

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL
COMPUTARIZADO PARA UNA TURBINA PELTON DE
LABORATORIO UTILIZANDO MATLAB Y SIMULINK”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

FABIÁN FLORES VACA

fabianfloresvaca@hotmail.com

OSWALDO SANTIAGO BONILLA BÁEZ

bonilla_santiago@hotmail.com

DIRECTOR: DR. ÁLVARO AGUINAGA BARRAGÁN

aaguinaga@epn.edu.ec

Quito, diciembre de 2008

DECLARACIÓN

Nosotros, **OSWALDO SANTIAGO BONILLA BÁEZ** y **FABIÁN FLORES VACA**, declaramos bajo nuestro juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Fabián Flores Vaca

Oswaldo Santiago Bonilla Báez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado por OSWALDO SANTIAGO BONILLA BÁEZ y FABIÁN FLORES VACA, bajo mi supervisión.

Dr. Álvaro Aguinaga Barragán

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradecemos sinceramente a todos aquellos profesionales que han colaborado en nuestra formación técnica y humana dentro de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. Entre tantos seres humanos a los que les debemos gratitud, cabe mencionar a: Dr. Álvaro Aguinaga, Ing. Adrián Peña, Dr. Víctor Cárdenas, Ing. Tito Velasteguí, Ing. Jorge Escobar, Ing. Carlos Valladares, Ing. Ángel Portilla, Ing. Claudio Álvarez, Ing. Iván Sola entre otros, los cuales de forma directa o indirecta colaboraron con los proyectos finales emprendidos por nosotros como estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Así también agradecemos a las demás personas que colaboraron para materializar éste proyecto.

FABIÁN, SANTIAGO.

DEDICATORIA

A Ruth, por compartir la energía que brota de su mente y corazón, la fuerza que proyectan sus manos y la visión de liderazgo que la hacen única. Gracias mamá.

A Alejandra por enseñarme el valor de la solidaridad, al haberme tomado de la mano y levantado cuando lo necesité. Gracias hermana.

FABIÁN

DEDICATORIA

Alejito por ser mi aliento a seguir día a día, Lucy por su comprensión y soporte en esos días difíciles. A Ingrid que me dio su soporte y ayuda durante estos seis años en la universidad.

A esas personas incondicionales que me formaron con valores y fortaleza durante toda mi niñez y mi juventud María Emperatriz y Oswaldo Enrique.

SANTIAGO

CONTENIDO

RESUMEN	XVIII
PRESENTACIÓN	XIX

CAPÍTULO 1

TURBOMAQUINARIA

1.1. DEFINICIÓN	1
1.2. CLASIFICACIÓN.....	2
1.3. TURBINAS DE IMPULSO	2
1.4. TURBINA PELTON	5
1.4.1. CAZOLETAS O CANGILONES.....	6
1.4.2. INYECTOR.....	7
1.4.3. REGULACIÓN DE VELOCIDAD EN LA TURBINA PELTON.....	8
1.4.4. TRIÁNGULOS DE VELOCIDADES.....	10
1.4.5. DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO MANOMÉTRICO.	16
1.4.6. RELACIÓN ENTRE EL DIÁMETRO DE LA RUEDA , EL DIÁMETRO DEL CHORRO Y EL NÚMERO ESPECÍFICO DE REVOLUCIONES PARA LA TURBINA PELTON DE UN INYECTOR.....	17
1.4.7. FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE LAS CAZOLETAS.....	19
1.4.8. CURVAS CARACTERÍSTICAS CON SALTO CONSTANTE.	20

CAPÍTULO 2

CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS

2.1. INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE PROCESOS	23
2.2. NOCIONES BÁSICAS SOBRE CONTROL DE PROCESOS	25
2.3. MODELADO MATEMÁTICO	27
2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	28
2.5. REPRESENTACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS EN VARIABLES DE ESTADO	30
2.6. ESTRUCTURAS UTILIZADAS EN CONTROL CLÁSICO.....	31
2.7. CONTROL A LAZO ABIERTO Y A LAZO CERRADO	31
2.8. SISTEMA COMBINADO EN AVANCE Y REALIMENTACIÓN DE SALIDA	34
2.9. CONTROLADORES PID	36
2.9.1. EXPRESIÓN GENERAL.....	36
2.9.1.1. Forma estándar	37
2.9.1.2. Forma paralela	37
2.9.1.3. Forma serie	38
2.9.2. SENTIDO FÍSICO DE LA ACTUACIÓN DE UN PID	39
2.9.2.1. Actuación proporcional.....	39
2.9.2.2. Actuación proporcional-derivativa	40
2.9.2.3. Actuación proporcional-integral	42
2.9.3. AJUSTE EXPERIMENTAL DE PID	45
2.9.3.1. Ajuste de Ziegler-Nichols	45
2.9.3.2. Otros tipos de ajuste experimental.....	49
2.9.4. AJUSTE ANALÍTICO DE PID POR ASIGNACIÓN DE POLOS.....	51
2.9.5. MODIFICACIONES DEL PID	52
2.9.6. SUPRESIÓN DEL EFECTO KICK-OFF	52
2.9.7. FILTRO DE LA DERIVADA	53
2.9.8. SET POINT WEIGHTING (CARGA DEL PUNTO DE TRABAJO).....	53
2.10. DIGITALIZACIÓN DE UN CONTROLADOR PID – PARALELO	55

CAPÍTULO 3

USO DE MATLAB Y SIMULINK COMO HERRAMIENTA PARA LA AUTOMATIZACIÓN COMPUTARIZADA

3.1. INTRODUCCIÓN	58
3.2. SIMULINK	60
3.2.1. FUENTES Y SUMIDEROS.....	62
3.2.2. SISTEMAS CONTINUOS Y DISCRETOS.....	63
3.2.3. OPERADORES NO-LINEALES.....	63
3.2.4. OPERACIONES MATEMÁTICAS	64
3.2.5. SEÑALES Y TRANSFERENCIA DE DATOS	64
3.2.6. CREACIÓN DE UN MODELO	65
3.2.7. CONFIGURACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS	67
3.3. CREACIÓN DE INTERFACES GRÁFICAS CON MATLAB	69
3.3.1. UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA GUIDE.....	69
3.3.2. FLUJO DE OPERACIÓN DE UNA GUI.....	71
3.3.3. PROGRAMACIÓN CON GUIDE	73
3.3.4. TIPOS DE CALLBACKS.....	74
3.4. ADQUISICIÓN Y MANEJO DE DATOS	74
3.4.1. ESQUEMA DEL EXPERIMENTO DE ADQUISICIÓN DE DATOS....	75
3.4.2. INSTALACIÓN DEL SISTEMA.....	75
3.4.3. CALIBRACIÓN	75
3.4.4. PRUEBAS	76
3.4.5. EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (SAD).....	76
3.4.6. HARDWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS (HAD).....	78
3.4.6.1. Subsistemas de entrada análoga.....	79
3.4.6.2. Subsistemas de salida análoga.....	79
3.4.6.3. Sistemas de entrada/salida digital (ESD ó DIO).....	79
3.4.6.4. Subsistemas contador/temporizador	80
3.4.6.5. Sensores	80
3.4.6.5.1. Señal de salida.....	81

3.4.6.5.2. Ancho de banda	81
3.5. HERRAMIENTAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DATA ACQUISITION TOOLBOX).....	82
3.6. EL PUERTO PARALELO DE LA PC.....	86
3.7. CAJA DE HERRAMIENTAS DE SISTEMAS DE CONTROL (CONTROL SYSTEM TOOLBOX)	91
3.8. CAJA DE HERRAMIENTAS DE CONTROL DE INSTRUMENTOS (INSTRUMENT CONTROL TOOLBOX).....	92

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

4.1. CICLO BÁSICO DE DISEÑO.....	94
4.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:	96
4.1.2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	96
4.1.2.1. Lazo de control del sistema.....	97
4.1.2.2. Especificaciones de turbina Pelton.....	97
4.1.2.3. Restricciones y condiciones de trabajo del sistema	99
4.1.2.4. Especificaciones de las señales de control	102
4.1.2.5. Especificaciones del actuador (posicionador de inyector).....	103
4.1.2.6. Sensor de velocidad.....	105
4.1.2.7. Características del computador y el software de control	105
4.1.2.8. Modelo matemático (enfoque continuo)	106
4.1.2.9. Función de transferencia de la turbina	107
4.1.2.10. Control PID en lazo cerrado.....	112
4.1.2.11. Especificaciones de la respuesta transitoria	115
4.1.3. SÍNTESIS – ALTERNATIVAS DE DISEÑO.....	118
4.1.4. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO	119
4.1.4.1. Control hidráulico (A).....	120

4.1.4.2.	Control neumático (B)	120
4.1.4.3.	Control eléctrico (C)	121
4.1.4.4.	Evaluación de Alternativas	122
4.1.5.	DECISIÓN – SELECCIÓN DE ALTERNATIVA DE DISEÑO.....	125
4.1.6.	SELECCIÓN DE ELEMENTOS CONSTITUTIVOS.....	125
4.2.	DISEÑO ELECTROMECAÁNICO.....	127
4.2.1.	ACTUADOR	127
4.2.2.	SENSOR DE VELOCIDAD.....	131
4.2.3.	COMPUTADOR.....	133
4.3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL EN MATLAB Y SIMULINK ...	135
4.3.1.	DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES DE CONTROL PID....	135
4.3.2.	VARIACIÓN DE LA GANANCIA	138
4.3.3.	SIMULACIÓN DE RESPUESTA ESCALÓN DEL SISTEMA EN GUI- SIMULINK Y DETERMINACIÓN DE GANANCIAS FINALES	141
4.4.	DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL EN MATLAB GUIDE .	150
4.4.1.	ESQUEMAS DE FLUJO DE FUNCIONAMIENTO	150
4.4.2.	INTERFACES GRÁFICAS.....	158

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

5.1.	DETALLES DE CONSTRUCCIÓN	169
5.2.	MONTAJE DEL SISTEMA DE CONTROL	169

CAPÍTULO 6

PRUEBAS

6.1.	PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	175
6.2.	DESARROLLO DE PRUEBAS.....	175
6.3.	EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	177

	CONCLUSIONES.....	178
--	-------------------	-----

	RECOMENDACIONES	180
--	-----------------------	-----

	BIBLIOGRAFÍA	181
--	--------------------	-----

	ANEXOS	183
--	--------------	-----

A – DATOS OBTENIDOS EN PRUEBAS

B – HOJAS DE DATOS TÉCNICOS DE SOFTWARE Y
HARDWARE

C – INSTRUCCIONES RELEVANTES UTILIZADAS EN EL
CÓDIGO DEL SISTEMA DE CONTROL

D – GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO DE MECÁNICA
DE FLUIDOS – TURBINA PELTON (PROPUESTA)

E – PRÁCTICA DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE
FLUIDOS – TURBINA PELTON (PROPUESTA) –
DESARROLLADA

F – GUÍA DE UTILIZACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL

G – PLANOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Turbina Pelton.....	3
Figura 1.2.	Turbina Schwamkrug.....	4
Figura 1.3.	Turbina Girard.....	4
Figura 1.4.	Turbina Michel-Banki	5
Figura 1.5.	Turbina Pelton.....	5
Figura 1.6.	Forma de la cazoleta	6
Figura 1.7.	Inyector	8
Figura 1.8.	Regulador Simple.	9
Figura 1.9.	Nomenclatura de los triángulos de velocidades.....	11
Figura 1.10.	Triángulos de velocidades.	12
Figura 1.11.	Velocidad de embalamiento.....	13
Figura 1.12.	Triángulos de velocidades ideal y real.	13
Figura 1.13.	Diagrama de velocidades	14
Figura 1.14.	Velocidad absoluta de entrada del agua en el rodete.....	15
Figura 1.15.	Valores de d/D , y α en función de z	19
Figura 1.16.	Curva de caudal para diversos grados de apertura $x(z)$	21
Figura 1.17.	Curvas de potencia y de rendimiento.....	22
Figura 2.1.	Esquemas globales de procesos no controlados y controlados.	26
Figura 2.2.	Sistema de control de lazo abierto.....	32
Figura 2.3.	Control a lazo cerrado por retroalimentación de salida.....	32
Figura 2.4.	Control a lazo cerrado por retroalimentación de salida.....	35
Figura 2.5.	Sistema controlado con PID.....	36
Figura 2.6.	Sistema de control con PID en forma paralela.....	38
Figura 2.7.	Sistema de control con PID, forma en serie.....	39
Figura 2.8.	Actuación proporcional	40
Figura 2.9.	Actuación proporcional-derivativa	41
Figura 2.10.	Actuación proporcional-derivativa	42

Figura 2.11.	Sistema con error no nulo - actuación proporcional.....	43
Figura 2.12.	Actuación proporcional-integral con T_i muy grande.....	44
Figura 2.13.	Respuesta de la planta a un escalón unitario	47
Figura 2.14.	Cálculo de la ganancia crítica.	48
Figura 2.15.	Medida del periodo de oscilación crítico	48
Figura 2.16.	Control PI sobre una planta de primer orden	51
Figura 2.17.	Sistema controlado por un PID.	53
Figura 2.18.	Respuesta ante entrada escalón unitario.....	54
Figura 2.19.	Respuesta temporal del sistema.....	54
Figura 2.20.	Esquema de cálculo de derivada e integral de la función Error vs. tiempo.	56
Figura 3.1.	Ventana de trabajo de MatLAB.....	61
Figura 3.2.	Librería de Simulink.	62
Figura 3.3.	Modelación en Simulink.	65
Figura 3.4.	Bloque “SCOPE” para visualización y “MUX” de combinación de señales en vector.....	67
Figura 3.5.	Interfaz para desarrollo de GUI's.	70
Figura 3.6.	Flujo de opciones de GUI	72
Figura 3.7.	Sistema de Adquisición de Datos (SAD).....	77
Figura 3.8.	Componentes de las tarjetas multifunción	78
Figura 3.9.	Componentes - toolbox de adquisición de datos	82
Figura 3.10.	Conector hembra de 25 pines (DB25)	87
Figura 4.1.	Ciclo básico del diseño.	95
Figura 4.2.	Disposición funcional del Sistema.....	97
Figura 4.3.	Esquema de equipo de laboratorio.	98
Figura 4.4.	Esquema de válvulas de sistema hidráulico.	100
Figura 4.5.	Esquema de curvas que caracterizan a las bombas.....	101
Figura 4.6.	Diagrama de bloques de la turbina.	107
Figura 4.7.	Diagrama de bloques de la turbina y el volante de inercia..	109
Figura 4.8.	Diagrama de bloques-función de transferencia.....	109
Figura 4.9.	Modelo de lazo abierto en unidad [1]-Simulink.	110
Figura 4.10.	Respuesta del sistema a una entrada tipo escalón en lazo abierto, en unidad [1] (por unidad) – $N1 [1]$ vs. $Z[1]$	111

Figura 4.11.	Diagrama de bloques de lazo cerrado.	112
Figura 4.12.	Esquema 3D de actuador (no se incluye las tapas acrílicas de las caras ni la disposición de los circuitos).	128
Figura 4.13.	Esquema de circuito de potencia de actuador.	130
Figura 4.14.	Esquema de circuito del tacómetro.	133
Figura 4.15.	Interfaz de análisis del sistema – lazo cerrado (GUIDE).....	137
Figura 4.16.	Interfaz de análisis del sistema–lazo cerrado (SIMULINK).	137
Figura 4.17.	Respuesta,	138
Figura 4.18.	Respuesta,	139
Figura 4.19.	Respuesta,	139
Figura 4.20.	Respuesta,	140
Figura 4.21.	Respuesta,	140
Figura 4.22.	$K_p=1$; $K_i=1$; $k_d=1$	141
Figura 4.23.	$K_p=2$; $K_i=1$; $k_d=1$	142
Figura 4.24.	$K_p=2$; $K_i=2$; $k_d=1$	142
Figura 4.25.	$K_p=2$; $K_i=3$; $k_d=1$	143
Figura 4.26.	$K_p=2.9$; $K_i=3.5$; $k_d=1.9$	143
Figura 4.27.	$K_p=3.7$; $K_i=1.9$; $k_d=3.5$	144
Figura 4.28.	$K_p=3.7$; $K_i=1.9$; $k_d=3.5$. (Esquema anterior).....	145
Figura 4.29.	Modelo matemático del sistema para aplicación de control.	149
Figura 4.30.	Respuesta del sistema - entrada tipo escalón.	149
Figura 4.31.	Esquema de flujo de interfaz para el sistema de control computarizado.	151
Figura 4.32.	Esquema de interfaz de control computarizado – parte 1... ..	153
Figura 4.33.	Esquema de interfaz de control computarizado – parte 2... ..	154
Figura 4.34.	Esquema de flujo de subproceso de censo de fines de carrera.	155
Figura 4.35.	Esquema de subproceso de visualización de datos.	156
Figura 4.36.	Esquema de flujo de subproceso de control.	157
Figura 4.37.	Presentación de la aplicación.	158
Figura 4.38.	Detalles del Proyecto.	159

Figura 4.39.	Instrucciones de calibración de equipo (No 01).	160
Figura 4.40.	Instrucciones de calibración de equipo (No 02).	160
Figura 4.41.	Ayuda Gráfica – interfaz Inicial.	161
Figura 4.42.	Ayuda Gráfica – interfaz No 01.	161
Figura 4.43.	Ayuda Gráfica – interfaz No 02.	162
Figura 4.44.	Ayuda Gráfica – interfaz No 03.	162
Figura 4.45.	Ayuda Gráfica – interfaz No 04.	163
Figura 4.46.	Interfaz de calibración de inyector - inicial.	164
Figura 4.47.	Interfaz de calibración de inyector - final.	165
Figura 4.48.	Instrucciones de utilización de equipo.	166
Figura 4.49.	Sistema de control computarizado para turbina Pelton.	167
Figura 4.50.	Instrucciones de desmontaje de sistema.	168
Figura 5.1.	Nivelación de actuador.	170
Figura 5.2.	Encuadre de mesa.	170
Figura 5.3.	Fijación de vástagos de válvula y actuador.	171
Figura 5.4.	Vista trasera de actuador.	171
Figura 5.5.	Vista lateral de actuador.	172
Figura 5.6.	Vista posterior de actuador.	172
Figura 5.7.	Prueba de Actuador en etapa de construcción – 1.	173
Figura 5.8.	Prueba de sistema – verificación de velocidad.	173
Figura 5.9.	Disposición final - actuador.	174
Figura 5.10.	Sistema de control computarizado en funcionamiento.	174
Figura 6.1.	Resultados de prueba No 01. N, Z1[rpm] vs. t [s].	176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	Parámetros de la turbina Pelton en función de la altura neta..	18
Tabla 2.1.	Clasificación general de los sistemas de control de procesos.	24
Tabla 2.2.	Ajuste de Ziegler-Nichols.	46
Tabla 2.3.	Ajuste de Chien-Hrones-Rewick para perturbaciones del sistema.....	49
Tabla 2.4.	Ajuste de Chien-Hrones-Rewick para referencia.	50
Tabla 2.5.	Ajuste de Cohen-Coon.....	50
Tabla 3.1.	Sensores análogos comunes.....	80
Tabla 3.2.	Tarjetas soportadas por el toolbox de adquisición de datos. ..	84
Tabla 3.3.	Descripción de las direcciones del puerto paralelo.	88
Tabla 3.4.	Funciones utilizadas para generar respuestas temporales ante entradas variadas.	92
Tabla 3.5.	Funciones relacionadas con el lugar de las raíces.	92
Tabla 3.6.	Funciones para manejar el puerto serial.....	93
Tabla 4.1.	Carga generada por la cabeza de inyección de la Turbina Pelton en el inyector.....	104
Tabla 4.2.	Características necesitadas por el computador.	106
Tabla 4.3.	Tabla de Criterio	122
Tabla 4.4.	Tabla de Costo.....	122
Tabla 4.5.	Tabla de Mantenimiento.....	122
Tabla 4.6.	Tabla de Espacio	123
Tabla 4.7.	Tabla de Complejidad	123
Tabla 4.8.	Tabla de Fuerza	123
Tabla 4.9.	Tabla de Precisión	123
Tabla 4.10.	Tabla de Conocimiento	124
Tabla 4.11.	Tabla de Conclusiones.....	124

Tabla 4.12.	Tabla de Conclusiones y Decisión	124
Tabla 4.13.	Detalles de elementos constitutivos del sistema.....	125
Tabla 4.14.	Elementos adicionales necesitados por el sistema.....	126
Tabla 4.15.	Características – circuito de potencia de actuador.	129
Tabla 4.16.	Parámetros de comunicación entre PC - C. Potencia de Actuador (Datos escritos).....	131
Tabla 4.17.	Contabilizador y Acondicionador de Datos, Interfaz de Control Computarizado - Potencia Eléctrica para Censado.	132
Tabla 4.18.	Requerimientos mínimos (Ver tabla 4.2).....	133
Tabla 4.19.	Requerimientos de la PC de control para optimizar el desempeño del sistema.	134
Tabla 4.20.	Datos constantes de conversión de unidades.....	148
Tabla 4.21.	Datos constantes de conversión de unidades (2)	148
Tabla 6.1.	Características de prueba para el equipo.	175
Tabla 6.2.	Prueba No 01 – Datos de funcionamiento – nominal inicial. .	175
Tabla 6.3.	Prueba No 01 – Resultados obtenidos con el sistema de control computarizado.	176

RESUMEN

El presente proyecto fue desarrollado con la finalidad de conseguir Diseñar y Construir un Sistema de Control Computarizado de Velocidad para una Turbina Pelton de Laboratorio, bajo condiciones de carga conocidas.

Para lo indicado anteriormente se generó una solución de ingeniería que satisface las condiciones técnicas encontradas al analizar la situación de la Turbina Pelton que se encuentra en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería Mecánica y que además se ajusta a los recursos disponibles para la realización del proyecto.

En el Capítulo 1 se definen las características principales de las turbinas, en especial de la Turbina Pelton.

El Capítulo 2 trata acerca del control industrial de procesos. Este marco teórico es de mucha importancia pues permite conocer las limitaciones del sistema que se va a controlar desde el punto de vista de la Automatización.

El Capítulo 3 trata acerca de las herramientas disponibles para generar una solución informática para el presente proyecto, al utilizar el paquete computacional MATLAB y sus diferentes herramientas incorporadas.

El Capítulo 4 desarrolla el ciclo de diseño de la solución al problema planteado, conjugando los puntos de vista: mecánico, de control y computacional.

Los Capítulos 5 y 6 tratan de la construcción, pruebas y evaluación de los resultados luego de implementar la solución generada en los capítulos previos, permitiendo unir la parte teórica con el desarrollo técnico real.

Para finalizar se presentan las conclusiones y recomendaciones que se encontraron al finalizar el proyecto, de forma que se pueda prever un panorama claro concerniente al desarrollo de Sistemas de Control, utilizando las

herramientas de MATLAB dentro del ambiente de laboratorio y la industria nacional.

PRESENTACIÓN

ANTECEDENTES

En el Ecuador existen diferentes opciones para controlar sistemas de generación energética o procesos industriales, entre las cuales están: el control electrónico, electromecánico, los PLC's, sistemas SCADA, entre otros.

En el campo del control mediante el uso de PC, aún no se ha utilizado de una manera extensa el software denominado MATLAB y su aplicación de control denominada SIMULINK en las fases de modelación (física) y prototipado

Este tema de tesis plantea el estudiar y desarrollar un sistema de control, mediante el software indicado antes, para rehabilitar un equipo de Turbina Pelton de Laboratorio que se encuentra en el Departamento de Ingeniería Mecánica.

JUSTIFICACIÓN

Este Proyecto se justifica por:

La necesidad de dar un correcto uso al equipo de Turbina Pelton del Laboratorio de Turbo Máquinas del Departamento de Ingeniería Mecánica para que brinde servicio a la Carrera de Ingeniería Mecánica, Maestría de Materiales, Diseño y Producción y otras de la Escuela Politécnica Nacional.

La necesidad del país de automatizar y comunicar con sistemas SCADA las mini-centrales hidroeléctricas que dispone.

Continuar con el desarrollo del área de Automatización Industrial en la Carrera de Ingeniería Mecánica.

Asimilar y transferir conocimientos en el área de Automatización Industrial de Procesos Mecánicos y específicamente en el de automatización de turbo maquinaria.

Complementar la formación de los graduandos en el área.

OBJETIVOS DEL PROYECTO:

Objetivo Principal:

Diseñar y construir un sistema de control para una turbina Pelton de Laboratorio utilizando Matlab y Simulink.

Objetivos Secundarios:

Establecer un marco teórico que fundamente teóricamente el Proyecto y posibilite la transferencia del conocimiento en el área de automatización de turbinas hidráulicas.

Diseñar y/o selección de los sensores, actuadores y controladores que permitan automatizar el funcionamiento de la turbina Pelton.

Construir, instalar y montar el sistema de control.

Desarrollar el programa de control en el Matlab y Simulink.

Probar y dejar operativo el equipo de turbina Pelton con que cuenta el Laboratorio de Turbomáquinas de la Carrera de Ingeniería Mecánica.

CAPÍTULO 1

TURBOMAQUINARIA¹

1.1. DEFINICIÓN

Turbomáquina son todos aquellos dispositivos en el cual la energía es transferida desde o hacia un flujo de fluido continuo por la acción dinámica de uno o más filas de álabes.

Dos principales categorías de turbo maquinaria son identificadas: primero, aquellas que transmiten potencia para incrementar la presión del fluido (ventiladores, compresores y bombas); después, aquellas que producen potencia por la expansión del fluido hacia una baja presión (turbinas hidráulicas, de gas y de vapor).

Las máquinas que extraen energía de una corriente de fluido incompresible y la transforma energía mecánica se llaman turbinas hidráulicas. En una turbina hidráulica, el fluido intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución que gira alrededor de su eje de simetría; éste mecanismo lleva una o varias ruedas, (rodetes o rotores), provistas de alabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el fluido.

¹ El presente capítulo ha sido creado tomando como referencia a:

- DIXON, S.; "Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery"; Cuarta Edición; Butterworth-Heinemann; Boston; 1998.
- FERNÁNDEZ, PEDRO; "Turbinas Hidráulicas", Universidad De Cantabria, Santander, 2003.
- MATAIX, CLAUDIO; "Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas"; Segunda Edición; Ediciones Del Castillo; Madrid; 1986.

1.2. CLASIFICACIÓN

La clasificación más general de las turbinas es: Turbinas de impulso y de reacción.

Turbinas de impulso, son accionadas por uno o más chorros libres de alta velocidad. Cada chorro es acelerado en una tobera externa hasta la rueda de la turbina. Si la fricción y la gravedad se desprecian, ni la presión del fluido ni su velocidad relativa a la rueda cambian conforme pasa sobre los alabes de la turbina. De tal manera, para una turbina de impulso, la expansión del fluido de alta a baja presión toma lugar en toberas externas a los alabes, y el rodete no gira lleno de fluido.

Turbinas de reacción, parte del cambio de la presión del fluido ocurre externamente y parte toma lugar dentro de los alabes móviles. La aceleración externa ocurre y el flujo se desvía para entrar a la rueda en la dirección apropiada, cuando pasa por toberas o aspas estacionarias denominadas alabes guía o alabes distribuidores. Se presenta una aceleración adicional del fluido relativa al rotor dentro de los alabes móviles, de modo que tanto la velocidad relativa como la presión de la corriente cambian a través de la rueda. Debido a que las turbinas de reacción operan llenas de fluido, por lo general pueden producir más potencia para un tamaño total determinado que las turbinas de impulso.

1.3. TURBINAS DE IMPULSO

Estas turbinas se empezaron a utilizarse antes que las de reacción; entre ellas se tienen:

Turbina Zuppinger (1846), con rueda tangencial de cucharas

Turbina Pelton, Figura 1.1, es tangencial, y la más utilizada para grandes saltos

Turbina Schwamkrug, (1850), radial y centrífuga, Figura 1.2

Turbina Girard, (1863), Figura 1.3, axial, con el rodete fuera del agua; mientras el cauce no subía de nivel, trabajaba como una de acción normal, mientras que si el nivel subía y el rodete quedaba sumergido, trabajaba como una de reacción, aunque no en las mejores condiciones; en la actualidad no se utiliza.

Turbina Michel, o Banki, Figura 1.4; el agua pasa dos veces por los álabes de rodete, construido en forma de tambor; se utiliza para pequeños y grandes saltos.

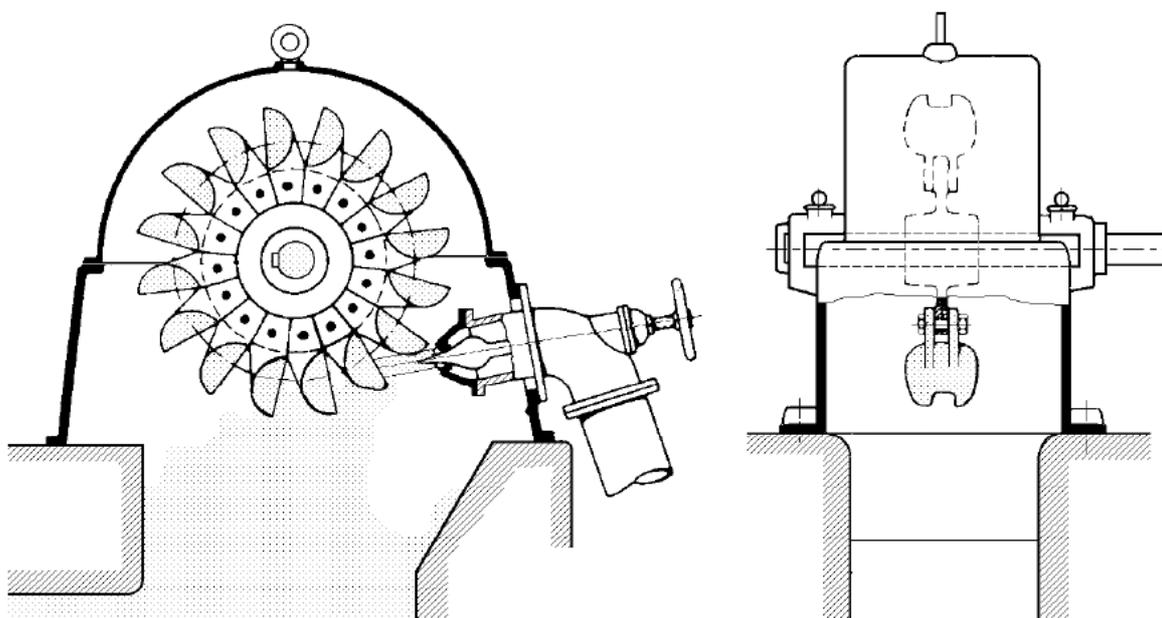


Figura 1.1. Turbina Pelton

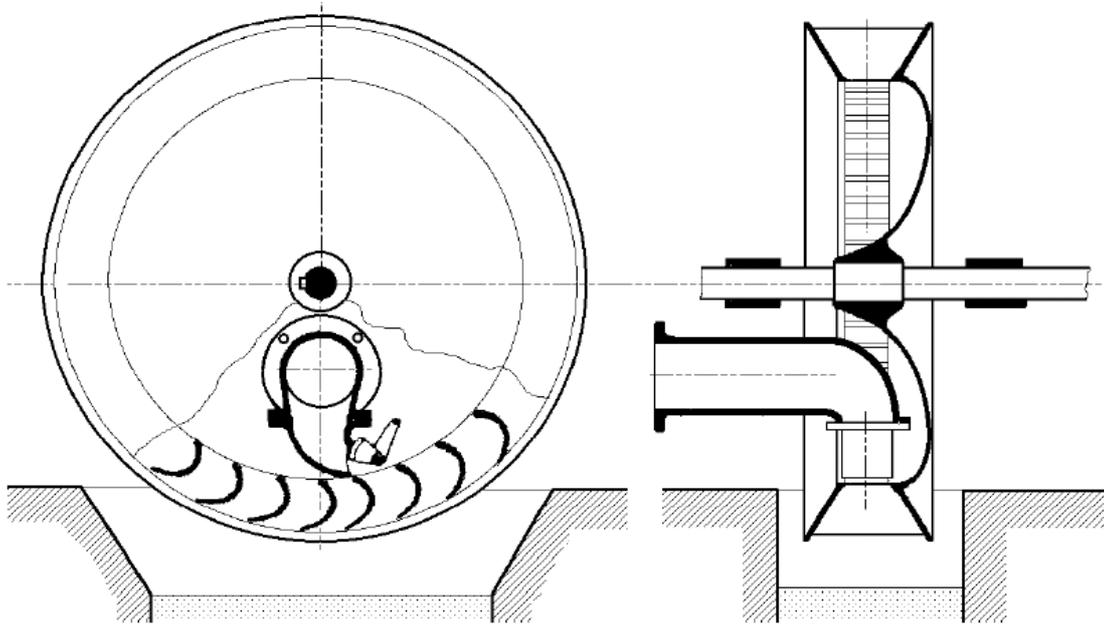


Figura 1.2. Turbina Schwammkrug

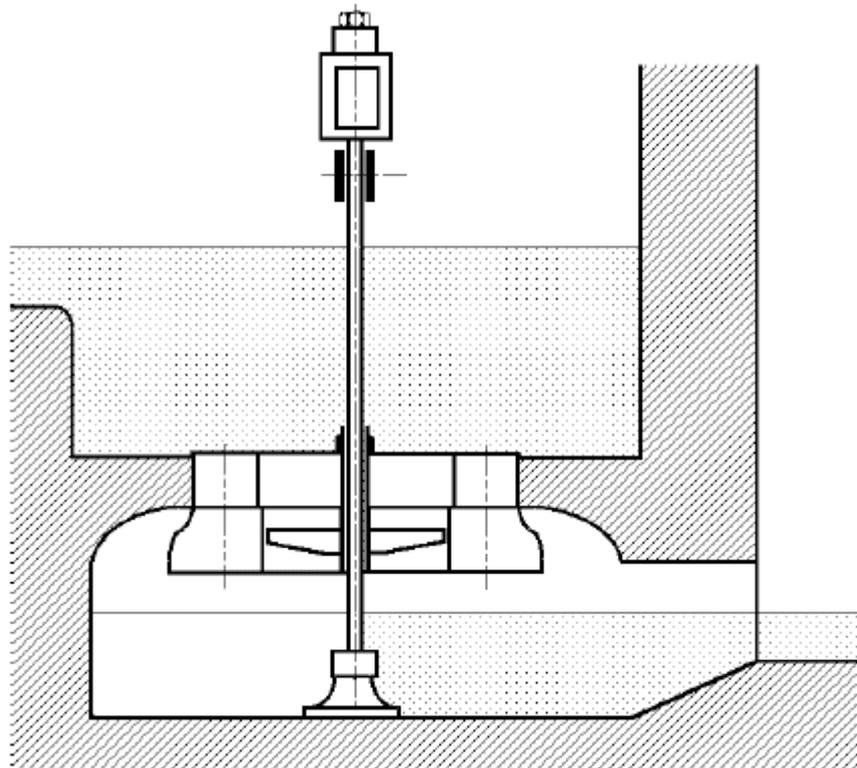


Figura 1.3. Turbina Girard

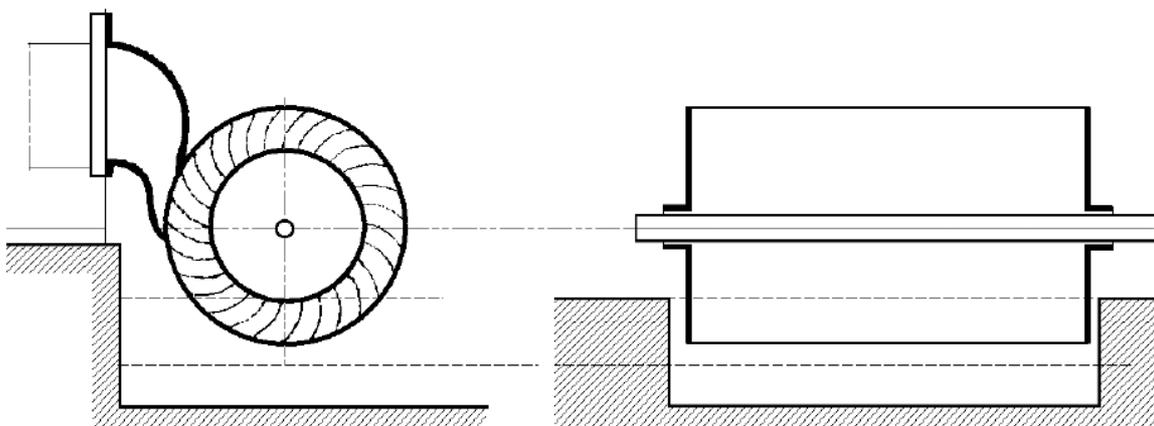


Figura 1.4. Turbina Michel-Banki

1.4. TURBINA PELTON

Las turbinas Pelton son turbinas de chorro libre que se acomodan a la utilización de saltos de agua con mucho desnivel y caudales relativamente pequeños, Figura 1.5, con márgenes de empleo entre 60 y 1500 metros, consiguiéndose rendimientos máximos del orden del 90%.

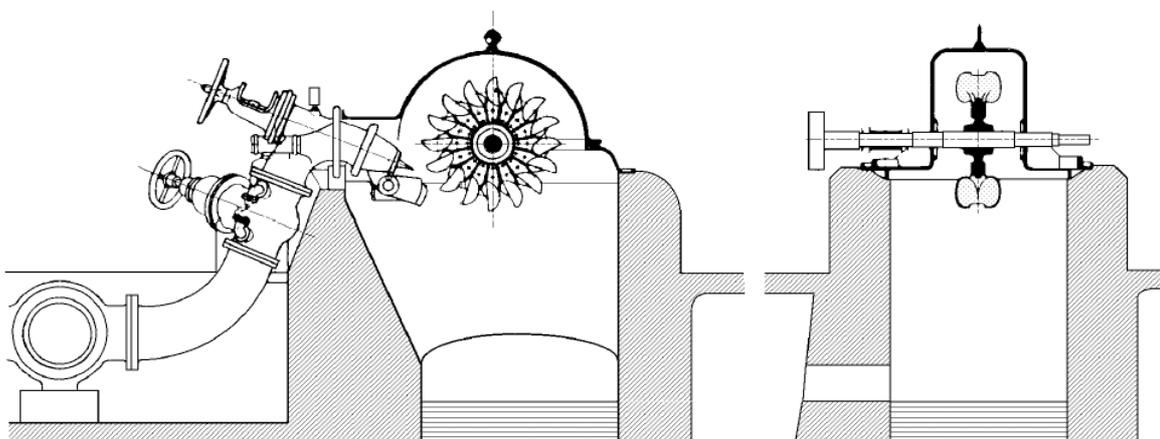


Figura 1.5. Turbina Pelton

1.4.1. CAZOLETAS O CANGILONES.

En una rueda Pelton la dirección del chorro no es ni axial ni radial, sino tangencial; el elemento constructivo más importante es la cazoleta en forma de doble cuchara, Figura 1.6, que recibe el chorro de diámetro d_1 exactamente en su arista media donde se divide en dos, circulando por su cavidad y recorriendo hasta la salida casi un ángulo de 180° , contrarrestándose así los empujes axiales por cambio de dirección de los dos chorros.

El agua una vez que sale de la cazoleta, cae libremente una cierta altura, pasando al cauce inferior.

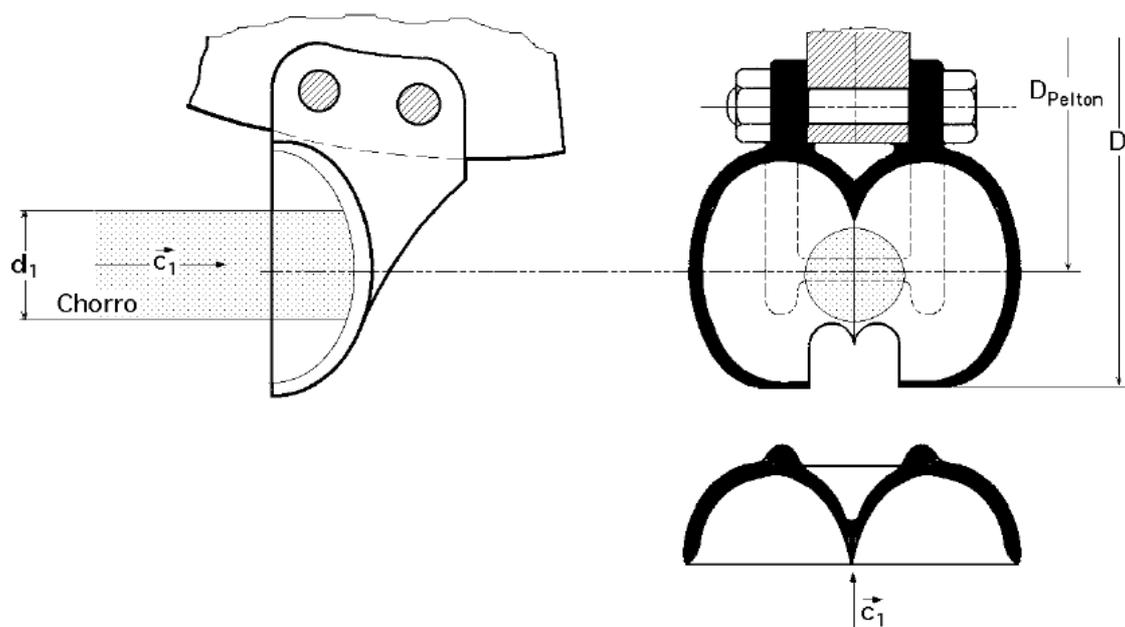


Figura 1.6. Forma de la cazoleta

1.4.2. INYECTOR

El inyector es el órgano regulador del caudal del chorro; consta de una válvula de aguja cuya carrera determina el grado de apertura del mismo; para poder asegurar el cierre, el diámetro máximo de la aguja tiene que ser superior al de salida del chorro cuyo diámetro d se mide en la sección contraída, situada aguas abajo de la salida del inyector y en donde se puede considerar que la presión exterior es igual a la atmosférica.

El chorro está constituido por un núcleo central convergente de agua y una sección anular creciente que contiene una emulsión de agua y aire.

Con el fin de asegurar una buena regulación, conviene diseñar el inyector de forma que exista una proporcionalidad entre la potencia de la turbina y la carrera z de la aguja, por cuanto la potencia es proporcional al caudal y éste, a su vez, a la sección de paso normal al flujo.

La variación del caudal del chorro para regular la potencia se consigue mediante una aguja de forma especial, con cuyo accionamiento se puede estrangular la sección de salida de la boquilla; su regulación puede ser manual o automática mediante un servomotor.

Tiene además otro sistema de regulación por desviación del chorro, que consiste en una superficie metálica llamada deflector, que se introduce en medio del chorro, dividiéndolo y desviando una parte del mismo, de forma que en vez de dirigirse contra las cazoletas, sale lateralmente sin producir ningún efecto útil. De esta forma se evitan sobre presiones en la tubería, por cuanto el caudal que circula por ésta continua siendo el mismo, Figura 1.7. Cuando se dispone de un solo inyector, el rodete tiene el eje de giro horizontal y el eje de salida del chorro es tangente horizontal, inferior a la circunferencia del rodete, cuyo diámetro se denomina diámetro Pelton, cayendo el agua a la salida de las cucharas al fondo de la turbina, sin interferir el giro de la rueda.

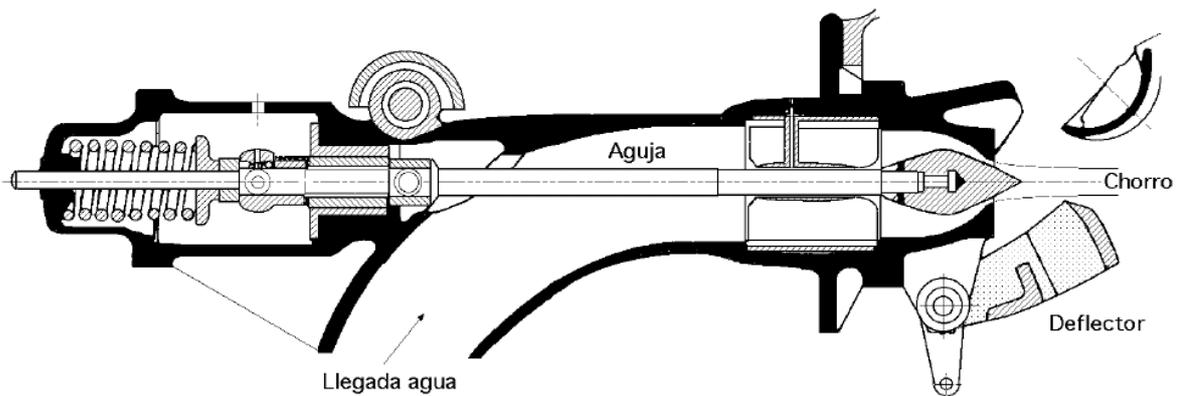


Figura 1.7. Inyector

1.4.3. REGULACIÓN DE VELOCIDAD EN LA TURBINA PELTON

Para mantener constante la velocidad de la turbina, el caudal inyectado tiene que adaptarse en cada instante al valor de la carga, por lo que la posición del inyector tiene que ajustarse mediante un regulador que actúa según la velocidad de la turbina y en el caso más general, en forma automática, Figura 1.8.

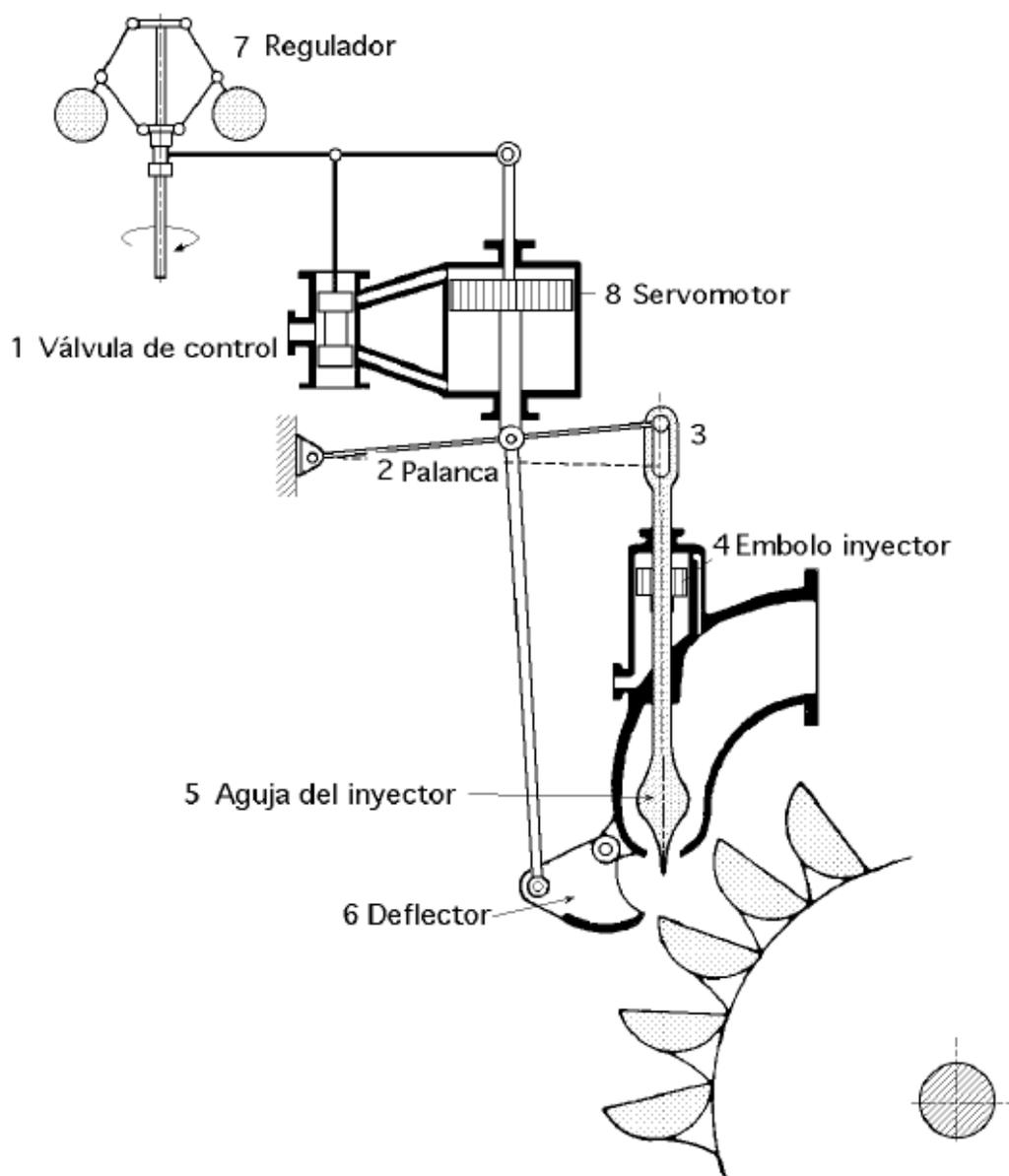


Figura 1.8. Regulador Simple.

Si se supone que la turbina se ha acelerado, el regulador 7 levantará la válvula 1 y el aceite a presión entrará en el cilindro grande haciendo bajar el émbolo 8, con lo que la palanca 2 bajará y el deflector 6 cortará al chorro desviando una parte del mismo.

El punzón 5 que estaba retenido por la palanca 2 no avanza solidariamente con ésta, debido al huelgo de la hendidura 3, sino que es empujado lentamente por el

agua a presión que pasa por un orificio estrecho, señalado en la figura y que actúa sobre el émbolo 4.

El punzón en su avance llega a encontrarse con el tope inferior de la hendidura 3 que le impide seguir cerrando la salida del inyector. Si sobreviene una carga brusca, el émbolo 8 actuará en sentido contrario, tirando rápidamente de la aguja 5 hacia atrás y llevando, simultáneamente, el deflector a su posición primitiva.

Cuando se utilizan grandes caudales de agua y se emplee un solo inyector, las cazoletas resultan muy grandes y pesadas; también se encuentra el inconveniente de que toda la fuerza tangencial se ejerce en un solo punto de la rueda, lo que representa un desequilibrio dinámico.

En consecuencia conviene hacer el montaje de dos o más inyectores cuando el caudal lo requiera, por lo que las cazoletas estarán menos cargadas y, por lo tanto, serán más pequeñas. El par motor se distribuirá más uniformemente sobre la periferia de la rueda, aumentará el número específico de revoluciones en raíz cuadrada del número de cazoletas y a igualdad de diámetro del rodete, la turbina adquirirá una velocidad angular mayor.

1.4.4. TRIÁNGULOS DE VELOCIDADES

Para el estudio del triángulo de velocidades se utiliza la nomenclatura universal, a la entrada y salida del rodete:

\vec{u} es la velocidad tangencial o periférica de la rueda.

\vec{c} es la velocidad absoluta del agua.

\vec{w} es la velocidad relativa del agua con respecto al álabe.

α es el ángulo que forma la velocidad \vec{u} con la velocidad \vec{c} .

β es el ángulo que forma la velocidad \vec{u} con la velocidad \vec{w} .

El subíndice 0 es el referente al entrada del agua en la corona directriz o distribuidor.

