dos tipos:

- Métodos en Lazo Cerrado: la información de las características del lazo se obtienen a partir de un test realizado en lazo cerrado, usualmente con un controlador con acción proporcional pura.
- Métodos en Lazo Abierto: la características estáticas y dinámicas de la planta (Elemento Final de Control + Proceso + Transmisor) se obtienen de un ensayo en lazo abierto, generalmente la respuesta a un escalón (Curva de Respuesta).

Método de Ziegler y Nichols en Lazo Cerrado o de la Oscilaciones sostenidas.

El Método consiste en obtener la respuesta de la señal medida a una perturbación (por ejemplo un pulso en el set point) con controlador proporcional.

Se observa la respuesta y si es amortiguada, se incrementa la ganancia hasta lograr Oscilaciones Sostenidas (oscilación con amplitud constante).

La ganancia del controlador (proporcional) en este caso se denomina “Ganancia Última” y se nota K_{cu} y el período de la oscilación se llama “Período Último” T_u .

Los valores recomendados de sintonización son:

CONTROLADOR	K_c	T_I	T_D
P	$K_{cu}/2$	∞	0
PI	$K_{cu}/2.2$	$\tau_u/1.2$	0
PID	$K_{cu}/1.7$	$\tau_u/2$	$\tau_u/8$

Método de Ziegler y Nichols en Lazo Abierto o de la Curva de respuesta.

Por ser un método en lazo abierto, primero se realiza un ensayo en lazo abierto, introduciendo un escalón en la señal de control (salida del controlador que actúa sobre el elemento final de control) y se registra el transitorio de la variable medida o controlada (Curva de Respuesta).

Aplicando el Método del Punto de inflexión, se obtiene una caracterización simplificada de la planta a controlar como una capacidad de primer orden más un tiempo muerto:

$$G(s) = G_V(s)G_P(s)G_T(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

El ajuste del controlador se hace según:

CONTROLADOR	Kc	T _I	T _D
P	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{L} \right)$	∞	0
PI	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{\tau}{L} \right)$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{\tau}{L} \right)$	$\frac{L}{0.5}$	$\frac{L}{2}$