El subíndice 1 es el referente a la entrada del agua en el rodete.

El subíndice 2 es el referente a la salida del agua del rodete.

El subíndice 3 es el referente a la salida del agua del tubo de aspiración.

El agua está en el rodete con una velocidad \vec{c}_1 , que si se encuentra en servicio normal en funcionamiento normal se moverá con una velocidad tangencial \vec{u}_1 .

La velocidad absoluta \vec{c}_1 forma un ángulo α_1 .

La velocidad relativa \vec{w}_1 forma un ángulo β_1 (ángulo del álabe a la entrada).

En todo momento la velocidad relativa es tangencial a lo largo del álabe.

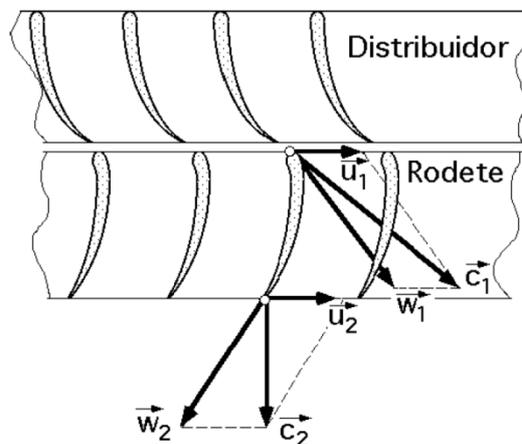


Figura 1.9. Nomenclatura de los triángulos de velocidades.

Como se puede notar en la Figura 1.9 el agua circula libremente produciendo un intercambio de energía, cambiando así la velocidad de salida:

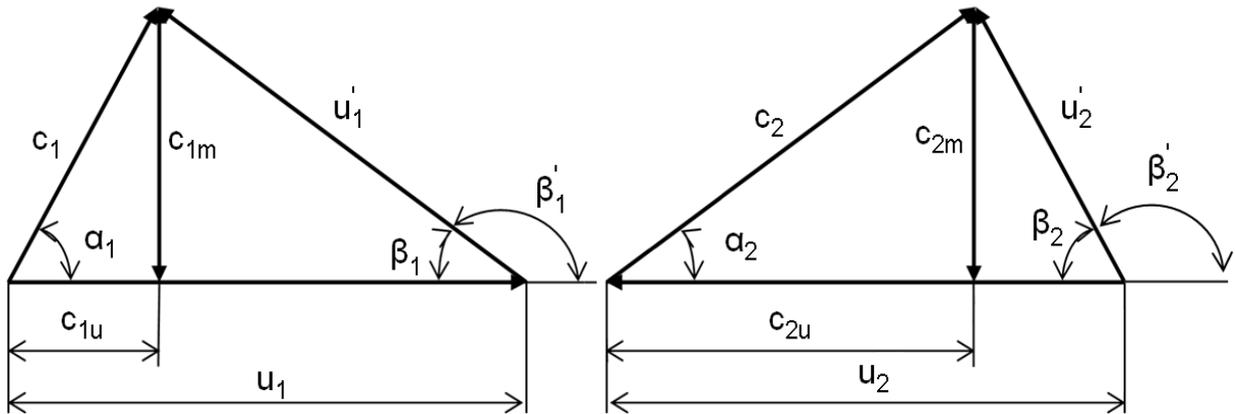


Figura 1.10. Triángulos de velocidades.

En la Figura 1.9, el chorro de agua que ingresa a la velocidad relativa \vec{w}_1 se ve afectado por un coeficiente de reducción de velocidad relativa ψ . Este factor estará entre 0 a 1 como su máximo valor. Así se tendrá:

$$w_2 = \psi w_1 \quad [1.1]$$

Cuando el rodete inicia un aumento de su velocidad periférica \bar{u} de tal forma que la nueva velocidad $\bar{u}'_1 > \bar{u}_1$ sea la velocidad de embalamiento, en ésta situación el agua golpea contra la cara posterior de los alabes al desviarse la velocidad relativa \vec{w}_1 , en relación con la tangente del alabe.

Por tal fenómeno la fuerza tangencial se vería frenada por la fuerza de choque; aunque el rodete gire sin control y sin regulación, la velocidad de embalamiento tiene un límite Figura 1.11, que se ve expresado en la ecuación 1.2.

$$u'_1 = [1.8 - 2.2] u_1 \quad [1.2]$$

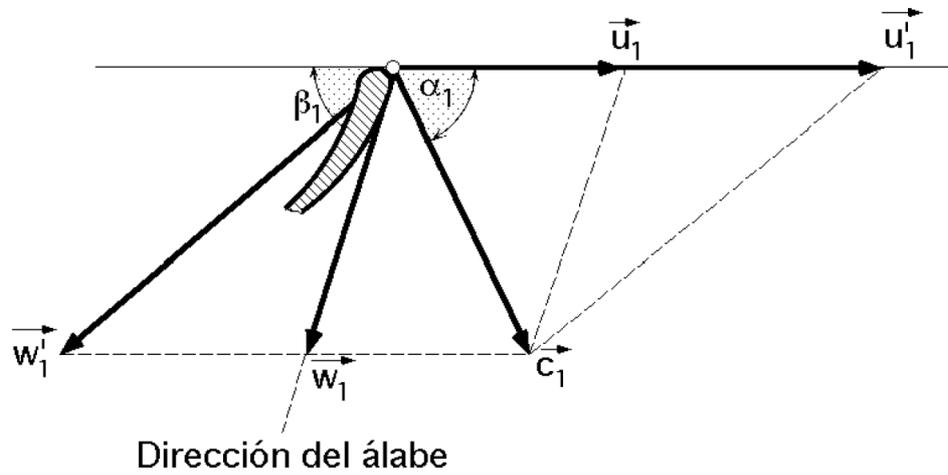


Figura 1.11. Velocidad de embalamiento

En la turbina Pelton, el chorro con velocidad absoluta \vec{c}_1 golpea simétricamente a la arista mediana de la cazoleta, dividiéndose en dos partes iguales y deslizándose sobre las dos mitades de la misma, saliendo desviados con una velocidad relativa $w_2 = \psi w_1$ y ángulo de salida $\beta_2 = 180^\circ$. En la realidad éste ángulo es se ve afectado, como se muestra en la Figura 1.12.

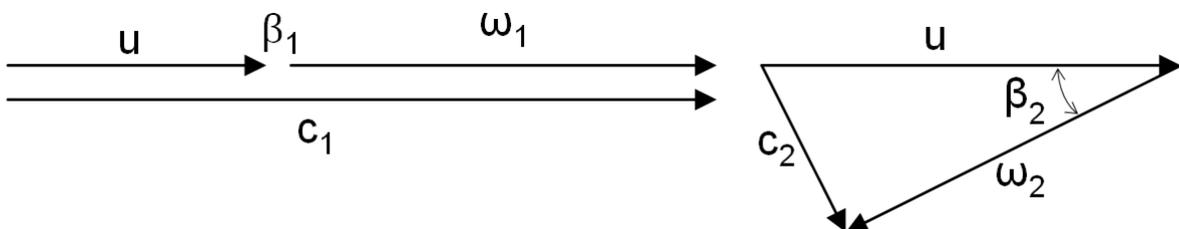


Figura 1.12. Triángulos de velocidades ideal y real.

\vec{c}_2 debe ser muy pequeño porque representa energía perdida.

En la práctica, el ángulo a la entrada del rodete $\beta_1=0^\circ$, aunque se desprecie la componente de choque motivada por tal circunstancia; los diámetros de la rueda a la entrada y salida son iguales, por lo que las velocidades \vec{u}_1 y \vec{u}_2 también lo serán.

Si $\beta_1=0^\circ$, $\beta_2=180^\circ$, las velocidades \vec{c}_1 y \vec{u}_1 están en la misma dirección, al igual que \vec{c}_2 y \vec{u}_2 , deduciéndose que:

$$c_1 = c_{1n} \ll c_2 = c_{2n} \quad [1.3]$$

En general el salto H_n es fijo y \vec{c}_1 es conocida, por lo que parece interesante determinar la velocidad tangencial \vec{u}_1 que debe tener la rueda para obtener un rendimiento máximo.

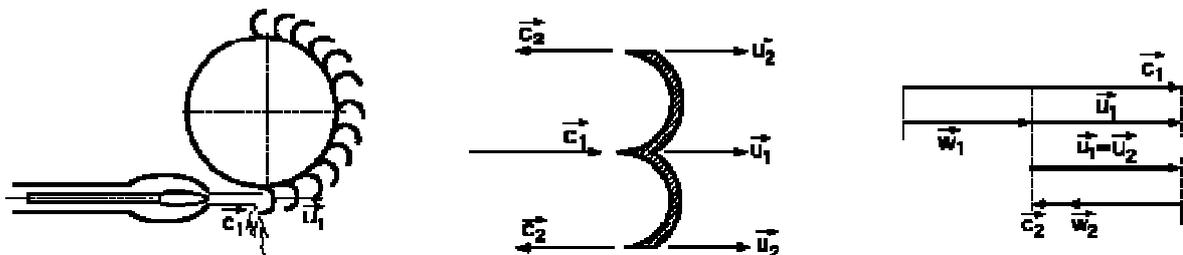


Figura 1.13. Diagrama de velocidades

Teniendo en cuenta los triángulos de velocidades con $\beta_1=0^\circ$ $\beta_2=180^\circ$,:

$$\left. \begin{aligned} \vec{c}_1 &= \vec{u}_1 + \vec{w}_1 \\ c_2 = u_2 - w_2 = u_1 - w_2 = |w_2| = \psi w_1 = u_1 - \psi w_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow c_1 - c_2 = w_1 (1 + \psi) = (c_1 - u_1) (1 + \psi)$$

[1.4]

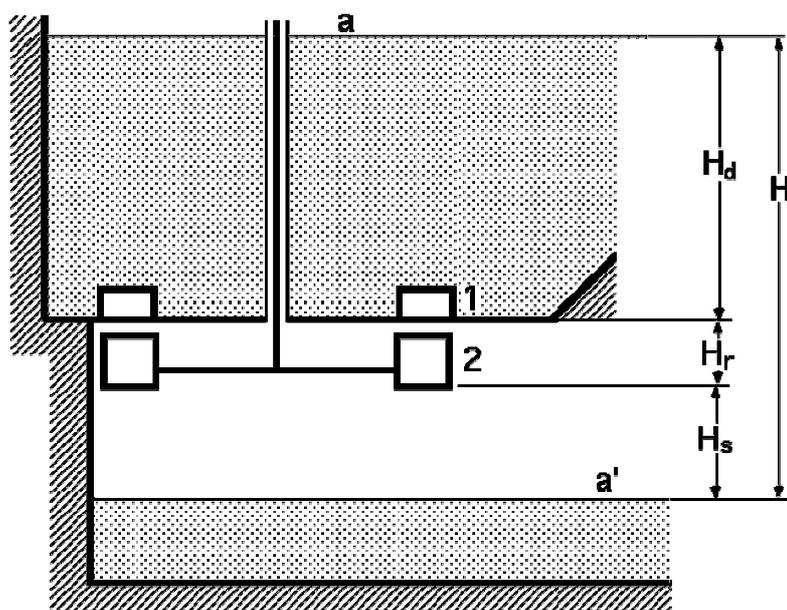


Figura 1.14. Velocidad absoluta de entrada del agua en el rodete

Mediante Bernoulli entre a y 1, con plano de comparación en 1.

$$0 + \frac{p_{atm}}{\gamma} + H_d = \frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} \quad [1.5]$$

$$c_1 = \sqrt{2g \left(H_d - \frac{p_1 - p_{atm}}{\gamma} \right)} \quad [1.6]$$

Pero para las turbinas de acción $p_1 = p_{atm}$, resultando en

$$c_1 = \sqrt{2gH_d} \quad [1.7]$$

Tomando en cuenta que c_1 es teórica, ya que está afectada por el rozamiento del distribuidor, es decir, es afectado por el factor ϕ_1 , el cual es conocido como el coeficiente de velocidad de la tobera.

$$c_1 = \phi_1 \sqrt{2gH_d} = \phi_1 \sqrt{2gH_n} \quad [1.8]$$

Con el fin de evitar ensayar todas las posibles velocidades para un máximo rendimiento para todos los posibles valores de salto neto H_n , se opera con independencia de éste mediante los coeficientes óptimos de velocidad: ξ ; ϕ ; λ ; μ ; k , partiendo de las siguientes relaciones:

$$u_1 = \xi_1 \sqrt{2gH_n} ; c_1 = \phi_1 \sqrt{2gH_n} ; w_1 = \lambda_1 \sqrt{2gH_n} ; c_{1n} = \mu_1 \sqrt{2gH_n} ; c_{1m} = k_{1m} \sqrt{2gH_n} \quad [1.9]$$

$$u_2 = \xi_2 \sqrt{2gH_n} ; c_2 = \phi_2 \sqrt{2gH_n} ; w_2 = \lambda_2 \sqrt{2gH_n} ; c_{2n} = \mu_2 \sqrt{2gH_n} ; c_{2m} = k_{2m} \sqrt{2gH_n} \quad [1.10]$$

Las ecuaciones 1.9 y 1.10 nos llevan a definir las ecuaciones 1.11 y 1.12.

$$u_1 = \xi_1 ; c_1 = \phi_1 ; w_1 = \lambda_1 \quad [1.11]$$

$$u_2 = \xi_2 ; c_2 = \phi_2 ; w_2 = \lambda_2 \quad [1.12]$$

Se obtiene:

$$\begin{cases} \phi_1 = \xi_1 + \lambda_1 \\ \phi_2 = \xi_1 - \psi \lambda_1 \end{cases} \Rightarrow \phi_1 - \phi_2 = \lambda_1 (1 + \psi) = (\phi_1 - \xi_1) (1 + \psi) \quad [1.13]$$

Por lo que la ecuación 1.11 en coeficientes óptimos de velocidad es la misma que la ecuación 1.4.

1.4.5. DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO MANOMÉTRICO.

Se denomina rendimiento manométrico al rendimiento que no toma en cuenta más que las pérdidas de carga de tipo hidráulico y se define como la relación entre la energía real utilizada por el rodete para la energía puesta a disposición de la turbina.

$$\eta_{man} = \frac{N_{ef}}{N_h} = \frac{N_{ef}}{\gamma Q H_n} \Rightarrow N_{ef} = \gamma Q H_n \eta_{man} \quad [1.14]$$

En función de los coeficientes óptimos de velocidad.

$$\eta_{man} = 2\xi_1 (\phi_1 - \xi_1) (1 + \psi) \quad [1.15]$$

1.4.6. RELACIÓN ENTRE EL DIÁMETRO DE LA RUEDA 1_r , EL DIÁMETRO DEL CHORRO 1_c Y EL NÚMERO ESPECÍFICO DE REVOLUCIONES 1_r PARA LA TURBINA PELTON DE UN INYECTOR.

Sustituyendo en η_s los valores del caudal, potencia y número de revoluciones, se obtiene:

$$\eta_s = \frac{n\sqrt{N}}{H_n^{5/4}} = \left| \begin{array}{l} Q = \frac{\pi d^2}{4} c_1 = \frac{\pi d^2}{4} \phi_1 \sqrt{2gH_n} \\ N = \frac{\gamma Q H_n \eta}{75} = \frac{\gamma \pi d^2 \phi_1 \sqrt{2gH_n^3} \eta}{300} = 46.36 d^2 \phi_1 H_n^{3/2} \eta \\ u_1 = \xi_1 \sqrt{2gH_n} = \frac{\pi D n}{60} ; n = \frac{60 \xi_1 \sqrt{2gH_n}}{\pi D} \end{array} \right| =$$

$$\frac{60 \xi_1 \sqrt{2gH_n}}{\pi D} \frac{1}{H_n^{5/4}} \sqrt{\frac{\gamma \pi d^2 \phi_1 \sqrt{2gH_n^3} \eta}{300}} = 18.21 \xi_1 \sqrt{\eta \phi_1} \frac{d}{D} \quad [1.16]$$

Para el caso el agua, $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$, la ecuación 1.12 se resumiría a:

$$\eta_s = 575.8 \xi_1 \sqrt{\eta \phi_1} \frac{d}{D} \quad [1.17]$$

La ecuación 1.13 relaciona n_s con d/D en función del rendimiento global y los coeficientes óptimos de velocidad ϕ_1 y ξ_1 . En la práctica si se toman valores medios: $\eta=0,825$; $\xi_1=0,48$; $\phi_1=0,98$, se obtiene:

$$n_s \cong 248 \frac{d}{D} \quad [1.18]$$

Este es un resultado que facilita trabajar con los cálculos.

De acuerdo con lo visto, n_s sólo puede variar con d/D por cuanto ϕ_1 viene impuesto por un salto dado H_n y ξ_1 por la condición de rendimiento máximo η_{max} .

La relación d/D viene limitada por razones de índole constructivas; si es pequeña, se tendrá una rueda de gran diámetro con un chorro de pequeño diámetro, por lo que las cucharas serían muy pequeñas y al ser el chorro tan fino la potencia sería pequeña, lo cual, al tener que mover un gran volante, constituido por la propia rueda y tener que vencer grandes rozamientos, debido al peso del rodete, se obtendrían rendimientos muy bajos, que harían inutilizable la turbina.

Por el contrario, si d/D es muy grande, implicaría también cucharas muy grandes, por cuanto deberían recibir un chorro de gran diámetro en comparación con el de la rueda, presentándose dificultades inherentes al tamaño de las cucharas, que harían impracticable la turbina.

Tabla 1.1. Parámetros de la turbina Pelton en función de la altura neta.²

Altura neta, H_n [m]	300	400	500	750	1000
No esp. revoluciones n_s	30-26,5	28,5-25,5	22,5-16,5	15,5-12,5	10,5
Relación de diámetros, d/D	0,125-0,085	0,106-0,077	0,094-0,069	0,065-0,052	0,044
No de cazoletas, x	17-20	18-21	18-23	24-28	27-31
No rev. reducido n_{11}	36,5-38,5	37-39	37,5-39,5	38-40	39,5
Caudal reducido Q_{11}	53-28,2	37,7-21,7	28,2-17,3	13,2-9,35	6,38

² - FERNÁNDEZ, PEDRO; "Turbinas Hidráulicas", Universidad De Cantabria, Santander, 2003.

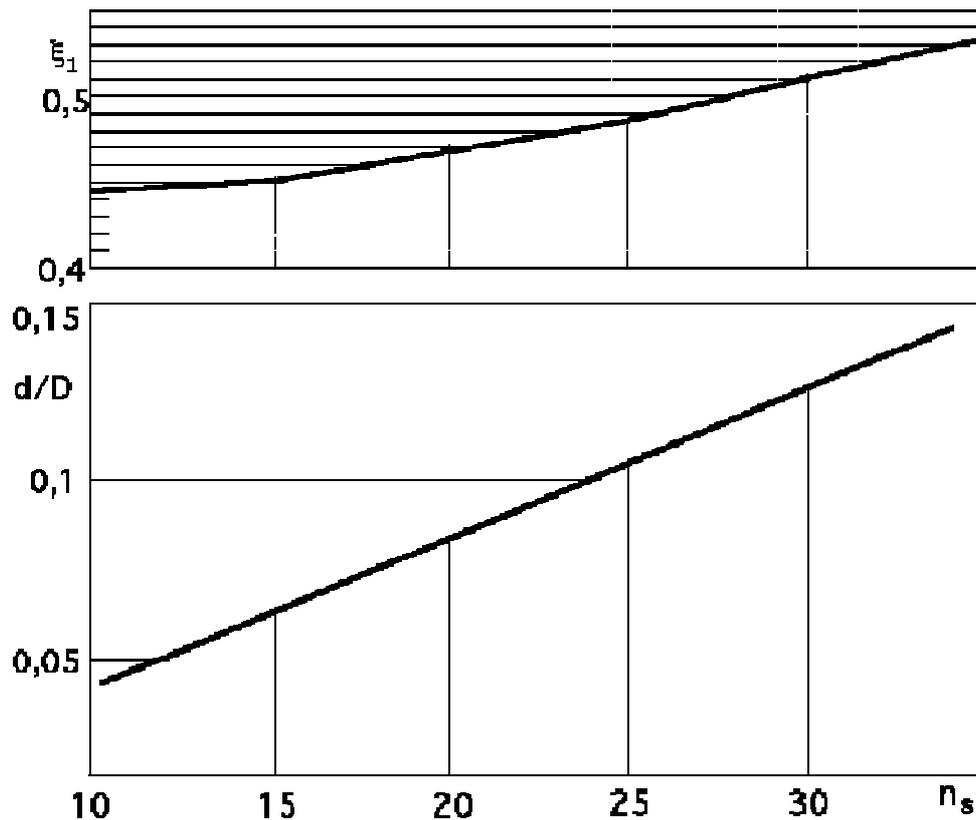


Figura 1.15. Valores de d/D , y ξ_1 en función de n_s

Experimentalmente se ha comprobado que los valores d/D tienen que estar comprendidos entre los límites siguientes, Figura 1.15:

$$\frac{1}{200} < \frac{d}{D} < \frac{1}{7} \quad [1.19]$$

Que se corresponden con: $1.23 < n_s < 35$, aunque en la práctica y para turbinas Pelton de un solo inyector se acepta: $5 < n_s < 30$.

1.4.7. FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE LAS CAZOLETAS.

La poder determinar la fuerza que actúan sobre las cazoletas se supone que el rodete se para durante un instante para recibir el chorro de agua en un choque directo, así ésta fuerza será de la siguiente forma:

$$F = \frac{\gamma Q}{g} (c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2) = | \alpha_1 = 0 ; c_2 = 0 | = \frac{\gamma Q c_1}{g} \quad [1.20]$$

Cuando se encuentra en movimiento:

$$F = \frac{\gamma Q}{g} (w_1 \cos \beta_1 - w_2 \cos \beta_2) = \left| \beta_1 = 0^\circ ; \beta_2 = 180^\circ \right| = \frac{\gamma Q w_1 (1 + \psi)}{g} = \frac{\gamma Q (c_1 - u_1) (1 + \psi)}{g} \quad [1.21]$$

1.4.8. CURVAS CARACTERÍSTICAS CON SALTO CONSTANTE.

La variación de la altura en la turbina Pelton es sumamente despreciable por lo que se asume una altura de salto constante, por ende las características de caudal, potencia y rendimiento se pueden poner en función del número de revoluciones n , o lo que es lo mismo, en función de ξ_1 .

$$u_1 = \xi_1 \sqrt{2gH_n} = \frac{\pi D n}{60} ; n = \frac{60}{\pi D} \xi_1 \sqrt{2gH_n} \quad [1.22]$$

Si H_n es constante la velocidad del chorro también lo será $c_1 = \phi_1 \sqrt{2gH_d} = cte$; para una determinada abertura del inyector correspondiente a una posición $x = cte$ de la aguja se tiene un chorro de sección:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \quad [1.23]$$

Sustituyendo la ecuación 1.8 y 1.23 en la de caudal:

$$Q = Q c_1 = Q \phi_1 \sqrt{2gH_d} = \frac{\pi d^2}{4} \phi_1 \sqrt{2gH_d} = 3.477 \phi_1 d^2 \sqrt{H_n} = cte \quad [1.24]$$

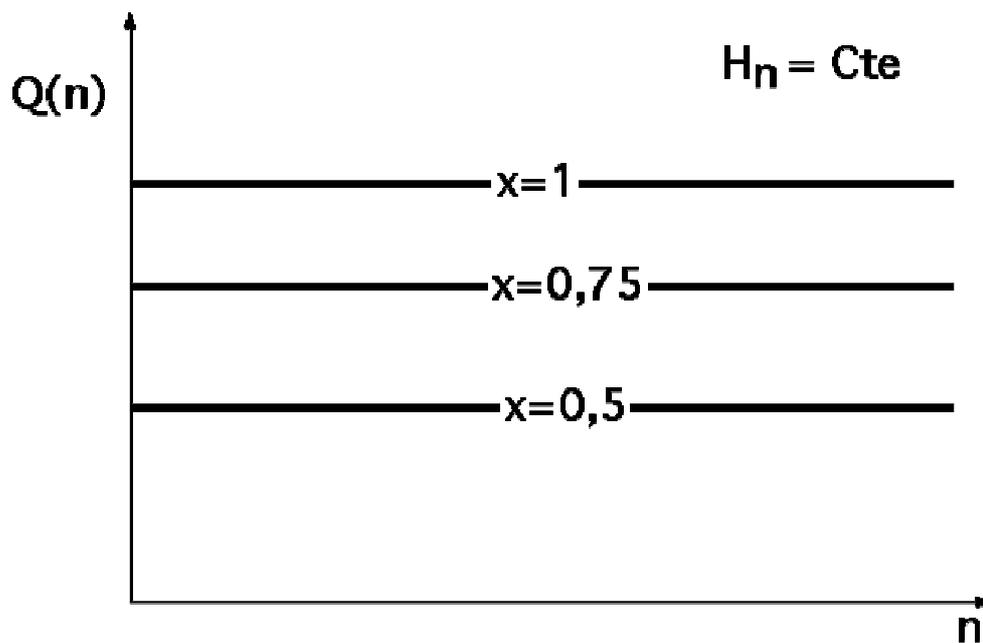


Figura 1.16. Curva de caudal para diversos grados de apertura $x(z)$.³

Sustituyendo la ecuación 1.15 en la potencia:

$$N = \frac{vQH_n \eta}{75} = \frac{2vQH_n}{75} \xi_1 (\varphi_1 - \xi_1) (1 + \psi) = \frac{2vQH_n}{75} \varphi_1^2 \left[\frac{\xi_1}{\varphi_1} - \left(\frac{\xi_1}{\varphi_1} \right)^2 \right] (1 + \psi) \quad [1.25]$$

Para el rendimiento manométrico:

$$\eta_{man} = 2\xi_1 (\varphi_1 - \xi_1) (1 + \psi) = 2\varphi_1^2 \left[\frac{\xi_1}{\varphi_1} - \left(\frac{\xi_1}{\varphi_1} \right)^2 \right] (1 + \psi) \quad [1.26]$$

Para $H_n = \text{cte}$ el caudal es constante para una determinada apertura del inyector $x = \text{cte}$, por lo tanto la ecuación 1.25 es una parábola que pasa por el origen,

Figura 1.25, y por el punto definido por $\frac{\xi_1}{\varphi_1} = 1$. En éste punto $c_1 = u_1$, y la velocidad

³ En las etapas de diseño, construcción y pruebas se pasará a denominar z al recorrido del inyector.

relativa, $w_1 = c_1 - u_1$, será nula, no empujando el agua a la cazoleta (velocidad de embalamiento).

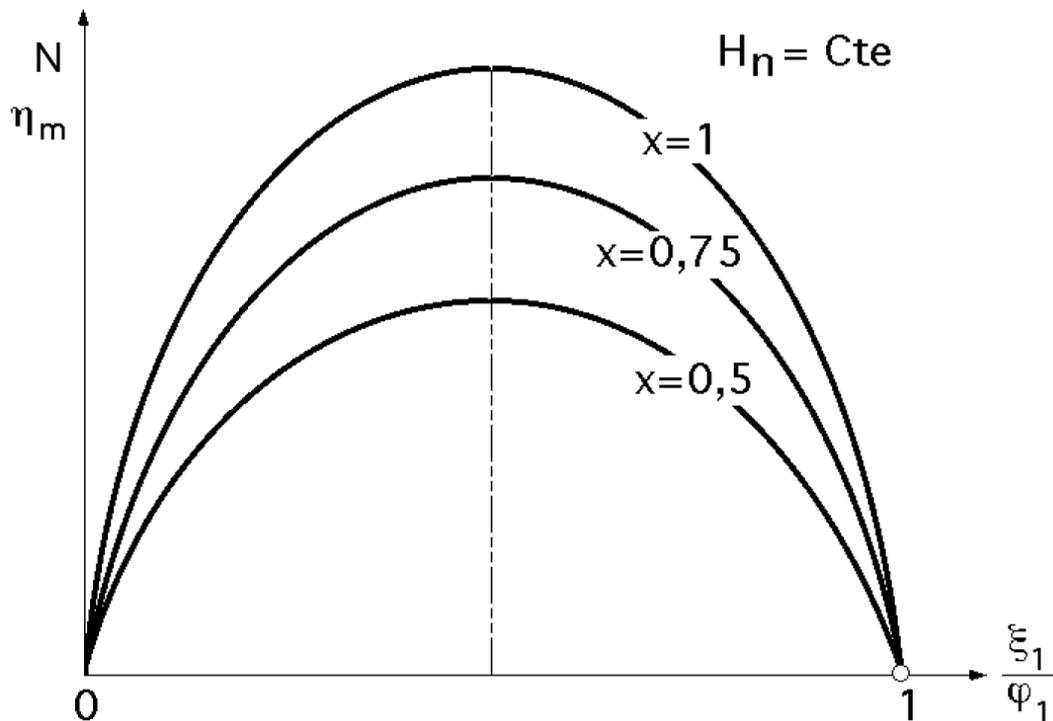


Figura 1.17. Curvas de potencia y de rendimiento.

La potencia máxima se obtiene, teóricamente, para: $\frac{\xi_1}{\varphi_1} = 0.5$; en la práctica ésta es para valores menores a 0.5.

De igual forma el rendimiento también es una parábola que pasa por el origen y por el punto $\frac{\xi_1}{\varphi_1} = 1$, con un máximo teórico para $\frac{\xi_1}{\varphi_1} = 0.5$.

CAPÍTULO 2

CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS⁴

2.1. INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE PROCESOS

La operación de un proceso involucra la necesidad de satisfacer una serie de aspectos de carácter técnico, económico y social. Así pues, el objetivo de todo proceso es obtener un determinado producto (o un conjunto de productos), con características de calidad pre-especificadas, con la mayor rentabilidad posible y sin generar alteraciones perjudiciales para el medio ambiente y/o las personas.

Hoy en día, “saber” control de procesos involucra una masa de conocimientos tan grande que es prácticamente imposible hablar de especialistas en este área. Para enfatizar la idea, a continuación se enumera simplemente algunos de los temas más frecuentemente encontrados en la literatura y relacionados solamente con los conceptos teóricos asociados al control de procesos:

- modelado matemático,
- modelos continuos o discretos, determinísticos o estocásticos,
- simulación dinámica,
- identificación,

⁴ Este capítulo se ha basado en material de:

- BOLTON, WILLIAM; “Mecatrónica – Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica”; 2da edición; Alfaomega; Mexico; 2001.
- BURNS, ROLAND, “Advanced Control Engineering”, Butterworth –Heinemann, Primera Edición, Oxford, 2001.
- GIL, JORGE, “Ingeniería de Control”, Unicopia, Segunda Edición, San Sebastián, 2004.
- OGATA, KATSUHIKO, “Ingeniería de Control Moderna”, Prentice Hall, Tercera Edición, México, 1998.
- SCENNA, NICOLÁS, “Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos”, S/E, 1999.

- control óptimo, control adaptable,
- control robusto,
- estimación de estados y parámetros,
- control no lineal,
- medición, adquisición y tratamiento de datos,
- detección y diagnóstico de fallas,
- análisis de señales y filtrado óptimo,
- control por computadora,
- control distribuido,
- control supervisor,
- control estadístico, entre otros.

En la Tabla 2.1, se muestra esquemáticamente una clasificación muy general de los sistemas de control de procesos. Los niveles inferiores corresponden a los sistemas más simples y menos automatizados.

Tabla 2.1. Clasificación general de los sistemas de control de procesos.⁵

Nivel	Nombre	Tipos de control y principales características (*)
V	Automatización total	Sistemas informáticos integrados - Mínima intervención humana - Control y decisión a cargo del sistema
IV	Jerárquico (gerencial)	Sistemas de control avanzado - Bases de Datos - Reconciliación de datos - SPC - Políticas de Producción - Relación de factores económicos/financieros - Sistemas de cómputo potente ("mainframe") - Sistemas expertos y de inteligencia artificial - CIM
III	Avanzado	DCS - Interfaces gráficas - Interfaces hombre/máquina - Control por computadora - Algoritmos de control (por retroalimentación de estados, óptimo, adaptable, no lineal, diagnóstico de fallas, etc.) - SCADA - Comunicaciones digitales por radio y telefónicas
II	Clásico	Mediciones "en línea" - Comunicaciones analógicas y digitales - Control automático a lazo cerrado - Simulación dinámica - Controladores PID - Dispositivos digitales - PLC - Interfaces digitales ("displays")
I	Manual	Órganos de accionamiento manual - Ausencia de mediciones "en línea" - Interfaces con el operador inexistentes o inadecuadas - Dispositivos analógicos
(*) Siglas: PLC: controlador de lógica programable; DCS: sistema de control distribuido; SCADA: adquisición de datos y control supervisor; SPC: control estadístico de procesos; CIM: producción informatizada integralmente.		

- ⁵ GIL, JORGE, "Ingeniería de Control", Unicopia, Segunda Edición, San Sebastián, 2004.

El resto de este capítulo, se ocupará básicamente de aspectos relacionados con el control clásico y el avanzado (niveles II y III), enfatizando la utilidad de la simulación numérica en relación con el control de procesos. En la primer parte, se incluye una revisión breve de conceptos y estructuras básicas de los sistemas de control, y una somera descripción cualitativa sobre su funcionamiento. Si bien varios de los temas que se tratan son objeto de materias de grado específicas, se los incluye para considerar enfoques más modernos que son de uso cada vez más frecuente en la actividad profesional. Tal es el caso de la descripción de sistemas en variables de estado, el control de sistemas no lineales, el control por realimentación de estados, el control óptimo, el control adaptable, entre otros.

En la segunda parte del capítulo, se abordan específicamente aspectos sobre la simulación numérica de estos sistemas, y su utilidad en la práctica de ingeniería. Se tratan temas como el uso de simuladores para el diseño de sistemas de control, y para el ajuste de los parámetros de los controladores.

Es indudable que el uso de simuladores dinámicos presenta una gran ventaja del punto de vista del análisis de los sistemas de control. La gran potencia de cómputo disponible actualmente permite la simulación de sistemas más complejos, con modelos matemáticos más detallados, y con una mejor aproximación al comportamiento real de las plantas.

2.2. NOCIONES BÁSICAS SOBRE CONTROL DE PROCESOS

Se identificará primero algunas definiciones básicas relacionadas con los temas a tratar en el resto del capítulo.

Un proceso es un conjunto de operaciones (simultáneas o secuenciales) que producen transformaciones de la materia de carácter físico y/o químico. Todo proceso interactúa con el resto del medio a través de las variables de salida, de las variables manipuladas, y de las perturbaciones.

Las variables de salida son aquellas variables del proceso cuyo valor se desea o se necesita conocer a lo largo del tiempo (normalmente son las indicativas de la calidad del producto, del nivel de producción, etc.).

Las variables manipuladas son aquellas que pueden ser modificadas durante la operación del proceso, para que las variables de salida evolucionen según una política preestablecida (por ejemplo, una variable manipulada típica es el caudal de alimentación de un reactivo en un proceso químico, que puede modificarse actuando sobre el grado de apertura de una válvula).

Por último, todo proceso está sometido a perturbaciones (normalmente indeseables), como por ejemplo: pérdidas energéticas al medio ambiente, presencia de impurezas indeseadas en los reactivos, entre otras. En general, las perturbaciones son variantes en el tiempo, e interesa conocerlas para tomar acciones que permitan atenuar los efectos indeseados que ellas causan.

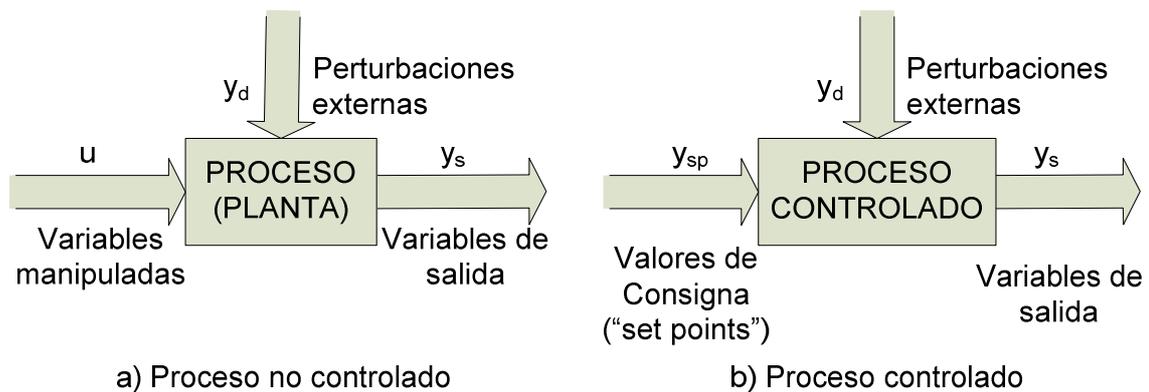


Figura 2.1. Esquemas globales de procesos no controlados y controlados.

La Figura 2.1.a) muestra un esquema global de un proceso no controlado, usualmente denominado la 'planta'.

Un proceso es (automáticamente) controlado cuando existen componentes operativos (los controladores) que permiten recibir valores deseados de consigna (o "set points"), de manera tal que las variables de salida evolucionen automáticamente hacia esos valores especificados, aun en presencia de

perturbaciones externas. Un esquema en bloques de un proceso controlado se indica en la Figura 2.1.b).

Hoy en día, es prácticamente inadmisibles pensar en la existencia de procesos que pudieran operar en forma no controlada. Por el contrario, es deseable disponer de sistemas de control cada vez más elaborados que permitan un alto grado de automatización del proceso, y que aseguren la obtención de productos finales con características de calidad ubicadas en un rango de especificación predeterminado.

2.3. MODELADO MATEMÁTICO

El diseño de estrategias de control clásico y avanzado requiere normalmente de desarrollos teóricos y de simulaciones dinámicas, que deben basarse en un modelo matemático del proceso a controlar. Dicho modelo debe representar (con cierto grado de aproximación) el comportamiento dinámico de las principales variables de interés.

Como la gran mayoría de los procesos reales poseen características no lineales, entonces su representación natural se efectúa mediante un modelo matemático que involucra normalmente un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales.

Cuando el sistema físico o el proceso a modelar se puede considerar de parámetros concentrados, entonces el modelo matemático resultante incluye ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO); mientras que si el proceso es de parámetros distribuidos, el modelo matemático incluirá ecuaciones diferenciales parciales. En este capítulo se tratará exclusivamente con sistemas de parámetros concentrados.

Típicamente, los modelos matemáticos surgen al plantear (para cada subsistema del proceso) los balances tradicionales de materia, de cantidad de movimiento y de energía. Los modelos que representan con mejor aproximación el funcionamiento real de una planta, se suelen denominar modelos detallados (MD).

Los MD involucran por lo general estructuras matemáticas con un gran número de ecuaciones (algebraicas y diferenciales), usualmente no lineales y acopladas; y permiten simular la dinámica de la mayor parte de las variables de interés que intervienen en el proceso. En la mayoría de las aplicaciones es imposible disponer de un MD del proceso; ya sea por limitaciones teóricas para su deducción, por imposibilidades de índole práctica para considerar todas las variables que intervienen, por desconocimiento fenomenológico de algunas etapas del proceso, entre otros.

Por lo general, encarar diseños de control basados en un MD del proceso suele resultar extremadamente dificultoso, debido a su complejidad matemática. Por tal motivo, es usual desarrollar modelos relativamente sencillos (o recurrir a diversos niveles de simplificación del MD si se lo dispusiera), de manera de contar con un modelo simplificado o modelo de tendencia (MT) del proceso, útil para propósitos de control. El MT deberá predecir con suficiente exactitud aquellas variables específicamente intervinientes en los lazos de control, tales como las variables manipuladas y medidas.

2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Una clasificación usual de los modelos se basa en el número de variables involucradas en la planta.

En general, en todo proceso existe un gran número de variables manipuladas (o de entrada) y de salida, en cuyo caso el modelo correspondiente se denomina de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO).

En el caso de algunos procesos sencillos, el modelo matemático puede incluir una única variable manipulada y una única variable de salida, y entonces el modelo se denomina de una entrada y una salida (SISO). Los casos combinados se denominan MISO y SIMO.

Desde el punto de vista de la descripción temporal de las variables intervinientes, los modelos se clasifican en continuos y discretos.

Un modelo matemático (dinámico) continuo involucra la resolución de ecuaciones diferenciales; un modelo matemático (dinámico) discreto involucra la resolución de ecuaciones en diferencias. Esta clasificación puede muchas veces dar lugar a confusiones. Por ejemplo, una reacción química desarrollada en un intervalo de tiempo finito es un proceso continuo, y que usualmente se representa a través de un modelo continuo; sin embargo, su implementación y resolución computacional será siempre discreta.

Algunas veces, un mismo proceso puede incluir características combinadas. Por ejemplo, si en la reacción química continua antes mencionada se efectúan mediciones de la conversión a intervalos de dos minutos, entonces el proceso de medición tiene características discretas. Un modelo matemático adecuado para tal proceso combinado deberá contemplar las características continuas de la reacción y las discretas de la medición. Pero, si las constantes de tiempo características de la reacción química fuesen mucho mayores que los intervalos correspondientes a la medición, podría modelarse el proceso completo como un sistema continuo. Sin embargo, la implementación computacional final siempre tendrá atributos discretos.

Por último, los modelos matemáticos pueden ser determinísticos o estocásticos.

Un modelo matemático es determinístico cuando asume nulos los ruidos típicos del proceso y de la medición; en tal caso, las evoluciones temporales de todas las variables del modelo pueden ser determinadas en forma precisa. En cambio, en un modelo estocástico las componentes aleatorias propias del proceso y de la medición se asumen de estadística conocida y usualmente se las considera como “ruidos blancos”.

2.5. REPRESENTACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS EN VARIABLES DE ESTADO

Las técnicas modernas de control utilizan cada vez con mayor frecuencia la descripción de los procesos en variables de estado. Un modelo de estados, determinístico y continuo se representa a través del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\text{a) Ecuación de estado: } \frac{dx}{dt} = f(x, u, t); \quad x(0) = x_0 \quad [2.1]$$

$$\text{b) Ecuación de salida: } y = h(x) \quad [2.2]$$

Donde t es el tiempo; x [$n \times 1$] es el vector de las variables de estado; x_0 [$n \times 1$] es el vector de las condiciones iniciales; y [$p \times 1$] es el vector de las variables de salida; u [$m \times 1$] es el vector de las variables de control (o manipuladas); f y h son vectores de funciones no lineales.

La descripción de los procesos en variables de estado surge naturalmente, como consecuencia de las ecuaciones de balance del sistema a modelar. Normalmente, se asume que los estados de un sistema son aquellas variables cuya evolución se representa a través de una ecuación diferencial.

Por ejemplo, supongamos un sistema sencillo conformado por un tanque de sección transversal uniforme (A), alimentado con un caudal variable de agua, $q_1(t)$. Admitamos que el caudal de salida, $q_2(t)$, depende de la altura de agua dentro del tanque y de la "resistencia" hidráulica (R) de la salida. Supongamos que se desea conocer la evolución temporal de la altura de agua dentro del tanque, $h(t)$. La ecuación de balance de materia es:

$$A \frac{dh(t)}{dt} = q_1(t) - q_2(h, R, t); \quad h(0) = h_0 \quad [2.3]$$

Donde h_0 es la altura de agua dentro del tanque, a $t=0$. Este sistema tiene entonces un único estado $x=h$; y una sola variable manipulada $u=q_1$. El modelo de estados para este sistema (SISO, determinístico y continuo), es:

$$A \frac{dx(t)}{dt} = -\frac{q_2(x, R, t)}{A} + \frac{u(t)}{A}; \quad x(0) = x_0 \quad [2.4]$$

$$y = x \quad [2.5]$$

El modelo matemático de las ecuaciones (2.4 y 2.5) involucra en general relaciones no lineales entre las variables de estado, de salida y de control. A efectos del control, tradicionalmente se ha recurrido a la linealización de los modelos no lineales en los puntos de operación del proceso (básicamente, la linealización consiste en una expansión en serie de Taylor alrededor de los puntos de equilibrio). La versión linealizada del sistema de la ecuación (2.1) resulta:

$$\text{Ecuación de estado:} \quad \frac{dx}{dt} = Ax + Bu; \quad x(0) = x_0 \quad [2.6]$$

$$\text{Ecuación de salida:} \quad y = Cx \quad [2.7]$$

2.6. ESTRUCTURAS UTILIZADAS EN CONTROL CLÁSICO

A continuación se resumen algunas de las configuraciones típicas más frecuentemente utilizadas en control clásico de procesos. Los temas que se tratan pretenden ser una revisión de conceptos previamente adquiridos por el lector en cursos de dinámica de sistemas y control de procesos.

2.7. CONTROL A LAZO ABIERTO Y A LAZO CERRADO

En la Figura 2.2 se esquematiza un sistema de control a lazo abierto, que se identifica fácilmente por la ausencia de realimentaciones. En base a los valores de consigna (y_{sp}), el controlador actúa modificando las variables manipuladas (u) del proceso de manera tal que las variables de salida (y_s) alcancen los valores pre-especificados. Los sistemas de control a lazo abierto son normalmente simples y

económicos, pero como contrapartida con ellos no se pueden asegurar valores de y_s exactamente iguales a los especificados por y_{sp} . En efecto, cualquier diferencia de y_s con respecto a y_{sp} , no podrá ser detectado por el sistema, y en consecuencia no se podrá corregir u para compensar el error.

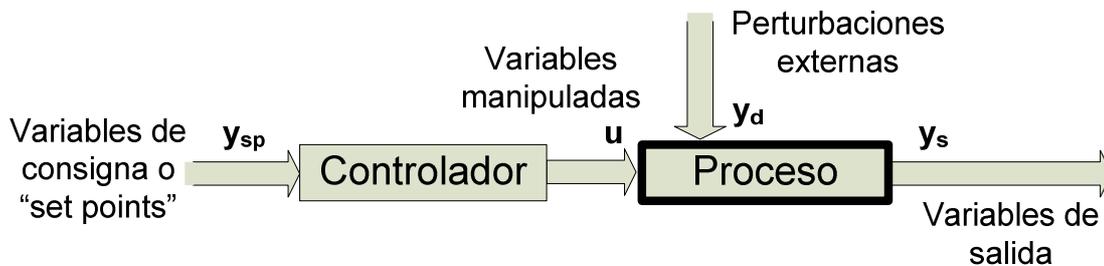


Figura 2.2. Sistema de control de lazo abierto.

Los sistemas de control a lazo cerrado (también denominados sistemas de control realimentados), permiten corregir las deficiencias propias de los sistemas de lazo abierto. En la Figura 2.3, se representa en forma esquemática un sistema de control a lazo cerrado por realimentación de la salida.

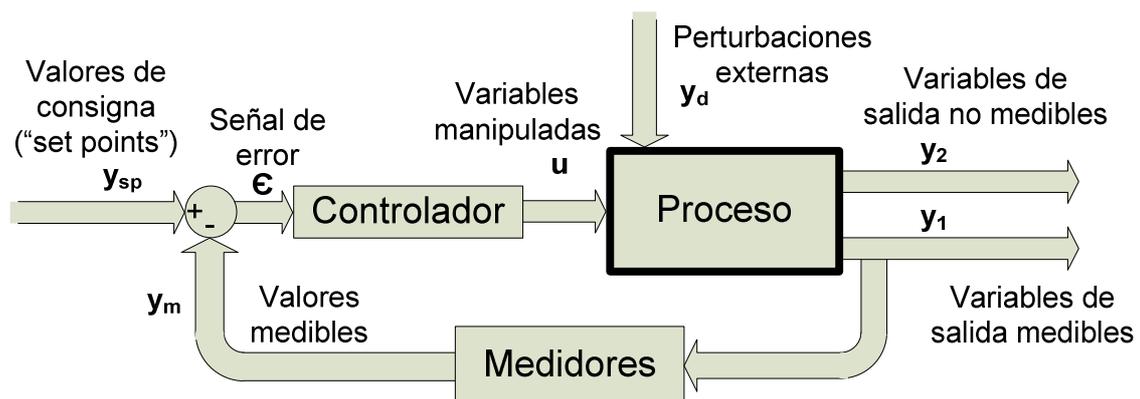


Figura 2.3. Control a lazo cerrado por retroalimentación de salida.

En este esquema se han separado las variables de salida, clasificándolas en medibles y no medibles. Una variable de proceso es medible cuando existen

sensores (medidores) que posibilitan determinar directamente su magnitud (por ejemplo, la temperatura puede determinarse directamente con una termocupla o una termoresistencia; la presión con un manómetro, etc.). Una variable de proceso es no medible si no existe un sensor con las características antes mencionadas.

Para propósitos de control, interesa disponer de mediciones “en línea”, sin retardos y con la mayor precisión posible; pero disponer de una medición con estas características puede requerir de sensores tan costosos que no se justifique su instalación. En tales casos, las variables no medibles pueden ser estimadas en forma indirecta, a partir de otras mediciones (por ejemplo, la concentración de un compuesto disuelto en un medio acuoso podría ser estimada a partir de mediciones de la diferencia entre el índice de refracción de la solución y del medio, y de una calibración del detector).

En un sistema de control a lazo cerrado, los valores medidos (y_m) se comparan con los de consigna, generándose una señal de error (ϵ). En base a dicha señal de error, el controlador modifica la variable manipulada de manera tal que las salidas medibles del proceso (y_1) evolucionen hacia los valores de las consignas.

En la Figura 2.3, el bloque controlador es una relación matemática $u = f(\epsilon)$ que permite establecer las acciones de control a efectuar en función de las señales de error.

Debe notarse que si bien se indican por separado los bloques comparador y controlador, en la práctica un controlador incluye siempre al comparador. Un controlador puede ser un equipo electrónico específico (“hardware”) ubicado en un “rack”, que recibe señales de las mediciones, y que se conecta con un órgano de acción final (por ej., una válvula) por medio de algún sistema de comunicación.

Alternativamente, un controlador puede implementarse a través de un algoritmo computacional (éste es el caso del control por computadora). Desde el punto de vista del control, el problema de diseño reside en: a) determinar la estructura del controlador a utilizar (por ej., si se requiere de un controlador no lineal, o de uno

lineal con efectos proporcional, integral, etc.); y b) ajustar los parámetros del controlador elegido (sintonizar el controlador).

2.8. SISTEMA COMBINADO EN AVANCE Y REALIMENTACIÓN DE SALIDA

Los sistemas de control realimentados presentan algunas deficiencias conocidas, como por ejemplo:

- pueden generar inestabilidad en las respuestas a lazo cerrado;
- no son eficientes en procesos caracterizados por dinámicas lentas, o con elevados “tiempos muertos” (es decir, cuando el efecto de las variables de entrada se observa en las salidas con cierto retardo);
- ante perturbaciones, responden después de ocurridos los efectos indeseados que aquellas provocan.

Los sistemas de control en avance permiten -al menos parcialmente- corregir esas deficiencias. Pero para ello, es necesario poder medir las perturbaciones, y conocer con precisión el modelo del proceso.

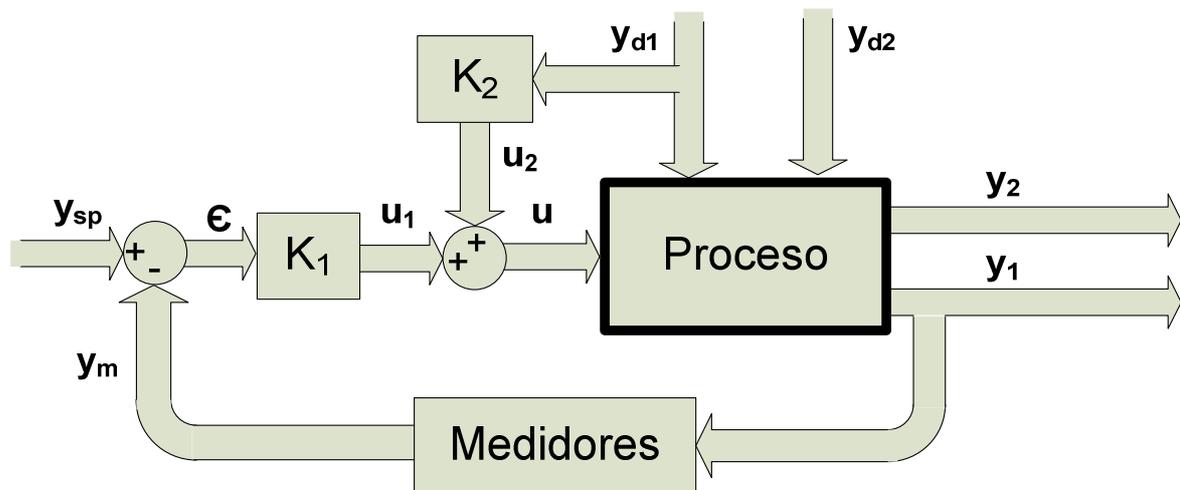


Figura 2.4. Control a lazo cerrado por retroalimentación de salida.

En la Figura 2.4 se muestra un proceso controlado por un sistema de lazo cerrado combinado. La variable manipulada (u) es la combinación de un control por realimentación de salida ("feedback", u_1), más una componente de control en avance ("feedforward", u_2). Las características de los controladores están representadas por K_1 y K_2 . Las perturbaciones del proceso se clasificaron en medibles (y_{d1}) y no medibles (y_{d2}), según criterios similares a los ya mencionados para las variables de salida.

El control en avance presenta la ventaja de permitir tomar acciones anticipadas, que posibilitan compensar los efectos indeseados causados por las perturbaciones medibles. Las desviaciones remanentes en las variables de salida son compensadas por el lazo cerrado de realimentación.

2.9. CONTROLADORES PID

Actualmente los dispositivos de control son de uso común en las empresas. Las técnicas de fabricación en serie han hecho que no se implementen compensadores para una función particular, sino dispositivos genéricos que sean capaces de ajustarse para una labor específica, según las características del sistema.

El controlador proporcional-integral-derivativo, o controlador PID, es un dispositivo de control genérico donde el diseñador sólo tiene que dar valores adecuados, según lo requiera la situación, a los distintos parámetros que contiene. Por tanto, se elude la necesidad de fabricar el compensador que se desea implementar.

2.9.1. EXPRESIÓN GENERAL

Como su propio nombre indica, un controlador PID es un caso particular de compensador de adelanto-retraso en el que el compensador de adelanto es proporcional-derivativo y el compensador de retraso es proporcional-integral. Del producto de ambos compensadores, se obtiene un controlador con dos ceros – que en general pueden ser reales o no –, un polo en el origen y una ganancia.

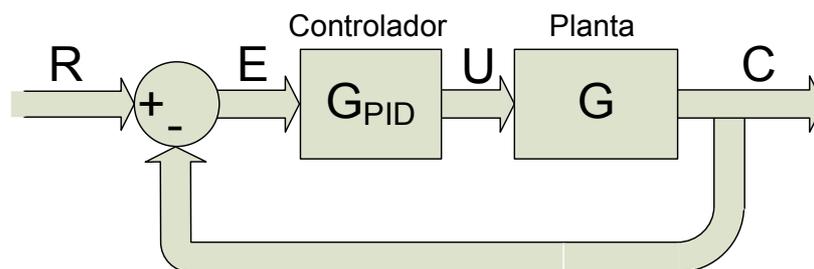


Figura 2.5. Sistema controlado con PID.

$$G_{PID}(s) = G_{PD}(s) \cdot G_{PI}(s) = K_1(s+a)K_2 \frac{s+b}{s} = K \frac{s^2 + \alpha s + \beta}{s} \quad [2.8]$$

Un controlador PID, por tanto, tiene tres parámetros que se pueden elegir: la posición de los dos ceros y el valor de la ganancia.

2.9.1.1. Forma estándar

Una expresión equivalente a la Ecuación (2.8) es la que se presenta en (2.9), también llamada forma estándar del controlador PID.

$$U(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + s \cdot T_d \right] \cdot E(s) \quad [2.9]$$

En (2.10) se observa la actuación temporal del controlador en la planta, que tiene tres sumandos: uno proporcional al error, otro proporcional a la integral del error y otro proporcional a la derivada del error.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad [2.10]$$

A la constante K_p se le llama ganancia proporcional y posee las unidades que relacionan la actuación con el error, T_i es la constante de tiempo integral y tiene unidades de segundos, y T_d la constante de tiempo derivativa y también tiene unidades de segundos.

2.9.1.2. Forma paralela

La actuación del controlador se puede separar en forma de tres sumandos diferentes. Cada uno de ellos acapara respectivamente la actuación proporcional, integral y derivativa:

$$U(s) = \left[K_p + \frac{K_i}{s} + s \cdot K_d \right] \cdot E(s) \quad [2.11]$$

Las constantes K_P , K_I y K_D se obtienen fácilmente conocidos los parámetros estándar K_p , T_i y T_d . Esta forma de expresar el controlador PID se conoce como paralela porque se puede representar como aparece en la Figura 2.6.

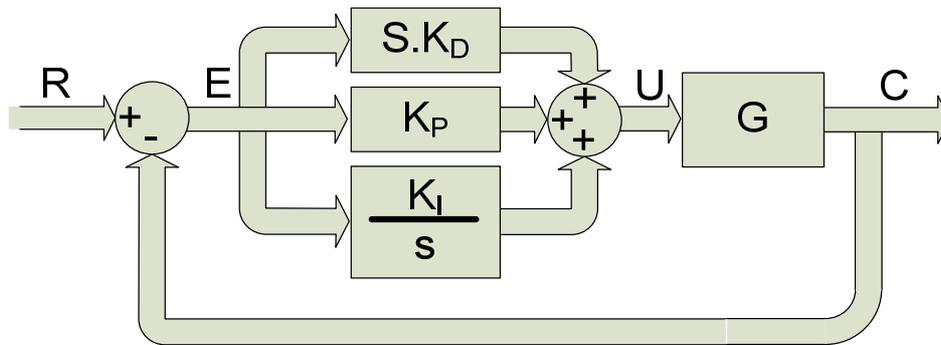


Figura 2.6. Sistema de control con PID en forma paralela

2.9.1.3. Forma serie

En el caso de que los dos ceros del controlador sean reales, se puede encontrar la forma serie o clásica del PID. La actuación del controlador PID serie se expresa como:

$$U(s) = K_P' \left(1 + \frac{1}{T_i' s} \right) (1 + s \cdot T_d') E(s)$$

[2.12]

Los nuevos parámetros serie K_p' , T_i' y T_d' se pueden obtener también a partir de los parámetros estándar. La condición que deben cumplir los parámetros estándar para que los dos ceros del controlador sean reales es que el tiempo de integración sea mayor que cuatro veces el tiempo de derivación: $T_i > 4T_d$.

Entonces, el controlador serie PID se puede representar en serie como aparece en la Figura 2.7.

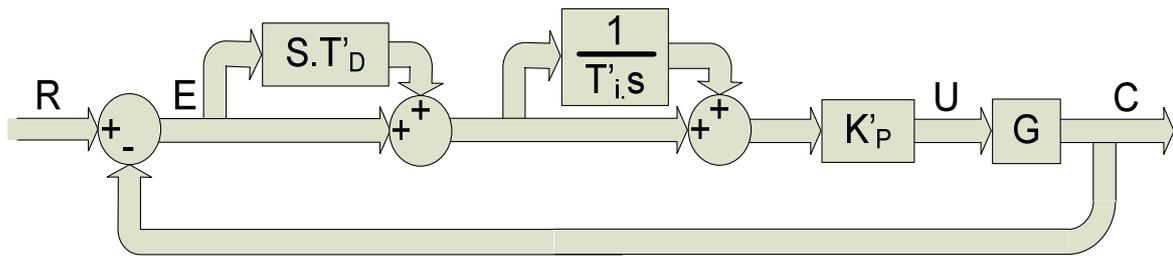


Figura 2.7. Sistema de control con PID, forma en serie.

La forma serie se llama también clásica porque los primeros actuadores PID neumáticos que se lograron implementar, siempre resultaban tener ceros reales. Es bueno conocer las tres formas de expresar los PID, porque el ingeniero puede manejar controladores comerciales que permitan introducir las constantes de alguna de estas tres maneras.

2.9.2. SENTIDO FÍSICO DE LA ACTUACIÓN DE UN PID

Es posible ajustar los parámetros de un controlador PID sin un conocimiento preciso del tipo de actuación que realiza cada una de las partes del mismo. Sin embargo, resulta muy conveniente para poder predecir cómo afecta al sistema la modificación de cada uno de ellos.

2.9.2.1. Actuación proporcional

Si el tiempo de integración se hace infinito y el de derivación nulo, el controlador PID se transforma en una ley de control puramente proporcional al error entre la referencia y la salida.

$$u(t) = K_p e(t) \quad [2.13]$$

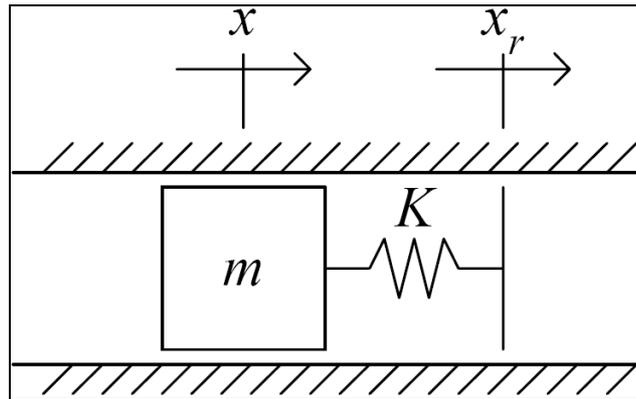


Figura 2.8. Actuación proporcional

Un símil mecánico de esta actuación, Figura 2.8, es la que haría un muelle de rigidez $K = K_P$ que uniera la referencia con una masa que se deseara mover hasta dicha referencia. Se puede hacer más rápido el sistema aumentando la rigidez del muelle, es decir, aumentando la ganancia proporcional del controlador.

Como contrapartida, también es previsible que el sistema se oscile más en torno a la referencia.

2.9.2.2. Actuación proporcional-derivativa

Una forma de evitar las fuertes oscilaciones que se pueden producir en torno a la referencia es añadir a la actuación proporcional otra actuación proporcional a la derivada del error. Esto es lo mismo que dotar al sistema una cierta capacidad de “anticipación” porque la inclusión del término derivativo es equivalente a actuar proporcionalmente al error que existirá dentro de T_d segundos.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \cong K_p e(t + T_d) \quad [2.14]$$

Esta antelación es beneficiosa porque el sistema es capaz de “frenar” antes de llegar a la referencia.

En la Figura 2.9 se muestra cómo en el instante t_1 el error todavía es positivo, por lo que el control proporcional seguirá actuando en la planta para acercar la masa a la referencia, aunque sea una fuerza pequeña. Pero un usuario previsor, deduciría que con la elevada velocidad que lleva la masa en breves instantes se rebasará la posición de referencia por lo que en ese instante introduciría una fuerza contraria o “de frenado”. Es decir, actuar en t_1 con la fuerza que se estima para t_2 .

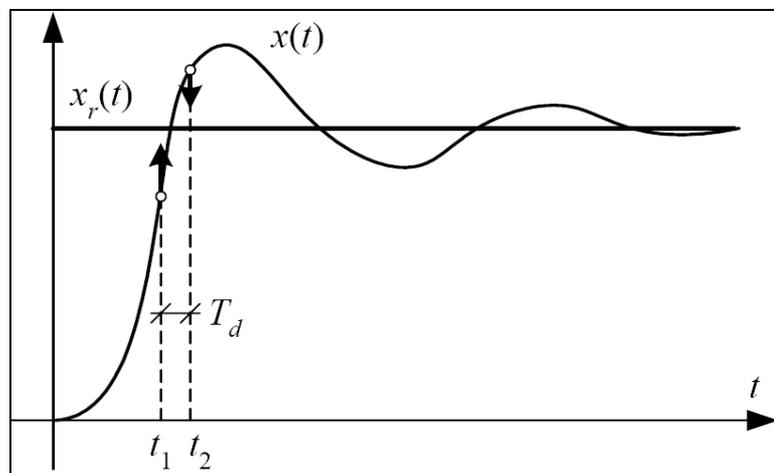


Figura 2.9. Actuación proporcional-derivativa

Un símil mecánico para la actuación proporcional-derivativa es la de imaginar que la posición de la masa y la referencia se encuentran unidas por un muelle y un amortiguador en paralelo. La rigidez del muelle sigue siendo igual a la ganancia proporcional, mientras que el coeficiente de amortiguamiento es el producto de la ganancia por la constante de tiempo de derivación.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \cong K_p e(t) + T_d K_p \frac{de(t)}{dt} = K e(t) + Bv(t)$$

[2.15]

Con esta comparación se muestra de forma más evidente cómo la actuación derivativa puede frenar el sistema haciéndolo menos oscilatorio, más amortiguado. Además, también se observa cómo al aumentar el valor de T_d se incrementa el “amortiguamiento” del sistema.

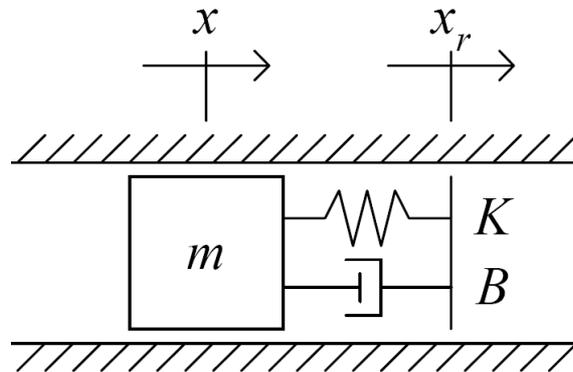


Figura 2.10. Actuación proporcional-derivativa

Con estas consideraciones, es posible aventurar unos valores adecuados para el tiempo T_d de la parte derivativa. No parece razonable asignar a T_d un valor muy elevado, en concreto superior al periodo de oscilación que posee el sistema sin acción derivativa. Parece lógico pensar que la estimación del error en T_d segundos sólo es buena mientras T_d se encuentre entre cero y, como mucho, un cuarto del periodo de oscilación del sistema.

2.9.2.3. Actuación proporcional-integral

Una característica común de la actuación proporcional y la proporcional-derivativa es que se hace cero cuando el error desaparece. Sin embargo, en algunos casos puede ser necesario que esto no sea así. En la Fig. 2.11 se muestra el mismo ejemplo de los apartados anteriores con la masa moviéndose verticalmente.

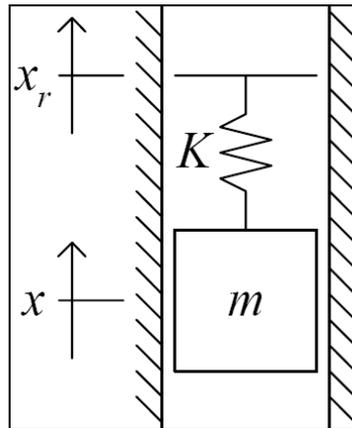


Figura 2.11. Sistema con error no nulo - actuación proporcional

Si la actuación es puramente proporcional, la masa en régimen permanente no alcanzaría la referencia sino que se colocaría en el lugar donde la acción del muelle contrarreste la fuerza del peso.

$$K_P e_{ss} = mg \Rightarrow e_{ss} = \frac{mg}{K_P} \quad [2.16]$$

Si se desea que no exista error en régimen permanente a la acción proporcional hay que añadir una actuación extra u_0 , (2.16). En los primeros sistemas controlados, la actuación u_0 se añadía de forma manual, incrementando esa especie de offset hasta que desaparecía el error.

$$u(t) = K_P e(t) + u_0 \quad [2.17]$$

En el caso del sistema de la Fig. 2.11, es evidente que, consiguiendo error nulo, el controlador debe introducir una fuerza $u(t) = u_0 = mg$. La solución automatizada más adecuada a este problema es ir aumentando el valor de u_0 de forma proporcional a la integral del error. La función integral del error aumenta paulatinamente mientras exista error no nulo hasta alcanzar, con error nulo, un valor finito.

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad [2.18]$$

La constante de tiempo de integración T_i da una idea del tiempo que se tarda en anular el error de forma automática. Esto se puede mostrar, de forma aproximada, calculando el valor de u_0 si el error en régimen permanente permanece constante:

$$u_0 = \frac{K_P}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau = \frac{K_P}{T_i} e_{ss} \int_0^t d\tau = \frac{K_P}{T_i} e_{ss} t \quad [2.19]$$

Sustituyendo en la ecuación (2.18) el valor del error que se obtuvo en (2.19), resulta que cuando el tiempo es igual a la constante de tiempo integral, $t = T_i$, el valor de u_0 alcanza el valor deseado mg .

$$u_0 = \frac{K_P}{T_i} e_{ss} t = \frac{K_P}{T_i} \frac{mg}{K_P} t = mg \frac{t}{T_i} \quad [2.20]$$

Por tanto, la constante de tiempo T_i da una idea del momento en que se anula el error en régimen permanente. Si se elige una T_i muy elevada, el sistema tarda mucho en alcanzar la referencia, Figura 2.12

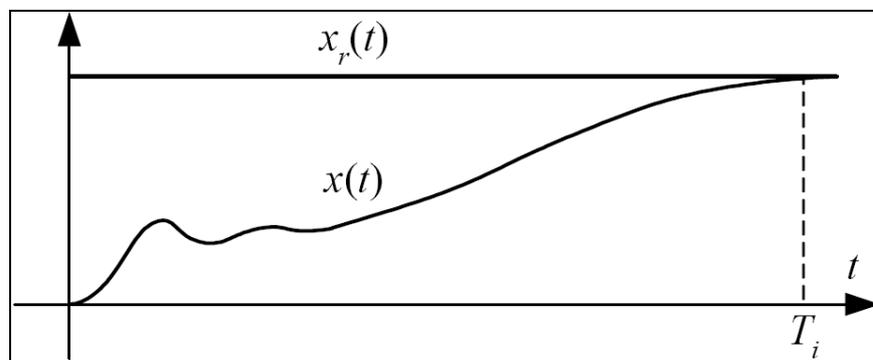


Figura 2.12. Actuación proporcional-integral con T_i muy grande.

La interpretación física que se acaba de dar a la actuación integral concuerda con el hecho de que cuando T_i se hace infinito entonces el sistema no tiene actuación integral. Un valor adecuado para T_i puede ser el periodo de oscilación del sistema, o un tiempo algo menor.

La actuación integral puede darse también en sistemas que, de suyo, carezcan de error en régimen permanente ante un determinado tipo de entrada. Lo que consigue entonces la parte integral es elevar el tipo del sistema en una unidad y anular el error ante entradas más severas.

2.9.3. AJUSTE EXPERIMENTAL DE PID

Las ideas enunciadas en el apartado anterior ayudan a conocer cómo cambia la respuesta del sistema modificando alguno de los parámetros del controlador, pero resultan insuficientes para poder asignar de forma adecuada sus valores numéricos.

Para asignar valores a los parámetros del controlador sin conocer la función de transferencia de la planta que se desea controlar, se han propuesto una serie de tablas que utilizan varios parámetros que se obtienen de forma experimental sobre la planta.

2.9.3.1. Ajuste de Ziegler-Nichols

El ajuste de Ziegler-Nichols es el más utilizado y propone unos parámetros para el PID de forma que el sistema controlado posea un buen rechazo a las perturbaciones que se puedan introducir en el sistema. Esto quiere decir que el seguimiento que hace el sistema a la referencia puede ser poco amortiguado, con demasiado sobreimpulso. Pero esto se considera intrascendente comparado con la especificación mencionada.

En muchos procesos industriales un buen rechazo a las perturbaciones es mucho más interesante que un buen seguimiento a la referencia. Por ejemplo, en una planta de elaboración de objetos plásticos, es muy importante que la temperatura del fluido permanezca constante en la referencia a pesar de las perturbaciones que suponen la entrada y la salida de material. El proceso inicial de

calentamiento, o régimen transitorio, no es muy importante de cara a la producción. Puede ser más o menos largo, con mayor o menor sobreimpulso, pero lo importante es que una vez que se llega a la temperatura de régimen permanente, las perturbaciones no hagan variar la temperatura dentro de un rango permisible.

En concreto, la especificación que se pretende con Ziegler-Nichols es obtener una relación de caída de sobreimpulsos de un cuarto, es decir, que ante la entrada de una perturbación los sucesivos rebases en torno a la referencia sean sucesivamente cada uno cuatro veces inferior al anterior.

Tabla 2.2. Ajuste de Ziegler-Nichols.⁶

	K_P	T_i	T_d	K_P	T_i	T_d
P	$\frac{1}{a}$	∞	0	$0,5K_{CR}$	∞	0
PI	$\frac{0,9}{a}$	3L	0	$0,45K_{CR}$	$\frac{T_{CR}}{1,2}$	0
PID	$\frac{1,2}{a}$	2L	0,5L	$0,6K_{CR}$	$\frac{T_{CR}}{2}$	$\frac{T_{CR}}{8}$

Los valores para los parámetros del PID se obtienen con la Tabla 2.2. Existen dos formas de ajuste: uno emplea los parámetros a y L de la respuesta de la planta ante una entrada escalón unitario y otro que emplea los parámetros de ganancia crítica K_{CR} y periodo de oscilación crítico T_{CR} de la planta.

En la Figura 2.13 se muestra cómo se obtienen los parámetros a y L de la respuesta de la planta ante una entrada escalón unitario. El valor de la salida en régimen permanente K se relaciona por trigonometría con el tiempo muerto L y la constante de tiempo T , según la ecuación (2.20).

- ⁶ SCENNA, NICOLÁS, "Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos", S/E, 1999.

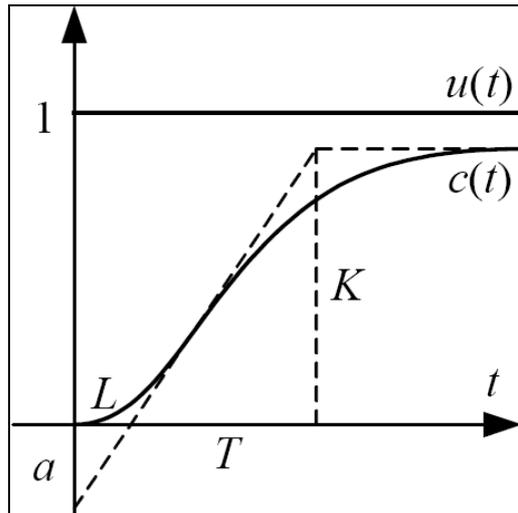


Figura 2.13. Respuesta de la planta a un escalón unitario

$$a = \frac{KL}{T} \quad [2.21]$$

La función de transferencia de la planta no se conoce, pero una aproximación de la misma puede ser (2.22), es decir, un sistema de primer orden con constante de tiempo T , un tiempo muerto L y una ganancia estática K .

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{1+Ts} \quad [2.22]$$

Los parámetros de ganancia crítica K_{CR} y periodo de oscilación crítico T_{CR} de la planta se pueden obtener experimentalmente de varias formas. Una posibilidad es introducir la planta en un sistema de control proporcional y aumentar la ganancia hasta volver la salida del sistema oscilatoria ante una entrada escalón, es decir, en el límite de estabilidad. La ganancia que deja el sistema en el límite de estabilidad es la ganancia crítica K_{CR} , mientras que el periodo de oscilación que se observe en la salida del sistema es el crítico T_{CR} .

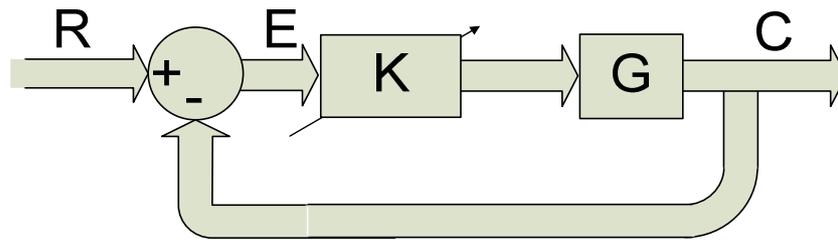


Figura 2.14. Cálculo de la ganancia crítica.

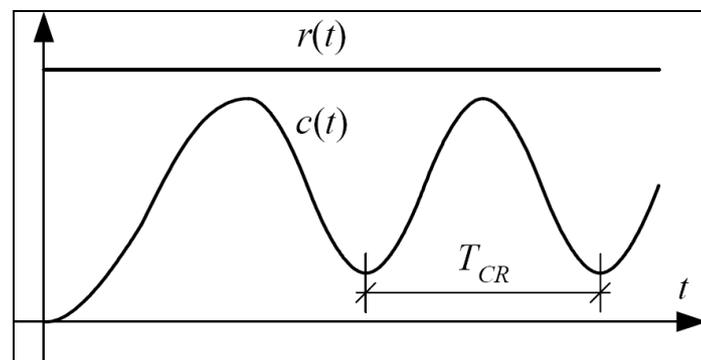


Figura 2.15. Medida del periodo de oscilación crítico

Si se conoce la función de transferencia de la planta, es posible obtener la ganancia crítica del sistema analíticamente por medio del criterio de Routh-Hurwitz. El periodo de oscilación crítico se puede obtener sustituyendo K por la K_{CR} , a través de los polos en lazo cerrado del sistema de la Figura 2.14, que se sitúan sobre el eje imaginario del plano S , ecuación (2.23).

$$P_{CR} = \pm \frac{2\pi}{T_{CR}} j$$

[2.23]

El ajuste de Ziegler-Nichols cumple una peculiaridad, y es que el tiempo de integración siempre es cuatro veces mayor que el tiempo de derivación. Esta elección es razonable, como se vio en el sentido físico de cada uno de las partes del PID. Matemáticamente, se puede demostrar que, en este caso concreto, los dos ceros del PID son reales (2.24).

$$U(s) = \frac{K_P T_D}{s} \left(s + \frac{1}{2T_D} \right)^2 E(s)$$

[2.24]

2.9.3.2. Otros tipos de ajuste experimental

Varios autores han propuesto tablas de ajuste para los parámetros del PID. A continuación se presentan las que propusieron Chien-Hrones-Rewick. Estos autores ofrecen los parámetros que consiguen sobreimpulsos del 20% o del 0%, tanto ante entradas referencia, como ante entrada perturbación.

Tabla 2.3. Ajuste de Chien-Hrones-Rewick para perturbaciones del sistema.⁷

Para N	0 % sobreimpulso			20 % sobreimpulso		
	K _P	T _i	T _d	K _P	T _i	T _d
P	$\frac{0,3}{a}$	∞	0	$\frac{0,7}{a}$	∞	0
PI	$\frac{0,6}{a}$	4L	0	$\frac{0,7}{a}$	2,3L	0
PID	$\frac{0,95}{a}$	2,4L	0,42L	$\frac{1,2}{a}$	2L	0,42L

- ⁷ SCENNA, NICOLÁS, "Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos", S/E, 1999.

Tabla 2.4. Ajuste de Chien-Hrones-Rewick para referencia.⁸

Para R	0 % sobreimpulso			20 % sobreimpulso		
	K _p	T _i	T _d	K _p	T _i	T _d
P	$\frac{0,3}{a}$	∞	0	$\frac{0,7}{a}$	∞	0
PI	$\frac{0,35}{a}$	1,2T	0	$\frac{0,6}{a}$	T	0
PID	$\frac{0,6}{a}$	T	0,5L	$\frac{0,95}{a}$	1,4T	0,47L

Hay que destacar que, los parámetros Chien-Hrones-Rewick no mantienen la relación cuatro a uno entre los tiempos de integración y derivación que tenían los de Ziegler-Nichols. También se puede observar cómo los parámetros Chien-Hrones-Rewick de la Tabla 2.3 se van asemejando más a los de Ziegler-Nichols conforme aumenta el sobreimpulso permitido. El ajuste de Cohen-Coon, Tabla 2.5, es otra propuesta para conseguir un buen seguimiento ante la entrada referencia.

Tabla 2.5. Ajuste de Cohen-Coon.⁹

	K _p	T _i	T _d
P	$\frac{1}{a} \left(1 + \frac{L}{3T} \right)$	∞	0
PI	$\frac{1}{a} \left(\frac{9}{10} + \frac{L}{12T} \right)$	$\frac{30T+3L}{9T+20L} L$	0
PID	$\frac{1}{a} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4T} \right)$	$\frac{32T+6L}{13T+8L} L$	$\frac{4T}{11T+2L} L$

- ⁸ SCENNA, NICOLÁS, "Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos", S/E, 1999.

- ⁹ SCENNA, NICOLÁS, "Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos", S/E, 1999.

2.9.4. AJUSTE ANALÍTICO DE PID POR ASIGNACIÓN DE POLOS

Existen muchas formas de ajustar los controladores PID. En este capítulo sólo se mencionará un método analítico de ajuste que persigue colocar los polos del sistema en lazo cerrado en aquellas posiciones que garantizan un comportamiento adecuado en régimen transitorio.

El método se va a explicar con el ejemplo de la Figura 2.16, en el que se desea ajustar un controlador PI para un sistema de primer orden.

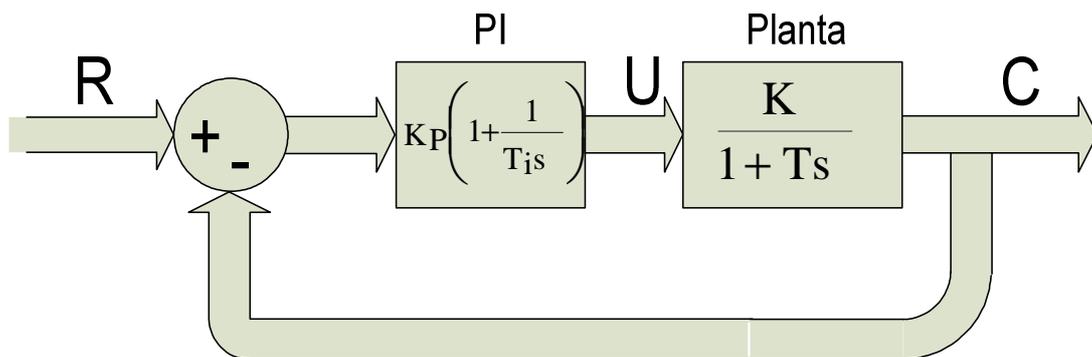


Figura 2.16. Control PI sobre una planta de primer orden

La función de transferencia en lazo cerrado es:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{KK_P(1+T_i s)}{TT_i s^2 + T_i(1+KK_P)s + KK_P} \quad [2.25]$$

Por tanto, queda un sistema de segundo orden con un cero. La localización de los polos en lazo cerrado se pueden colocar analíticamente donde se desee. Basta con resolver los valores de K_p y T_i que satisfacen la ecuación (2.26).

$$TT_i s^2 + T_i(1+KK_P)s + KK_P = \alpha(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \quad [2.26]$$

La posición del cero viene dada con la asignación de polos, pero es posible eliminar su efecto con un pre-filtro de la referencia.

2.9.5. MODIFICACIONES DEL PID

En ocasiones se modifican los PID para obtener mejores características. La diferencia se refleja en la expresión matemática (2.27) que define su comportamiento.

$$U(s) = K_p \left[E_p(s) + \frac{1}{T_i s} E(s) + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d s}{N}} E_d(s) \right] \quad \text{con} \quad \begin{cases} E(s) = R(s) - C(s) \\ E_p(s) = bR(s) - C(s) \\ E_d(s) = cR(s) - C(s) \end{cases} \quad [2.27]$$

Se observa que en el error de la parte proporcional la referencia tiene un peso de valor b , mientras que en la parte derivativa el peso de la referencia es c y se añade un polo cuya constante de tiempo es el tiempo derivativo dividido por N .

2.9.6. SUPRESIÓN DEL EFECTO KICK-OFF

El efecto kick-off se produce en un sistema que actúe en función de la derivada de una señal escalón. En el momento del salto del escalón, la derivada es infinita, por lo que la actuación también se hace muy grande, saturando los actuadores. Esta actuación puede ser nociva para la planta.

Una forma de solucionar este problema es dando el valor de cero a la constante c . Aunque en aplicaciones en las que interese saturar el dispositivo con rapidez, pueden darse valores de c incluso superiores a la unidad.

2.9.7. FILTRO DE LA DERIVADA

Las señales que pasan por un controlador suelen ir cargadas de ruido. Como la parte derivativa amplifica sin ningún tipo de limitación el ruido de alta frecuencia, es habitual introducir un filtro de primer orden en la parte derivativa, de tal forma que posea ganancia finita para altas frecuencias.

Normalmente el valor de N está comprendido entre 2 y 20, siendo valores típicos 8 y 10. Como se puede deducir de la expresión (2.27), cuanto mayor es N menor es el efecto el filtro.

2.9.8. SET POINT WEIGHTING (CARGA DEL PUNTO DE TRABAJO)

La modificación de b permite mejorar el coeficiente de error y disminuir el primer sobreimpulso. El valor estándar de b es la unidad, pero asignando a b un valor entre 0 y 1 se reduce el primer sobreimpulso se la respuesta temporal del sistema.

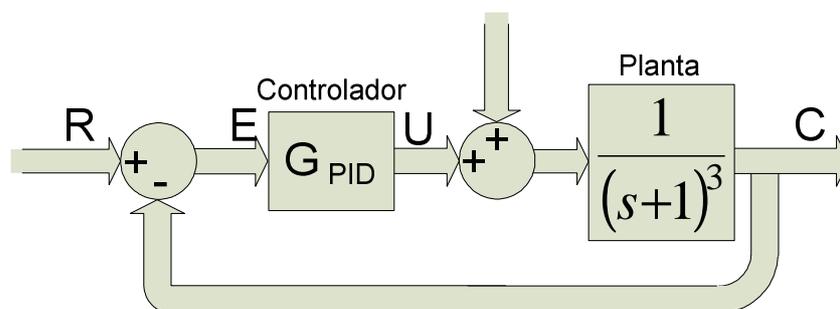


Figura 2.17. Sistema controlado por un PID.

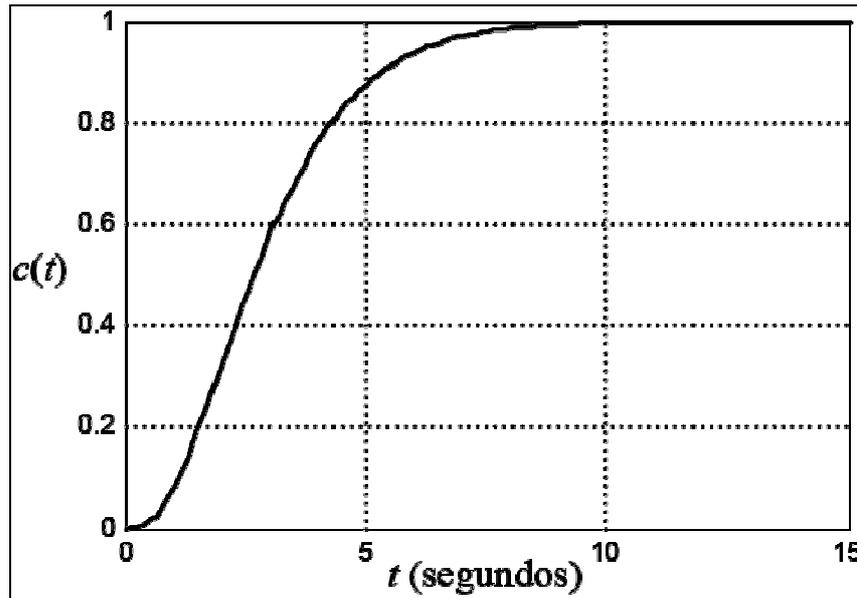


Figura 2.18. Respuesta ante entrada escalón unitario.

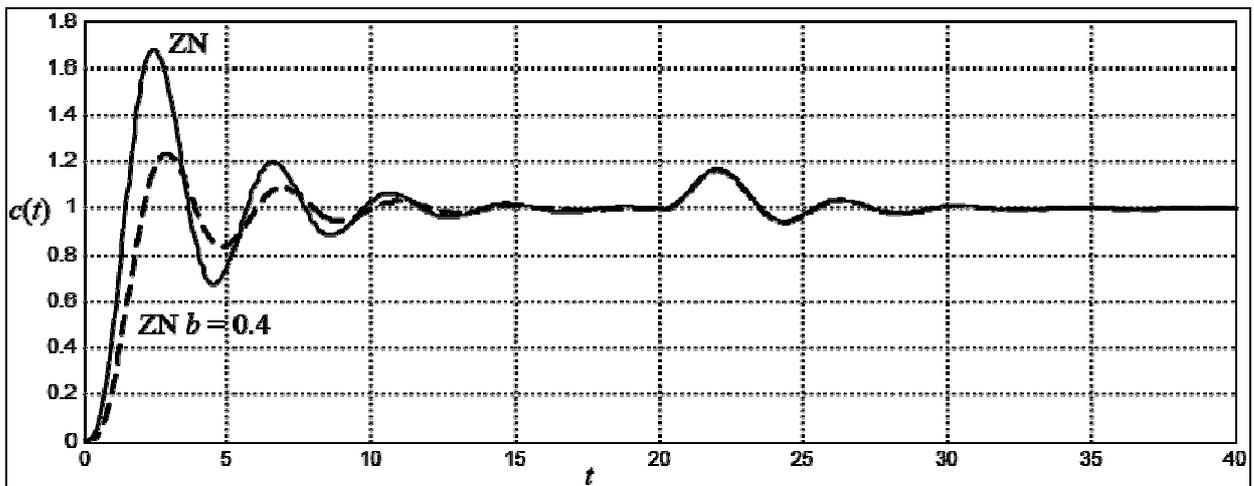


Figura 2.19. Respuesta temporal del sistema.

En la Figura 2.19 se observa cómo haciendo $b = 0.4$ en el sistema ejemplo de la Figura 2.17, se ha reducido la magnitud del primer sobreimpulso hasta dejarlo del orden del 20%. De esta forma se consigue mejorar el comportamiento de los parámetros de Ziegler-Nichols ante la entrada referencia, conservando intacto el buen rechazo de las perturbaciones.

2.10. DIGITALIZACIÓN DE UN CONTROLADOR PID – PARALELO

Para obtener un controlador digital que proporcione determinado modo de control es necesario crear un programa adecuado para el controlador. Este programa debe indicar como deberá ser procesada la señal de error digital en un momento dado para obtener el valor de salida correcto para el siguiente elemento de corrección. Este procesamiento puede involucrar la señal de entrada presente, así como también las señales de entrada y salida anteriores. El programa, por lo tanto, pide al controlador resolver una ecuación en diferencias.

La función de transferencia de un controlador analógico PID – PARALELO es:

$$\text{FUNCION DE TRANSFERENCIA} = K_p + \frac{1}{s} K_i + s K_d \quad [2.28]$$

Por lo cual, si se expresa la ecuación multiplicada por $E(s)$ (Ecuación [2.11]) se obtendrá:

$$U(s) = \left[K_p + \frac{K_i}{s} + s \cdot K_d \right] \cdot E(s)$$

Una multiplicación por s equivale a una diferenciación. Sin embargo, también es posible considerar el gradiente de la respuesta en el tiempo de la señal de error en el presente instante de tiempo como:

$$\frac{(\text{última muestra del error, } e_n, \text{ menos la penúltima muestra del error, } e_{n-1})}{(\text{Intervalo de muestreo, } T_s)}$$

[2.29]

Donde:

e_x = muestra de error en un determinado instante - x

T_s = intervalo de muestreo

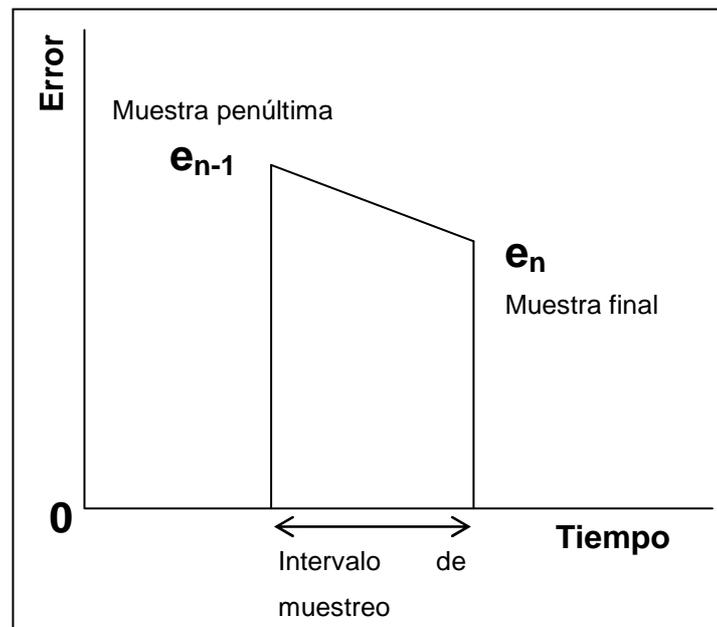


Figura 2.20. Esquema de cálculo de derivada e integral de la función Error vs. tiempo.

Dividir entre S equivale a integrar. Se puede, sin embargo, considerar que la integral del error al término del periodo de muestreo como el área que está debajo de la gráfica error-tiempo durante el último periodo de muestreo más la suma de las áreas que están bajo la gráfica de todas las muestras anteriores (Int_{prev}). Si el periodo de muestreo es breve comparado con los tiempos presentes, el área durante el último intervalo de muestreo es casi:

$$\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{e_n + e_{n-1}}{T_s}\right)$$

[2.30]

Por lo tanto, para la señal de salida del controlador, u_n , en un instante en particular, el equivalente de la función de transferencia es:

$$u_n = K_P \cdot e_n + K_I \left(\frac{(e_n + e_{n-1})T_s}{2} + \text{Int}_{\text{PREV}} \right) + K_D \left(\frac{e_n - e_{n-1}}{T_s} \right) \quad [2.31]$$

Si se reordena esta ecuación se obtiene:

$$u_n = A \cdot e_n + B \cdot e_{n-1} + C (\text{Int}_{\text{PREV}}) \quad [2.32]$$

Donde:

$$\begin{aligned} A &= K_P + 0,5 * K_I * T_s + \frac{K_D}{T_s} \\ B &= 0,5 * K_I * T_s - \frac{K_D}{T_s} \\ C &= K_I \end{aligned} \quad [2.33]$$

El programa para digitalizar un controlador PID consiste en:

1. Determinar los valores de K_P , K_I y K_D .
2. Determinar los valores iniciales de e_{n-1} , Int_{PREV} , y el tiempo de muestreo, T_s .
3. Reestablecimiento del temporizador del intervalo de muestreo.
4. Introducción del error e_n .
5. Calcular u_n con la ecuación anterior.
6. Actualizar, dejándolo listo para el siguiente cálculo, el valor de área anterior a $\text{Int}_{\text{PREV}} + 0,5(e_n + e_{n-1})T_s$.
7. Actualizar, dejándolo listo para el siguiente cálculo, el valor del error definiendo e_{n-1} igual a e_n .
8. Esperar a que transcurra el programa de muestreo.
9. Ir al paso 3 y repetir el ciclo.

CAPÍTULO 3

USO DE MATLAB Y SIMULINK COMO HERRAMIENTA PARA LA AUTOMATIZACIÓN COMPUTARIZADA¹⁰

3.1. INTRODUCCIÓN

MATLAB® (Matrix Laboratory - Laboratorio de Matrices) es un gran programa de cálculo técnico y científico. Para ciertas operaciones es muy rápido, cuando puede ejecutar sus funciones en código nativo con los tamaños más adecuados para aprovechar sus capacidades de vectorización. En otras aplicaciones resulta bastante más lento que el código equivalente desarrollado en C/C++ o Fortran. El lenguaje de programación de MATLAB siempre es una magnífica herramienta de alto nivel para desarrollar aplicaciones técnicas, fácil de utilizar y que, aumenta significativamente la productividad de los programadores respecto a otros entornos de desarrollo.

MATLAB se puede arrancar como cualquier otra aplicación de Windows, clicando dos veces en el icono correspondiente en el escritorio o por medio del menú (Inicio). Al arrancar MATLAB se abre una ventana similar a la mostrada por los programas de Windows.

MATLAB es un sistema que se basa en matrices para realizar cálculos matemáticos de ingeniería. Se puede considerar un tipo de lenguaje diseñado para efectuar manipulación de matrices. Todas las variables que maneja MATLAB

¹⁰ Este capítulo toma como referencia a:

- ESQUEDA, JOSÉ, "MATLAB e Interfaces Gráficas", Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, 2002.
- KARRIS, STEVEN, "Introduction to Simulink", Orchard Publications, U.S.A., 2006.
- MATHWORKS, "MATLAB® 6.5 Help", 2002.

son matrices, es decir, sólo tiene un tipo de datos, una matriz, o un arreglo rectangular de números.

MATLAB incorpora varias aplicaciones conjuntas. Para el desarrollo de este proyecto de titulación las más útiles serán: M-File Editor, GUIDE y SIMULINK. Además cuenta con una extensa gama de librerías de funciones (toolboxes), siendo posible modificar o expandir las librerías existentes, haciendo de este un paquete muy flexible y útil para cualquier rama de las ciencias técnicas, económicas e incluso las ciencias sociales.

Al considerar específicamente a la automatización computarizada, MATLAB y sus complementos ofrecen la posibilidad de diseñar, simular e incluso desarrollar un prototipo de modelo de sistema físico. Las diferencias existentes entre las actividades enunciadas son:

- Para diseñar y simular se utiliza tiempo “no real”, es decir, MATLAB-SIMULINK utiliza la capacidad del hardware del computador para realizar los cálculos con la mayor velocidad posible.
- Para probar un prototipo de sistema, MATLAB-SIMULINK recurre a la utilización de un kernel (archivo de enlace entre MATLAB y MS WINDOWS®) para garantizar que el sistema se controle en forma real.

En el caso de que el sistema de control se desarrolle en MATLAB-GUIDE, la aplicación debe garantizar que la ejecución de la misma se desarrolle en forma sincronizada con el sistema controlado, para lo cual se utilizan instrucciones de programación específicas (edición de archivos: m, fig y demás en “M-File Editor” y GUIDE).

El presente capítulo explicará con más detalle el paquete computacional MATLAB, en los temas correspondientes a los métodos de adquisición de datos y el manejo de motores de paso.

3.2. SIMULINK

Las aplicaciones MATLAB® y SIMULINK® están integradas en una sola entidad. Simulink es un paquete de software que sirve para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Este soporta sistemas lineales y no lineales, modelados en tiempo continuo, discreto o una combinación de los dos casos anteriores. Los sistemas además pueden contener subsistemas que trabajen a distintas frecuencias y que se controlen a distintas frecuencias también.

Para modelar, Simulink provee una interfaz gráfica programable (IGP o en inglés GUI) para construir modelos con diagramas de bloque. Se utiliza el sistema de “clic y arrastre” para situar los bloques en las posiciones deseadas. Con esta interfaz es posible dibujar los modelos tal cual se realizaría con lápiz y papel.

El conjunto de componentes incluidos junto al programa Simulink, incluye bibliotecas de fuentes de señal, dispositivos de presentación de datos, sistemas lineales y no lineales, conectores y funciones matemáticas. En caso de que sea necesario, se pueden crear nuevos bloques a la medida por el usuario.

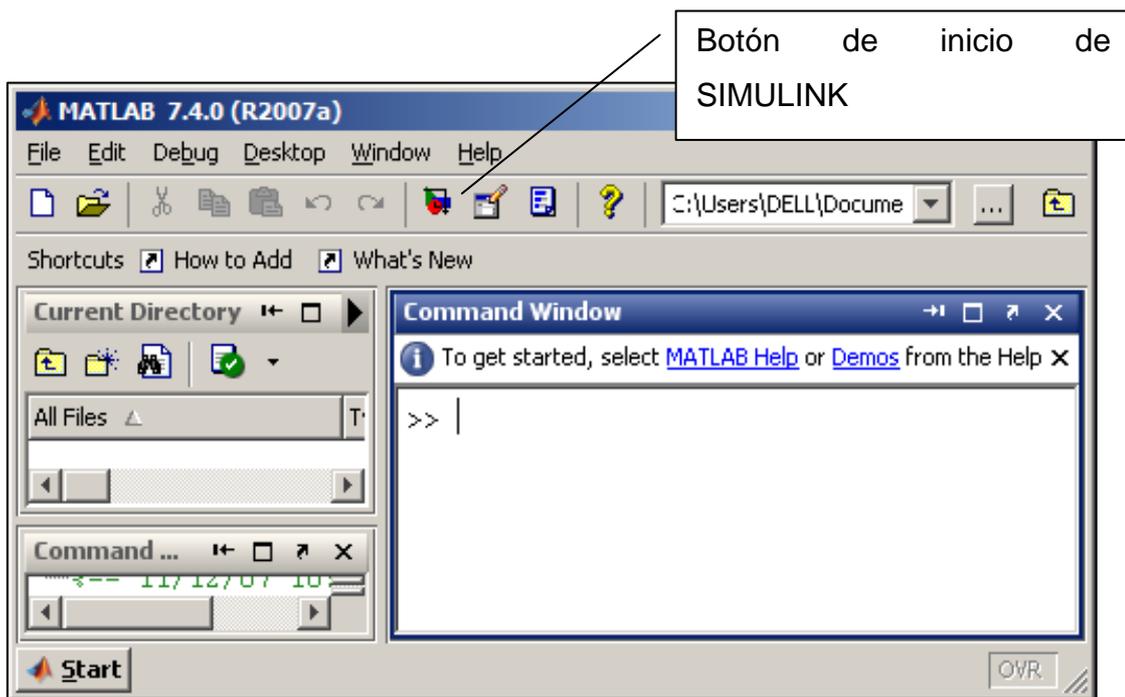


Figura 3.1. Ventana de trabajo de MatLAB.

El programa Simulink se inicia desde el botón Simulink Library Browser (Biblioteca de Simulink, ver imagen) de la ventana de comandos de Matlab, o desde la línea de comandos mediante la orden:

» simulink

Una vez iniciado el programa el entorno de trabajo queda dividido en tres partes:

La ventana de comandos de Matlab (Matlab command window): desde la que se puede ejecutar cualquier comando del mismo, dar valores a variables y controlar la ejecución de las simulaciones.

La ventana de la biblioteca de Simulink (Simulink Library Browser): desde la que se seleccionan los componentes que se van a insertaren el sistema a simular.

La, o las ventanas de los modelos: en las que se realizan dibujan los modelos y se realizan y controlan las simulaciones. Estas ventanas aparecen cuando se abre un modelo ya existente o se crea una ventana en blanco para dibujar un

nuevo modelo. Para ello, se pueden utilizar los botones de la ventana de la librería de Simulink.

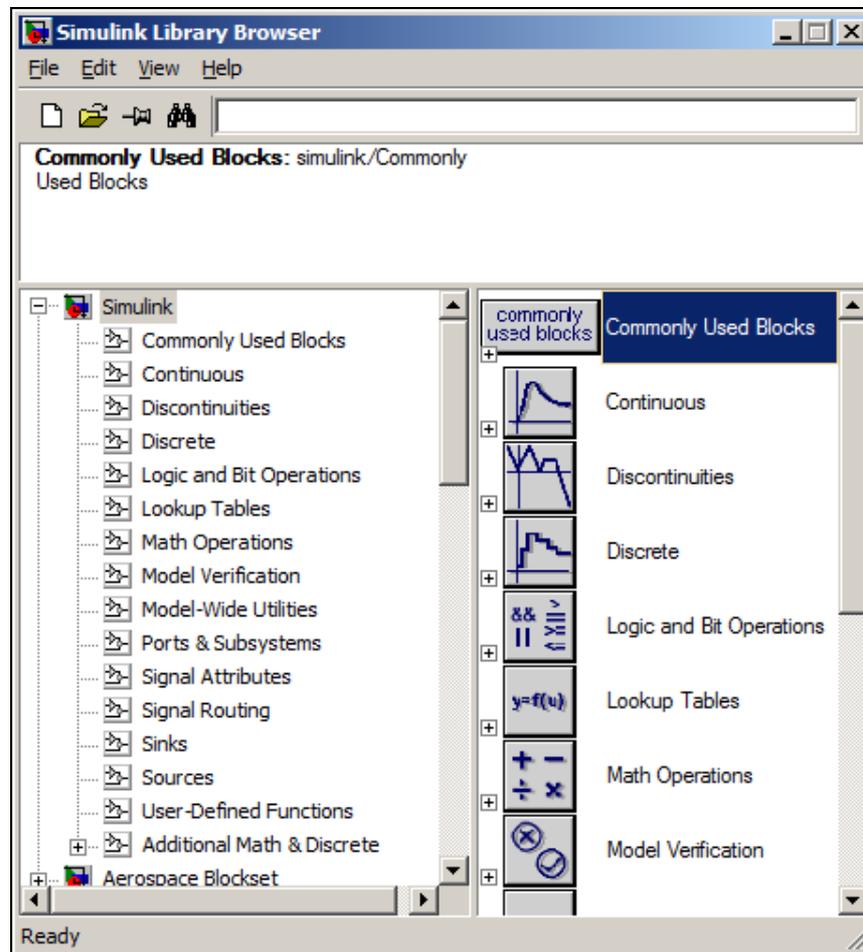


Figura 3.2. Librería de Simulink.

Todos los componentes básicos de Simulink, se pueden encontrar en su biblioteca de componentes. A continuación se describen los componentes básicos de la biblioteca de Simulink:

3.2.1. FUENTES Y SUMIDEROS

La librería de Fuentes contiene las Fuentes de datos/señales que se pueden usar en la simulación de un sistema dinámico. Posiblemente se requiera usar una entrada tipo constante, una onda sinusoidal, un paso, una secuencia repetitiva

como un tren de pulsos, una rampa, entre otras. Se podría probar los efectos del ruido (perturbaciones), para lo cual es posible usar el generador de señales aleatorias para simularlo. El reloj podría utilizarse para crear un índice de tiempo con propósitos de presentación de gráficos. La tierra se puede utilizar para conectar cualquier puerto no utilizado, para evitar mensajes de error indicando que existen puertos desconectados.

Los sumideros son bloques donde las señales son finalizadas o utilizadas por última vez. En la mayoría de casos es necesario guardar los resultados del modelo en un archivo, una matriz o varias variables. Los datos se pueden desplegar o almacenarse en el disco duro del pc. El bloque de parada podría ser usado para parar la simulación si la entrada de dicho bloque (la señal que está siendo depositada en el mismo) no es cero.

3.2.2. SISTEMAS CONTINUOS Y DISCRETOS

Todos los sistemas dinámicos pueden ser analizados como sistemas continuos o sistemas discretos. Simulink permite representar estos sistemas usando funciones de transferencia, bloques de integración, bloques de demora, entre otros.

Los sistemas discretos pueden ser diseñados en el plano Z, en el que se representa las ecuaciones diferenciales. Los sistemas pueden ser representados bajo la forma de estado-espacio, la cual es muy útil en el diseño de sistemas de control modernos.

3.2.3. OPERADORES NO-LINEALES

Una de las principales ventajas de usar herramientas como Simulink es la habilidad de simular sistemas no lineales y obtener resultados sin resolverlos analíticamente. Es virtualmente imposible obtener una solución analítica de una

sistema que tiene no linealidades tales como: saturación, funciones no lineales, entre otros.

Durante la simulación, los sistemas son analizados mediante diferenciación numérica, así, las no linealidades no influyen en gran grado.

3.2.4. OPERACIONES MATEMÁTICAS

Los operadores matemáticos, tales como: producto, suma, operaciones lógicas Y, O, entre otros, pueden ser programadas junto con la señal de flujo. La multiplicación de matrices se vuelve fácil con el bloque de ganancia matricial. Las funciones trigonométricas como: seno, tangente inversa... también están disponibles.

Los operadores relacionales tales como “igual a”, “mayor que”, “menor que”, y demás pueden ser usadas en circuitos lógicos.

3.2.5. SEÑALES Y TRANSFERENCIA DE DATOS

En diagramas de bloque complicados podría necesitarse transferir datos de una porción del diagrama de bloques a otro. Así pues esto se lo puede realizar en diferentes subsistemas. La señal puede ser vertida en un bloque GOTO (“ir a”), el cual es usado para enviar señales de un subsistema a otro.

La mezcla de señales (“Multiplexing”) permite deshacer el desorden ocasionado por demasiados conectores y hace la visualización de matrices (columna/fila) más fácil.

Los componentes de la Biblioteca de Simulink, citados anteriormente, son los más usados. Sin embargo existen muchos bloques adicionales que son bastante útiles para simulación.

La cantidad de ítems que tenga la biblioteca de Simulink depende de la versión del programa, los bloques predeterminados (adquiridos con la licencia de la aplicación) y los bloques adquiridos por separado (se los puede encontrar en internet, con precios variables).

3.2.6. CREACIÓN DE UN MODELO

Para simular un sistema, se deben insertar en las ventanas de simulación los distintos componentes con los que se va a construir el modelo. Se pueden seguir los siguientes pasos:

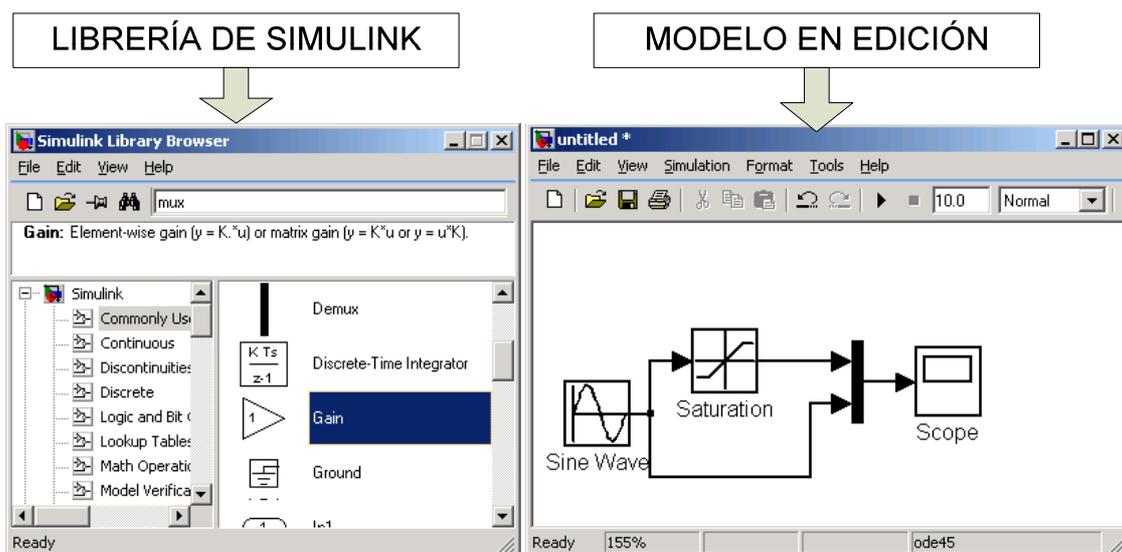


Figura 3.3. Modelación en Simulink.

Crear un nuevo modelo: Para abrir una nueva ventana de simulación se debe pulsar el botón nuevo modelo.

Buscar un bloque. Se puede buscar un bloque expandiendo el árbol de la biblioteca o buscándolo directamente por su nombre en la ventana de búsqueda.

En este caso, si hay más de un bloque que pueda corresponder a ese nombre, irán apareciendo a medida que se pulse la tecla “enter”.

Situar un bloque: Para situar un bloque, se mantiene pulsado el botón izquierdo del ratón sobre el icono en forma de rombo que hay junto al nombre del bloque y se arrastra hacia la posición deseada en la ventana de simulación.

Conectar bloques: En cada bloque, los puntos de salida aparecen indicados mediante una flecha saliente del bloque, mientras que los puertos de entrada a cada bloque se indican con una flecha entrante al mismo. Se conecta la entrada de un bloque a la salida de otro, manteniendo pulsado el botón izquierdo del ratón mientras se arrastra desde el símbolo de entrada de uno de los bloques hasta el de salida de otro o viceversa.

Crear una bifurcación: Si se desea llevar la salida de un bloque a la entrada de más de uno se necesita crear una bifurcación en la conexión. Para hacerlo, se arrastra con el ratón desde la entrada del nuevo bloque a conectar hasta la línea de la conexión que se va a bifurcar.

Modificar los bloques: Se pueden rotar o aplicar simetrías a los bloques usados, según convenga la colocación de entradas salidas para el esquema que se esté realizando, pulsando sobre él el botón derecho del ratón y utilizando los menús desplegables o mediante la opción ‘Format del menú principal (“Format\Flip Block, ‘Format\Rotate Block”...)). También mediante los menús o haciendo doble clic sobre el bloque, se pueden modificar sus parámetros.

Inserción de textos: Se puede incluir un texto aclaratorio o informativo en cualquier parte de la ventana del modelo, haciendo doble clic en una zona libre y escribiendo directamente el texto.

También se pueden cambiar los nombres y posiciones de los bloques que se empleen para la simulación antes o después de conectarlos, Asimismo los enlaces de las conexiones pueden moverse o modificarse. Para eliminar cualquier elemento basta con seleccionarlo con un clic y eliminarlo con la tecla “supr” o “delete”, o utilizar alguno de los menús.

Conviene guardar (“File\Save as”) periódicamente el modelo, incluso antes de terminarlo, para evitar perder el trabajo realizado.

3.2.7. CONFIGURACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS

Antes de poder ejecutar la simulación, es necesario seleccionar los parámetros apropiados para la misma.

Desde el menú: “Simulation\Configuration Parameters”, se puede desplegar un cuadro de dialogo, en el que se controlan parámetros de la simulación de entre los cuales el que se modifica más habitualmente es el tiempo final de la simulación. (Otros parámetros accesibles son el tiempo de inicio de la simulación, el método matemático que se empleara para llevarla a cabo, o las variables que se tomarán/guardarán de/en el espacio de trabajo). La simulación se puede poner en marcha o detener mediante el menú anterior o los botones de la ventana.



Figura 3.4. Bloque “SCOPE” para visualización y “MUX” de combinación de señales en vector.

Para visualizar los resultados de la misma son muy útiles los bloques que se encuentran en el grupo “Sinks” de la biblioteca de Simulink. De entre ellos, quizás el más útil es el bloque “Scope” que simula el comportamiento de un osciloscopio. Tras realizar una simulación se pueden ver los resultados que ha registrado haciendo un doble clic sobre él.

Para ver correctamente los resultados se utilizan los controles de zoom, siendo conveniente pulsar siempre tras una simulación el botón de “auto escala” (el de los prismáticos) para ver el total de los datos registrados. Los otros tres botones de zoom permiten respectivamente ampliar un área señalada con un arrastre del ratón, ampliar el eje “X” de la misma manera o ampliar el eje “Y”.

El bloque “Scope” tiene una serie de propiedades a la que se accede a través del botón correspondiente de la ventana “Scope” Dos de las mas útiles son la que permite elegir el número de entradas que se desean para el osciloscopio “Number of axes” (que será también el número de gráficos que representará) y la que determina si el osciloscopio almacena todos los datos de la simulación o sólo los últimos obtenidos “Limit rows to last”. Respecto a este último control, es conveniente eliminar La marca “√” del cuadradito blanco para que el osciloscopio mantenga todos los datos registrados durante la simulación completa.

Si se desea visualizar más de una señal en un osciloscopio, existen dos posibilidades:

Aumentar el número de entradas del osciloscopio como se comentó anteriormente.

Utilizar un bloque “Mux” para que ambas señales aparezcan en el mismo gráfico.

3.3. CREACIÓN DE INTERFACES GRÁFICAS CON MATLAB

GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) es un juego de herramientas que se extiende por completo el soporte de MATLAB, diseñadas para crear GUIs (Graphical User Interfaces) fácil y rápidamente dando auxilio en el diseño y presentación de los controles de la interfaz, reduciendo la labor al grado de seleccionar, tirar, arrastrar y personalizar propiedades.

Una vez que los controles están en posición se editan las funciones de llamada (Callback) de cada uno de ellos, escribiendo el código de MATLAB que se ejecutará cuando el control sea utilizado. Siempre será difícil diseñar GUIs, pero no debería ser difícil implementarlas. GUIDE está diseñado para ser menos tedioso el proceso de aplicación de la interfaz gráfica y obviamente para trabajar como herramienta de trazado de GUIs, entre sus poderosos componentes está el editor de propiedades (property editor), este se encuentra disponible cualquier momento que se esté lidiando con los controles de MATLAB, el editor de propiedades por separado se puede concebir como una herramienta de trazado, y asistente de codificación (revisión de nombres y valores de propiedades). Cuando se fusiona con el panel de control, el editor de menú, y herramienta de alineación, resulta una combinación que brinda inigualable control de los gráficos en MATLAB.

3.3.1. UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA GUIDE

A la herramienta GUIDE se accede de varias maneras, la utilizada de ellas es tecleando `guide` en la ventana de comando.

```
>> guide
```

La ventana principal de GUIDE es la siguiente:

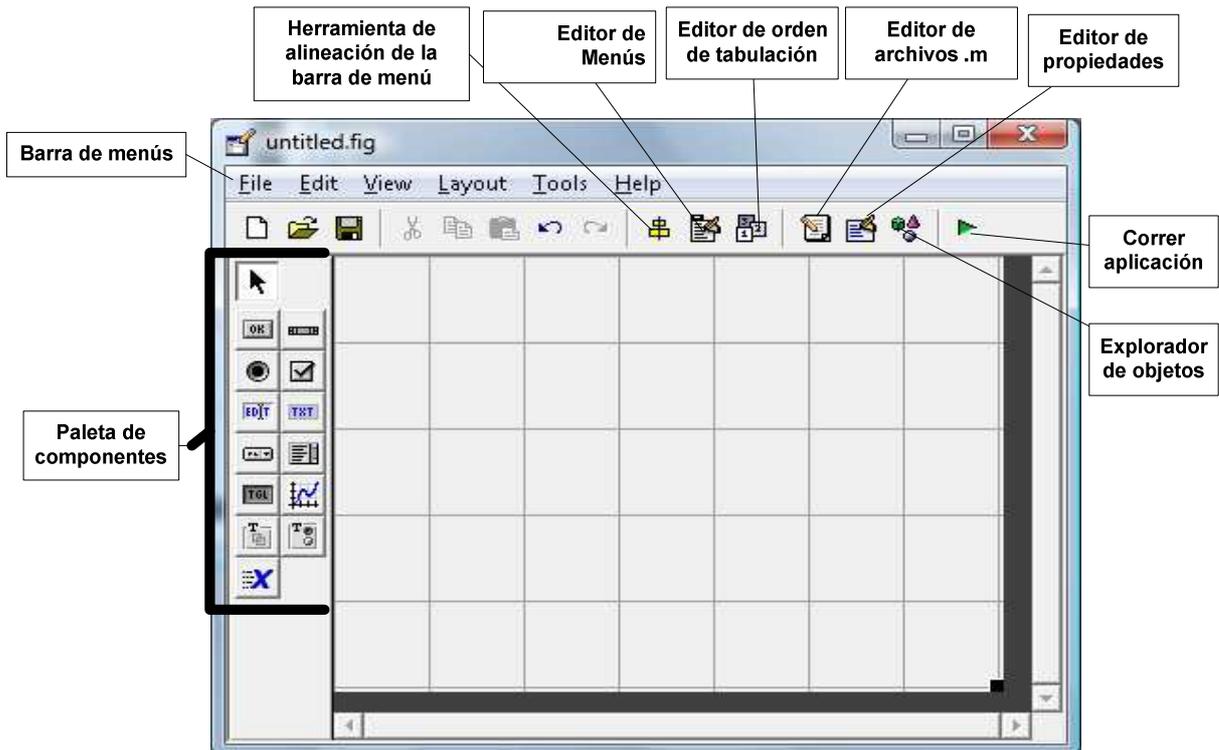


Figura 3.5. Interfaz para desarrollo de GUI's.

Las Componentes principales de GUIDE son:

Barra de Menús: Aquí se encuentran las funciones elementales de Edición de GUI's.

Paleta de Componentes (component Palette): Aquí se encuentran los uicontrols, estos componentes permiten seleccionar los controles (objetos) que son los que se muestran en la figura.

En la barra de herramientas se encuentran los siguientes botones:

Botón de ejecución (Run button): Al presionarse de crea la figura de la interfaz diseñada en el Layout Área.

Alineación de Componentes (Alignment tool): esta opción permite alinear los componentes que se encuentran en el área de trabajo (Layout Área) de manera personalizada.

Propiedades del Inspector (Property Inspector): con esta opción se asignan y modifican las propiedades de cada objeto en forma personalizada.

Navegador de Objetos (Object Browser): Muestra todos los objetos que se encuentra en la figura (en forma de árbol), además permite seleccionar a los mismos.

Editor de Menús (Menú Editor): El redactor de Menú crea menús de ventana y menús de contexto.

La Interfaz de Grafica de Usuario (GUI) se crea en una ventana de figura que consta de los siguientes componentes:

- Menú de interfaz con el usuario.
- Dispositivo de control de interfaz con el usuario.
- Ejes para exhibir graficas o imágenes.

Es posible personalizar el GUIDE con la opción "Preferences" hallada en el menú "File", ahí posible desplegar los nombres de los componentes hallados en la paleta y la de presentar las herramientas.

3.3.2. FLUJO DE OPERACIÓN DE UNA GUI

Con una GUI (INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO), el flujo de cómputo está controlado por las acciones en la interfaz. Mientras que en un guión el flujo de comandos está predeterminado, el flujo de operaciones con una GUI no lo está.

Los comandos para crear una interfaz con el usuario se escribe en un guión, la interfaz invoca el guión que se ejecute, mientras la interfaz del usuario permanece en la pantalla aunque no se haya completado la ejecución del guión.

En la figura 3.6 se muestra el concepto básico de la operación del software con una GUI. Cuando se interactúa con un control, el programa registra el valor de esa opción y ejecuta los comandos prescritos en la cadena de invocación. Los menús de interfaz con el usuario, los botones, los menús desplegables, los controladores deslizantes y el texto editable son dispositivos que controlan las operaciones del software. Al completarse la ejecución de las instrucciones de la cadena de invocación, el control vuelve a la interfaz para que puedan elegirse otra opción del menú. Este ciclo se repite hasta que se cierra la GUI.

El control guarda un *string* (cadena de caracteres) que describe la acción a realizar cuando se invoca puede consistir en un solo comando de MATLAB o una secuencia de comandos, o en una llamada a una función. Es recomendable utilizar llamadas a funciones, sobre todo cuando se requieren de más de unos cuantos comandos en la invocación.

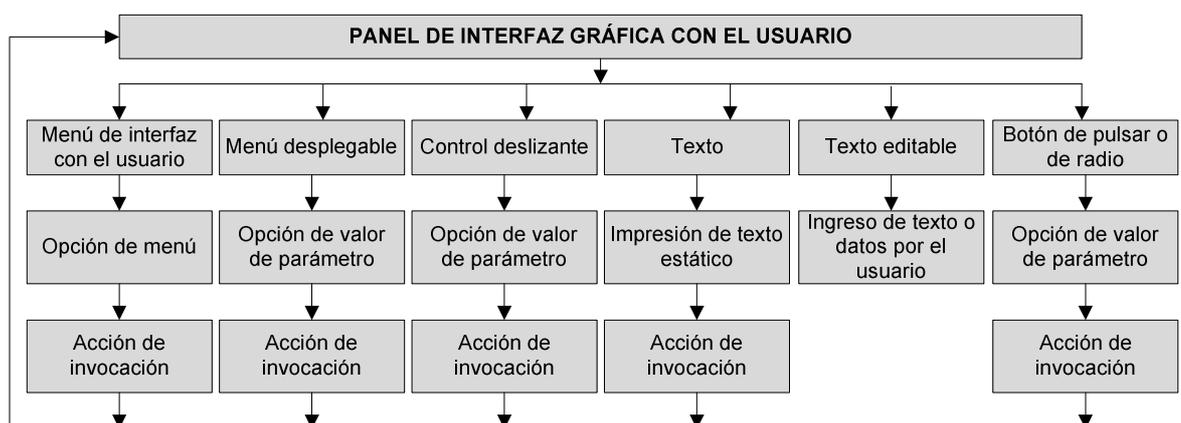


Figura 3.6. Flujo de opciones de GUI

3.3.3. PROGRAMACIÓN CON GUIDE

Para programar con guide, básicamente se utilizan llamadas de retorno (Callbacks), que se definen y caracterizan como:

- El código escrito que controla el comportamiento de una aplicación gráfica creada por el usuario responde a eventos, tales como: clic en botones, movimiento de barras (“sliders”), selección de ítems de menús, o la creación y borrado de componentes.
- El programa toma la forma de un conjunto de funciones llamadas “callbacks”, para cada componente y también para la figura GUI.

Un callback es una función escrita que está asociada con un componente específico de la figura GUI. Este controla el comportamiento del elemento citado mediante el desarrollo de una o varias acciones en respuesta a un evento ocurrido en dicho componente. Matlab llama al callback del componente, al ser disparado por el evento ocurrido.

Como ejemplo, supóngase que una GUI tiene un botón que dispara la impresión de un conjunto de datos. Cuando el usuario hace clic en el botón, Matlab llama a la función callback asociada con el evento “al hacer clic” del botón y la llamada, que ha sido programada por el usuario, toma los datos y los imprime.

Un componente puede ser cualquier componente de control como: botón de comando, cuadro de lista o una barra deslizante. Para propósitos de programación, este también puede ser un menú o un contenedor tal como un panel o un grupo de botones.

3.3.4. TIPOS DE CALLBACKS

Las llamadas de retorno disponibles para cada componente y para la figura GUI en si, están definidas como propiedades. Por ejemplo:

- Un botón de comando tiene cinco propiedades tipo callback: “ButtonDownFcn” (Al hacer clic), “Callback” (llamada de retorno), “CreateFcn” (Función de creación de componente), “DeleteFcn” (Función de destrucción de componente) y “KeyPressFcn” (Al presionar una tecla).
- Un panel tiene cuatro propiedades callback: ButtonDownFcn, CreateFcn, DeleteFcn y ResizeFcn. Es posible, pero no requerido, crear una función callback para cada una de estas propiedades.

La figura GUI también tiene cierto tipo de propiedades tipo llamadas de retorno con las cuales puede estar asociada. Cada tipo de callback tiene un mecanismo de disparo (evento) que causa la llamada de ejecución.

3.4. ADQUISICIÓN Y MANEJO DE DATOS

Antes de que se instale un Sistema De Adquisición De Datos (SAD), se debe entender las cantidades que se desea medir, las características de aquellas cantidades físicas, el sensor apropiado para usar y el hardware de adquisición apropiado para el sistema.

3.4.1. ESQUEMA DEL EXPERIMENTO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para cada experimento de adquisición de datos, se necesita desarrollar las siguientes tareas:

- Instalar el sistema
- Calibración
- Pruebas

3.4.2. INSTALACIÓN DEL SISTEMA

El primer paso en cualquier actividad que involucre adquisición de datos es instalar el hardware. La instalación consiste en conectar la tarjeta de adquisición de datos y el computador o instalar los módulos en una estructura externa. La instalación del software consiste en cargar los manejadores (drivers) del hardware y la aplicación informática en el computador.

3.4.3. CALIBRACIÓN

Luego de que el hardware y el software estén instalados y los sensores conectados, el hardware de adquisición de datos debe ser calibrado. La calibración consiste en proveer una entrada conocida al sistema y grabar la salida. Para muchos dispositivos de adquisición, la calibración puede ser muy fácil pues están provistos del software especial desarrollado por el fabricante.

3.4.4. PRUEBAS

Luego de haber instalado y calibrado el hardware, es posible comenzar a adquirir datos. Se sobreentiende que se conoce completamente las características de la señal que se está midiendo, luego es posible configurar el sistema y adquirir datos.

Sin embargo, en el mundo real, el sensor puede estar captando niveles de ruido inaceptables y requerirá blindaje, o posiblemente sea necesario trabajar con los dispositivos a altas frecuencias, o tal vez sea necesario agregar un filtro anti ruido para remover componentes de frecuencia no deseados.

Estos eventos del mundo real se convierten en obstáculos entre el usuario y las mediciones exactas y precisas. Para evitar estos obstáculos, es necesario experimentar con diferentes configuraciones de hardware y software. En otras palabras, es necesario desarrollar múltiples pruebas de adquisición de datos.

3.4.5. EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (SAD)

Como usuario de Matlab y el Data Acquisition Toolbox, se está interesado en medir y analizar un fenómeno físico. El propósito de cualquier sistema de adquisición es proveer al usuario de las herramientas y los recursos necesario para realizar la mencionada operación.

Se puede pensar que un SAD es una colección de software y hardware que conectan al usuario con el mundo físico. Un SAD típico se compone de lo siguiente:

Hardware de Adquisición: es el corazón de cualquier sistema de adquisición de datos. Su principal función es la de convertir señales analógicas en señales digitales y viceversa.

Sensores y Actuadores (Transductores): un transductor es un dispositivo que convierte energía de entrada de una naturaleza en energía de salida de otra naturaleza. Por ejemplo, un micrófono es un sensor que convierte la energía del sonido (presión sonora) en energía eléctrica, mientras que un parlante es un actuador que convierte a la energía eléctrica en energía sonora.

Hardware de acondicionamiento de señal: frecuentemente, las señales de los sensores son incompatibles con el hardware de adquisición. Para superar esta incompatibilidad, la señal debe ser acondicionada

Computador: el computador provee un procesador, un reloj del sistema, un bus de transferencia de datos, memoria y espacio de disco para almacenar datos.

Software: el software permite intercambiar información entre el computador y el hardware.

Los componentes del SAD y su relación se muestran a continuación:

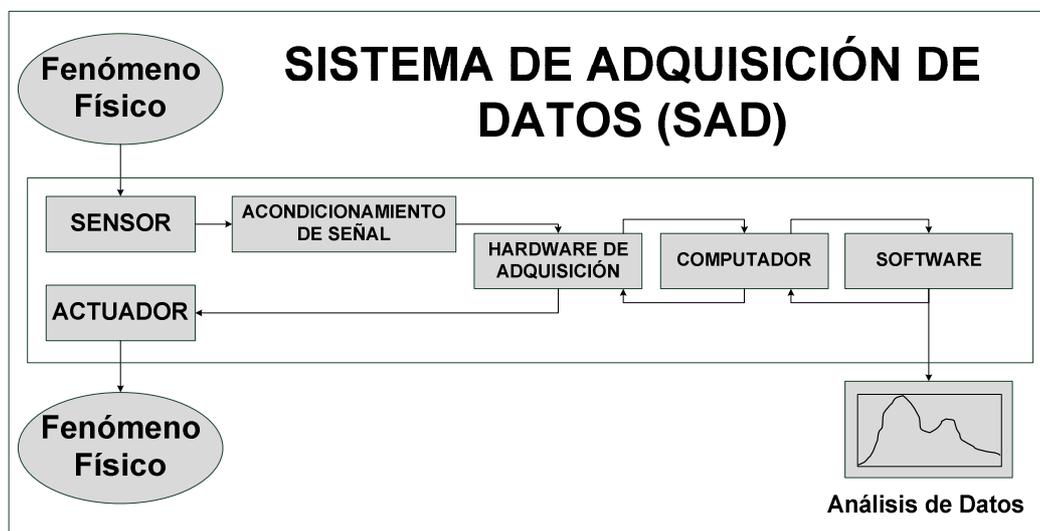


Figura 3.7. Sistema de Adquisición de Datos (SAD).

La figura muestra dos importantes características de los sistemas de adquisición de datos:

- Las señales son ingresadas a un sensor, acondicionadas, convertidas en bits que el computador puede leer y analizar para extraer información significativa.
- Los datos que salen del computador son convertidos en una señal análoga y se descargan en el actuador.

3.4.6. HARDWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS (HAD)

El hardware de adquisición de datos (HAD) puede ser interno, directamente instalado en un zócalo de expansión dentro del computador, o también puede ser externo, conectado al computador mediante un cable y un puerto.

Básicamente, el HAD está caracterizado por los subsistemas que posee. Un subsistema es un componente del HAD que realiza tareas específicas. Subsistemas comunes incluyen:

- Entrada análoga
- Salida análoga
- Entrada/Salida digital
- Contadores/temporizadores

Los dispositivos que contienen múltiples subsistemas, tales como el que se muestra a continuación, son llamados “tarjetas multifunción”.

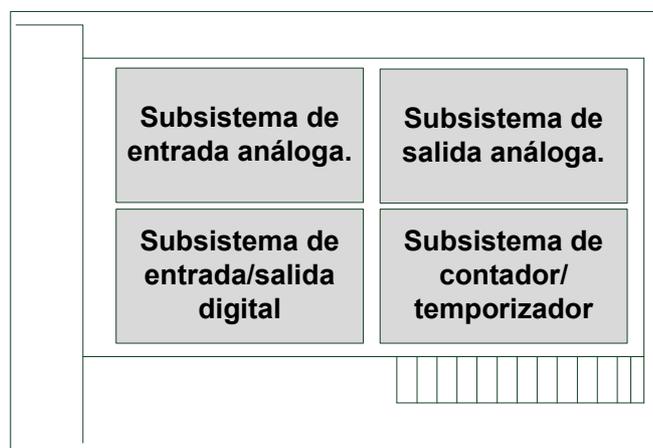


Figura 3.8. Componentes de las tarjetas multifunción

3.4.6.1. Subsistemas de entrada análoga

Los subsistemas de entrada análogos convierten una entrada análoga del “mundo real” de un sensor en bits que pueden ser leídos por el computador. Sin embargo, lo más importante de todos los subsistemas disponibles comúnmente, estos ofrecen típicamente dispositivos multicanal de 12 o 16 bits de resolución.

Los sistemas de entrada análoga también son conocidos como: subsistemas AI, convertidores A/D o ADC's.

3.4.6.2. Subsistemas de salida análoga

Estos subsistemas convierten datos digitales almacenados en el computador en una señal análoga para el “mundo real”. Estos subsistemas realizan el proceso contrario al del subsistema anterior.

3.4.6.3. Sistemas de entrada/salida digital (ESD ó DIO)

Los subsistemas DIO están diseñados para recibir y enviar valores digitales (niveles lógicos) hacia y desde el hardware. Estos valores son manejados típicamente tanto como bits simples, líneas de datos o como un puerto; el cual suele contar con 8 líneas. Aunque las tarjetas de adquisición más populares incluyen la capacidad de adquirir y enviar datos digitales, la misma está limitada a operaciones simples, por lo cual es necesario hardware especial para desarrollar operaciones E/S digitales avanzadas.

3.4.6.4. Subsistemas contador/temporizador

Estos subsistemas son utilizados para contar eventos, medida de frecuencia y periodo y generación de trenes de pulsos.

3.4.6.5. Sensores

Un sensor convierte un fenómeno físico de interés en una señal que es ingresada en el hardware de adquisición. Hay dos tipos principales de sensores basados en la salida que producen: sensores digitales y sensores análogos.

Los sensores digitales producen una señal de salida que es una representación digital de la señal de entrada y tiene valores discretos de magnitud, medidos en tiempo discreto. Un sensor digital debe sacar niveles lógicos que sean compatibles con el receptor digital. Algunos niveles lógicos estándares incluyen lógica transistor-transistor (TTL) y lógica de emisor común (ECL).

Los sensores análogos producen y sacan una señal que es directamente proporcional a la señal de entrada, además de ser continua en magnitud y tiempo. La mayoría de variables físicas tales como: temperatura, presión y aceleración son de naturaleza continua y son fácilmente medibles con un sensor análogo.

El sensor que se debe usar depende del fenómeno físico que se requiera medir. Algunos sensores comunes de medición análoga y las variables físicas que deben medir se enlistan a continuación:

Tabla 3.1. Sensores análogos comunes.¹¹

Sensor	Variable Física
Acelerómetro	Aceleración
Micrófono	Presión
Manómetro	Presión
Dispositivo de termo resistencia (RTD)	Temperatura
Medidor de Esfuerzo	Fuerza
Termocupla	Temperatura

¹¹ MATHWORKS, "MATLAB® 6.5 Help", 2002.

Cuando se desea escoger el mejor sensor análogo, se debe emparejar las características de la variable física a medir, con las características del sensor. Las dos características más importantes del sensor son:

- La señal de salida
- El ancho de banda

3.4.6.5.1. *Señal de salida*

La salida del sensor puede ser una señal análoga o digital, además esta señal generalmente es voltaje aunque algunos sensores despachan corriente.

3.4.6.5.2. *Ancho de banda*

Durante el experimento de adquisición en el mundo real, el fenómeno físico que se medirá tiene límites esperados.

El ancho de banda está dado por un rango de frecuencias presentes en la señal que se está midiendo. Se puede pensar que el ancho de banda se relaciona con el porcentaje de cambio de señal. Una señal que varía lentamente tiene un pequeño ancho de banda, mientras que una señal que varía rápidamente tiene un alto ancho de banda.

Para medir apropiadamente el fenómeno físico de interés, el ancho de banda del sensor debe ser compatible con el ancho de banda de la medición. Probablemente se desee utilizar sensores con el ancho de banda más amplio posible cuando se realice una medición de un sistema físico. Esta es una forma de asegurar que el sistema básico de medición es capaz de responder linealmente sobre el rango de interés completo. Sin embargo, mientras el ancho de banda sea más amplio en el sensor, se debe eliminar las posibles componentes de frecuencia indeseables (ruidos).

3.5. HERRAMIENTAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DATA ACQUISITION TOOLBOX)

El toolbox de adquisición de datos se divide en tres componentes principales:

- Las funciones M establecidas
- El motor de adquisición de datos
- Los manejadores (drivers) de la tarjeta de adquisición de datos

Como se muestra en la figura siguiente, estos componentes permiten intercambiar información entre Matlab y el hardware de adquisición de datos.

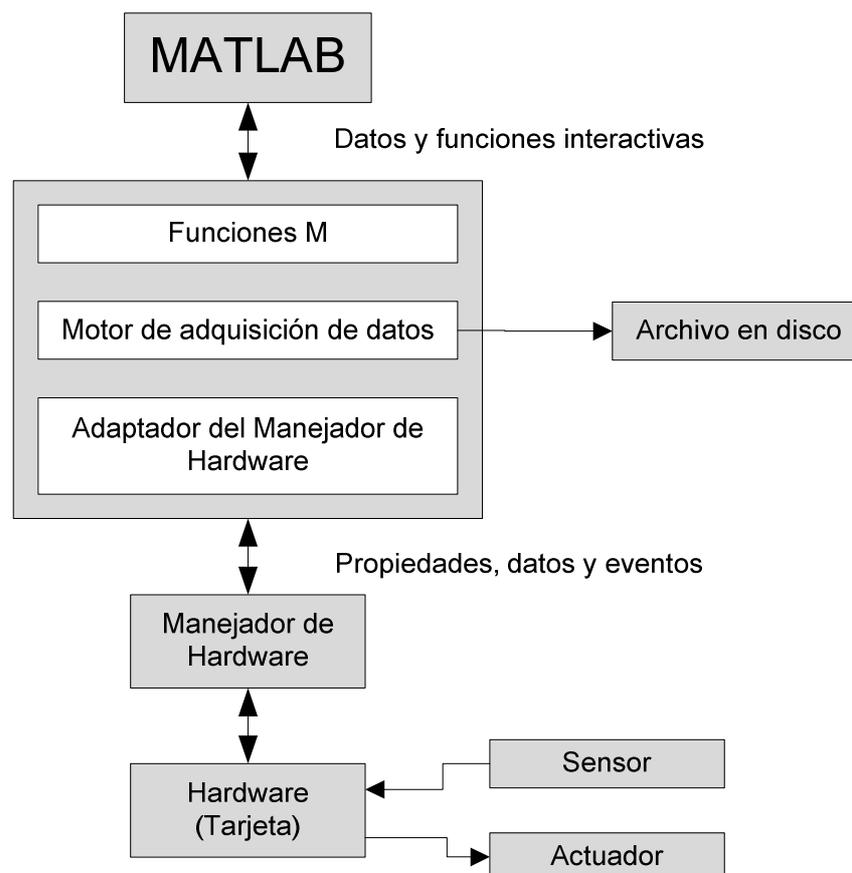


Figura 3.9. Componentes - toolbox de adquisición de datos

La figura anterior muestra como fluye la información de componente a componente. Esta información consiste de:

Propiedades: Con el manejo de las propiedades es posible controlar el comportamiento de la aplicación. Las propiedades contienen información sobre la configuración del hardware.

Datos: Pueden ser datos provenientes de un sensor conectado a un subsistema de entrada analógica para ser almacenados en Matlab o también pueden ser datos de salida de Matlab a un actuador conectado a un subsistema de salida analógica.

Eventos: Un evento ocurre en un tiempo particular una vez que ciertas condiciones se hayan cumplido y se produzcan una o más acciones predeterminadas. Los eventos solo pueden generarse después de haber configurado las propiedades correspondientes. Una forma de utilizar los eventos puede ser el analizar o graficar datos una vez que se adquiere un número predeterminado de ellos.

Funciones M: Para ejecutar cualquier tarea con la aplicación de adquisición de datos, debe llamarse algunas funciones M. Entre otras cosas, estas funciones permiten:

- Crear dispositivos de objetos que proporcionan un camino de Matlab al hardware y permite controlar el comportamiento de la aplicación
- Capturar datos o sacar datos
- Configurar las propiedades
- Evaluar el estado y los recursos del hardware de adquisición

Para tener una referencia clara de las funciones M predeterminadas en la caja de herramientas de adquisición de datos, el apéndice cuenta con la lista completa de las mismas.

El motor de adquisición de datos: El motor de adquisición de datos, o simplemente motor, es una librería de enlace dinámico (dll) en forma de archivo MEX que:

Guarda los dispositivos de objetos y sus valores asociados de configuración que controlan la aplicación de adquisición de datos, controla la sincronización de eventos y controla el almacenaje de datos capturados o en espera de ser sacados. Mientras el motor ejecuta estas tareas, puede usarse Matlab para ejecutar otras tareas como el análisis de los datos adquiridos. En otras palabras, el motor y Matlab son asíncronos.

El adaptador del manejador del hardware: El adaptador del manejador del hardware, o simplemente el manejador, es una interfaz entre el motor de adquisición de datos y el manejador de la tarjeta. El propósito principal del adaptador es pasar información entre Matlab y la tarjeta adquisitora a través del manejador (driver) generalmente proporcionado por el fabricante. Por ejemplo, si se usa una tarjeta adquisitora de National Instruments, entonces debe estar instalado el manejador correspondiente de NI-DAQ proporcionado por el fabricante. En la tabla siguiente se muestran las tarjetas soportadas por el toolbox de adquisición de datos.

Tabla 3.2. Tarjetas soportadas por el toolbox de adquisición de datos.¹²

FABRICANTE	NOMBRE DEL ADAPTADOR
ComputerBoards	cbi
Agilent Technologies	hpe1432
Keithley	keithley
Measurement Computing	mcc
National Instruments	nidaq
Parallel port	parallel
Tarjetas de sonido para Windows	winsound

¹² MATHWORKS, "MATLAB® 6.5 Help", 2002.

SESIÓN DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La sesión de adquisición de datos se compone de todos los pasos que se desea realizar al adquirir o exportar datos. Los pasos son:

Creación de un objeto dispositivo – Se puede crear un objeto dispositivo usando las funciones de creación: analoginput, analogoutput o digitalio. Los objetos dispositivo son los elementos básicos de la caja de herramientas (DAT) para acceder al hardware.

Agregar canales o líneas – Luego de que se ha creado un objeto dispositivo, se debe agregar canales o líneas al mismo. Los canales se refieren a entrada/salida de datos análoga, mientras que las líneas se refieren a la entrada/salida de datos digitales. Los canales y las líneas son los objetos básicos con los que se maneja la entrada/salida de datos a través del hardware.

Configuración de Propiedades – Para establecer el comportamiento del objeto dispositivo, es necesario agregar valores a sus respectivas propiedades usando la función “set” o la notación punto.

Es posible muchas de las propiedades en cualquier momento, sin embargo, algunas de las propiedades solo son configurables cuando el objeto dispositivo no está “corriendo” (no ha iniciado la sesión de adquisición/escritura de datos).

Al contrario, dependiendo de la configuración del hardware y los requerimientos de la aplicación, probablemente sea conveniente aceptar las propiedades por defecto y saltar este paso.

Adquirir y escribir (ingreso/salida) datos – Para adquirir o escribir datos, se debe ejecutar (correr) el objeto dispositivo con la función “start”. Mientras un objeto dispositivo se está ejecutando, se comporta de acuerdo a las propiedades que se le haya especificado en el punto anterior.

Luego que los datos se adquieren, se debe extraerlos de la “máquina/motor de adquisición” con la función “getdata”. Antes de que sea posible enviar datos, estos deben ser “puestos en cola” (colocados en las respectivas variables que referencian a las líneas de escritura/envío) en el motor de adquisición utilizando la función “putdata”.

Limpieza – Cuando no se necesite más el objeto dispositivo, se debe remover al mismo de la memoria utilizando la función “delete”. Luego debe ser removido del espacio de trabajo de Matlab usando el comando “clear”.

La sesión de adquisición de datos sigue los pasos anteriores, pero el tratamiento es diferente para los objetos dispositivo de lectura/escritura digital, porque estos no almacenan datos en el motor de adquisición. Así pues, solo la lectura/escritura de datos análoga seguirá al pie de la letra los pasos anteriores.

3.6. EL PUERTO PARALELO DE LA PC

El puerto paralelo se apega al estándar IEEE 1284 liberado en 1994 y que define 4 modos de operación soportados aún en la actualidad:

- Puerto Paralelo Estándar (SPP)
- Puerto Paralelo PS/2 (Bidireccional)
- Puerto Paralelo Mejorado (EPP)
- Puerto Paralelo con Capacidades Extendidas (ECP).

La mayoría de las computadoras personales recientes, tanto de escritorio como portátiles, presentan por omisión una configuración del puerto paralelo en dos direcciones de datos (bidireccional) para cualquier sistema operativo. Los sistemas operativos menos recientes, hablando de Windows 98 y anteriores, también son capaces de soportar este tipo de esquema para recibir y enviar datos por el puerto de impresión, siempre y cuando se configure manualmente dicha característica, preferentemente desde el SETUP. El motivo central de este artículo es discutir el modo de operación bidireccional.

CARACTERÍSTICAS DEL PUERTO PARALELO Y SU UTILIZACIÓN MEDIANTE MATLAB

El puerto paralelo está constituido por ocho líneas de manejo de datos, cuatro líneas de control, cinco líneas de estado y ocho líneas de tierra. Cuando se usa normalmente, las líneas son controladas por el software cargado en el computador y el dispositivo periférico siguiendo un protocolo, tal como el protocolo normalizado IEEE 1284-1994. El protocolo define los procedimientos para transferir datos tales como: el “handshacking”, la devolución de información de estado, entre otros. Sin embargo, la caja de herramientas de adquisición de datos de Matlab usa al puerto paralelo como un dispositivo básico de entrada/salida digital, por lo cual no se necesita ningún protocolo.

Además, es posible usar el puerto para ingresar y sacar del computador valores digitales tal como se podría hacer con un subsistema DIO (Entrada/Salida digital – Digital Input/Output).

Para acceder a las líneas físicas del puerto paralelo, la mayoría de las PC's vienen equipadas con un conector hembra de 25 pines, el mismo que se muestra a continuación:

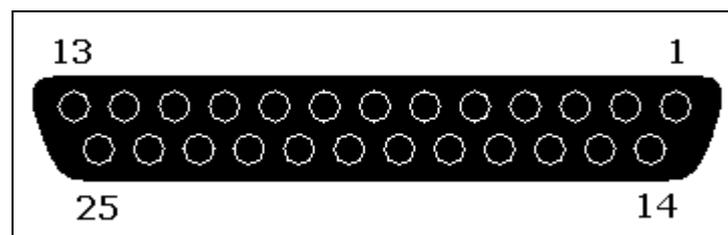


Figura 3.10. Conector hembra de 25 pines (DB25)

Las líneas usan niveles lógicos TTL. Una línea tiene el estado alto (verdadero o cierto) cuando este se encuentra en un estado alto TTL, mientras que la línea esta baja (falso o no cierto) cuando presenta un estado bajo TTL. Son excepciones las líneas 1, 11, 14 y 17, las cuales están invertidas físicamente.

La caja de herramientas de adquisición agrupa las 17 líneas que no son tierra en tres puertos separados. Las direcciones de los puertos y los números de pines asociados se detallan a continuación:

Tabla 3.3. Descripción de las direcciones del puerto paralelo.¹³

DIRECCIÓN DE PUERTO	PINES	DESCRIPCIÓN
0	2-9	Ocho líneas de entrada/salida, con 9 pines, con el pin 9 como el bit más significativo (MSB).
1	10-13, 15	Cinco líneas de entrada usadas para el estado.
2	1, 14, 16, 17	Cuatro líneas de entrada/salida usadas para el control.

Nótese que, en algunos casos, las líneas del puerto 0 pueden ser unidireccionales y solo enviar datos. Si el hardware lo soporta, es posible configurar estas líneas tanto para entrada como para salida de datos con el BIOS del PC, seleccionando un modo bidireccional tal como el modo EPP (Enhanced Parallel Port – Puerto Paralelo mejorado) o ECP (Extended Capabilities Port – Puerto de Capacidades Extendidas). Las características del puerto paralelo para un objeto DIO (Digital Input/Output – Entrada/Salida Digital) declarado con el nombre de “parport” se pueden mostrar desde Matlab, como se indica a continuación:

```
>>hwinfo = daqhwinfo(parport);
```

```
>>hwinfo.Port(1)
```

```
ans =
```

```
    ID: 0
```

```
LineIDs: [0 1 2 3 4 5 6 7]
```

```
Direction: 'in/out'
```

```
Config: 'port'
```

```
>>hwinfo.Port(2)
```

- ¹³ MATHWORKS, “MATLAB® 6.5 Help”, 2002.

```
ans =
```

```
ID: 1
```

```
LineIDs: [0 1 2 3 4]
```

```
Direction: 'in'
```

```
Config: 'port'
```

```
>>hwinfo.Port(3)
```

```
ans =
```

```
ID: 2
```

```
LineIDs: [0 1 2 3]
```

```
Direction: 'in/out'
```

```
Config: 'port'
```

Esta información indica que todas las 17 líneas pueden ser configuradas como puertos, se puede ingresar y enviar valores usando las 12 líneas asociadas con los puertos 0 y 2, por las cinco líneas asociadas al puerto 1, es posible únicamente ingresar valores.

Para obtener referencia rápida de los objetos DIO (objetos dispositivo), la propiedad "LineName" (nombre de línea) se llena automáticamente con un nombre que incluye el número de pin del puerto, por ejemplo:

```
>>dio = digitalio('parallel', 1)
```

La instrucción a anterior despliega un resumen informativo del objeto "dio", el cual usa el puerto paralelo del PC. El resumen se muestra a continuación:

```
Port Parameters: Port 0 is port configurable for reading and writing.
```

```
Port 1 is port configurable for reading.
```

Port 2 is port configurable for reading and writing.

Engine status: Engine not required.

DIO object contains no lines.

Al digitar la instrucción siguiente se obtiene:

```
>>addline(dio, 0:16, 'in')
```

Index:	LineName:	HwLine:	Port:	Direction:
1	'Pin2'	0	0	'In'
2	'Pin3'	1	0	'In'
3	'Pin4'	2	0	'In'
4	'Pin5'	3	0	'In'
5	'Pin6'	4	0	'In'
6	'Pin7'	5	0	'In'
7	'Pin8'	6	0	'In'
8	'Pin9'	7	0	'In'
9	'Pin15'	0	1	'In'
10	'Pin13'	1	1	'In'
11	'Pin12'	2	1	'In'
12	'Pin10'	3	1	'In'
13	'Pin11'	4	1	'In'
14	'Pin1'	0	2	'In'
15	'Pin14'	1	2	'In'
16	'Pin16'	2	2	'In'

17 'Pin17' 3 2 'In'

Como se muestra sobre estas líneas, el puerto paralelo puede ser tratado como cualquier tipo de dispositivo de entrada/salida de datos digital, detallado ya en el apartado de la “CAJA DE HERRAMIENTAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DATA ACQUISITION TOOLBOX)”.

3.7. CAJA DE HERRAMIENTAS DE SISTEMAS DE CONTROL (CONTROL SYSTEM TOOLBOX)

MATLAB tiene una rica colección de funciones útiles al instante para el desarrollador teórico de sistemas de control.

Matemática compleja, eigenvalores, localización de raíces, inversión de matrices y transformadas de Fourier rápidas son solo unos pocos ejemplos de las importantes herramientas basadas en métodos numéricos encontradas en MATLAB. Más generalmente, el álgebra lineal, computación matricial y análisis numérico que MATLAB posee provee herramientas sólidas para la ingeniería de control en la forma de la Caja de Herramientas de Sistemas de Control, SIMULINK y otros módulos.

La ingeniería del control puede simplificarse mediante interfaces gráficas de usuario (GUI), para que los sistemas sean modelados como funciones de transferencia en forma de ganancia de polo cero o forma de espacio-estado permitiendo al usuario utilizar técnicas de diseño clásicas y/o modernas.

Es posible manipular tanto sistemas en tiempo continuo como en tiempo discreto.

Conversiones entre representaciones de modelos son provistas. Respuesta temporal, respuesta frecuencial y demás pueden ser computadas y graficadas.

Las funciones utilizadas para generar respuestas temporales ante entradas variadas, son las siguientes:

Tabla 3.4. Funciones utilizadas para generar respuestas temporales ante entradas variadas.¹⁴

Función	Detalles
step	Respuesta a un escalón
impulse	Respuesta a un impulso
lsim	Entrada aleatoria
ginput	Averiguar valores de un determinado punto de la gráfica
damp	Permite obtener ω_n y ξ
dcgain	Permite obtener la ganancia estática de una FT

Tabla 3.5. Funciones relacionadas con el lugar de las raíces.¹⁵

Función	Detalles
rlocus	Trazado del Lugar de las Raíces (para ss. continuos y discretos)
rlocfind	Identificación concreta de un punto del lugar
pzmap	Representación del diagrama de polos y ceros
Sgrid	Red de obtener ω_n y ξ en el plano 's'

3.8. CAJA DE HERRAMIENTAS DE CONTROL DE INSTRUMENTOS (INSTRUMENT CONTROL TOOLBOX)

La caja de Herramientas de Control de Instrumentos es un conjunto de funciones desarrolladas en el ambiente y técnicas de programación de MATLAB. Este conjunto de funciones permiten al usuario de las mismas contar con las siguientes opciones:

Una red de comunicaciones con instrumentos que soporta varias interfaces de comunicación y manipulación de instrumentos (GPIB-IEEE-488, VISA, TCP/IP, UDP, Puerto Serial).

Los datos que se transmiten pueden tener formatos de texto o numéricos.

- ¹⁴ MATHWORKS, "MATLAB® 6.5 Help", 2002.

- ¹⁵ MATHWORKS, "MATLAB® 6.5 Help", 2002.

La transferencia puede ser sincrónica o asincrónica.

Posibilidad de grabar datos e información de eventos en diversos formatos de archivo.

El uso más destacado de esta caja de herramientas puede indicarse como la creación de variables de referencia a los puertos seriales que dispone la PC, las funciones más útiles relacionadas a manejo del puerto serial son las siguientes:

Tabla 3.6. Funciones para manejar el puerto serial.¹⁶

Función	Detalles
serial	Permite crear una variable de referencia a puerto serial.
fopen	Abre la variable de puerto serial que se requiera.
fclose	Cierra la variable de puerto serial que ya no se necesite.
fprintf, fwrite	Permiten escribir datos en el puerto serial
fscanf, fread	Permiten leer datos en el puerto serial
readasync	Permite comenzar un proceso de lectura asincronica.

- ¹⁶ MATHWORKS, "MATLAB® 6.5 Help", 2002.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Para el proceso de diseño del presente proyecto se utilizará como referencia el libro de Carles Riba i Romeva, "DISEÑO CONCURRENTE"¹⁷.

4.1. CICLO BÁSICO DE DISEÑO

A continuación se indica el ciclo básico de diseño, el cual será utilizado para desarrollar el sistema de control, cabe indicar que el paso de simulación será omitido por considerarse de extrema importancia el factor de costo del proyecto y porque las alternativas seleccionadas para el análisis trabajarán de forma similar.

¹⁷- RIBA, CARLES, "Diseño Concurrente", S/E, 2002.

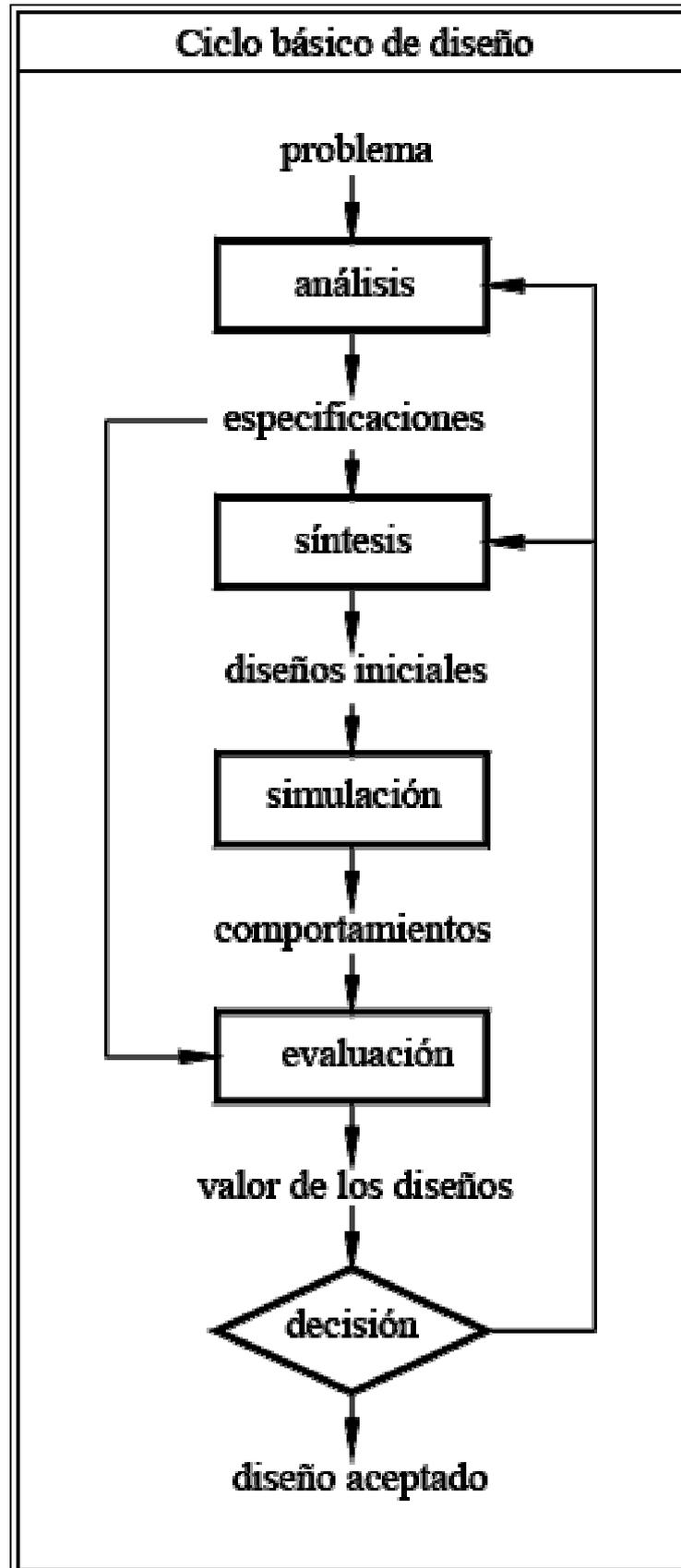


Figura 4.1. Ciclo básico del diseño.

4.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

En el Ecuador existen diferentes opciones para controlar sistemas energéticos o procesos industriales, entre las cuales están: el control electrónico, electromecánico, los PLC's, sistemas SCADA, entre otros.

En el campo del control mediante el uso de PC, aún no se ha utilizado de una manera extensa el software denominado MATLAB y su aplicación de control denominada SIMULINK.

Este tema de tesis plantea el estudiar y desarrollar un sistema de control, mediante el software indicado antes, para rehabilitar una Turbina Pelton de Laboratorio que se encuentra en el Departamento de Ingeniería Mecánica.

Además, será necesario utilizar para ello: diseño mecánico, electrónico e informático.

4.1.2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Para realizar el análisis del problema, a continuación se indican las especificaciones técnicas requeridas para el presente proyecto, posteriormente se desarrollará el modelo matemático del sistema.

4.1.2.1. Lazo de control del sistema¹⁸

La disposición funcional del sistema en el lazo de control se muestra en la siguiente figura:

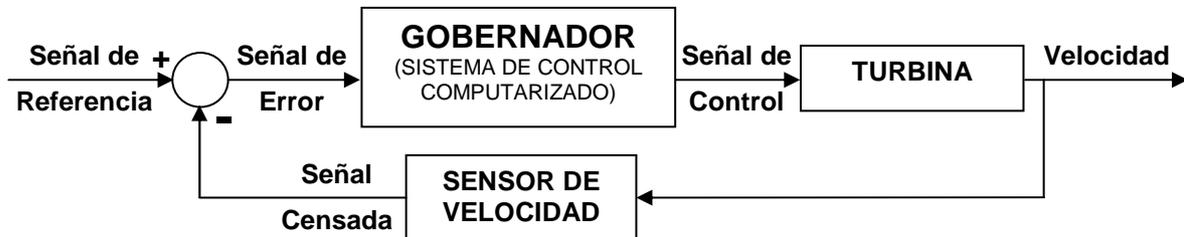


Figura 4.2. Disposición funcional del Sistema.

4.1.2.2. Especificaciones de turbina Pelton

La turbina Pelton constituye el subsistema/equipo sobre el cual se ejecutarán los comandos de control que determine el aplicativo informático. Este equipo tiene/debe tener teóricamente las siguientes características de funcionamiento bajo condiciones de trabajo nominales¹⁹:

N_n	=	600 [rpm]
Z_n	=	17,5 [mm]
Q_n	=	13,32 [m ³ /h] (3,7 [lt/s]) - aproximado
H_n	=	21,34 [m] (70 pies) - aproximado
BHP_n	=	0,41 [Kw] (0,55 HP) - aproximado
M_n	=	71,5 [N.m] (4,9 lbf.pies) – aproximado
$\square b$	=	720 [°] – aproximado

¹⁸ USBECK, DANILO, "Diseño y Construcción de un Regulador Electro-Hidráulico de Velocidad para una Mini Turbina Pelton con Aplicación al Laboratorio", Tesis - E.P.N., Quito, 1986.

¹⁹ USBECK, DANILO; "Diseño y Construcción de un Regulador Electro-Hidráulico de Velocidad para una Mini Turbina Pelton con Aplicación al Laboratorio", Tesis - E.P.N., Quito, 1986.

Donde:

- N: velocidad de rotación de turbina
- Z: apertura del inyector (0[mm] – 25,4[mm] posibles)
- Q: flujo que se inyecta a la turbina
- H: altura de la columna de agua antes de la salida por el inyector
- BHP: Potencia al freno de la turbina.
- M: Torque al freno.
- b: Apertura de la válvula de descarga de la bomba (Válvula de diafragma para control de flujo)

A continuación se indica el diagrama esquemático del equipo de Pelton de Laboratorio, cuando ya se haya implementado el sistema de control:

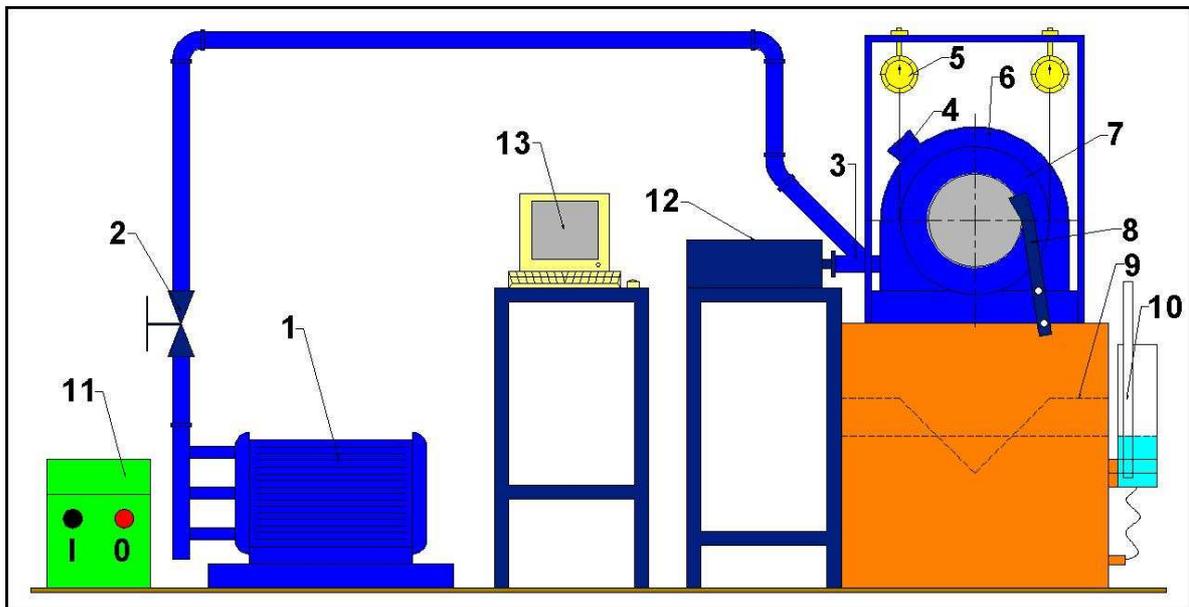


Figura 4.3. Esquema de equipo de laboratorio.

Donde:

1. Bomba.
2. Válvula de descarga de bomba.

3. Válvula de aguja (Inyector).
4. Manómetro.
5. Balanza (2 balanzas y la correa corresponden al sistema de Freno Pronny).
6. Turbina Pelton.
7. Tambor del freno.
8. Sensor de velocidad.
9. Vertedero triangular.
10. Medidor del nivel en vertedero (Regleta).
11. Caja de encendido y apagado.
12. Actuador.
13. Computador.

4.1.2.3. Restricciones y condiciones de trabajo del sistema

El Sistema hidráulico, que provee la alimentación de agua al inyector y sirve de sumidero a la descarga de la turbina Pelton, está conformado según el esquema de la figura anterior.

Como se puede observar, el agua que alimenta a la turbina proviene de una bomba de alta capacidad/flujo y de alta presión de descarga, la misma que posee una curva característica de funcionamiento.

La presión de descarga de la bomba depende de la ubicación de su punto de funcionamiento sobre la curva de flujo vs. altura de descarga (Q vs. H) y este punto a su vez está determinado por la cantidad de apertura de la válvula de descarga (control de caudal) de la bomba.

Considerando la posición de la válvula de aguja (inyector) de la turbina, la válvula de descarga de la bomba y las características del motor de la bomba, se tiene lo siguiente:

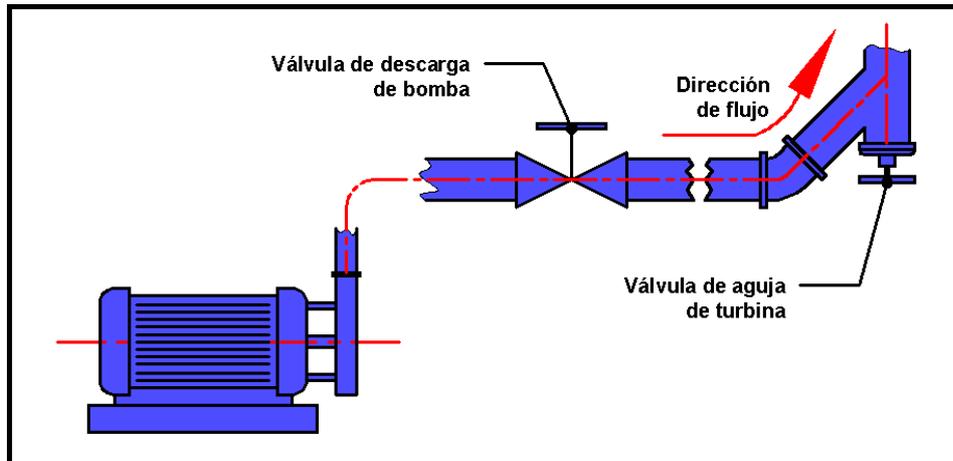


Figura 4.4. Esquema de válvulas de sistema hidráulico.

1. El motor de la bomba tiene una potencia de 11,2 [kw] (15 Hp)
2. Las válvulas de descarga y de aguja se encuentran posicionadas en serie.
3. El cierre de la válvula de aguja produce el cierre total de la vía de flujo de descarga de la bomba.
4. Al cerrar la vía de flujo de descarga de la bomba, el punto de funcionamiento de la misma pasa a ser el punto de cierre (shut off point), dando como resultado una altísima presión en la tubería de descarga (desde la bomba hasta la válvula de aguja), tal y como se muestra en el esquema siguiente:

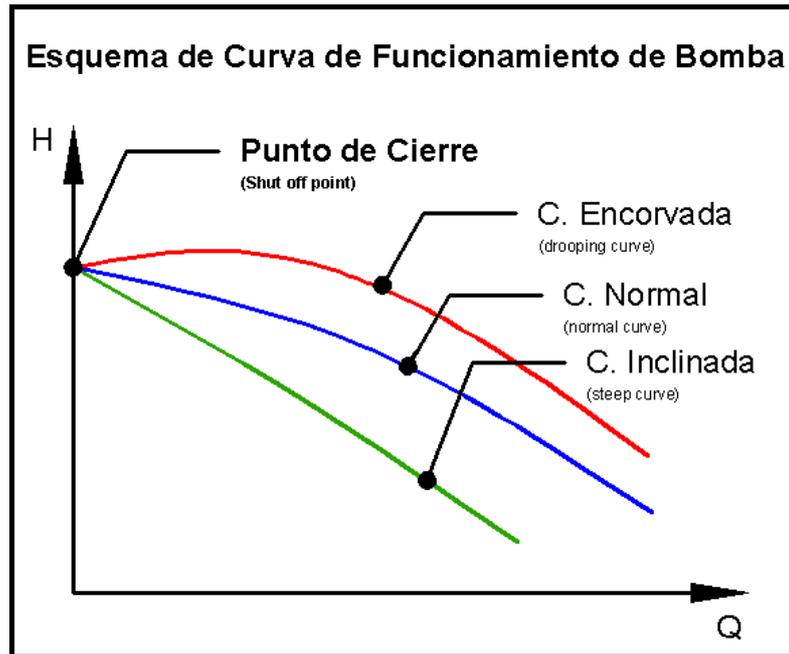


Figura 4.5. Esquema de curvas que caracterizan a las bombas.

5. El proyecto de titulación previo que se denomina: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REGULADOR ELECTRO-HIDRÁULICO DE VELOCIDAD PARA UNA MINI TURBINA PELTON CON APLICACIÓN AL LABORATORIO”, obra de DANILO USBECK, PATRICIO FLOR y MAURICIO GONZÁLEZ toma en cuenta estos aspectos, además de la necesidad de linealizar las ecuaciones matemáticas que determinan el funcionamiento de la turbina Pelton de Laboratorio, razón por la cual se desarrolla un modelo matemático simplificado y se toman las condiciones de funcionamiento de la turbina nominales como base para dicho desarrollo. Además, el mencionado proyecto toma como intervalo de actuación a la apertura del inyector desde 16 hasta 20 [mm].

Al analizar los puntos anteriores se concluye que:

1. Debido al pequeño rango de aplicación en lo correspondiente a la apertura del inyector, se ha visto la necesidad de determinar experimentalmente aperturas mínima y máxima del actuador que permitan un rango más amplio de control, siempre observando que la variación de la altura en la entrada del inyector no

sea mayor a $\pm 3,048$ [m] (± 10 [pies]), así pues se ha encontrado un rango más amplio de actuación ($Z_{\min}=13$ [mm] y $Z_{\max}=23$ [mm]). Con el rango de carrera de inyector determinado, se ha elegido un rango de velocidad de consigna de ± 30 [rpm] – {570 - 630}[rpm].

2. El rango de diseño del presente sistema de control debe estar determinado por las siguientes condiciones teóricas (relacionadas con el proyecto de sistema de control previo indicado anteriormente):

N: $600 \pm 5\%$ [rpm] – aproximadamente en punto nominal.
 $600 + 25\%$ [rpm] – como sobrepaso máximo porcentual en punto nominal.

N(rango): 570 – 630 [rpm]

Z_{min}: 13 [mm] durante el funcionamiento del sistema de control - aproximado

Z_{máx}: 23 [mm] durante el funcionamiento del sistema de control - aproximado

Z: 0 [mm] - 24 [mm] – se reducirá 1 [mm] a la carrera máxima permitida por el sistema de control como precaución contra malas calibraciones de la posición del inyector (4,17% de reducción de carrera de inyector)

Z_n: 17,5 [mm] – aproximadamente en punto nominal

H_n : 21,34 [m] (70 [pies]) – aproximado en punto nominal

3. Se utilizará el desarrollo matemático del proyecto de titulación previo como base para encontrar el modelo matemático de control que se utilizará en el presente proyecto.

4.1.2.4. Especificaciones de las señales de control

El sistema de control debe manejar varias señales para realizar las operaciones matemáticas y tomar las decisiones adecuadas.

Las señales que se van a utilizar son:

Señal de Error	=	Señal de Referencia - Señal Censada
Señal de Referencia:		Valor interno del Programa de control (Velocidad requerida / Consigna)
Señal de Control:		Comunicación Serial o Paralela: PC – ACTUADOR (Desplazamiento de actuador sobre la aguja)
Señal Censada:		Comunicación Serial o Paralela: TACÓMETRO ELECTRÓNICO – PC (Velocidad medida)

4.1.2.5. Especificaciones del actuador (posicionador de inyector)

La turbina Pelton posee una válvula de aguja (inyector), la misma que regula el flujo de agua que impacta a las cazoletas (álabes) y proveyendo la energía mecánica para la rotación del rodete.

El inyector debe ser posicionado adecuadamente, por esta razón se debe diseñar y construir o adquirir un sistema posicionador lineal que cuente con las siguientes características:

Tipo:	Actuador lineal de doble efecto.
Controlado por:	PC, comunicación serial (puerto COM-DB9) y/o paralela (puerto LPT-DB25).

Interfaz Informática:	Interfaz gráfica de usuario (GUI) MATLAB 6.5
Carrera máxima:	25 - 30 mm.
Alimentación eléctrica:	110 [VCA] ó 220 [VCA], disponibles junto al equipo.
Dimensiones:	500x500x1300[mm], máximas, incluido soporte.

Para determinar la carga que soportará el actuador se evaluará la carga a la que está sometida la válvula de aguja en condiciones cercanas a las condiciones de diseño del sistema de control:

$$Z_{\min.} = 13[\text{mm}] \qquad Z_{\max.} = 23 [\text{mm}]$$

$$H_{\text{aprox.}} = 21,34 [\text{m}] \text{ (70 pies)}$$

Obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 4.1. Carga generada por la cabeza de inyección de la Turbina Pelton en el inyector.

No.	APERTURA DE LA VÁLVULA DE DESCARGA	APERTURA APROXIMADA	CARGA EN DINAMÓMETRO		DIRECCIÓN DE LA CARGA	ALTURA DE CABEZA ANTES DEL INYECTOR	
	$\square b$ [°]	Z [mm]	P [N]	P [kg]		H [m] (pies)	H [m] (pies)
1	360	10	98	10	Hacia la turbina	12	40
2		24	49	5		12	40
3	720	10	147	15		20	75
4		24	59	6		15	50
5	1080	10	294	26		---	---
6		24	98	10		---	---

- Las pruebas 5 y 6 se realizaron con el manómetro de la turbina incomunicado, por precaución a sobrepasar la altura máxima permitida por el manómetro (60 [m] – 196 [pies])

Al tomar como referencia los valores de carga que se acercan más al punto de referencia nominal (No. 3 y No. 4) se puede observar que:

$$P = 176 [\text{N}] \text{ (18 [kg]) si } Z = 10 [\text{mm}]$$

No se tomará en cuenta a los valores de las pruebas 5 y 6 por encontrarse muy por encima de las condiciones de funcionamiento del presente sistema de control.

Tomando en cuenta que el sistema de control no trabajará de forma continua (un par de veces por año) y que la carga es relativamente pequeña, se selecciona la siguiente condición de diseño:

$$n_f = \text{Factor de seguridad en fuerza} = 1,5$$

$$P_{\text{máx}} = 176 * 1,5 = 264 \text{ [N]} (22,5 \text{ [kg]})$$

Se puede notar que la fuerza máxima que soportará el sistema es muy pequeña, despreciable. Es decir, el actuador no requiere un diseño excesivamente robusto.

4.1.2.6. Sensor de velocidad

El sensor de velocidad que se utilizará debe estar constituido por un codificador rotacional relativo, el mismo que debe enviar una señal digital (pulsos) a un microprocesador ubicado en un circuito.

El microprocesador del circuito que se use posteriormente transmitirá la señal al computador que se va a utilizar en el sistema utilizando para ello comunicación serial y/o paralela.

4.1.2.7. Características del computador y el software de control

A continuación se indica las características mínimas necesarias del computador y el respectivo software que debe ser utilizado para el proyecto:

Tabla 4.2. Características necesitadas por el computador.²⁰

SISTEMA OPERATIVO	PROCESADOR	ESPACIO EN DISCO	MEMORIA RAM	VERSIÓN DE MATLAB
Windows XP	Pentium III, IV, Xeon, Pentium M, AMD Athlon, Athlon XP, Athlon MP	20 Gb	512 Mb	6.5 (en adelante)

4.1.2.8. Modelo matemático (enfoque continuo)

Debido al análisis del problema y sus especificaciones técnicas (indicadas anteriormente) se concluye que:

El tipo de sistema de control es de tipo: **SISO** (Simple Entrada – Simple Salida).

Entrada en lazo abierto: Apertura del inyector z [mm]

Z [1]

Entrada en lazo cerrado: Valor Z_1 [1] ó [rpm] = Velocidad de referencia en campo de datos de computador.

Salida: Velocidad angular del rodete de la turbina, N [rpm]

Velocidad angular del rodete de la turbina, N_1 [1]

²⁰ MATHWORKS, "MATLAB® 6.5 Help", 2002.

Los demás parámetros involucrados en el sistema hidráulico: H, Q, BHP, M deberán comportarse dentro de un rango adecuado para mantener la aplicación del modelo matemático del sistema, es decir, tener un valor cercano al valor aproximado de funcionamiento en el punto nominal.

A continuación se desarrollará el modelo matemático del sistema, tomando en cuenta que se aplicará al mismo control PID.

4.1.2.9. Función de transferencia de la turbina

De la física fundamental, se tiene que dinámicamente el torque de una turbina puede modelarse en función de la aceleración angular y de la inercia.

$$T_m \cdot s \cdot n_1 = m_1 \quad [4.1]$$

Donde T_m es el tiempo de arranque mecánico relativo a la inercia de la turbina, el cual es característico de cada tipo de turbina, m_1 es la variación del torque generado por la turbina y s es el operador de la transformada de Laplace.

Expresado en diagrama de bloques:

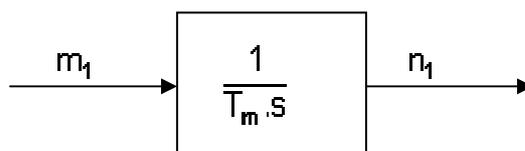


Figura 4.6. Diagrama de bloques de la turbina.

De acuerdo a lo requerido en el sistema se debe obtener una función de transferencia la cual sea capaz de introducir la variable de control, que en éste caso es el recorrido (apertura) del inyector para que se obtenga como respuesta la velocidad del rodete de la turbina.

$$F_t = \frac{m_1}{z_1} \quad [4.2]$$

$$F_t = \frac{a_{23} T_m s}{T_m s - a_{22}} \quad [4.3]$$

Donde²¹:

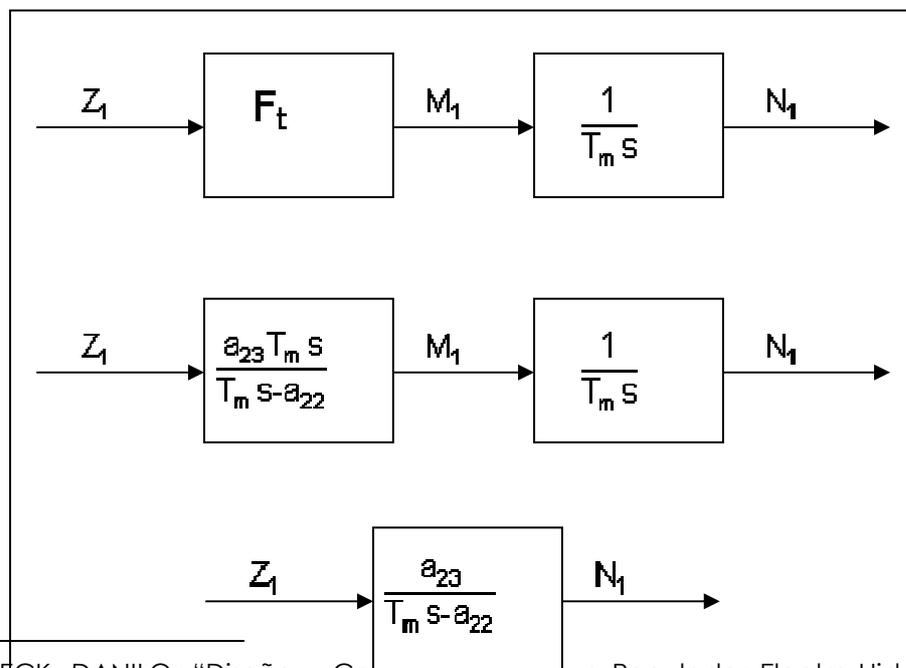
F_t : la función de transferencia torque posición del inyector, para el caso particular en el laboratorio.

a_{22} : es el coeficiente derivativo parcial, torque de la turbina en p.u. con respecto a la velocidad de la turbina en p.u.

a_{23} : es el coeficiente derivativo parcial, torque de la turbina en p.u. con respecto a la posición de la aguja inyectora en p.u.

T_m : es el tiempo de arranque de la turbina.

A continuación se desarrolla el diagrama de bloques con la función de transferencia.



²¹ USBECK, DANILO; "Diseño y Construcción de un Regulador Electro-Hidráulico de Velocidad para una Mini Turbina Pelton con Aplicación al Laboratorio", Tesis - E.P.N., Quito, 1986.

Figura 4.7. Diagrama de bloques de la turbina y el volante de inercia.

Para simplificar ésta función se nombra las siguientes constantes con el fin de analizar el modelo más fácilmente:

- C_6 : es el coeficiente entre el torque de la turbina respecto a la posición de la aguja inyectora para el torque respecto a la velocidad de la turbina.
- r_t : es el coeficiente entre el tiempo de arranque de la turbina para el torque respecto a la velocidad de la turbina.

El diagrama de bloques en lazo abierto tiene la siguiente forma:

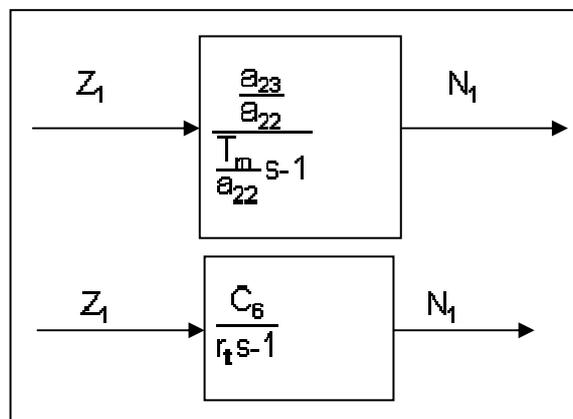


Figura 4.8. Diagrama de bloques - función de transferencia del sistema.

Donde:

$$C_b = \frac{a_{23}}{a_{22}} = \frac{2.5}{-1.06} = -2.3585 \quad [4.4]$$

$$r_t = \frac{T_m}{a_{22}} = \frac{8.018}{-1.06} = -7.5642 \quad [4.5]$$

Para analizar el comportamiento del sistema se desarrolló una interfaz gráfica en MATLAB-GUIDE y un modelo en MATLAB-SIMULINK, a continuación se presenta los resultados obtenidos con este modelo:

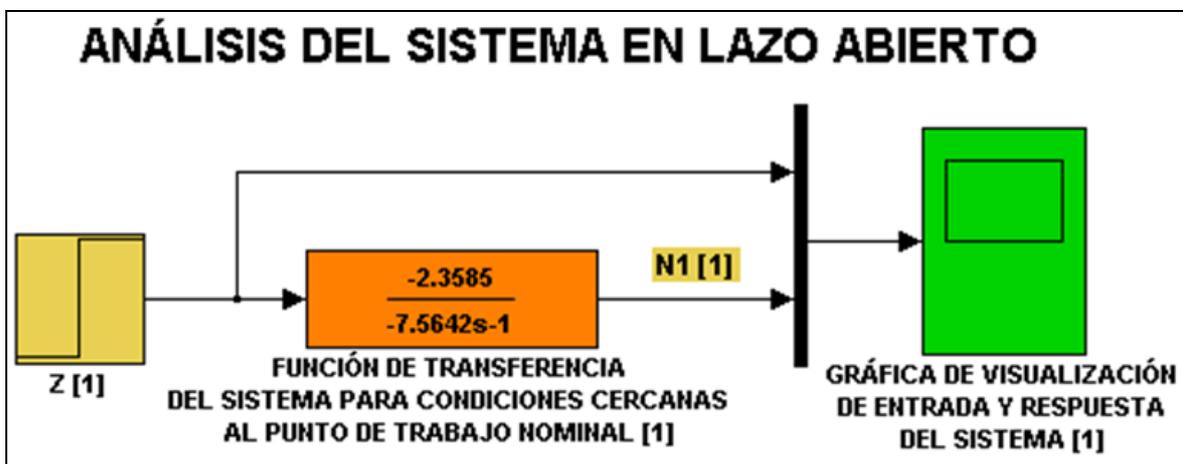


Figura 4.9. Modelo de lazo abierto en unidad [1]-Simulink.



Figura 4.10. Respuesta del sistema a una entrada tipo escalón en lazo abierto, en unidad [1] (por unidad) – $N_1[1]$ vs. $Z[1]$

En la gráfica anterior puede observarse que la variación de $N_1[1]$ con respecto a una entrada escalón unitario de $Z[1]$ es considerable, el valor que toma N al estabilizarse el sistema, aproximadamente al tiempo $t = 45[s]$ es de 2,3585, entonces:

$$N(t \rightarrow \infty) = 2,3585 = -C_6 \quad [4.6]$$

Además, mediante el análisis anterior se tiene que:

Si $Z=1 \rightarrow N_1 = -C_6$ por lo cual se puede obtener la relación:

$$\frac{N_{1-\text{estado estable}}}{Z_{1-\text{estado estable}}} = -C_6 = 2,3585 \quad [4.7]$$

$$\frac{Z_{1-\text{estado estable}}}{N_{1-\text{estado estable}}} = \frac{1}{-C_6} = 0,424 \quad [4.8]$$

Estas relaciones serán muy útiles al momento de analizar el sistema en unidades reales.

4.1.2.10. Control PID en lazo cerrado

Se denominará a la función de control con las letras F_c donde ésta representa a la función del PID.

$$F_c = k_p + \frac{k_i}{s} + sk_d \quad [4.9]$$

$$F_t = \frac{C_B}{r_t s - 1} \quad [4.10]$$

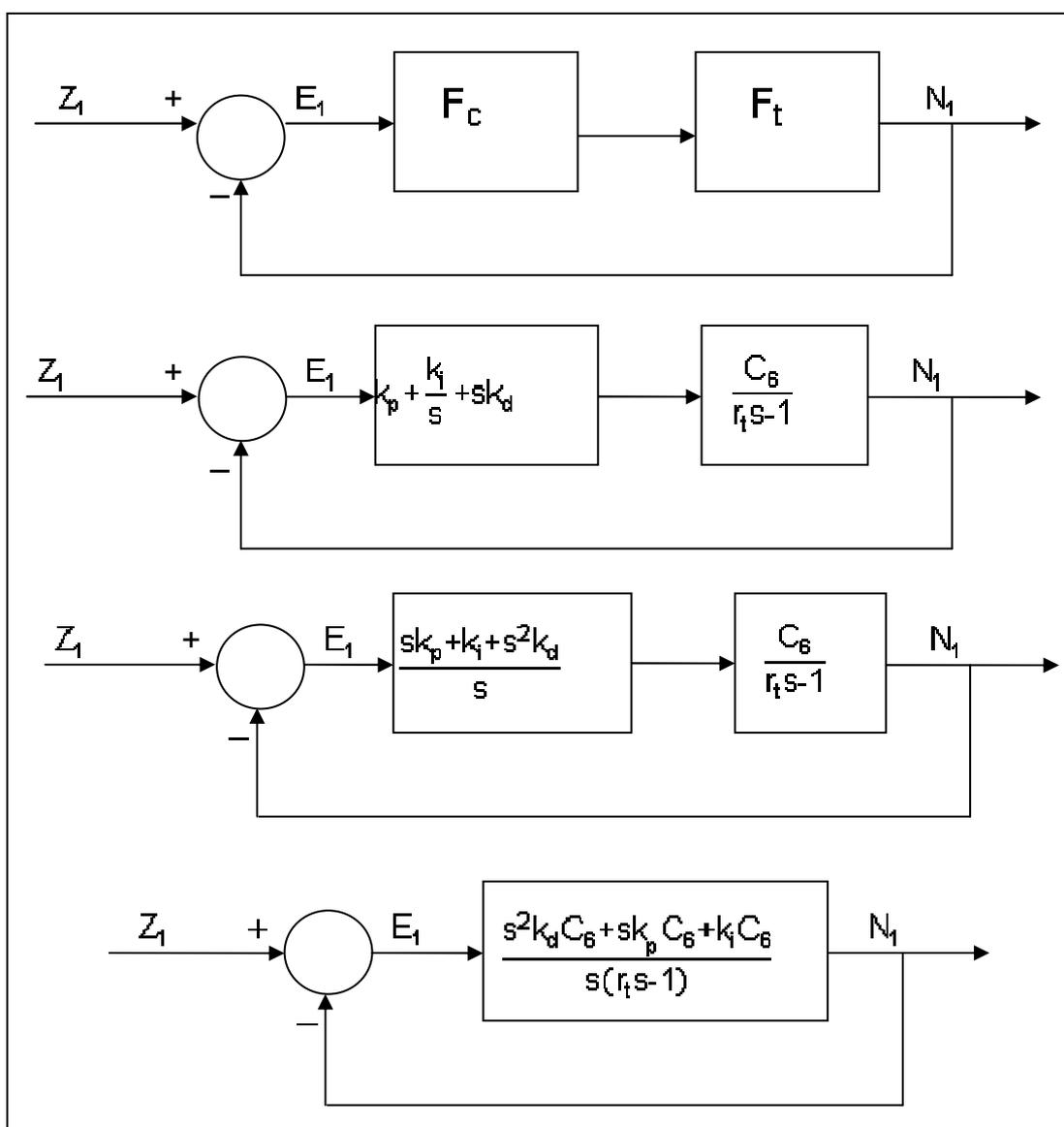


Figura 4.11. Diagrama de bloques de lazo cerrado.

$$\text{Sea: } H_{\text{transf}}(s) = \frac{N_1}{Z_1} = \frac{F_c \cdot F_t}{1 + F_c \cdot F_t} \quad [4.11]$$

Reemplazando las ecuaciones 4.9 y 4.10 dentro de 4.11 se obtiene:

$$H_{\text{transf}}(s) = \frac{N_1}{Z_1} = \frac{\left(k_p + \frac{k_i}{s} + s k_d\right) \cdot \left(\frac{C_B}{r_f s - 1}\right)}{1 + \left(k_p + \frac{k_i}{s} + s k_d\right) \cdot \left(\frac{C_B}{r_f s - 1}\right)}$$

$$H_{\text{transf}}(s) = \frac{N_1}{Z_1} = \frac{\frac{s^2 k_d C_B + s k_p C_B + k_i C_B}{s(r_f s - 1)}}{1 + \frac{s^2 k_d C_B + s k_p C_B + k_i C_B}{s(r_f s - 1)}}$$

$$H_{\text{transf}}(s) = \frac{N_1}{Z_1} = \frac{\frac{s^2 k_d C_B + s k_p C_B + k_i C_B}{s(r_f s - 1)}}{\frac{s(r_f s - 1) + s^2 k_d C_B + s k_p C_B + k_i C_B}{s(r_f s - 1)}}$$

$$H_{\text{transf}}(s) = \frac{N_1}{Z_1} = \frac{s^2 k_d C_B + s k_p C_B + k_i C_B}{s^2 r_f - s + s^2 k_d C_B + s k_p C_B + k_i C_B}$$

$$H_{\text{transf}}(s) = \frac{N_1}{Z_1} = \frac{s^2 k_d C_B + s k_p C_B + k_i C_B}{s^2 (r_f + k_d C_B) - s(1 - k_p C_B) + k_i C_B}$$

$$H_{\text{transf}}(s) = \frac{N_1}{Z_1} = \frac{\frac{s^2 k_d C_B + s k_p C_B + k_i C_B}{(r_f + k_d C_B)}}{s^2 - s \frac{(1 - k_p C_B)}{(r_f + k_d C_B)} + \frac{k_i C_B}{(r_f + k_d C_B)}} \quad [4.12]$$

Error en estado estable ($E(s)$)

$$E(s) = Z(s) \cdot \frac{1}{1 + F_c \cdot F_t} \quad [4.13]$$

$$E(s) = Z(s) \cdot \frac{1}{1 + \left(k_p + \frac{k_i}{s} + s k_d\right) \cdot \left(\frac{C_B}{r_f s - 1}\right)}$$

$$E(s) = Z(s) \cdot \frac{1}{1 + \frac{s^2 k_d C_6 + s k_p C_6 + k_i C_6}{s(r_1 s - 1)}}$$

$$E(s) = Z(s) \cdot \frac{s(r_1 s - 1)}{s^2(r_1 + k_d C_6) - s(1 - k_p C_6) + k_i C_6} \quad \text{ssi: } k_p \neq 0; k_d \neq 0; k_i \neq 0 \quad [4.14]$$

Si la entrada $Z(s) = \frac{A}{s}$ (Escalón de magnitud A)

$$E(s) = \frac{A}{s} \cdot \frac{s(r_1 s - 1)}{s^2(r_1 + k_d C_6) - s(1 - k_p C_6) + k_i C_6}$$

$$E(s) = \frac{A(r_1 s - 1)}{s^2(r_1 + k_d C_6) - s(1 - k_p C_6) + k_i C_6}$$

$$eee = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sA(r_1 s - 1)}{s^2(r_1 + k_d C_6) - s(1 - k_p C_6) + k_i C_6}$$

$$eee = 0$$

Si la entrada $Z(s) = \frac{A}{s^2}$ (Rampa de magnitud A)

$$E(s) = \frac{A}{s^2} \cdot \frac{s(r_1 s - 1)}{s^2(r_1 + k_d C_6) - s(1 - k_p C_6) + k_i C_6}$$

$$E(s) = \frac{A}{s} \cdot \frac{(r_1 s - 1)}{s^2(r_1 + k_d C_6) - s(1 - k_p C_6) + k_i C_6}$$

$$eee = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{A}{s} \cdot \frac{s(r_1 s - 1)}{s^2(r_1 + k_d C_6) - s(1 - k_p C_6) + k_i C_6}$$

$$eee = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{A(r_1 s - 1)}{s^2(r_1 + k_d C_6) - s(1 - k_p C_6) + k_i C_6}$$

$$e_{ss} = \frac{A}{k_1 C_6}$$

$$e_{ss} = \frac{A}{k_1 C_6} = \frac{A}{K_{Ev}}$$

Coefficiente de error de la velocidad $K_{Ev} = k_1 C_6$

El análisis gráfico de la respuesta del sistema controlado mediante PID se desarrollará posteriormente al determinar las constantes de control en base a criterios técnicos de los elementos constitutivos del sistema controlado, especificaciones técnicas del proyecto y dispositivos del sistema de control disponibles.

4.1.2.11. Especificaciones de la respuesta transitoria

Para poder determinar la respuesta transitoria del sistema primero se debe determinar la frecuencia natural, razón de amortiguamiento y frecuencia amortiguada.

A modo de análisis inicial se utilizará el procedimiento siguiente:

Para poder determinar la razón de amortiguamiento es posible utilizar el Sobrepasso Máximo Porcentual. Para este caso la variación máxima será del 25%, según se indico en el apartado 4.1.2.3. (Restricciones y Condiciones de Trabajo del Sistema)

Sea: SM = sobrepasso máximo [1]

ξ = razón de amortiguamiento [1]

Entonces:

$$SM = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} = 0.25 \quad [4.15]$$

$$\ln\left(e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}\right) = \ln(0.25)$$

$$-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \ln(0.25)$$

$$-\xi\pi = \ln(0.25) \cdot \sqrt{1-\xi^2}$$

$$\xi^2\pi^2 = [\ln(0.25)]^2 \cdot (1-\xi^2)$$

$$\xi^2\pi^2 = [\ln(0.25)]^2 - [\ln(0.25)]^2 \cdot \xi^2$$

$$\xi^2\pi^2 + [\ln(0.25)]^2 \cdot \xi^2 = [\ln(0.25)]^2$$

$$\xi^2 \cdot \{\pi^2 + [\ln(0.25)]^2\} = [\ln(0.25)]^2$$

$$\xi^2 = \frac{[\ln(0.25)]^2}{\pi^2 + [\ln(0.25)]^2}$$

$$\xi = \sqrt{\frac{[\ln(0.25)]^2}{\pi^2 + [\ln(0.25)]^2}}$$

$$\xi^2 = 0.1630$$

$$\xi = +0.4037 \quad [4.16]$$

El valor de la razón de amortiguamiento es: $0 < \xi = +0.4037 < 1$; razón por la cual, para las condiciones desarrolladas en el presente análisis, el sistema es de tipo: sub-amortiguado.

En éste procedimiento de cálculo inicial, el tiempo de salto t_r se considerará:

$$t_r = 2 \text{ [s]}$$

Debido a la gran presión de descarga que posee la bomba y el análisis de respuesta a entradas tipo escalón que es el que más interesa. Mediante la ecuación 4.15 se obtiene ω (frecuencia amortiguada del sistema) y ω_n (frecuencia natural del sistema).

$$t_r = \frac{\pi - \phi}{\omega} \quad [4.17]$$

$$\phi = \arccos(\xi) \quad [4.18]$$

$$\phi = \arccos(0.4037)$$

$$\phi = 1.1552$$

$$\omega = \frac{\pi - \phi}{t_r}$$

$$\omega = \frac{\pi - 1.1552}{2} = 0.9932 \quad [4.19]$$

$$\omega_n = \frac{\omega}{\sqrt{1 - \xi^2}}$$

$$\omega_n = \frac{0.9932}{\sqrt{1-0.1630}} = 1.0856 \quad [4.20]$$

El tiempo pico, t_p , se calcula de la siguiente forma:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega} \quad [4.21]$$

$$t_p = \frac{\pi}{0.9932} = 3.1631$$

Así también el tiempo de estabilización, t_s , es el siguiente:

$$3T \leq t_s \leq 4T \quad [4.22]$$

$$T = \frac{1}{\xi\omega_n} \quad [4.23]$$

$$T = \frac{1}{0.4037 \cdot 1.0856} = 2.2818$$

$$3 \times 2.2818 \leq t_s \leq 4 \times 2.2818$$

$$6.8454 \leq t_{s2} \leq 9.1272 \quad [4.24]$$

Como puede notarse en el desarrollo anterior, es posible obtener características adecuadas para el sistema controlado con el desarrollo de PID. Además, posteriormente se realizará el cálculo de las características del sistema elegido (con las constantes PID definidas).

4.1.3. SÍNTESIS – ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Para las condiciones del sistema del equipo de laboratorio se indican a continuación las posibles soluciones que se puede dar al problema, dentro de los parámetros de fuerza/potencia provista, viabilidad del espacio físico como de costos.

A. Control Hidráulico.- El movimiento del inyector puede ser dado por un flujo de fluido hidráulico provocado por una bomba hidráulica y controlado por electroválvulas.

Éste fluido controlado por electroválvulas puede mover a un pistón de doble efecto y este a su vez provocar el movimiento del inyector.

Las señales que controlaran la electroválvula provendrían de un computador.

B. Control Neumático.- El flujo de aire puede mover a un actuador o pistón el cual mueva con eficacia nuestro inyector.

El flujo de aire para poder controlar el movimiento y posición del pistón puede ser controlado nuevamente por electroválvulas, controladas a su vez por señales provenientes del computador.

C. Control Eléctrico.- Se puede desarrollar un sistema de control eléctrico el cual controle un motor y que éste a su vez controle el inyector.

El movimiento del motor será controlado por una señal del computador.

Para todas las propuestas de control se necesitara el sensor de velocidad, este debe de ser electrónico para que el mismo de una señal de velocidad que puede ingresar al computador, previamente aquella señal será un tren de pulsos.

4.1.4. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Se describe a continuación las ventajas y desventajas que se aprecian de acuerdo con los parámetros de diseño.

4.1.4.1. Control hidráulico (A)

Ventajas:

- Es un sistema que pudiera mover el inyector sometido a grandes fuerzas generadas por la alta presión en el inyector.
- Reutilización de los componentes ya instalados en el equipo.
- Buen tiempo de respuesta.

Desventajas:

- Es un sistema robusto que ocupa mucho espacio físico.
- La inversión en las electroválvulas hidráulicas tiene un costo medio.
- El estudio del sistema hidráulico de control abarca muchas variables en el sistema.
- El mantenimiento del sistema debe ser exhaustivo, ya que al existir alguna contaminación en el flujo hidráulico puede trabar las válvulas o cilindro, des calibrando así el sistema.
- Las fugas en algún acople o manguera podrían afectar el sistema.

4.1.4.2. Control neumático (B)

Ventajas:

- La fuerza de los actuadores neumáticos es razonable para nuestro diseño.
- Se requieren el mismo número de implementos, que al comparar con el sistema hidráulico son más económicos.
- El espacio físico es reducido con éste sistema.
- El mantenimiento es menor que el del sistema hidráulico, pero de igual manera al existir contaminantes pueden des calibrar el sistema.

Desventajas:

- Si bien es mucho más económico que el sistema hidráulico, los costos de inversión son elevados porque debe ser adquiridos en su totalidad.
- El control del mismo es mucho más complejo ya que los actuadores solo trabajan en sus posiciones extremas, y si se desea controlar en posiciones medias deben de adecuarse nuevos dispositivos de mando intermedio.
- Manejo de muchas variables en el sistema.
- Las fugas en algún acople o manguera podrían afectar el sistema.

4.1.4.3. Control eléctrico (C)

Ventajas:

- Ya que se tienen muchos tipos de motores se puede dimensionar de acuerdo a la fuerza requerida.
- El espacio es mucho más reducido en comparación con los otros sistemas mencionados.
- El control del motor puede venir directamente del computador sin tener intermediarios como son las electroválvulas, excepto por la conversión de señales de circuito de control al circuito de potencia.
- Precisión en la posición del inyector.
- La inversión económica es menor que en los otros sistemas.
- Menor manejo de variables.
- El mantenimiento se reduce a lubricación de partes móviles.

Desventajas:

- El conocimiento del control de motores eléctricos es limitado en nuestra carrera.
- El cambio total de sistema hace que la reutilización de los implementos sea nulo.
- La calibración debe ser exacta, ya que el sistema no sería robusto.

A continuación se desarrollara de evaluación del peso específico de cada criterio de selección:

Complejidad>Precisión>Costo>Espacio=Mantenimiento>Fuerza=Conocimiento

Tabla 4.3. Tabla de Criterio

CRITERIO	Costo	Mantenimiento	Espacio	Complejidad	Fuerza	Precisión	Conocimiento	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo		1	1	0	1	0	1	5,0	0,185
Mantenimiento	0		0,5	0		0	1	2,5	0,093
Espacio	0	0,5		0	1	0	1	3,5	0,130
Complejidad	1	1	1		1	1	1	7,0	0,259
Fuerza	0	0	0	0		0	0,5	1,5	0,056
Precisión	1	1	1	0	1		1	6,0	0,222
Conocimiento	0	0	0	0	0,5	0		1,5	0,056
Suma								27,0	1,000

4.1.4.4. Evaluación de Alternativas

Tabla 4.4. Tabla de Costo

COSTO	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0	0	1	0,166
Solución B	1		0	2	0,333
Solución C	1	1		3	0,500
Suma				6	1,000

Tabla 4.5. Tabla de Mantenimiento

MANTENIMIENTO	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,500

Solución B	0		1	2	0,333
Solución C	0	0		1	0,166
Suma			6		1,000

Tabla 4.6. Tabla de Espacio

ESPACIO	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,500
Solución B	0		1	2	0,333
Solución C	0	0		1	0,166
Suma				6	1,000

Tabla 4.7. Tabla de Complejidad

COMPLEJIDAD	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		0	0,5	1,5	0,25
Solución B	1		0,5	2,5	0,416666667
Solución C	0,5	0,5		2	0,333333333
Suma				6	1

Tabla 4.8. Tabla de Fuerza

FUERZA	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,500
Solución B	0		0,5	1,5	0,250
Solución C	0	0,5		1,5	0,250
Suma				6	1,000

Tabla 4.9. Tabla de Precisión

PRECISIÓN	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		1	0	2	0,333
Solución B	0		0	1	0,166
Solución C	1	1		3	0,500
Suma				6	1,000

Tabla 4.10. Tabla de Conocimiento

CONOCIMIENTO	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A		1	0,5	2,5	0,416
Solución B	0		0	1	0,166
Solución C	0,5	1		2,5	0,416
			Suma	6	1,000

Tabla 4.11. Tabla de Conclusiones

CONCLUSIÓN	Costo	Mante.	Espacio	Complejidad	Fuerza	Precisión	Conocimiento	Σ	PRIORIDAD
Solución A	Costo A * Criterio Costo	Mante. A * Criterio Mante.	Espacio A * Criterio Espacio	Comple. A * Criterio Comple.	Fuerza A * Criterio Fuerza	Preci. A * Criterio Preci.	Conoci. A * Criterio Conoci.	Σ Sol. A	Posición
Solución B	Costo B * Criterio Costo	Mante. B * Criterio Mante.	Espacio B * Criterio Espacio	Comple. B * Criterio Comple.	Fuerza B * Criterio Fuerza	Preci. B * Criterio Preci.	Conoci. B * Criterio Conoci.	Σ Sol. B	Posición
Solución C	Costo C * Criterio Costo	Mante. C * Criterio Mante.	Espacio C * Criterio Espacio	Comple. C * Criterio Comple.	Fuerza C * Criterio Fuerza	Preci. C * Criterio Preci.	Conoci. C * Criterio Conoci.	Σ Sol. C	Posición

La posición es determinada ordenando los valores obtenidos en la sumatoria de forma descendente, quedando la tabla de la siguiente forma:

Tabla 4.12. Tabla de Conclusiones y Decisión

CONCLUSIÓN	COSTO	MANTENIMIENTO	ESPACIO	COMPLEJIDAD	FUERZA	PRECISIÓN	CONOCIMIENTO	Σ	PRIORIDAD
Solución A	0,031	0,046	0,065	0,065	0,028	0,074	0,023	0,332	2
Solución B	0,062	0,031	0,043	0,108	0,014	0,037	0,009	0,304	3
Solución C	0,093	0,015	0,022	0,086	0,014	0,111	0,023	0,364	1

Por lo tanto, al observar la tabla se nota que el diseño más conveniente es el dispositivo de control eléctrico, seguido del hidráulico y finalizando con el neumático.

4.1.5. DECISIÓN – SELECCIÓN DE ALTERNATIVA DE DISEÑO

Con los resultados del paso anterior, se decide diseñar un sistema de control constituido físicamente por los siguientes elementos:

SISTEMA CONTROLADO: Turbina Pelton de Laboratorio

GOBERNADOR: Computador

SENSOR: Tacómetro digital (Electrónico)

ACTUADOR: Lineal de doble efecto, electromecánico con circuito electrónico de control de potencia de motores y comunicación con PC.

4.1.6. SELECCIÓN DE ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

Debido a los resultados obtenidos mediante las diferentes etapas del diseño desarrolladas, se decide utilizar los siguientes elementos constitutivos:

Tabla 4.13. Detalles de elementos constitutivos del sistema.

ELEMENTO	SUBELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Actuador	Estructura	Perfil L (ángulo de 90 grados)

	Guías de Soporte y vástago	Eje
	Elementos Motrices	Motor de Paso
	Placa	Platina
	Interfaz de Control Computarizado - Potencia Eléctrica para actuación	Circuito Electrónico de Control - Potencia (Actuación)
	Sujetadores	Pernos, tuercas, arandelas, arandelas de presión.
	Protección al Medio Ambiente	Planchas acrílicas transparentes, pintura de diferentes colores
Sensor de Velocidad	Sensor de pulsos	Opto acoplador
	Contabilizador y acondicionador de datos (señales), Interfaz de Control Computarizado - Potencia Eléctrica para censado.	Circuito Electrónico de Control - Potencia (censado)
	Enfriamiento de circuitos	Ventilador
Computador	Visualización y accesorios.	Monitor, teclado, ratón, cables y demás accesorios
	CPU	PENTIUMIII, 128Mb RAM, o superior

Adicionalmente, para acondicionar el equipo son requeridos los siguientes elementos:

Tabla 4.14. Elementos adicionales necesitados por el sistema.

ELEMENTOS ADICIONALES
Cable de Interfaz USB-Serial (ver siguiente sección)
Mesa de Actuador
Mesa de Computador
Contactador de alimentación de bomba
Cables eléctricos de alimentación de energía
Tubería Eléctrica
Protección de válvulas de desagüe, entre otros

4.2. DISEÑO ELECTROMECAÁNICO

4.2.1. ACTUADOR

En lo referente al actuador del sistema de control, se considerará los siguientes factores de diseño:

Movimiento: Lineal de doble efecto (avance y retorno)

Carrera máxima: 30 [mm]

Longitud total: 487 [mm]

Ancho: 225,4 [mm]

Altura: 120,0 [mm]

Longitud extendida: 517 [mm] – aproximadamente.

Elementos motrices: 2 motores de paso unipolares de seis hilos.

Rotor roscado, eje con configuración de tornillo de potencia.

$N_f = 4$ [fases] (número de fases)

$P_p = 1,8$ [grados/paso] (precisión por paso)

$P_{pr} = 200$ [pasos/rev] (pasos por revolución)

$p = 1,5$ [mm] (paso de la rosca del tornillo de potencia)

$d = 6,35$ [mm] (diámetro del tornillo de potencia)

$I = 0,32$ [A] por fase

$V = 24$ [V]

Carga: 245,0 [N] - (25 [kgf]), tracción.

Velocidad: 18 [mm/min] máx. (teórica por diseño de circuito de potencia)
10 [mm/min] recomendada (por demoras en transmisión de comandos desde la interfaz gráfica de MATLAB)

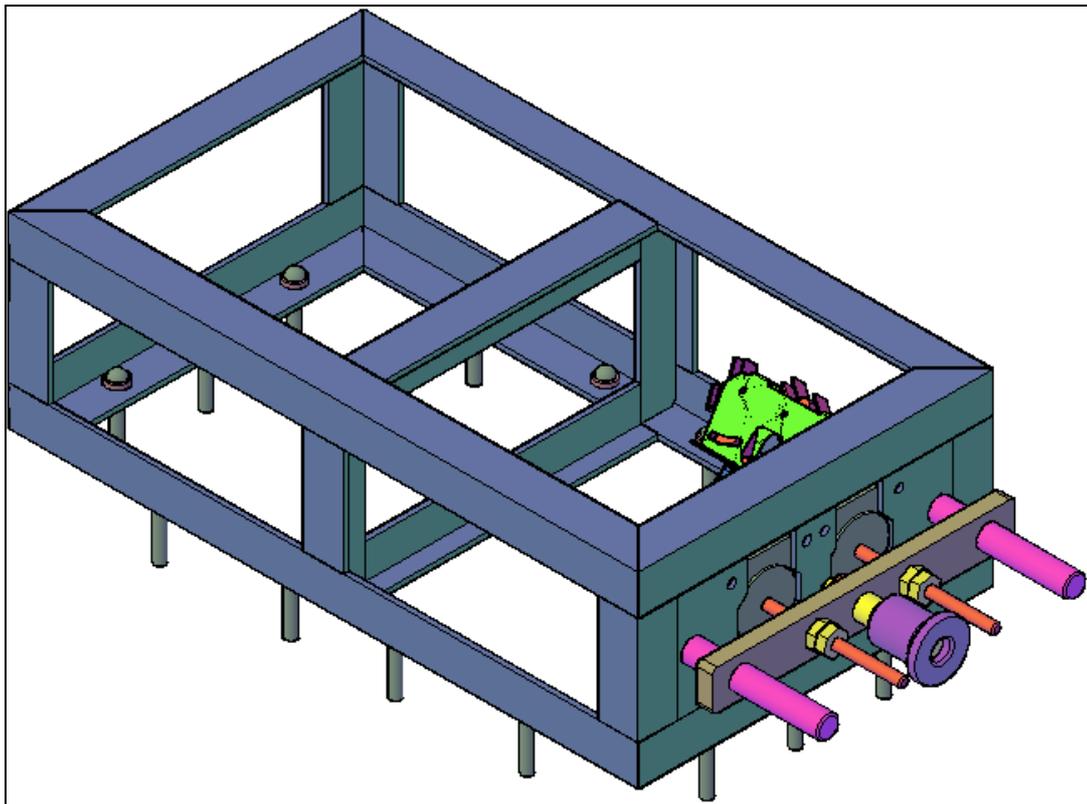


Figura 4.12. Esquema 3D de actuador (no se incluye las tapas acrílicas de las caras ni la disposición de los circuitos dentro del mismo).

En el apéndice correspondiente puede obtenerse los detalles del actuador y los planos respectivos.

INTERFAZ DE CONTROL - POTENCIA ELÉCTRICA PARA ACTUACIÓN

En lo referente al circuito de interfaz de control computarizado - potencia eléctrica para actuación (Figura 4.13), se ha adquirido uno que cumple las características requeridas por los elementos motrices del actuador (motores de paso), el tipo de comunicación que se debe usar, alimentación eléctrica disponible y demás, a continuación se indica las características del sistema:

Tabla 4.15. Características – circuito de potencia de actuador.

CARACTERÍSTICA	DETALLE
Capacidad	2 motores de pasos, de 0,32 [A] por fase y 4 fases, 24 [V] de alimentación
Alimentación	110 [VAC]
Comunicación	Envío y recepción de datos mediante comunicación serial, Protocolo RS-232, puerto serial de computador DB9 – puerto serial de 3 pines en circuito
Tiempo mínimo teórico de actuación por paso	0,020 [s] (por paso conjunto de motores)
Funciones de actuación	Movimientos de avance y retroceso para cada motor y para movimiento conjunto (6 funciones de movimiento)
Dimensiones (LxAxH)	100x200x120 [mm]
Extra	Circuito de medición de velocidad auxiliar (tacómetro) integrado (1 función)

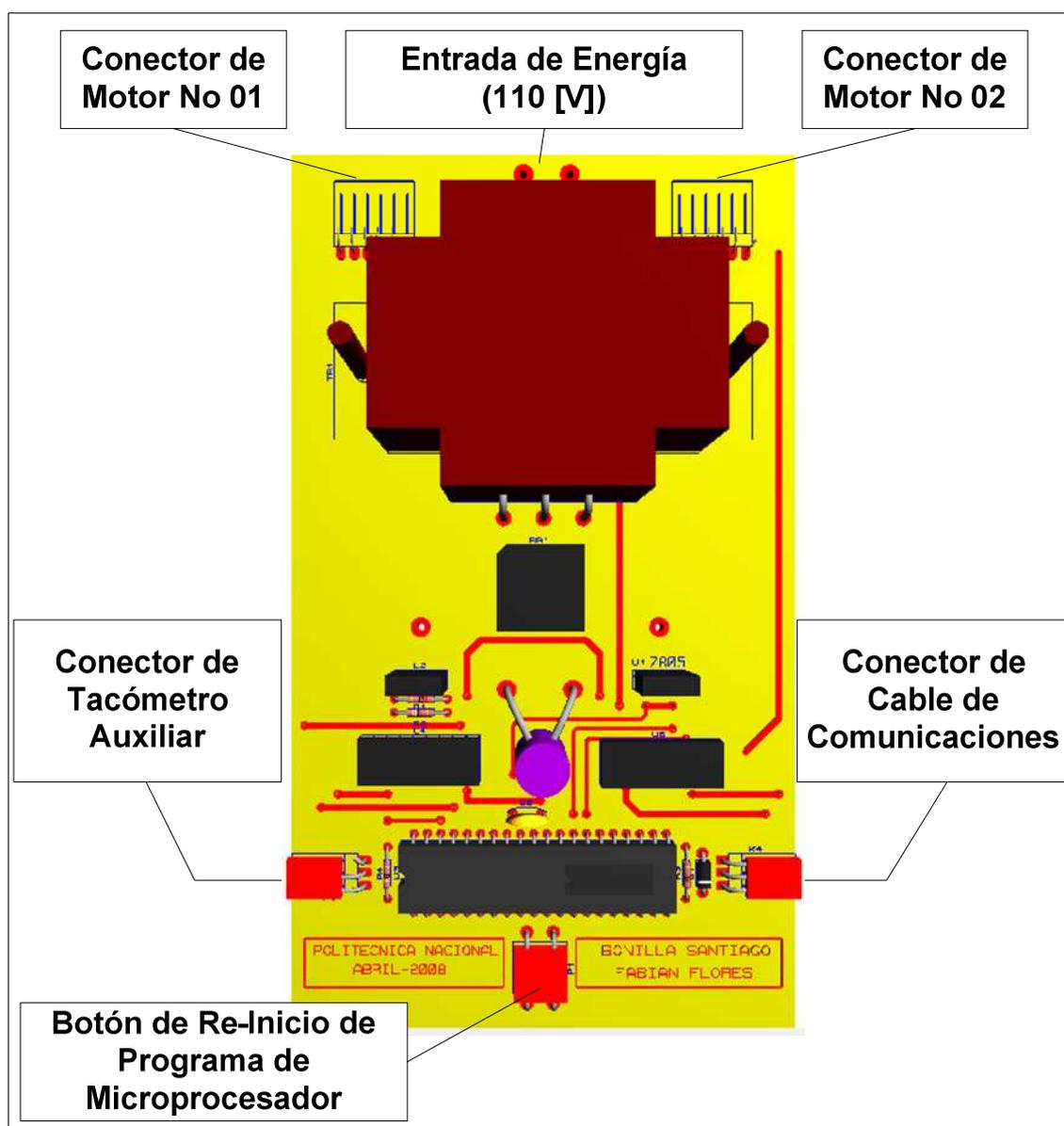


Figura 4.13. Esquema de circuito de potencia de actuador.

Tabla 4.16. Parámetros de comunicación entre PC - C. Potencia de Actuador (Datos escritos)

FUNCIÓN #	CARÁCTER ESCRITO	ACCIÓN	DIRECCIÓN EN MOVIMIENTO LINEAL DE ACTUADOR
1	1	Motor 1 - Giro horario - 1 pulso	Adelante*
2	2	Motor 1 - Giro anti horario - 1 pulso	Atrás*
3	3	Motor 2 - Giro horario - 1 pulso	Adelante*
4	4	Motor 2 - Giro anti horario - 1 pulso	Atrás*
5	5	Motores 1 y 2 - Giro horario - 1 pulso	Adelante*
6	6	Motores 1 y 2 - Giro horario - 1 pulso	Atrás*
7	7	Tacómetro auxiliar - requisición de velocidad [rpm]	Ninguna – Luego de escribir este dato sobre el circuito se debe leer la velocidad censada por el tacómetro.
* Cada paso simple o conjunto significa un movimiento lineal de tornillo de potencia de 0,0075 [mm]			

4.2.2. SENSOR DE VELOCIDAD

En el caso de este elemento electrónico se ha tomado en cuenta el tiempo de muestreo, el costo y las demás características requeridas. A continuación se listan los detalles del elemento adquirido y del circuito del tacómetro, Figura 4.14, el cual es el encargado de realizar la interfaz entre el codificador rotativo y el computador.

Tabla 4.17. Contabilizador y Acondicionador de Datos, Interfaz de Control Computarizado - Potencia Eléctrica para Censado.

CARACTERÍSTICA	DETALLE
Tiempo mínimo teórico de muestreo	0,250 [s]*
Alimentación	110 [VAC]
Comunicación	Envío y recepción de datos mediante comunicación serial, Protocolo RS-232, puerto serial de computador DB9 – puerto serial de 3 pines en circuito.
Fuente Auxiliar	15 [V]; para ventilador y circuito de seguridad
Funciones de censado	Censado de datos en 1 sola función, escritura binaria del número 0 y recepción de dato de velocidad V [rpm] en formato binario
Dimensiones (LxAxH)	140x90x60 [mm]
* El tiempo de muestreo que se logre durante la utilización del sistema de control puede variar dependiendo directamente de la capacidad del computador al manejar la adquisición de datos y las demás tareas que deba ejecutar a cada instante.	

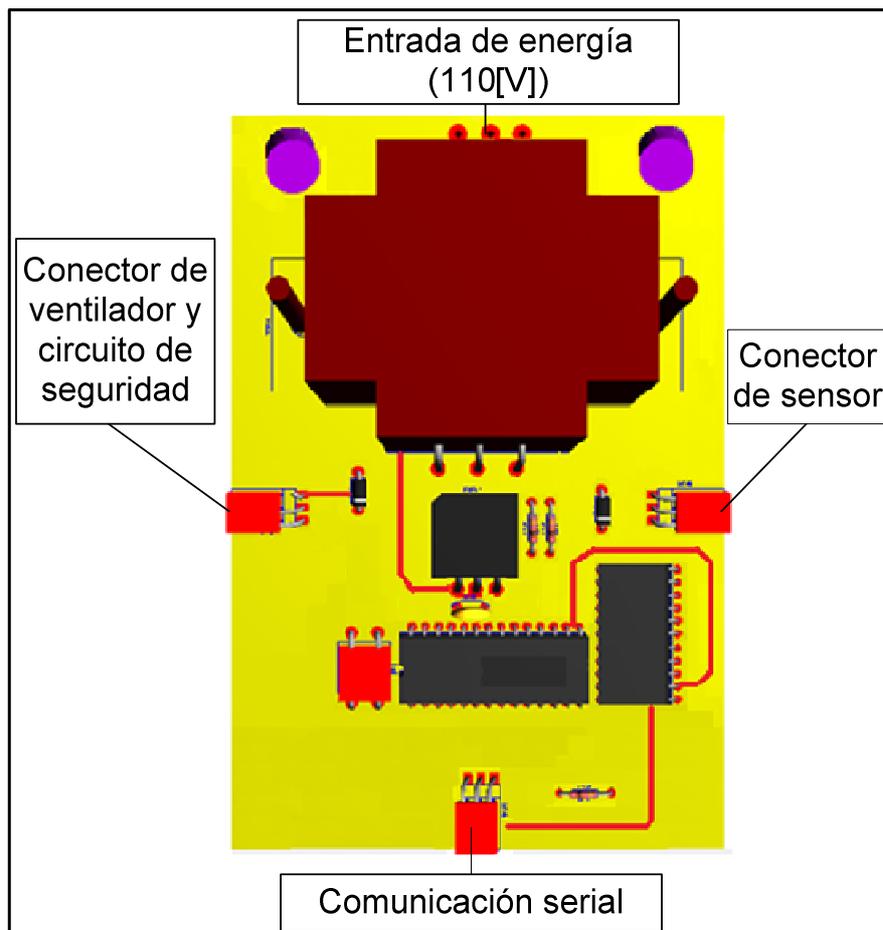


Figura 4.14. Esquema de circuito del tacómetro.

4.2.3. COMPUTADOR

El sistema de control ha de desarrollarse en MATLAB 6.5, de tal manera que se requiere un ordenador lo suficientemente potente para manejar la carga, procesamiento y envío de datos eficientemente.

En los requerimientos del paquete computacional se ha encontrado lo siguiente:

Tabla 4.18. Requerimientos mínimos (Ver tabla 4.2)

SISTEMA OPERATIVO	PROCESADORES	ESPACIO LIBRE EN DISCO	MEMORIA RAM
Windows XP	Pentium III, IV, Xeon, Pentium M, AMD Athlon, Athlon XP, Athlon MP	20 Gb	512 Mb

Pero al realizar pruebas con interfaces gráficas y manejo de datos se ha encontrado estas características insuficientes para lograr un rendimiento óptimo de los componentes de control del sistema (actuador y sensor). Por la razón anterior se requieren las siguientes características en el computador que controlará el proceso.

Tabla 4.19. Requerimientos de la PC de control para optimizar el desempeño del sistema.

SISTEMA OPERATIVO	PROCESADOR	ESPACIO LIBRE EN DISCO	MEMORIA RAM
Windows Xp	Pentium IV, equivalente o superior	30 Gb	512 Mb

Manejo de datos mediante el puerto serial

Para el manejo de datos por el puerto serial se requiere contar con 2 puertos seriales DB9-macho en el computador. Comúnmente se encuentra 1 solo puerto serial en los computadores de escritorio, pero es posible adquirir cables de interfaz USB-Serial de costo mínimo.

Así, se ha seleccionado el cable de interfaz y su controlador respectivo:

PL-2303HX-Edition (Rev D), USB to Serial Bridge and Controller (en la sección de anexos puede encontrar la hoja de datos del producto)

4.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL EN MATLAB Y SIMULINK

4.3.1. DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES DE CONTROL PID

Luego de haber seleccionado los componentes del sistema con sus respectivas características, se procederá a realizar el análisis de las constantes del sistema de control, de modo que se utilicen de la mejor manera las características de los elementos constitutivos del sistema de control y se adapten a las restricciones presentes en el sistema hidráulico.

Para determinar k_p , k_i y k_d , las constantes del sistema de control, se procede a evaluar la ecuación de la función de transferencia (Ec. 4.8.)

La ecuación mencionada tiene como parámetros a C_6 y τ_t , estas constantes tomarán los valores (ver ecuaciones [4.4] - [4.5] - [4.11]):

$$C_6 = \frac{a_{23}}{a_{22}} = \frac{2.5}{-1.06} = -2.3585$$

$$\tau_t = \frac{T_m}{a_{22}} = \frac{8.018}{-1.06} = -7.5642$$

$$H_{\text{transf}}(s) = \frac{N_1}{Z_1} = \frac{23585 (s^2 k_d + s k_p + k_i)}{s^2 (75642 + 23585 k_d) + s (10000 + 23585 k_p) + 23585 k_i} \quad [4.25]$$

Con el objetivo de desarrollar este procedimiento se desarrolló dos interfaces gráfica de análisis, una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) en MATLAB-GUIDE y otra en MATLAB - SIMULINK.

Estas interfaces permiten observar simultáneamente los resultados que se pudieran obtener aplicando distintos valores a las constantes que se va a seleccionar en la respuesta. Las constantes definidas en las interfaces se detallan a continuación:

Parámetros de interfaz para el sistema de lazo cerrado con control PID:

$$C_6 = -2,3585 \text{ (Valor por defecto)}$$

$$r_t = -7,5642 \text{ (Valor por defecto)}$$

$$k_p = \text{variable}$$

$$k_i = \text{variable}$$

$$k_d = \text{variable}$$

$$k_r = 1$$

$$T_{\text{simulación}} = 50 \text{ [s] (Valor por defecto)}$$

Donde:

K_p = constante proporcional del sistema en lazo cerrado.

K_i = constante integral del sistema de lazo cerrado.

K_d = constante derivativa del sistema de lazo cerrado.

K_r = constante de retroalimentación del sistema de lazo cerrado.

$T_{\text{simulación}}$ = tiempo de análisis y representación gráfica de la respuesta del sistema.

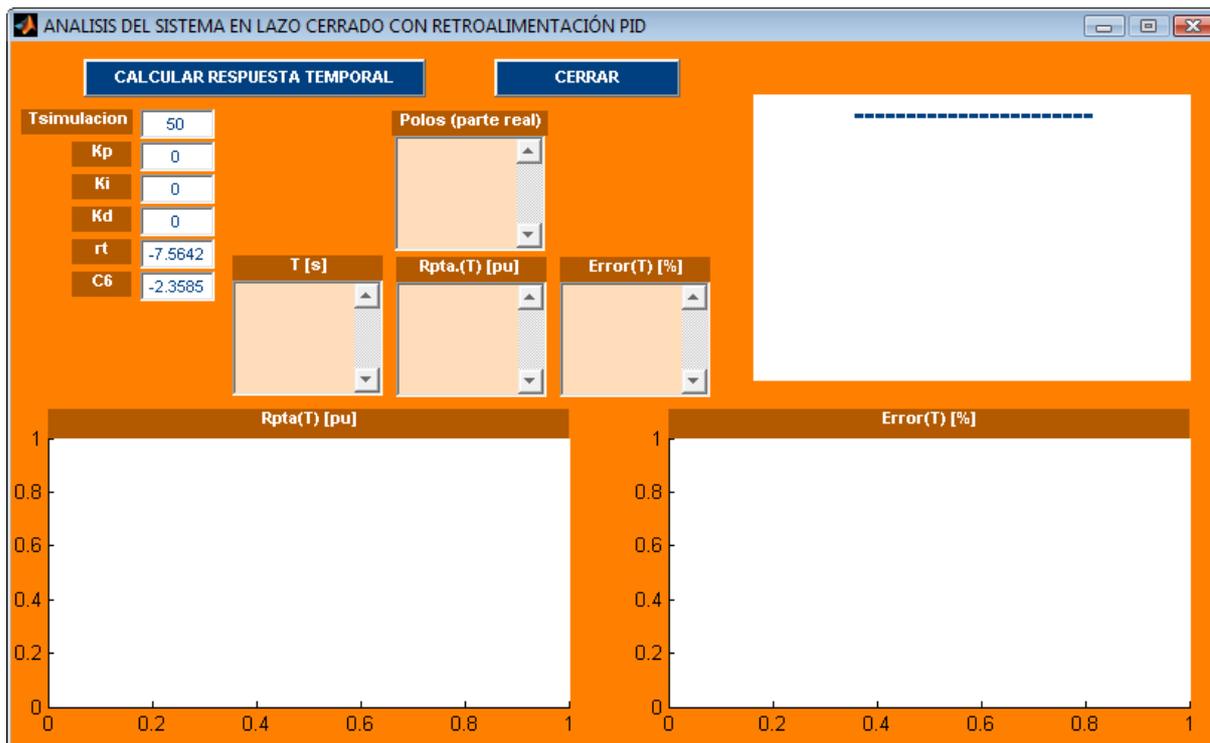


Figura 4.15. Interfaz de análisis del sistema – lazo cerrado (GUIDE).

En el análisis mediante la interfaz gráfica solamente se tomará en cuenta la variación de K_p , debido a su importancia para el controlador.

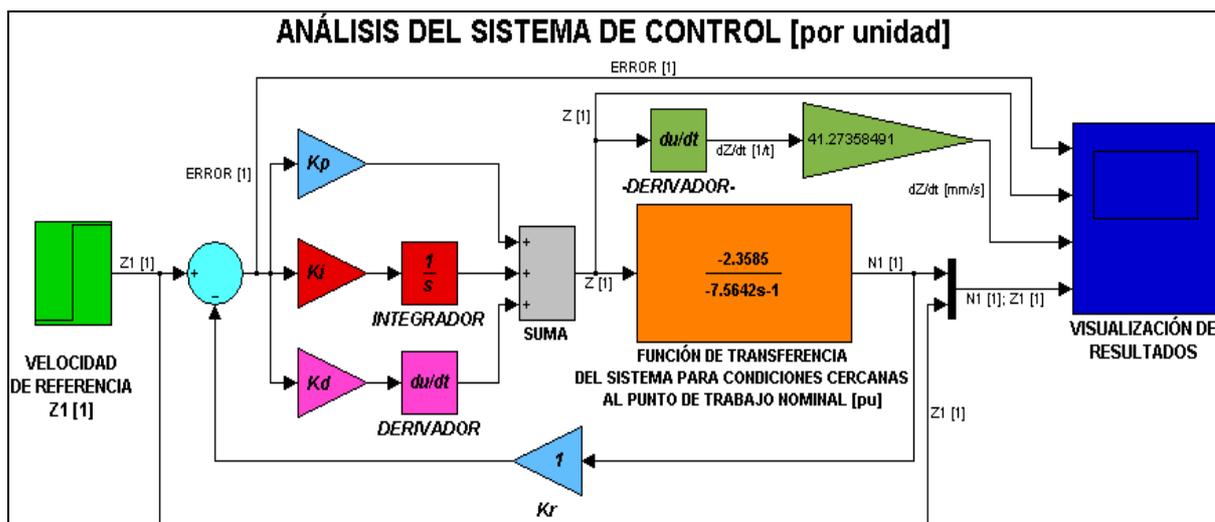


Figura 4.16. Interfaz de análisis del sistema – lazo cerrado (SIMULINK).

4.3.2. VARIACIÓN DE LA GANANCIA k_p

Al evaluar la ecuación [4.25] en la siguiente figura, se puede observar la variación de la respuesta del sistema (en por unidad [pu] – [1]), cuando se eligen distintos valores para la ganancia k_p (1, 2, 3, 4, 5), manteniendo k_i y k_d en cero, con una entrada tipo escalón. Este análisis se ha realizado con el propósito de mostrar como se comportaría el sistema en el caso de que únicamente se utilizara control en lazo cerrado de tipo proporcional.

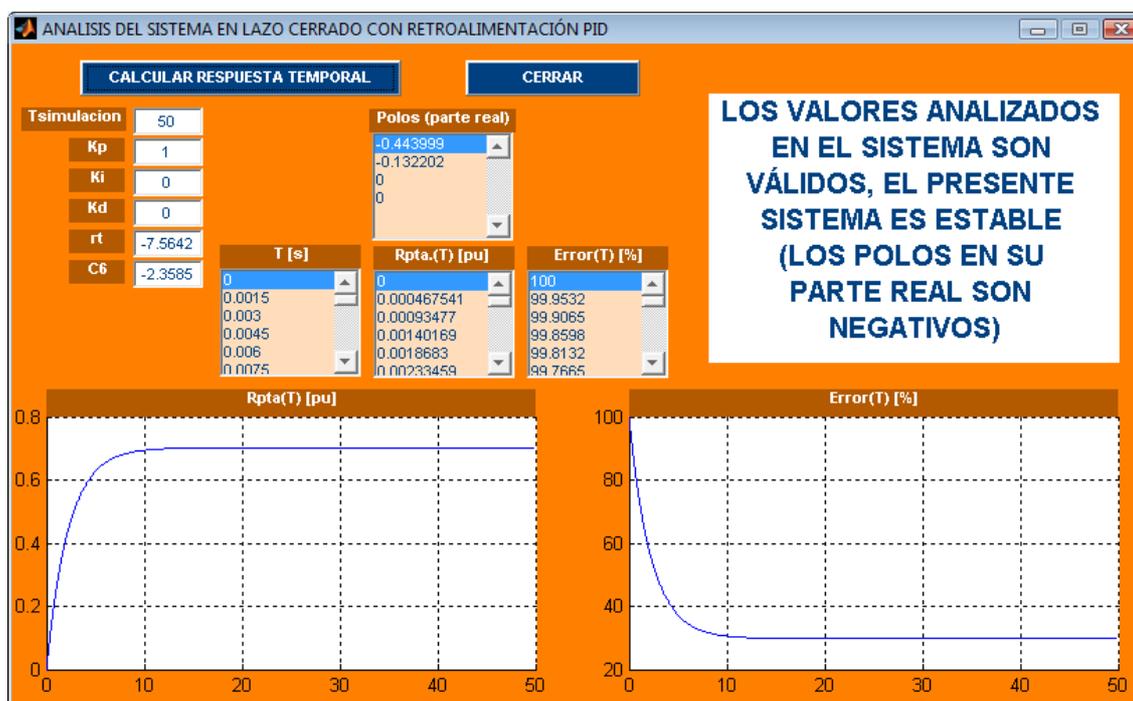


Figura 4.17. Respuesta,

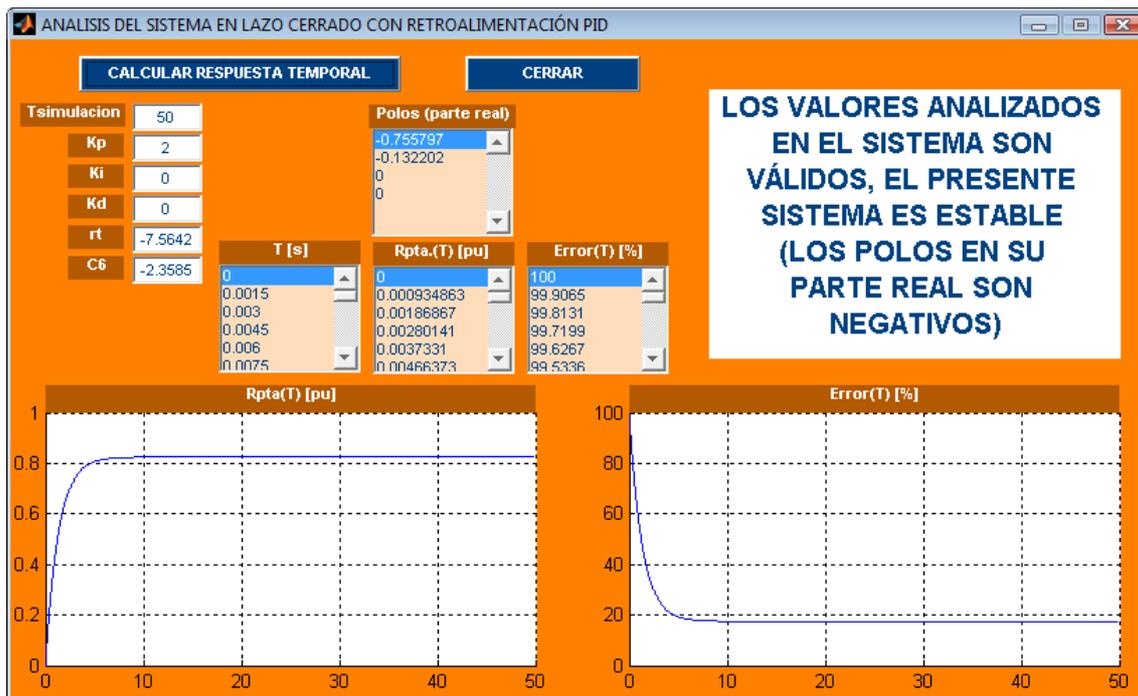


Figura 4.18. Respuesta,

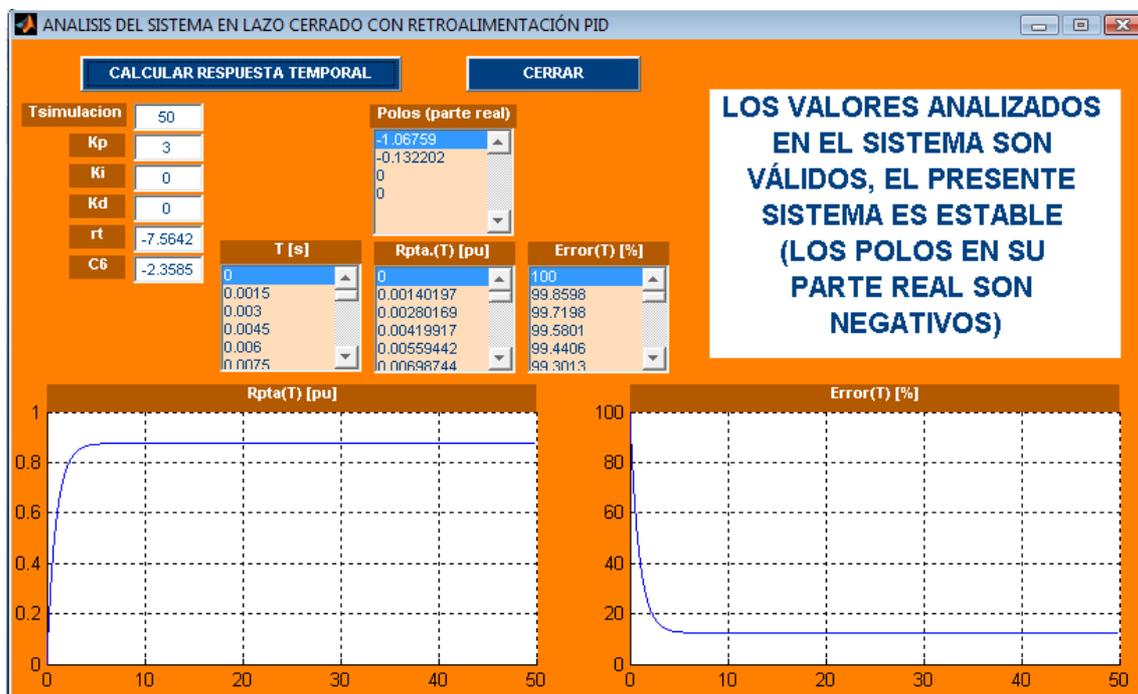


Figura 4.19. Respuesta,

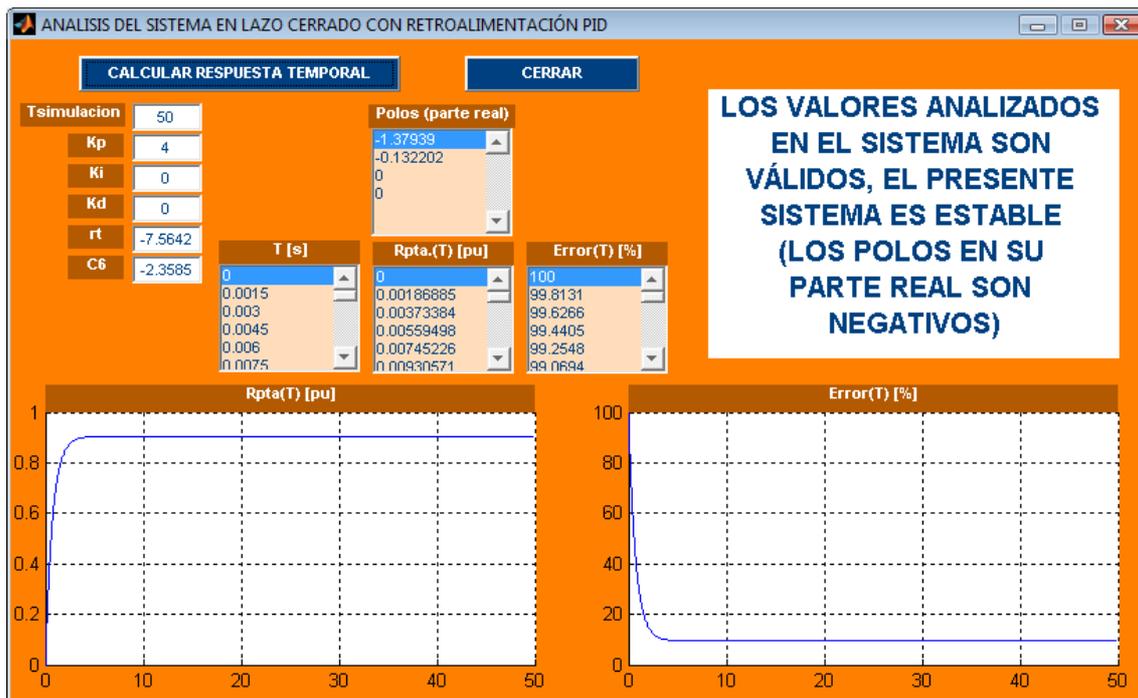


Figura 4.20. Respuesta,

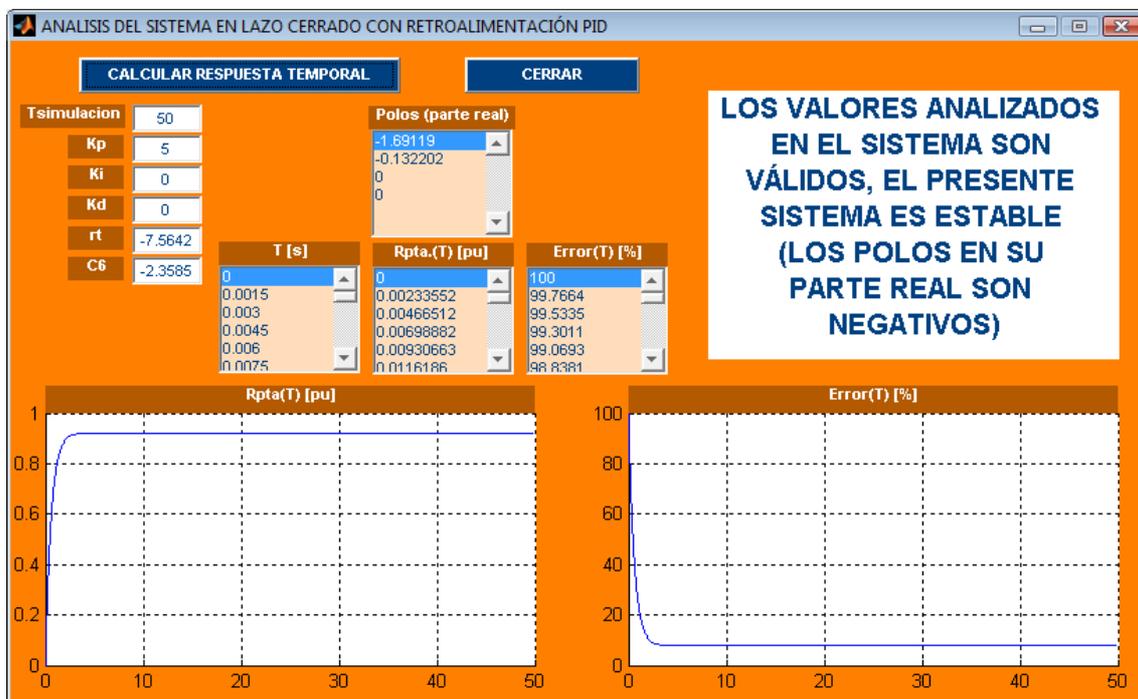


Figura 4.21. Respuesta,

Al comparar todas las figuras anteriores (Figuras 4.17 – 4.21), se nota que la variación de k_p hace que el sistema tenga una respuesta más rápida disminuyendo el error en estado estable, además que si k_p tiende a infinito la respuesta tenderá a la unidad.

4.3.3. SIMULACIÓN DE RESPUESTA ESCALÓN DEL SISTEMA EN GUI-SIMULINK Y DETERMINACIÓN DE GANANCIAS FINALES

Al combinar diferentes valores de ganancias k_i , k_p y k_d , se obtiene las siguientes gráficas:

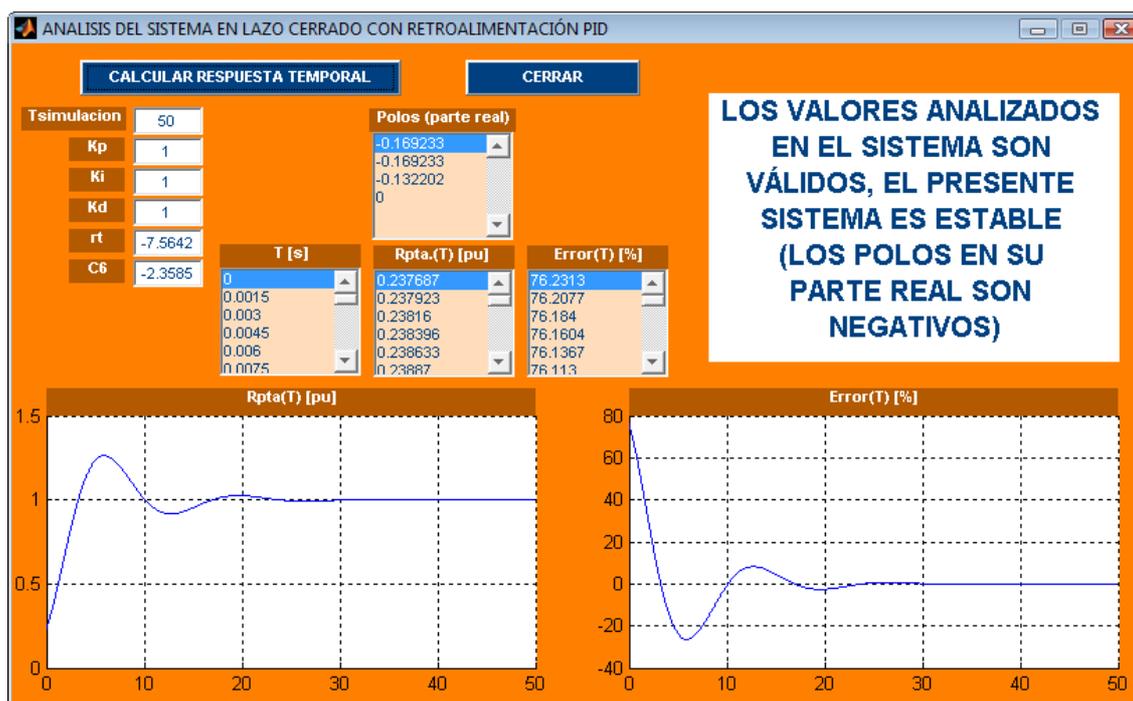


Figura 4.22. $k_p=1$; $k_i=1$; $k_d=1$.

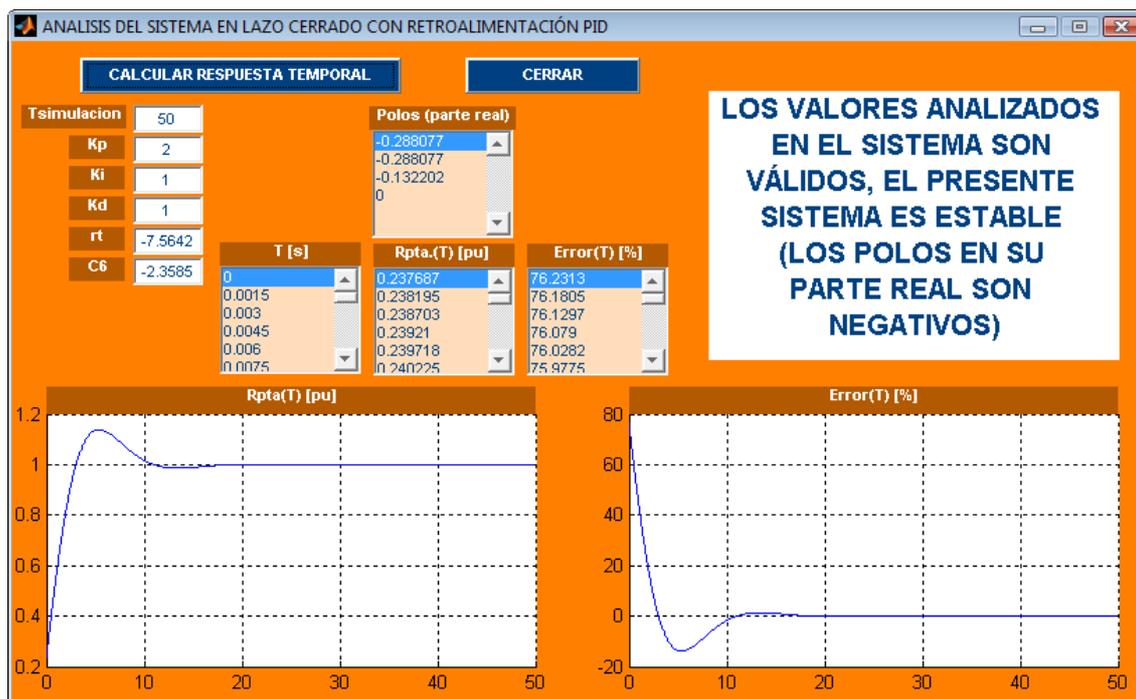
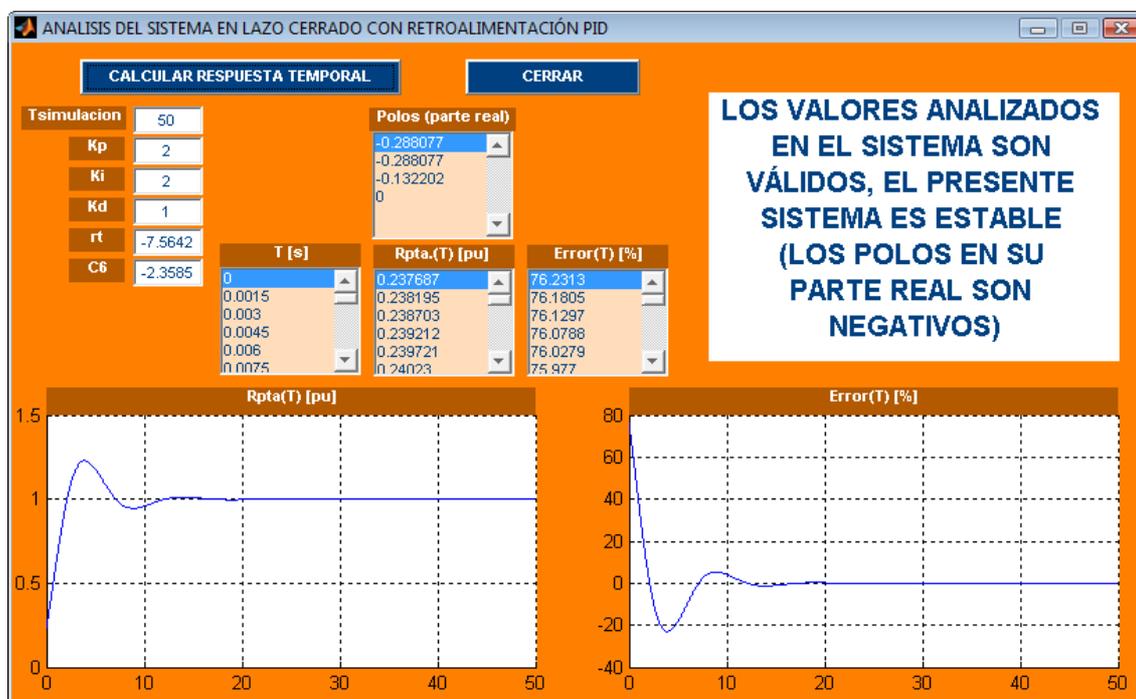
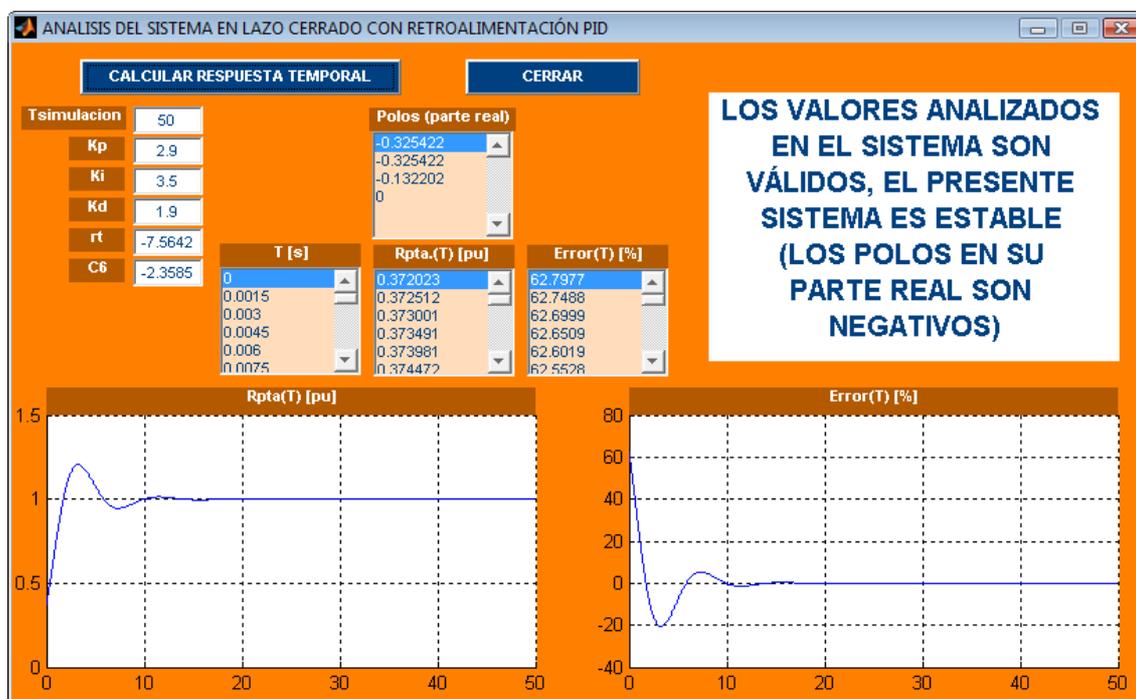
Figura 4.23. $K_p=2$; $K_i=1$; $k_d=1$.Figura 4.24. $K_p=2$; $K_i=2$; $k_d=1$.

Figura 4.25. $K_p=2$; $K_i=3$; $k_d=1$.Figura 4.26. $K_p=2.9$; $K_i=3.5$; $k_d=1.9$.

A continuación se muestra la selección de las constantes del sistema de manera más fina, utilizando para ello el modelo matemático del sistema de control PID en simulink; se incluye en los datos obtenidos de simulink la función de variación del error, la posición del inyector, la velocidad del inyector y la respuesta del sistema en [1]:

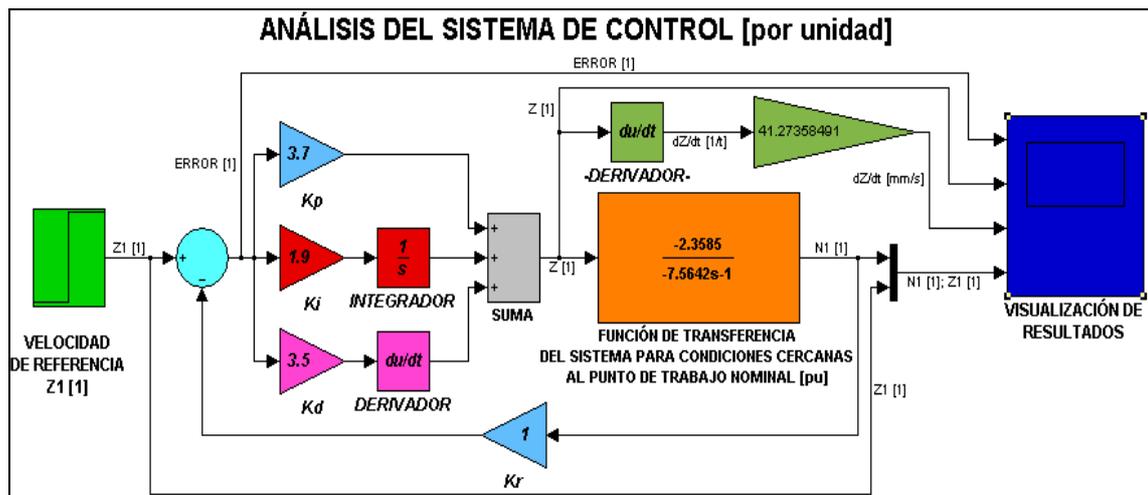


Figura 4.27. $K_p=3.7$; $K_i=1.9$; $k_d=3.5$.

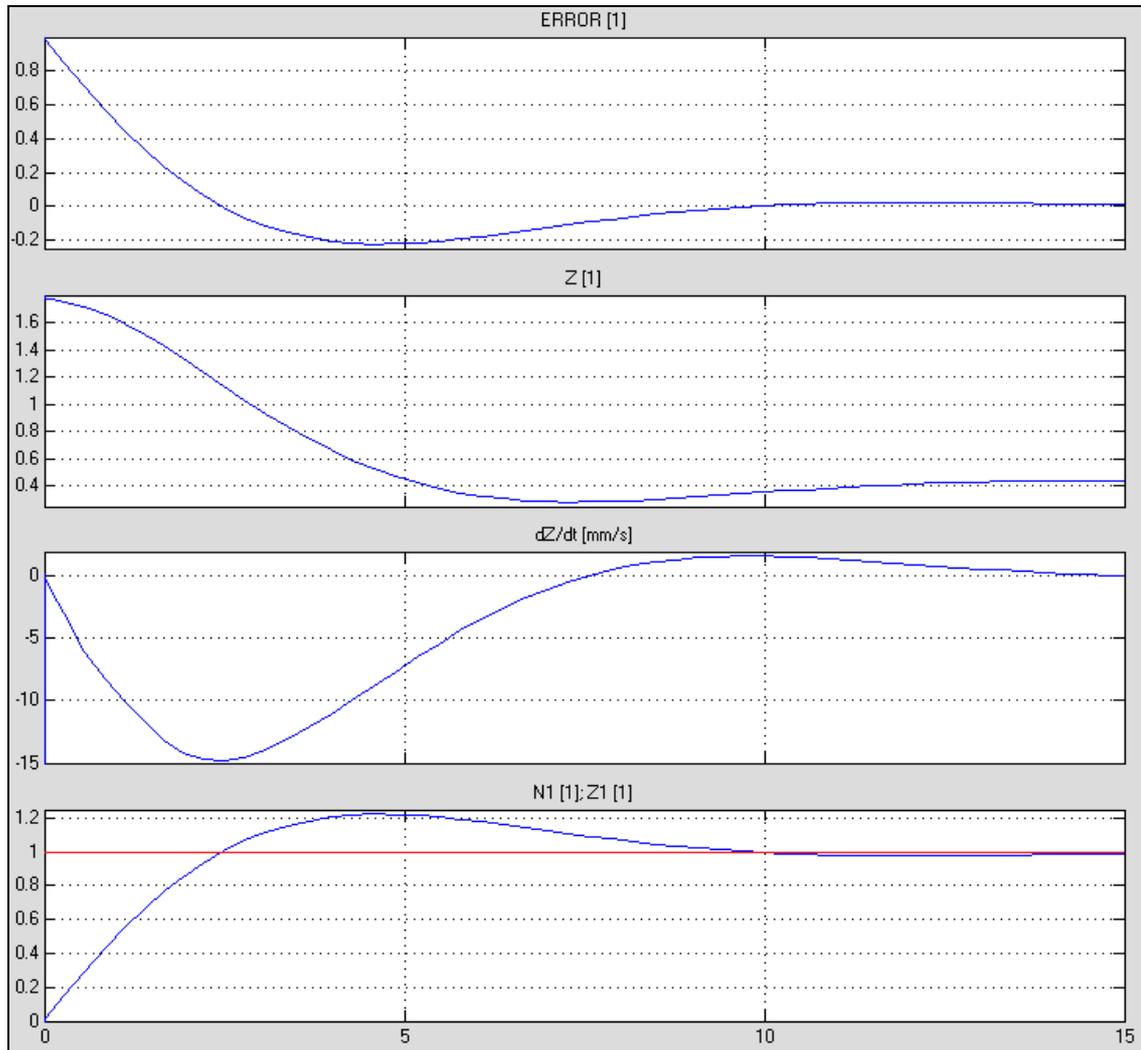


Figura 4.28. $K_p=3.7$; $K_i=1.9$; $k_d=3.5$. (Esquema anterior)

Como se puede ver en la gráfica anterior, el valor del sobrepaso máximo ante una entrada tipo escalón no sobrepasa el 25% (no llega a 1,25 [1]). Además. El sistema se estabiliza aproximadamente a los 15 segundos luego de ser encendido.

Las constantes determinadas son las siguientes:

$$k_p=3.7$$

[4.26]

$$k_i=1.9 \quad [4.27]$$

$$k_d=3.5 \quad [4.28]$$

La función de transferencia final será (desarrollo en MATLAB):

```
>> syms num den kp ki kd
```

```
>> num=23585*[kd kp ki]
```

```
num =
```

```
[ 23585*kd, 23585*kp, 23585*ki]
```

```
>> den=[(75642+23585*kd) (10000+23585*kp) 23585*ki]
```

```
den =
```

```
[ 75642+23585*kd, 10000+23585*kp, 23585*ki]
```

```
>> kp=3.7
```

```
kp =
```

```
3.7000000000000000
```

```
>> ki=1.9
```

```
ki =
```

```
1.9000000000000000
```

```
>> kd=3.5
```

```
kd =
```

```
3.5000000000000000
```

```
>> nume=subs(num)
```

```
nume =
```

```

1.0e+004 *
      8.254750000000000  8.726450000000000  4.481150000000000
>> dene=subs(den)
dene =
      1.0e+005 *
      1.581895000000000  0.972645000000000  0.448115000000000
>> tfsys=tf(num,dene)
Transfer function:
      8.255e004 s^2 + 8.726e004 s + 4.481e004
-----
      1.582e005 s^2 + 9.726e004 s + 4.481e004
>> pole(tfsys)
ans =
-0.307430328814492 + 0.434469708978598i
-0.307430328814492 - 0.434469708978598i
>> residue(num,dene)
ans =
      0.115397323666778 - 0.074231173093906i
      0.115397323666778 + 0.074231173093906i

```

Así pues, se observa que los polos en su parte real son negativos, cumpliendo con los requerimientos de estabilidad necesarios.

Para obtener la función de transferencia del sistema en unidades de trabajo, revoluciones por minuto para la velocidad y milímetros para la posición del inyector, a continuación se utilizará las relaciones correspondientes a los puntos de trabajo nominales para calcular las variables por unidad:

$$8.255e004 s^2 + 8.726e004 s + 4.481e004$$

$$1.582e005 s^2 + 9.726e004 s + 4.481e004$$

Tabla 4.20. Datos constantes de conversión de unidades.

ENTRADA ESCALÓN DE Z	
Z[1]	Z1[1]
1	2,3585
LAZO ABIERTO- CONDICIONES NOMINALES	
ENTRADA ESCALÓN DE Z	
Z[1]	Z1[1]
0,424	1

Tabla 4.21. Datos constantes de conversión de unidades (2)

LAZO CERRADO - CONDICIONES NOMINALES SEGÚN USBECK		LAZO CERRADO	
z[mm]	N[rpm]	FACTORES DE CONVERSIÓN NOMINALES	
17,5	600	X: $Z_1[1] = z[mm] / X$	Y: $N1[1] = N[rpm] / Y$
		17,5	600

Con los resultados de las tablas anteriores se transforma el sistema de control al siguiente modelo:

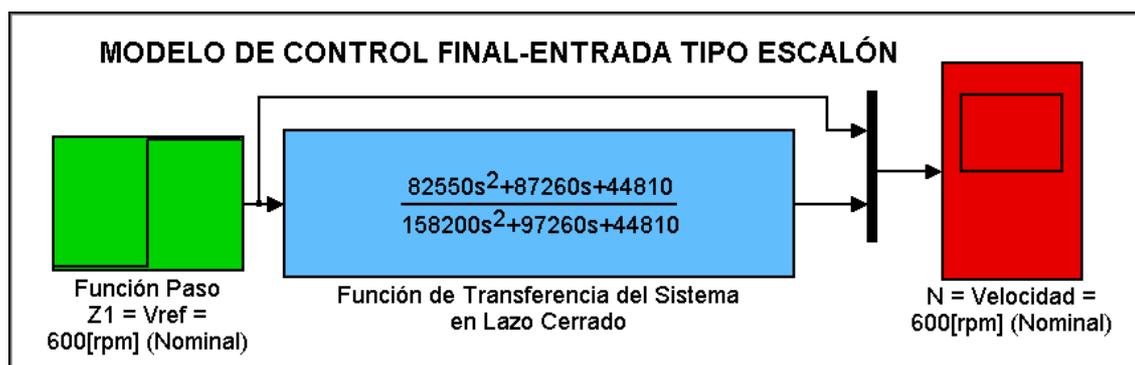


Figura 4.29. Modelo matemático del sistema, para aplicación de control.

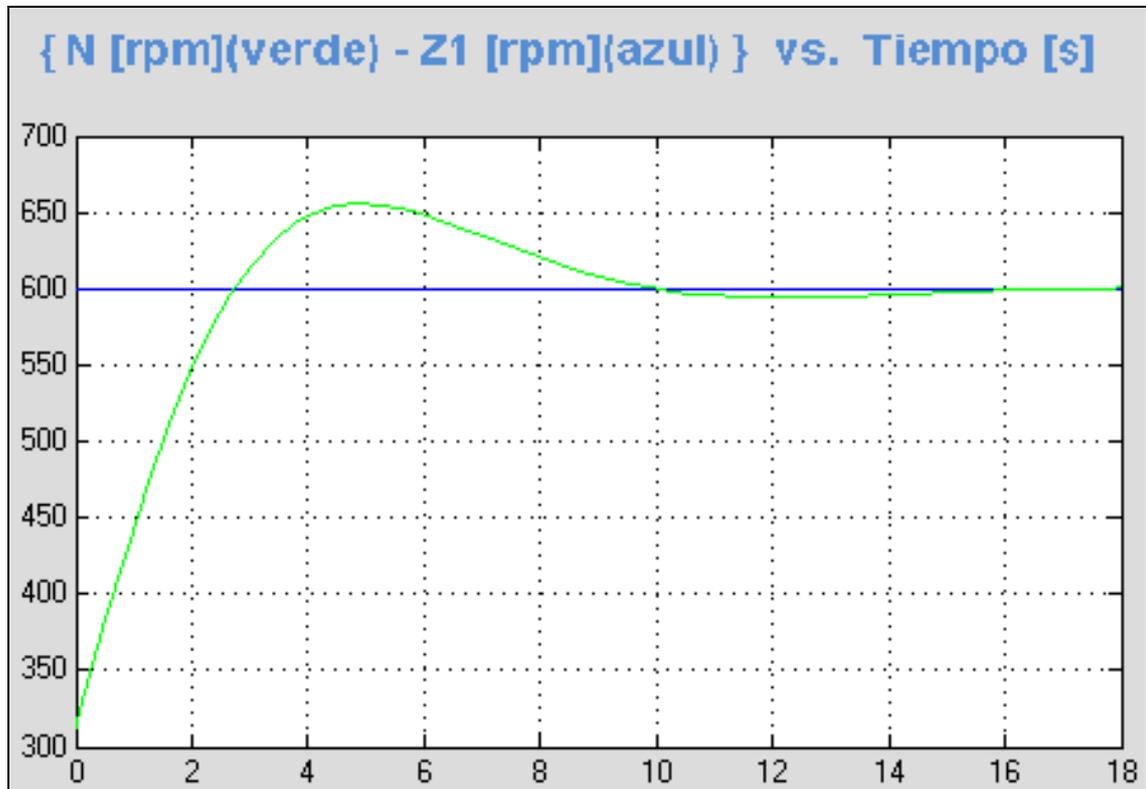


Figura 4.30. Respuesta del sistema - entrada tipo escalón.

La figura anterior confirma los resultados obtenidos antes, las variables del sistema de control han sido seleccionadas correctamente.

Con las constantes de control determinadas, se utilizará el desarrollo de la sección 2.10 (DIGITALIZACIÓN DE UN CONTROLADOR PID – PARALELO), para desarrollar la ecuación discreta que utilizará el programa de control.

4.4. DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL EN MATLAB GUIDE

Para desarrollar la interfaz del sistema de control se optó por utilizar el paquete GUIDE (Grafical User Interfece Developer Environment), que se encuentra incluido en MATLAB.

Entre los elementos de programación computacional utilizados se indican a continuación los más relevantes:

- Funciones e instrucciones propias de MATLAB para manejo de objetos y para manejo de datos.
- Funciones definidas por el usuario en archivos M para manejo lógico de las secuencias (subprogramas) de adquisición de dato (Velocidad entregada por el tacómetro) y actuación (Manejo de actuador).
- Objetos gráficos propios de GUIDE (botones, marcos de ejes, paneles, textos estáticos, textos de edición y demás).
- Objetos lógicos como: temporizadores (timers), punteros de objetos seriales y paralelos para el manejo de entrada y salida de datos; punteros de objetos gráficos (Handles) y demás.
- Archivos de interfaz gráfica (extensión “.fig”)

4.4.1. ESQUEMAS DE FLUJO DE FUNCIONAMIENTO

A continuación se presenta el diagrama de flujo de interfaz, es decir, el orden de cada una de las ventanas de interfaz que formarán parte del Sistema de Control Computarizado.

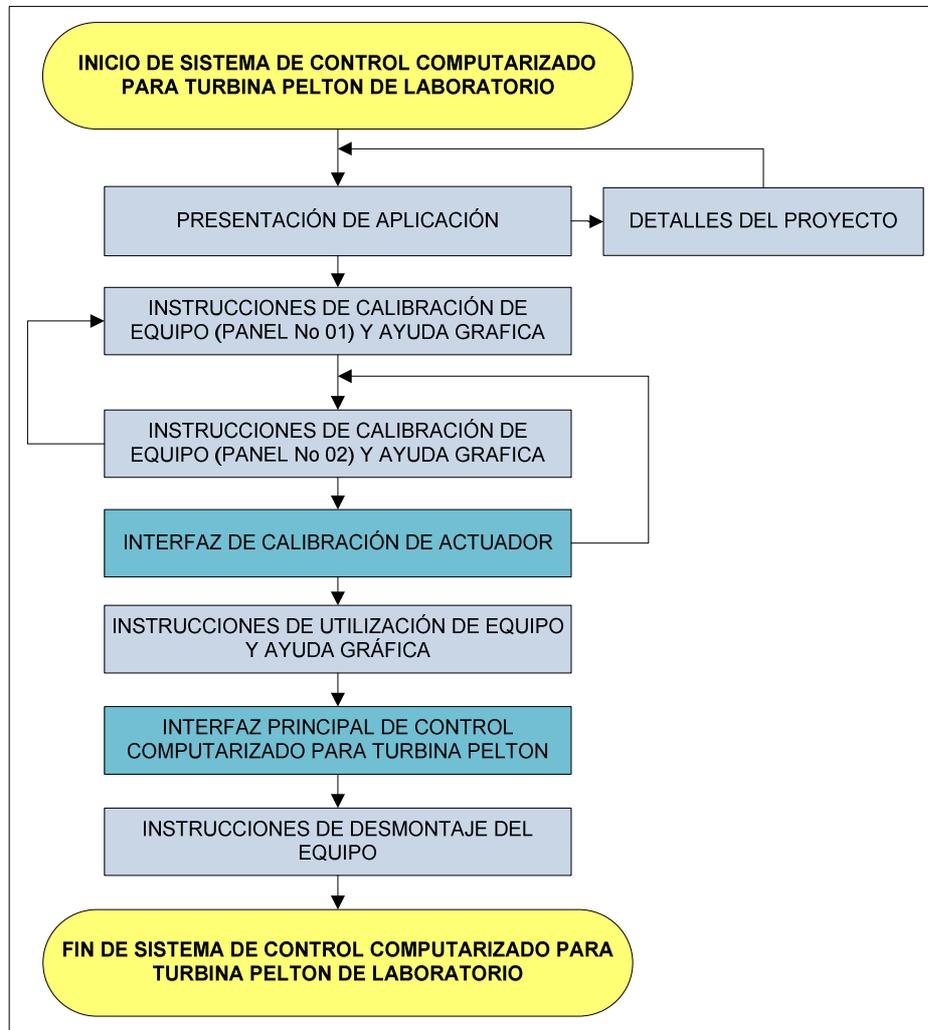


Figura 4.31. Esquema de flujo de interfaz para el sistema de control computarizado.

Cada uno de los cuadros de proceso del diagrama anterior se ve representado por una ventana de interfaz gráfica – GUI – que tiene funciones básicas, relacionadas con pasos de calibración y uso del equipo, excepto la “INTERFAZ PRINCIPAL DE CONTROL COMPUTARIZADO PARA TURBINA PELTON”.

La interfaz principal de control se encargará de inicializar, ejecutar y terminar todas las tareas correspondientes al gobierno del proceso de control. A continuación se presenta los esquemas de flujo de la interfaz de control y sus respectivos subprocesos (subrutinas) que se ejecutan conjuntamente a la interfaz mediante temporizadores (timers).

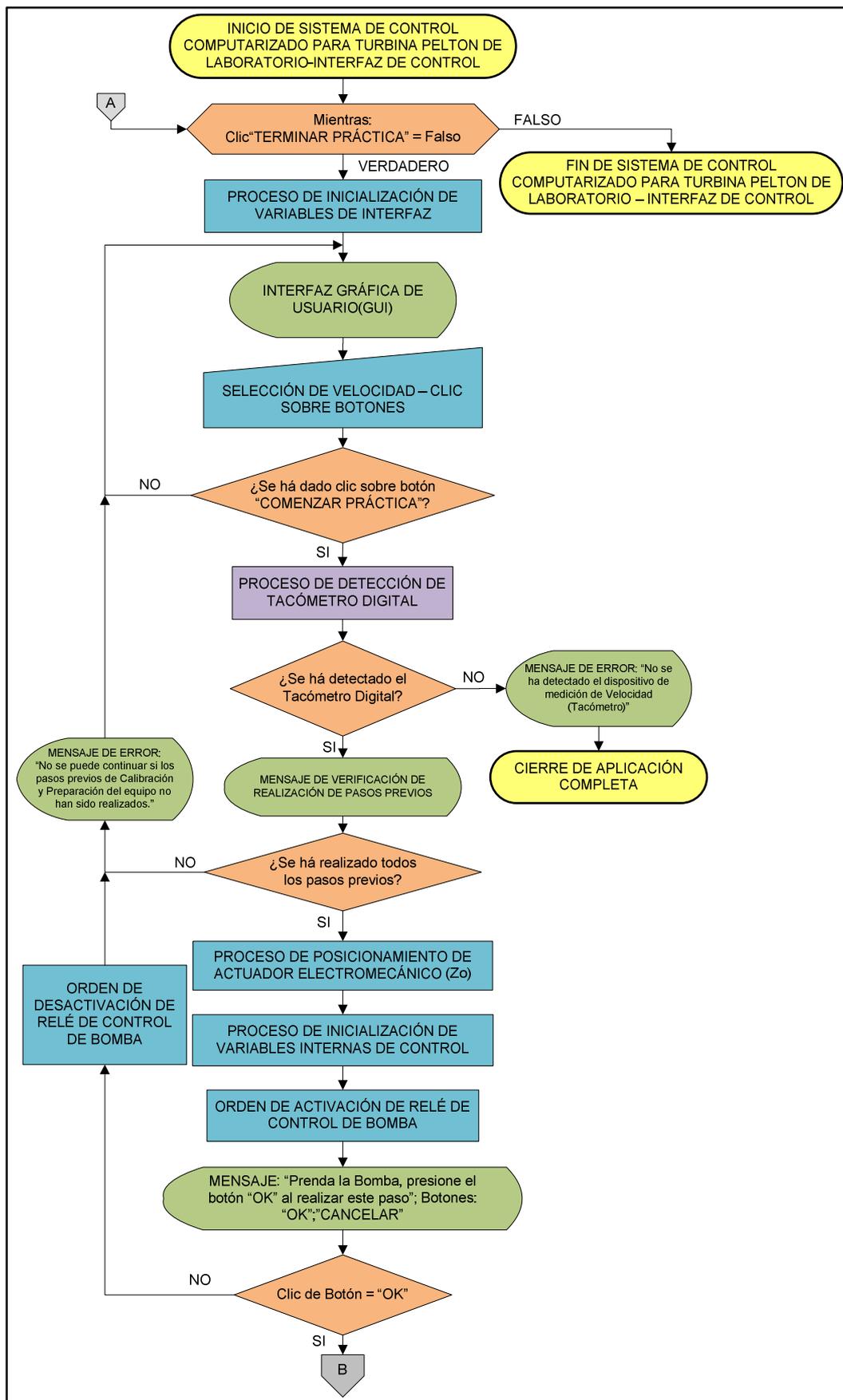


Figura 4.32. Esquema de interfaz de control computarizado – parte 1.

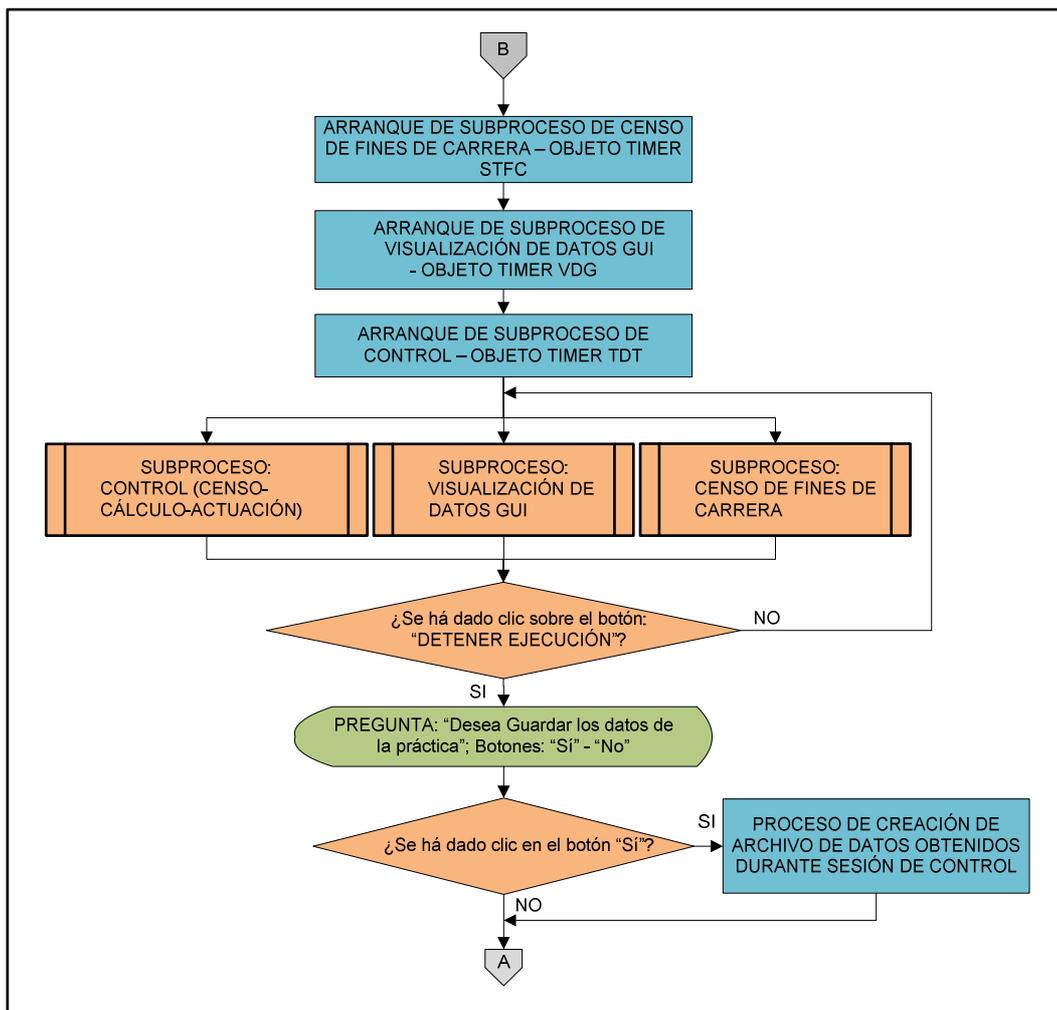


Figura 4.33. Esquema de interfaz de control computarizado – parte 2.

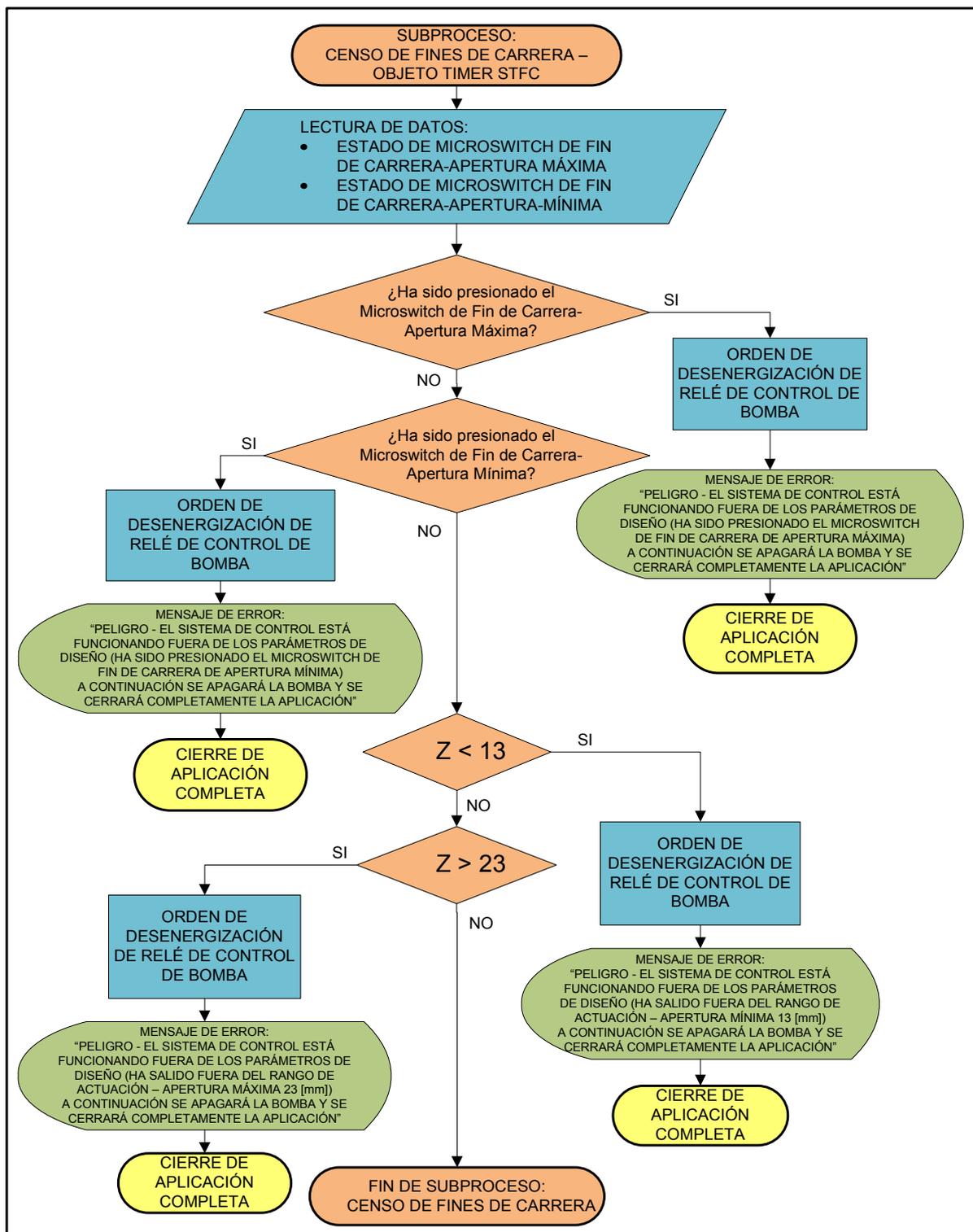


Figura 4.34. Esquema de flujo de subproceso de censo de fines de carrera.

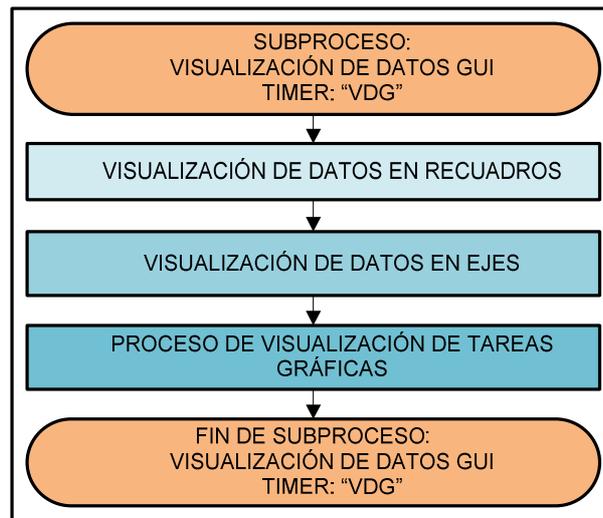


Figura 4.35. Esquema de flujo de subproceso de visualización de datos.

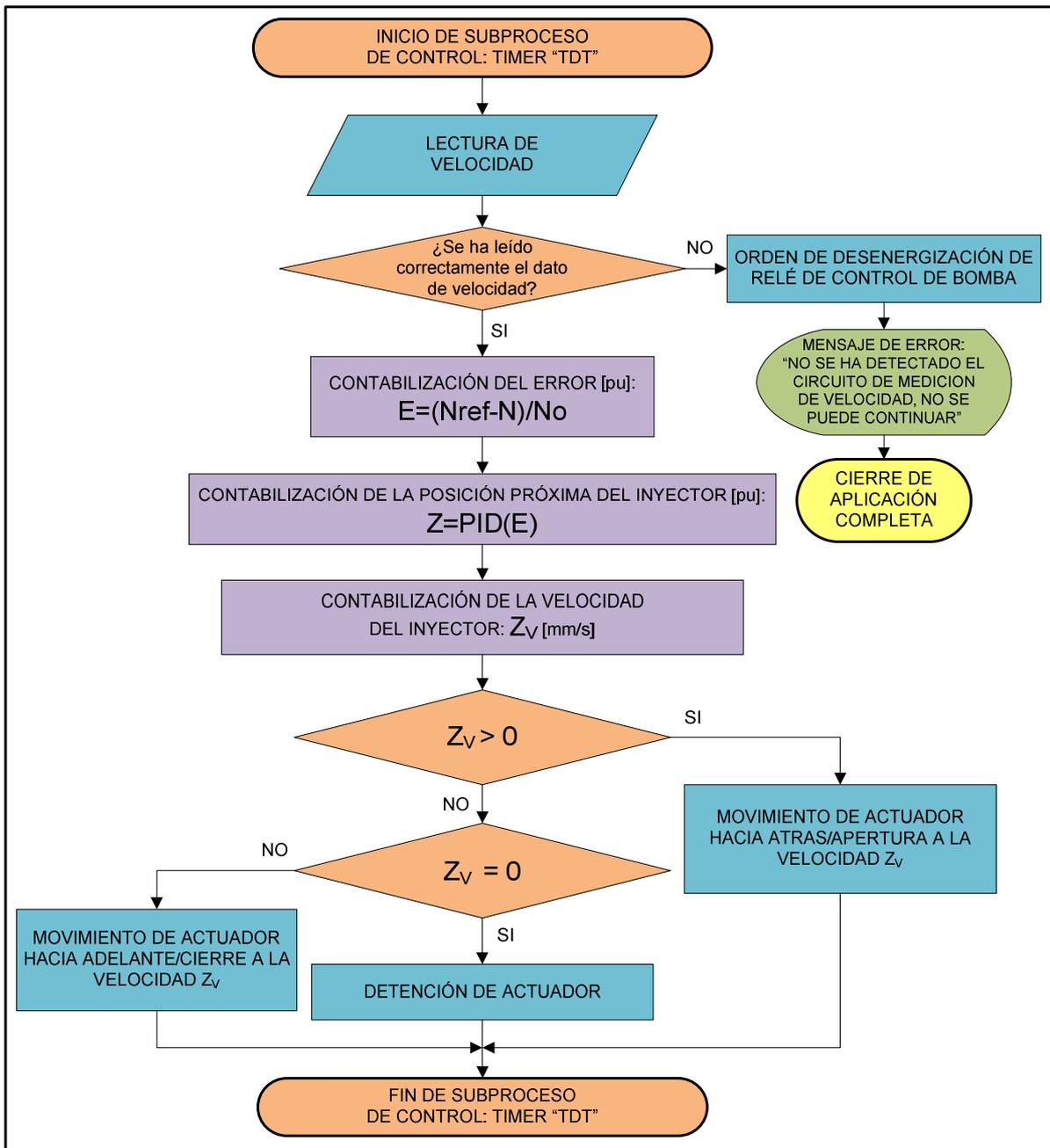


Figura 4.36. Esquema de flujo de subproceso de control.

4.4.2. INTERFACES GRÁFICAS

Según el diagrama anterior se tiene las siguientes interfaces del sistema:

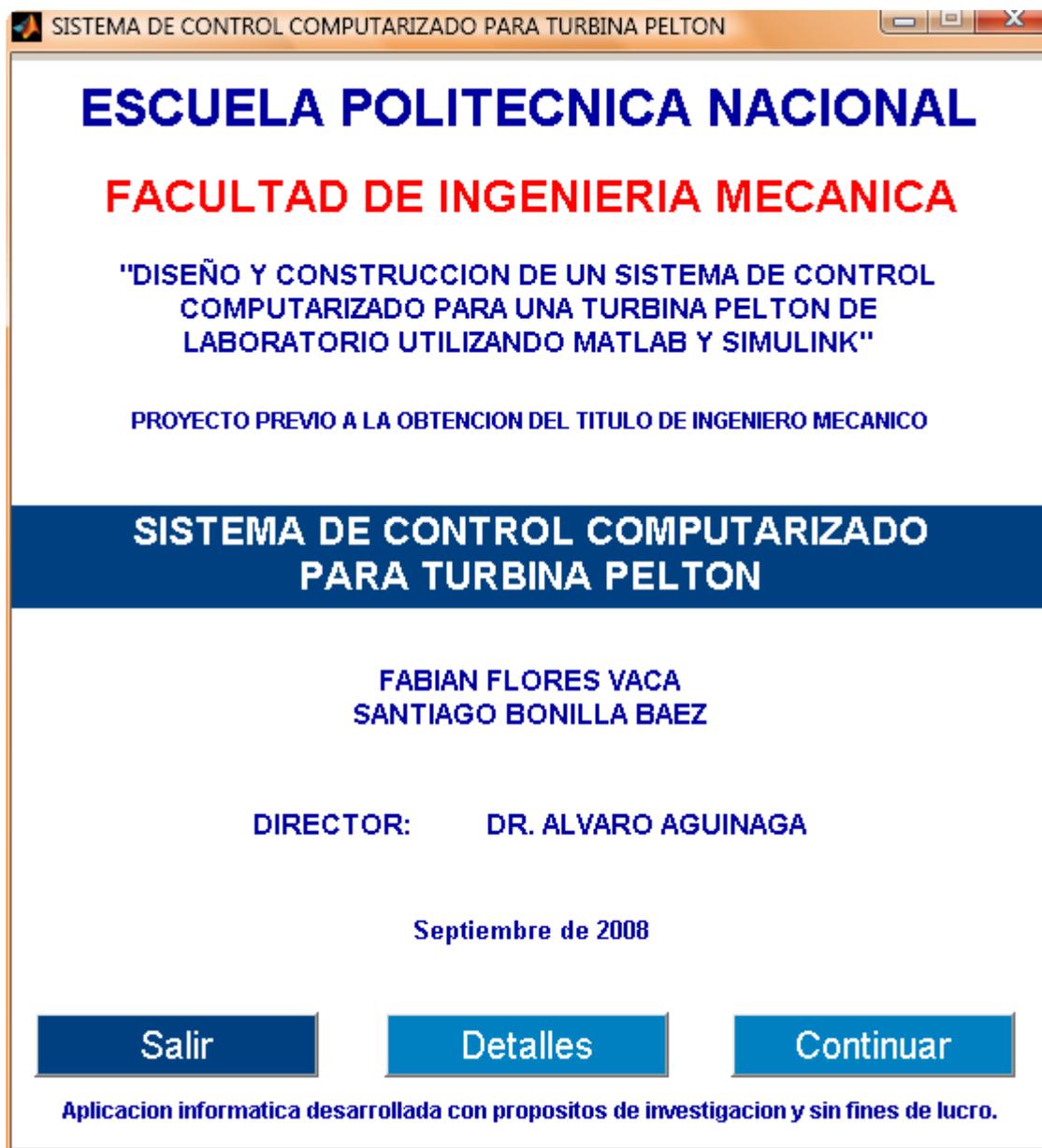


Figura 4.37. Presentación de la aplicación.



Figura 4.38. Detalles del Proyecto.

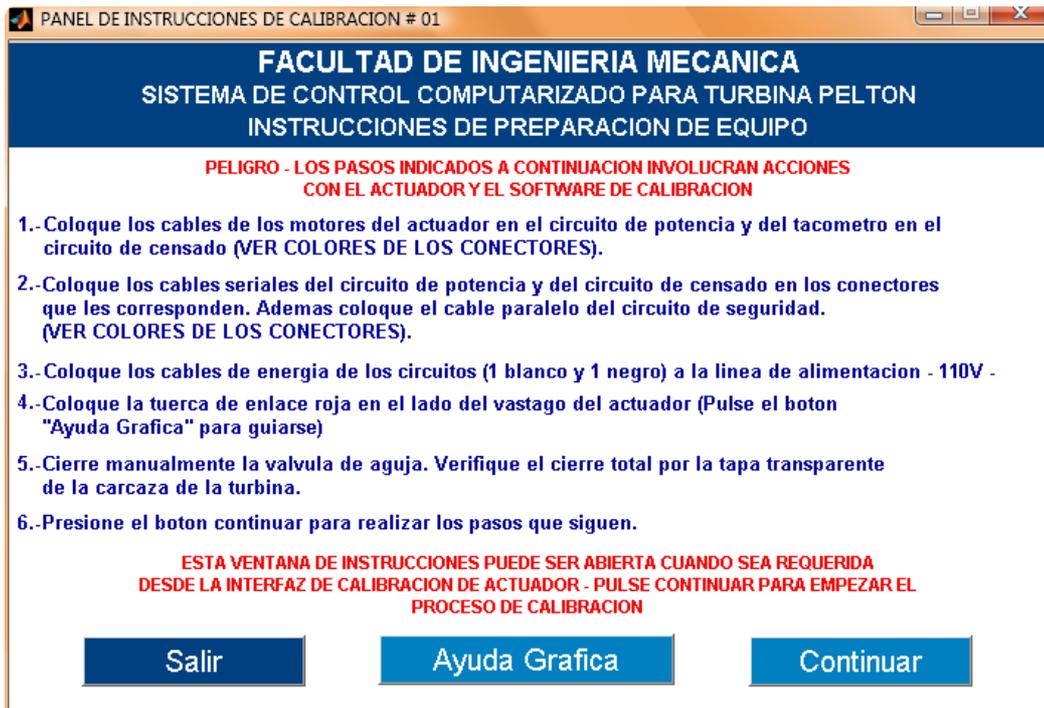


Figura 4.39. Instrucciones de calibración de equipo (No 01).

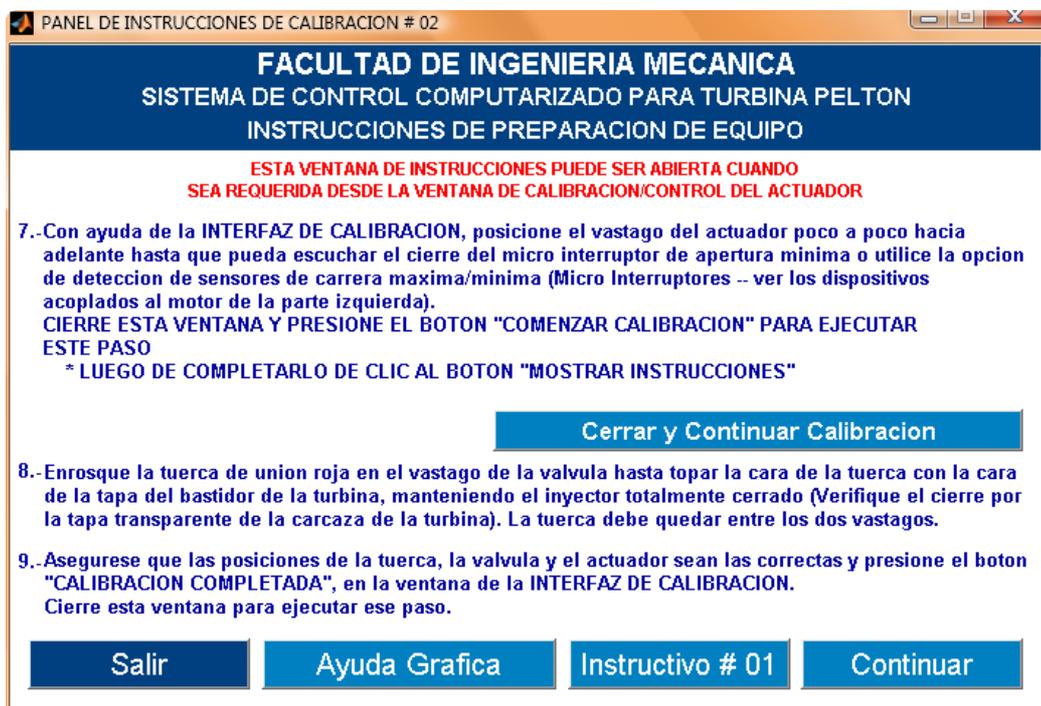


Figura 4.40. Instrucciones de calibración de equipo (No 02).

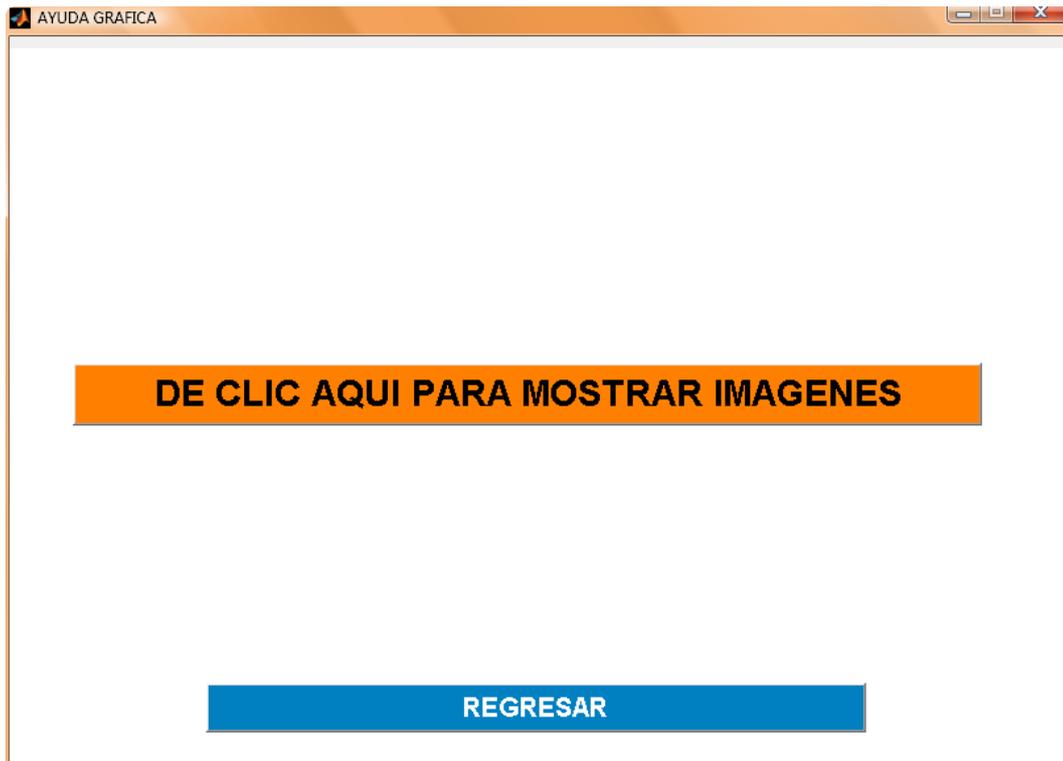


Figura 4.41. Ayuda Gráfica – interfaz Inicial.

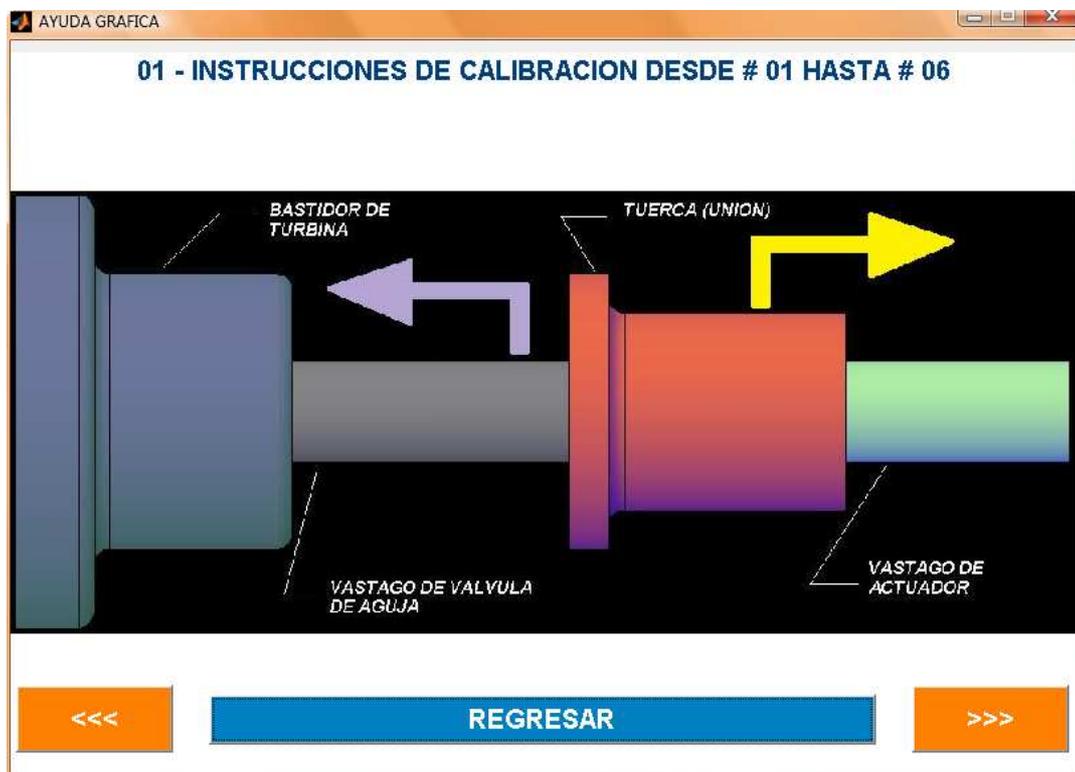


Figura 4.42. Ayuda Gráfica – interfaz No 01.

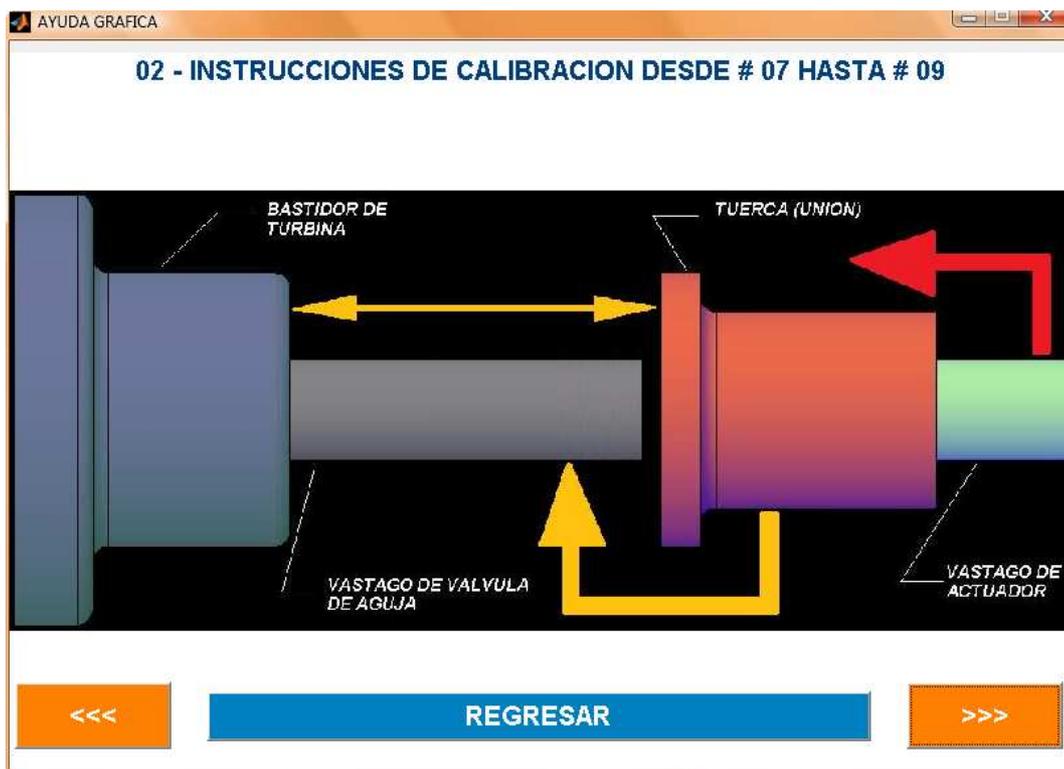


Figura 4.43. Ayuda Gráfica – interfaz No 02.



Figura 4.44. Ayuda Gráfica – interfaz No 03.



Figura 4.45. Ayuda Gráfica – interfaz No 04.

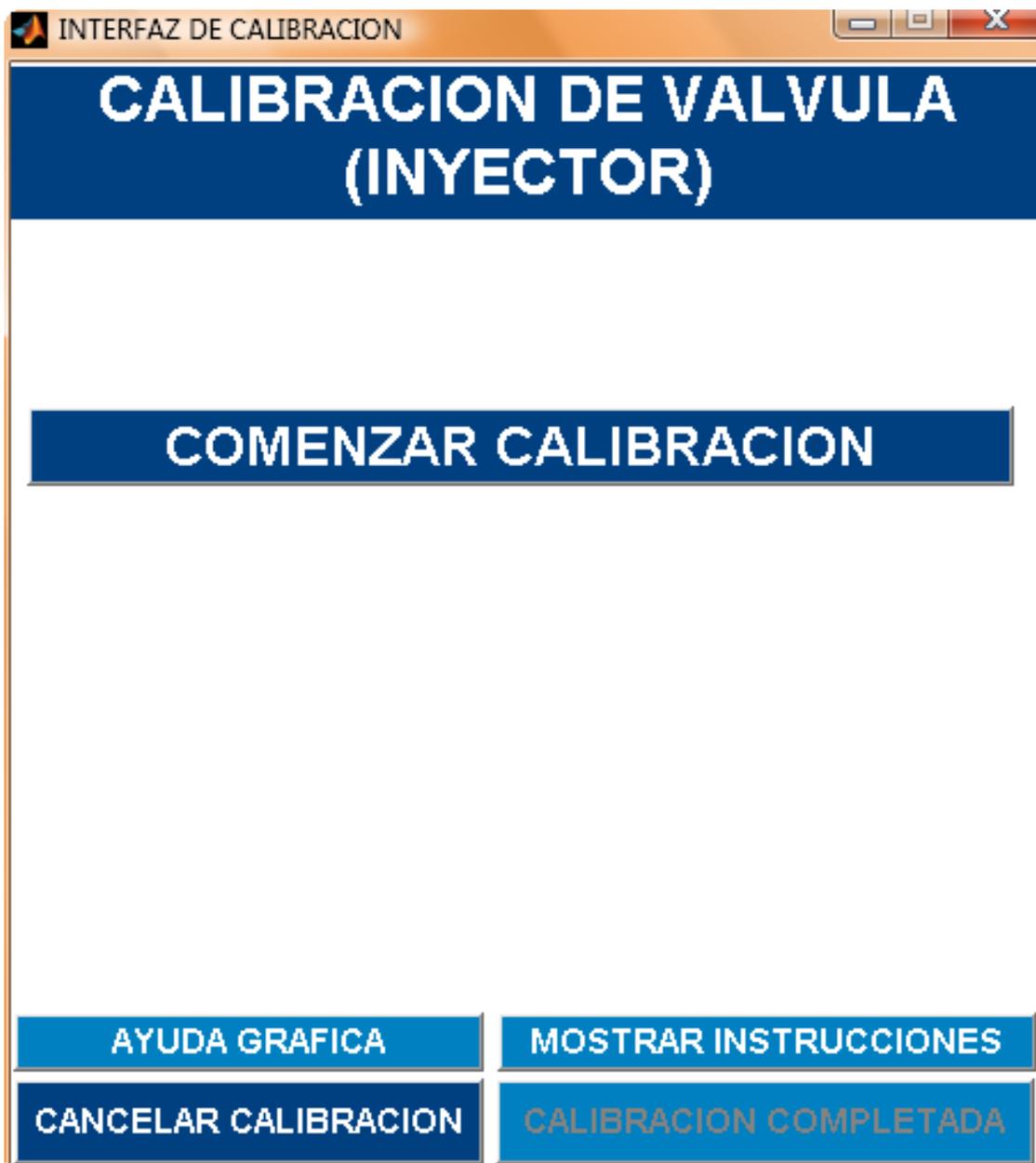


Figura 4.46. Interfaz de calibración de inyector - inicial.

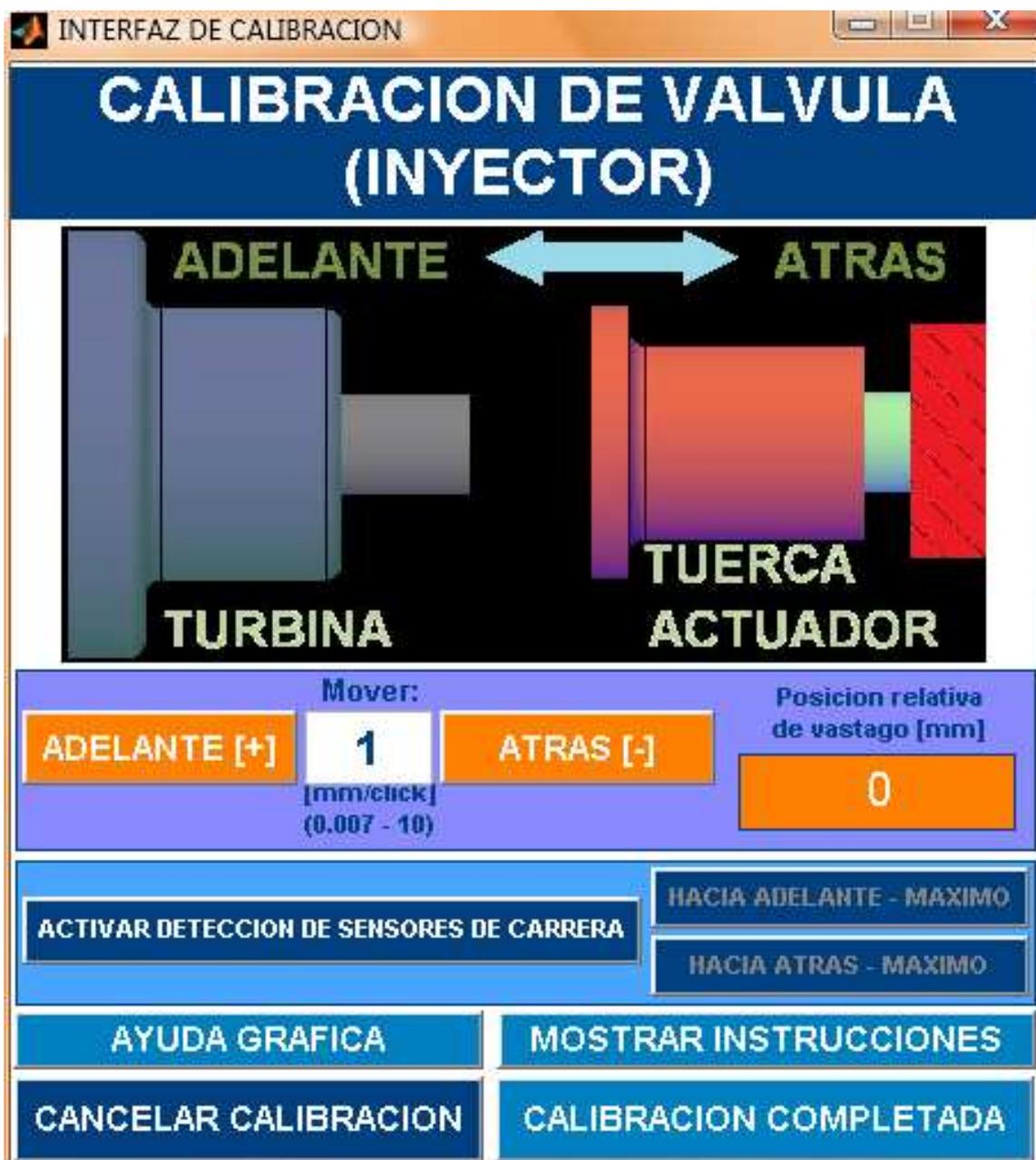


Figura 4.47. Interfaz de calibración de inyector - final.

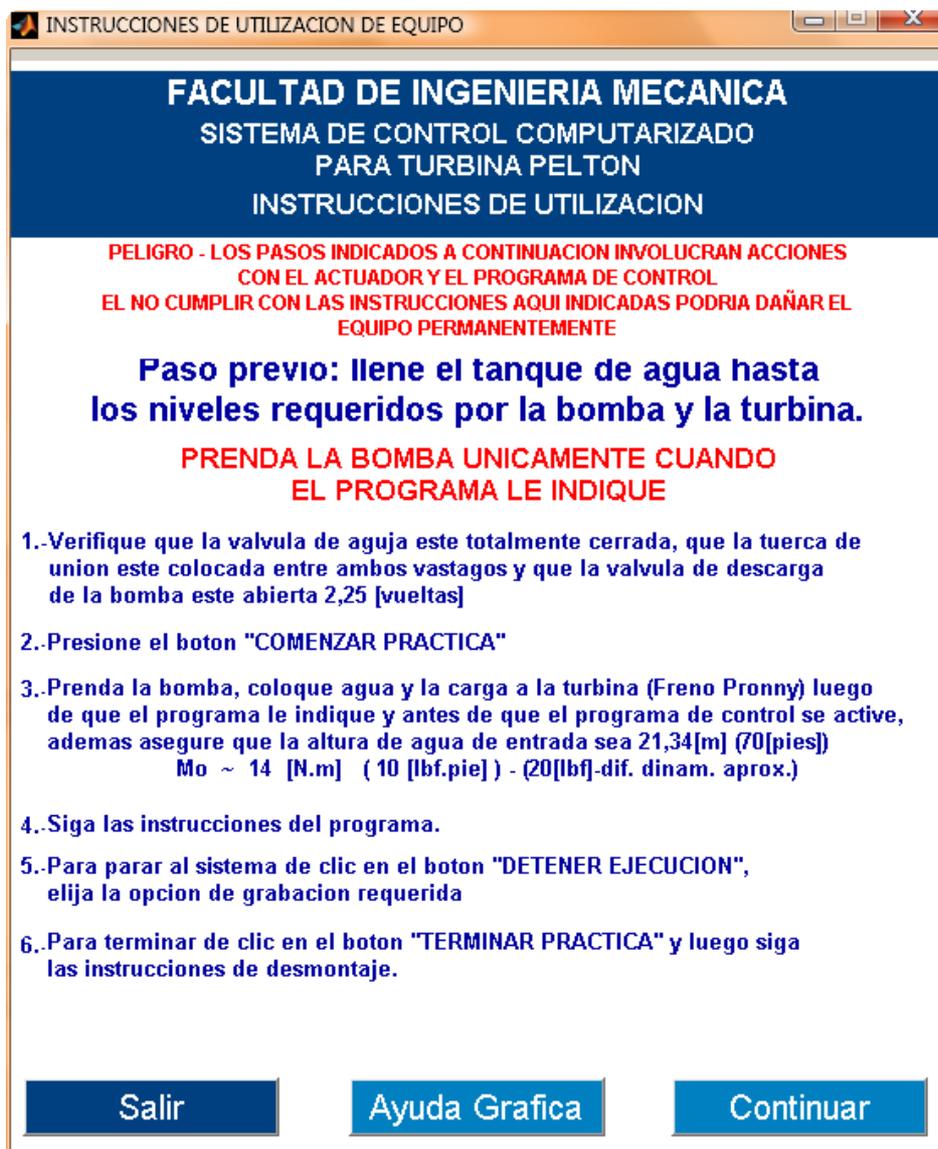


Figura 4.48. Instrucciones de utilización de equipo.

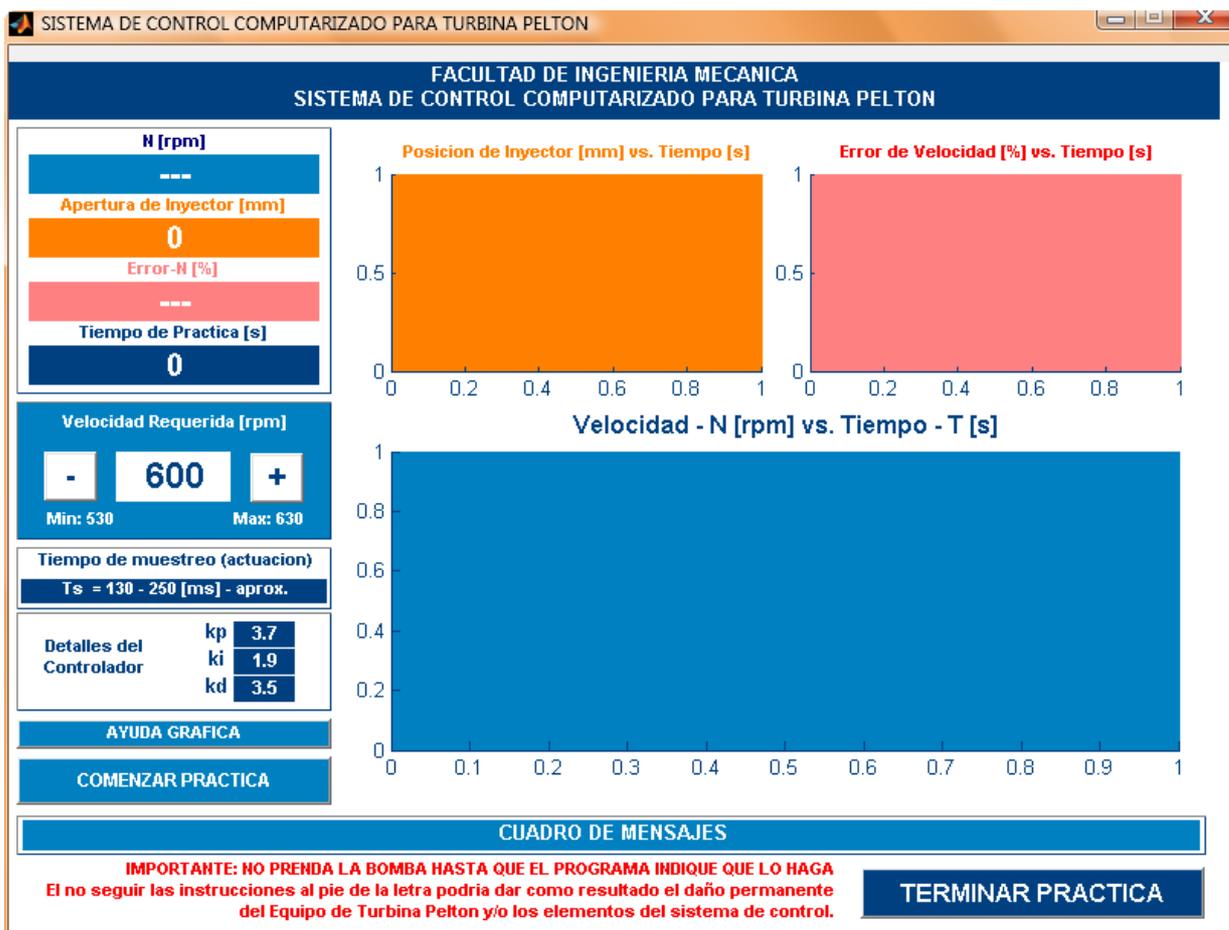


Figura 4.49. Sistema de control computarizado para turbina Pelton.

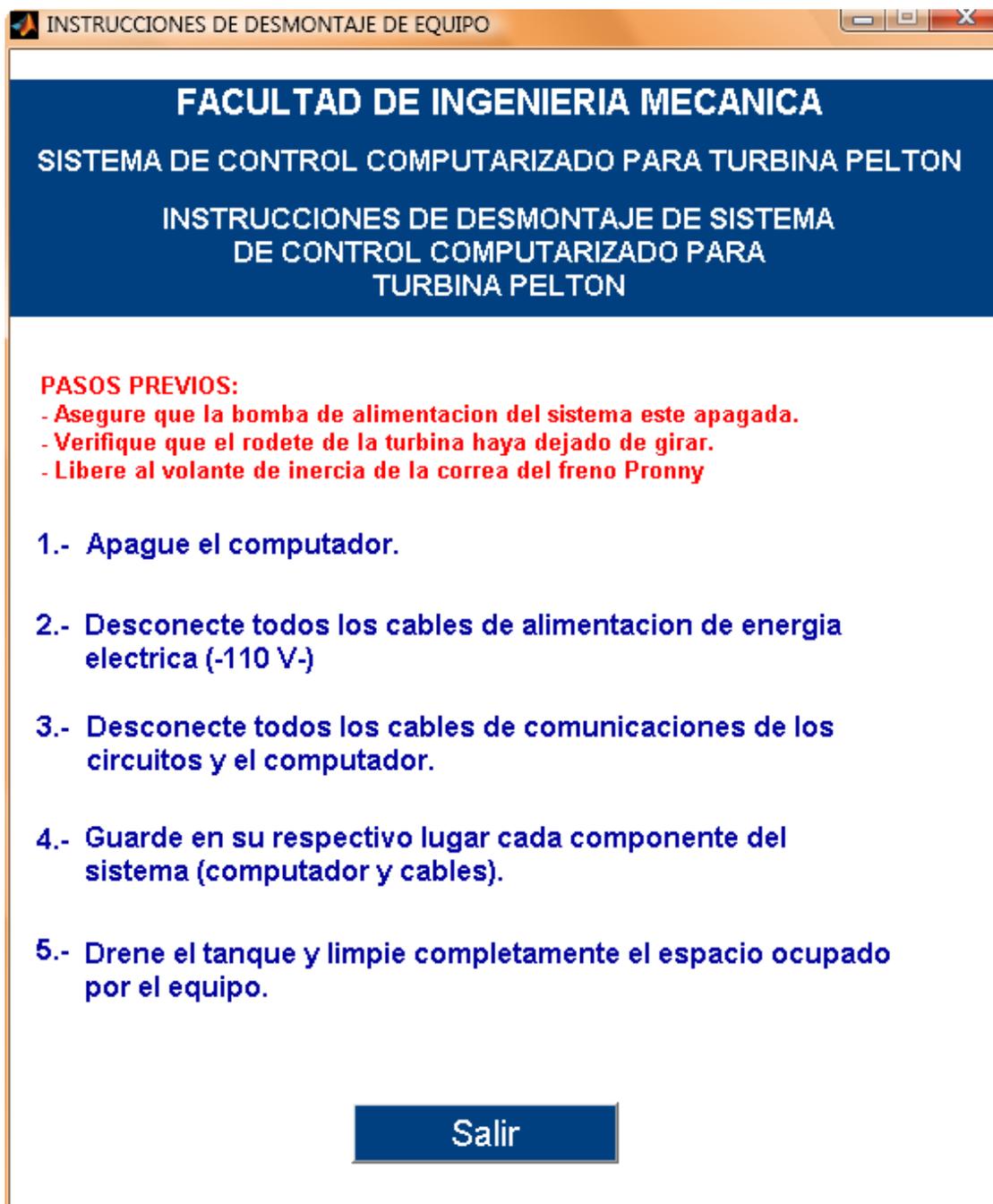


Figura 4.50. Instrucciones de desmontaje de sistema.

En la sección de apéndices es posible encontrar referencias de las instrucciones más importantes del código utilizado en cada una de las interfaces anteriores.

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

5.1. DETALLES DE CONSTRUCCIÓN

Para la construcción del sistema de control se utilizarán diferentes herramientas, máquinas y aparatos de medida.

Herramientas

Rayadores, brocas, brocas de centro, cuchillas: acero rápido, escuadras, nivel, sierra manual, fresas y portafresas, útiles del tomo, limas, destornilladores, cuchillas, martillo y demás.

Máquinas

Fresadora universal, torno, taladro vertical y manual, soldadora eléctrica, amoladora, cizalla.

Aparatos de medida

Flexómetro, regletas, calibrador pie de rey, tacómetro (Foto-Tac), multímetro, cronómetro.

5.2. MONTAJE DEL SISTEMA DE CONTROL

En la etapa de montaje del sistema de control se optó por conseguir asistencia de personal técnico en montajes industriales.

Como referencia de esta etapa, a continuación se indican fotografías relacionadas con la construcción, montaje y calibración del sistema de control.



Figura 5.1. Nivelación de actuador.



Figura 5.2. Encuadre de mesa.



Figura 5.3. Fijación de vástagos de válvula y actuador.



Figura 5.4. Vista trasera de actuador

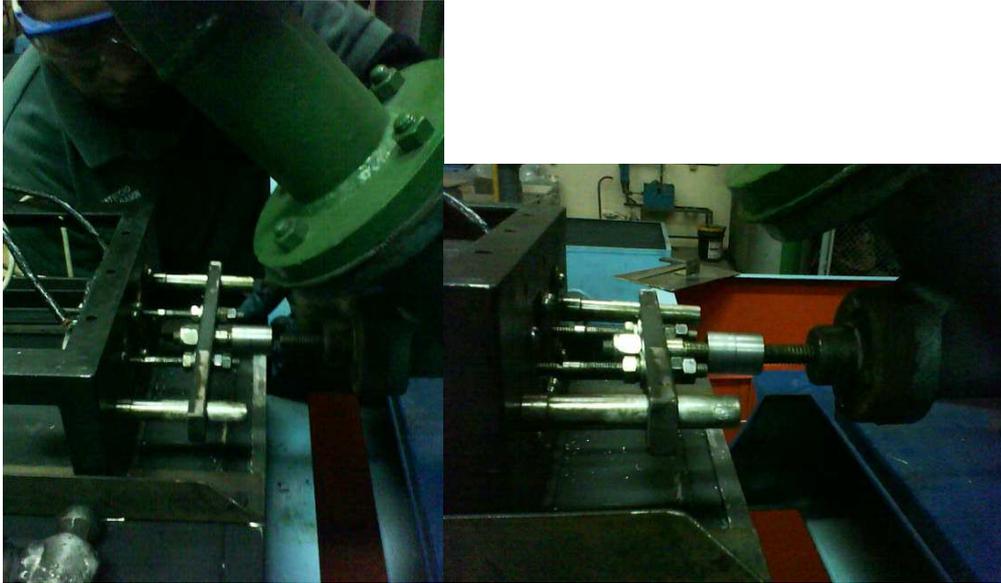


Figura 5.5. Vista lateral de actuador.



Figura 5.6. Vista posterior de actuador.



Figura 5.7. Prueba de Actuador en etapa de construcción – 1.



Figura 5.8. Prueba de sistema – verificación de velocidad.



Figura 5.9. Disposición final - actuador.



Figura 5.10. Sistema de control computarizado en funcionamiento.

CAPÍTULO 6

PRUEBAS

6.1. PROTOCOLO DE PRUEBAS

Luego de completar los procesos de construcción y montaje se debe probar el Sistema de Control, para garantizar que cumpla con los parámetros de diseño establecidos.

Tabla 6.1. Características de prueba para el equipo.

#	Prueba	Detalles
1	Condiciones de Diseño	Se procederá a probar el equipo y a medir su respuesta en condiciones de diseño, variando la velocidad requerida (Z1) dentro del rango de diseño (570 – 630 [rpm]). La duración de la prueba será de 20 minutos.

6.2. DESARROLLO DE PRUEBAS

Al desarrollar el protocolo de prueba se obtuvieron los siguientes resultados (resumidos):

Tabla 6.2. Prueba No 01 – Datos de funcionamiento – nominal inicial.

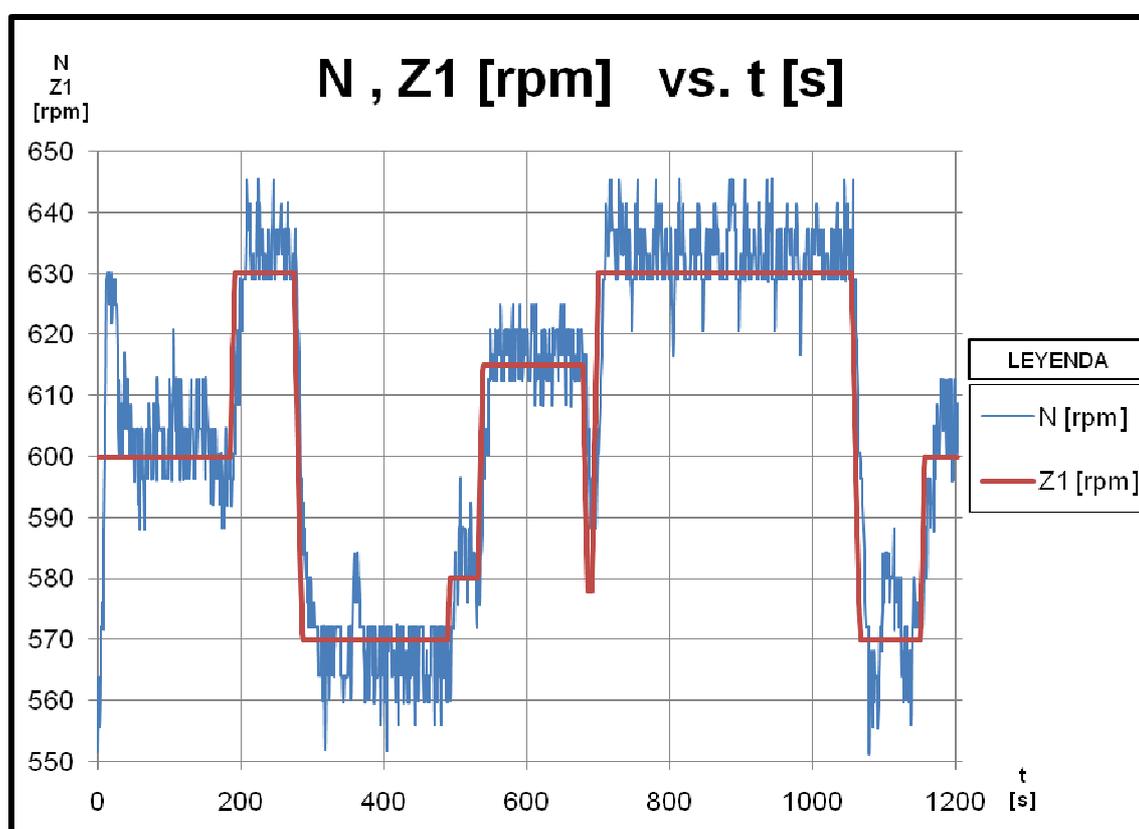
PARÁMETROS DE PRUEBA			
N_{nom} [rpm]*	600	b_{aprox} [vueltas]*	2,25
z_{nom} [mm]*	17,5	H_{nom} [m]*	21,34
z_o [mm]*	17,5	$M_{nom\ aprox}$ [N.m]*	14
$z_{mín}$ [mm]	13	BHP_{aprox} [Kw]*	0,9
$z_{máx}$ [mm]	23	Q_{aprox} [m ³ /h]*	26,3
Duración de prueba [min]	20	# Muestras [1]	1297

*Estos datos fueron medidos al encender la bomba y calibrar los parámetros solicitados por la aplicación.

Tabla 6.3. Prueba No 01 – Resultados obtenidos con el sistema de control computarizado.

Dato	E _{velocidad} [%]	z [mm]
Promedio	1,06	17,51
Mínimo	0,00	15,03
Máximo	5,00	20,87

La lista de datos que fue tomada para realizar esta tabla de datos y la gráfica que se muestra a continuación se encuentra en la sección de anexos.

**Figura 6.1.** Resultados de prueba No 01. N, Z1[rpm] vs. t [s].

En el apéndice puede obtenerse la lista de valores tomada para generar la tabla anterior y el gráfico anteriores.

6.3. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

PRUEBA No 01 – CONDICIONES DE DISEÑO

Los resultados muestran que:

$$\mathbf{Evel} = \text{Error de velocidad máximo} = 5 \% \leq 5\%$$

$$\mathbf{z_{min}} = 15,83[\text{mm}]; \mathbf{z_{máx}} = 20,87[\text{mm}]$$

Así pues, mediante esta evaluación se puede observar que:

- El error de velocidad máximo se encuentra dentro de los parámetros de diseño.
- Los valores máximo y mínimo de apertura del inyector alcanzados durante la práctica se encuentran relativamente distantes de los valores máximo y mínimo elegidos como condiciones de diseño. Las instrucciones de seguridad no encontraron ninguna anomalía durante la prueba.

CONCLUSIONES

Después de haber desarrollado exitosamente el presente proyecto se concluye que:

- El objetivo principal – Diseñar y construir un sistema de control para una turbina Pelton de Laboratorio utilizando Matlab y Simulink – y cada uno de los objetivos secundarios del presente proyecto han sido alcanzados con éxito, ya que se logró obtener resultados acordes a los requerimientos técnicos del Sistema de Control.
- El intervalo de funcionamiento del sistema de control (recorrido de inyector) ha sido seleccionado correctamente. Los límites de dicho intervalo permiten que el sistema funcione inclusive con pequeñas desviaciones en la calibración.
- El desarrollo de Sistemas de Control Computarizados puede ser realizado por estudiantes de la Carrera de Ingeniería Mecánica de una forma práctica, objetiva y real, sin necesidad de conocer a fondo los campos de la electrónica y el desarrollo de aplicativos informáticos, claro está, teniendo los lineamientos necesarios como para poder elegir correctamente elementos electrónicos (orientados al manejo de sensores y actuadores) y desarrollar aplicativos informáticos eficientes y eficaces.
- El Sistema de Control desarrollado posee características electromecánicas compatibles con posibles proyectos futuros de automatización del equipo de turbina Pelton y/o el circuito hidráulico al que pertenece la turbina.
- Para utilizar el Sistema de Control desarrollado en el presente proyecto, los usuarios del mismo deben seguir las instrucciones de calibración y utilización correctamente, caso contrario, acciones no adecuadas pueden dañar permanentemente el equipo.

- El procedimiento de calibración del equipo es semiautomático, por lo cual, la precisión de la calibración del actuador tiene relación directa con la destreza del usuario para completar cada de los pasos. En caso de no calibrar bien el actuador del equipo, la posición de la válvula de aguja calculada por el programa incluirá un error estático mínimo.
- El uso que se puede dar al paquete computacional MATLAB es extenso, ya que permite manejar datos, realizar cálculos, crear interfaces gráficas, adquirir y proveer datos desde o hacia dispositivos ajenos al computador, manipular imágenes y muchas otras funcionalidades útiles para todos los campos en que se aplica la Ingeniería Mecánica y las demás ramas de ingeniería en general.
- El presente proyecto de automatización resultó ser relativamente barato, lo cual hace prever que el uso de sistemas de control similares para sistemas productivos de pequeña y mediana industria, puede ser rentable a corto plazo.

RECOMENDACIONES

A continuación se indican las recomendaciones nacidas al completar el presente proyecto:

- Se recomienda utilizar los instructivos de operación del equipo tanto para prácticas del área de automatización como del área de turbomaquinaria, con el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento y una larga vida útil de los dispositivos que comprenden el sistema de control.
- Antes de utilizar el equipo se debe limpiar y lubricar las partes móviles del actuador, con el objetivo de garantizar la perfecta movilidad del mismo en todo el rango de recorrido de la válvula de aguja.
- Se recomienda también impulsar el área de Control y Automatización de Procesos dentro de la Facultad de Ingeniería Mecánica para adherir nuevas herramientas prácticas al currículum profesional de los alumnos de la Carrera de Ingeniería Mecánica, lo cual proveerá a los jóvenes ingenieros de más y mejores oportunidades en el campo laboral nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- BOLTON, WILLIAM; “Mecatrónica – Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica”; 2da edición; Alfaomega; Mexico; 2001.
- BURNS, ROLAND, “Advanced Control Engineering”, Butterworth –Heinemann, Primera Edición, Oxford, 2001.
- DIXON, S.; “Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery”; Cuarta Edición; Butterworth-Heinemann; Boston; 1998.
- ESQUEDA, JOSÉ, “MATLAB e Interfaces Gráficas”, Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, 2002.
- FERNÁNDEZ, PEDRO; “Turbinas Hidráulicas”, Universidad De Cantabria, Santander, 2003.
- GIL, JORGE, “Ingeniería de Control”, Unicopia, Segunda Edición, San Sebastián, 2004.
- KARRIS, STEVEN, “Introduction to Simulink”, Orchard Publications, U.S.A., 2006.
- MATAIX, CLAUDIO; “Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas”; Segunda Edición; Ediciones Del Castillo; Madrid; 1986.
- MATHWORKS, “MATLAB® 6.5 Help”, 2002.
- OGATA, KATSUHIKO, “Ingeniería de Control Moderna”, Prentice Hall, Tercera Edición, México, 1998.
- RIBA, CARLES, “Diseño Concurrente”, S/E, 2002.

- SCENNA, NICOLÁS, “Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos”, S/E, 1999.
- SOTELO, GILVERTO; “Hidráulica General”; Volumen 1; Limusa; México; 1999.
- STREETER, VICTOR; “Mecánica de los Fluidos”; Mc Graw – Hill; México; 1975.
- USBECK, DANILO, “Diseño y Construcción de un Regulador Electro-Hidráulico de Velocidad para una Mini Turbina Pelton con Aplicación al Laboratorio”, Tesis - E.P.N., Quito, 1986.

ANEXOS

- A – DATOS OBTENIDOS EN PRUEBAS
- B – HOJAS DE DATOS TÉCNICOS DE SOFTWARE Y HARDWARE
- C – INSTRUCCIONES RELEVANTES UTILIZADAS EN EL CÓDIGO DEL SISTEMA DE CONTROL
- D – GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS – TURBINA PELTON (PROPUESTA)
- E – PRÁCTICA DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS – TURBINA PELTON (PROPUESTA) – DESARROLLADA
- F – GUÍA DE UTILIZACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL
- G – PLANOS

A – DATOS OBTENIDOS EN PRUEBAS

ANEXO A

Prueba No 01 – Datos de funcionamiento – nominal inicial.

CONDICIONES NOMINALES			
N_{nom} [rpm]	600	<input type="checkbox"/> b_{aprox} [vueltas]	2,25
z_{nom} [mm]	17,5	H_{nom} [m]	21,34
z_o [mm]	17,5	M_{nom aprox} [N.m]	14
z_{min} [mm]	13	BHP_{aprox} [Kw]	0,9
z_{máx} [mm]	23	Q_{aprox} [m³/h]	26,3
Duración de prueba [min]	20	# Muestras [1]	1297
Estos datos fueron medidos al encender la bomba y calibrar los parámetros solicitados por la aplicación.			

La primera fila de datos de la tabla siguiente no debe ser tomada en cuenta para el análisis de la respuesta del sistema, porque los valores contenidos en la misma corresponden a valores de inicialización. Además, los datos correspondientes a los primeros cinco segundos del sistema no han sido considerados en los cálculos porque se encuentran relacionados con el arranque del sistema y la calibración del torque mediante los dinamómetros, por ende, el sistema antes del arranque tendrá siempre una ligera desviación de las condiciones previstas.

Prueba No 01 – Resultados obtenidos con el sistema de control computarizado.

#	t [s]	N [rpm]	Z1 [rpm]	E _{vel} [rpm]	E _{vel} [%]	E _{vel} [%]	z [mm]
1	0,00	0,00	600	600,00	100,00	100	17,4975
2	0,81	551,43	600	48,57	8,10	8,10	17,4975
3	1,98	563,71	600	36,29	6,05	6,05	17,3925
4	2,73	563,71	600	36,29	6,05	6,05	17,2500
5	3,88	555,71	600	44,29	7,38	7,38	17,0400
6	4,94	563,71	600	36,29	6,05	6,05	16,8075
7	5,70	572,00	600	28,00	4,67	4,67	16,5450
8	6,66	572,00	600	28,00	4,67	4,67	16,2750
9	7,39	576,00	600	24,00	4,00	4,00	16,0200
10	8,73	572,00	600	28,00	4,67	4,67	15,6675
11	9,77	588,14	600	11,86	1,98	1,98	15,3975
12	10,55	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	15,4875
13	11,52	608,43	600	-8,43	-1,40	1,40	15,6300
14	12,27	629,00	600	-29,00	-4,83	4,83	15,5400
15	13,30	629,00	600	-29,00	-4,83	4,83	15,3825
16	14,27	630,00	600	-30,00	-5,00	5,00	15,4800
17	15,00	629,00	600	-29,00	-4,83	4,83	15,6300
18	16,00	625,00	600	-25,00	-4,17	4,17	15,5175
19	16,75	630,00	600	-30,00	-5,00	5,00	15,3450
20	17,72	629,00	600	-29,00	-4,83	4,83	15,4350
21	18,67	625,00	600	-25,00	-4,17	4,17	15,5775

22	19,45	630,00	600	-30,00	-5,00	5,00	15,7800
23	20,52	622,00	600	-22,00	-3,67	3,67	16,0425
24	21,27	625,00	600	-25,00	-4,17	4,17	16,2300
25	22,22	629,00	600	-29,00	-4,83	4,83	16,4775
26	23,20	629,00	600	-29,00	-4,83	4,83	16,3950
27	24,00	629,00	600	-29,00	-4,83	4,83	16,5150
28	24,97	629,00	600	-29,00	-4,83	4,83	16,6800
29	25,75	624,86	600	-24,86	-4,14	4,14	16,8825
30	26,86	624,86	600	-24,86	-4,14	4,14	17,1450
31	28,39	616,71	600	-16,71	-2,79	2,79	17,4600
32	29,56	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,7975
33	30,33	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,6925
34	31,39	612,57	600	-12,57	-2,10	2,10	17,5350
35	32,34	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,6400
36	33,09	608,43	600	-8,43	-1,40	1,40	17,5200
37	34,06	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,6100
38	34,84	608,57	600	-8,57	-1,43	1,43	17,5050
39	35,81	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,6100
40	36,59	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,4900
41	37,58	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	17,6100
42	38,56	616,71	600	-16,71	-2,79	2,79	17,7825
43	39,30	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,6850
44	40,30	612,57	600	-12,57	-2,10	2,10	17,5125
45	41,16	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	17,6100
46	42,25	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,7825
47	43,23	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	17,6850
48	43,97	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,7825
49	44,95	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,6850
50	45,75	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,7750
51	46,73	608,43	600	-8,43	-1,40	1,40	17,6850
52	47,91	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,7900
53	48,70	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,6850
54	49,66	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,7825
55	50,41	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,9400
56	51,48	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,8425
57	52,61	596,00	600	4,00	0,67	0,67	17,6850
58	53,34	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,4825
59	54,42	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,5800
60	55,20	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,7600
61	56,28	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,9700
62	57,38	592,14	600	7,86	1,31	1,31	17,8575
63	58,16	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,7000
64	59,25	588,14	600	11,86	1,98	1,98	17,8050
65	60,05	596,14	600	3,86	0,64	0,64	17,7075
66	61,11	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,8200
67	62,09	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,9775
68	62,86	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,8650
69	63,84	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,6850
70	64,58	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,7750
71	65,58	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,6700
72	66,63	588,00	600	12,00	2,00	2,00	17,5200
73	67,38	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,2875
74	68,34	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,3850
75	69,11	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,5500
76	70,08	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,4675
77	70,88	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,2725
78	71,83	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,3550
79	72,80	608,57	600	-8,57	-1,43	1,43	17,5050
80	73,55	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,7075

81	74,53	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,6100
82	75,30	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,7150
83	76,27	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,6025
84	77,02	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,4375
85	78,09	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,2200
86	79,05	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	16,9800
87	79,83	608,57	600	-8,57	-1,43	1,43	17,0850
88	80,84	600,29	600	-0,29	-0,05	0,05	17,2575
89	81,59	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,1450
90	82,69	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,2425
91	83,64	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	17,1450
92	84,41	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,2500
93	85,38	608,57	600	-8,57	-1,43	1,43	17,1375
94	86,13	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,2425
95	87,06	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,1300
96	87,86	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,2350
97	88,94	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,3925
98	89,89	604,29	600	-4,29	-0,71	0,71	17,2875
99	90,75	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,3925
100	91,69	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,5725
101	92,47	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,4600
102	93,44	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,3025
103	94,39	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,4150
104	95,17	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,5950
105	96,38	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,4750
106	97,16	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,3175
107	98,13	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,0850
108	99,13	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	16,8300
109	99,88	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	16,9350
110	100,89	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	17,0850
111	101,66	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	16,9650
112	102,64	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	16,8150
113	103,63	596,29	600	3,71	0,62	0,62	16,6050
114	104,38	608,57	600	-8,57	-1,43	1,43	16,3650
115	105,33	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	16,4550
116	106,09	612,57	600	-12,57	-2,10	2,10	16,6200
117	107,06	620,86	600	-20,86	-3,48	3,48	16,5150
118	107,83	608,43	600	-8,43	-1,40	1,40	16,6275
119	108,80	608,43	600	-8,43	-1,40	1,40	16,5375
120	109,77	604,29	600	-4,29	-0,71	0,71	16,6350
121	110,55	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	16,5450
122	111,52	608,57	600	-8,57	-1,43	1,43	16,6350
123	112,28	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	16,8000
124	113,22	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	16,7025
125	114,34	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	16,7925
126	115,08	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	16,6725
127	116,05	596,29	600	3,71	0,62	0,62	16,7775
128	116,83	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	16,6875
129	117,81	612,57	600	-12,57	-2,10	2,10	16,7850
130	118,77	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	16,9575
131	119,53	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	16,8600
132	120,52	596,14	600	3,86	0,64	0,64	16,9425
133	121,25	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	16,8300
134	122,22	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	16,9275
135	122,98	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,1000
136	123,98	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,0025
137	124,98	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,1075
138	125,70	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,0100
139	126,78	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	16,8600

140	127,55	596,43	600	3,57	0,60	0,60	16,9575
141	128,50	596,43	600	3,57	0,60	0,60	16,8900
142	129,47	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	16,7475
143	130,27	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	16,8450
144	131,23	612,57	600	-12,57	-2,10	2,10	17,0025
145	132,00	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	16,9050
146	132,98	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	16,7550
147	133,73	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	16,8675
148	134,70	600,29	600	-0,29	-0,05	0,05	17,0250
149	135,69	596,43	600	3,57	0,60	0,60	16,9350
150	136,42	596,43	600	3,57	0,60	0,60	16,7625
151	137,42	600,29	600	-0,29	-0,05	0,05	16,5675
152	138,20	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	16,6800
153	139,38	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	16,8450
154	140,45	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	16,7475
155	141,25	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	16,8300
156	142,31	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	16,9800
157	143,06	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,1975
158	144,13	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,1000
159	145,19	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,1975
160	145,97	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,3850
161	147,08	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,2725
162	148,14	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	17,1075
163	148,89	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,2350
164	150,06	608,43	600	-8,43	-1,40	1,40	17,1375
165	150,83	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,2275
166	152,03	612,57	600	-12,57	-2,10	2,10	17,1225
167	153,11	608,57	600	-8,57	-1,43	1,43	17,2050
168	153,86	608,57	600	-8,57	-1,43	1,43	17,3625
169	154,92	604,29	600	-4,29	-0,71	0,71	17,5725
170	155,78	600,29	600	-0,29	-0,05	0,05	17,7225
171	156,86	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,6250
172	157,94	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,7150
173	158,70	592,29	600	7,71	1,29	1,29	17,6325
174	159,80	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,4675
175	160,53	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,5650
176	161,70	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,7225
177	162,66	592,14	600	7,86	1,31	1,31	17,6250
178	163,44	600,00	600	0,00	0,00	0,00	17,4525
179	164,53	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,5575
180	165,30	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,7000
181	166,39	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,6025
182	167,47	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,6925
183	168,23	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,5950
184	169,31	600,29	600	-0,29	-0,05	0,05	17,4375
185	170,41	600,29	600	-0,29	-0,05	0,05	17,5500
186	171,14	592,14	600	7,86	1,31	1,31	17,6175
187	172,22	600,29	600	-0,29	-0,05	0,05	17,5425
188	172,98	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,6550
189	173,95	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,7975
190	175,08	588,29	600	11,71	1,95	1,95	17,7000
191	175,92	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,5350
192	177,00	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,6325
193	178,23	588,29	600	11,71	1,95	1,95	17,5200
194	179,05	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,3475
195	180,27	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,4525
196	181,33	592,14	600	7,86	1,31	1,31	17,6250
197	182,09	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,5050
198	183,14	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,5875

199	183,89	596,29	600	3,71	0,62	0,62	17,4900
200	185,09	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,3325
201	186,31	604,57	601	-3,57	-0,59	0,59	17,4600
202	187,17	592,00	606	14,00	2,31	2,31	17,6475
203	188,22	596,43	612	15,57	2,54	2,54	17,5650
204	189,34	596,43	618	21,57	3,49	3,49	17,4150
205	190,09	596,29	621	24,71	3,98	3,98	17,2200
206	191,17	600,43	627	26,57	4,24	4,24	16,9725
207	191,92	600,43	630	29,57	4,69	4,69	16,7100
208	193,03	608,43	630	21,57	3,42	3,42	16,4250
209	194,20	608,57	630	21,43	3,40	3,40	16,1100
210	194,95	616,71	630	13,29	2,11	2,11	15,8550
211	196,05	620,71	630	9,29	1,47	1,47	15,9525
212	197,13	620,71	630	9,29	1,47	1,47	16,1100
213	197,89	608,57	630	21,43	3,40	3,40	15,9750
214	198,97	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,7950
215	199,75	620,71	630	9,29	1,47	1,47	15,9000
216	200,84	624,86	630	5,14	0,82	0,82	15,7950
217	201,78	624,86	630	5,14	0,82	0,82	15,8475
218	202,55	620,71	630	9,29	1,47	1,47	15,7425
219	203,61	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,5925
220	204,36	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,7050
221	205,34	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,6075
222	206,11	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,4575
223	207,19	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,2400
224	208,25	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,0300
225	209,02	645,43	630	-15,43	-2,45	2,45	15,1425
226	210,22	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	15,3075
227	211,33	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	15,2100
228	212,08	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	15,3150
229	213,06	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,4800
230	213,81	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	15,6825
231	214,88	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,9300
232	215,63	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,8100
233	216,69	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,6450
234	217,64	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,6750
235	218,39	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,8400
236	219,39	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,7425
237	220,13	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,7800
238	221,22	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,6900
239	222,47	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	15,5400
240	223,33	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,6375
241	224,41	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,7800
242	225,47	645,57	630	-15,57	-2,47	2,47	15,7275
243	226,27	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,8250
244	227,36	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	15,7125
245	228,11	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,8175
246	229,19	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,7125
247	230,23	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,8175
248	230,98	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,9975
249	232,06	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,9000
250	232,83	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,7275
251	233,91	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,8475
252	234,95	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0050
253	235,70	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,9075
254	236,78	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,7500
255	237,55	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,5550
256	238,61	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,6750
257	239,80	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,8400

258	240,55	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,0425
259	241,52	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,9450
260	242,28	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,7725
261	243,38	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,5775
262	244,44	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,3900
263	245,23	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,4800
264	246,31	645,43	630	-15,43	-2,45	2,45	15,6450
265	247,06	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,8400
266	248,13	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,7200
267	249,09	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,8025
268	249,88	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,6900
269	250,86	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,7950
270	251,59	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,7050
271	252,78	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,8100
272	253,88	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,7125
273	254,64	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,8100
274	255,70	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,7125
275	256,77	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	15,8175
276	257,52	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,9825
277	258,58	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,8850
278	259,34	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,9675
279	260,41	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,1250
280	261,47	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0275
281	262,23	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,8700
282	263,31	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,9675
283	264,41	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,1325
284	265,17	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0275
285	266,16	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	15,8775
286	266,89	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,9750
287	267,95	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1250
288	268,72	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3050
289	269,92	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5150
290	271,00	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4175
291	271,77	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2750
292	272,84	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,0650
293	273,89	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,1775
294	274,69	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,0500
295	275,78	629,00	625	-4,00	-0,64	0,64	16,1250
296	276,55	637,29	620	-17,29	-2,79	2,79	16,2900
297	277,63	633,14	614	-19,14	-3,12	3,12	16,5000
298	278,72	629,00	609	-20,00	-3,28	3,28	16,7475
299	280,14	616,57	601	-15,57	-2,59	2,59	17,0550
300	281,23	620,71	596	-24,71	-4,15	4,15	17,4000
301	282,31	616,71	590	-26,71	-4,53	4,53	17,6850
302	283,38	608,43	585	-23,43	-4,00	4,00	17,9325
303	284,27	596,29	580	-16,29	-2,81	2,81	18,2175
304	285,55	596,43	575	-21,43	-3,73	3,73	18,5100
305	286,63	584,14	571	-13,14	-2,30	2,30	18,8025
306	287,34	592,29	570	-22,29	-3,91	3,91	18,7200
307	288,41	584,00	570	-14,00	-2,46	2,46	18,8325
308	289,17	588,14	570	-18,14	-3,18	3,18	18,9750
309	290,25	584,14	570	-14,14	-2,48	2,48	19,1850
310	291,22	580,14	570	-10,14	-1,78	1,78	19,0725
311	291,98	580,14	570	-10,14	-1,78	1,78	19,1850
312	292,95	584,14	570	-14,14	-2,48	2,48	19,3350
313	293,72	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,5375
314	294,78	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	19,4250
315	295,89	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5225
316	296,66	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4250

317	297,70	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	19,5300
318	298,48	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6950
319	299,44	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	19,5975
320	300,19	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6875
321	301,25	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5825
322	302,20	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6725
323	303,00	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,8375
324	304,16	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,0175
325	304,92	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8975
326	306,00	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,0025
327	307,05	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,1375
328	307,81	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,3475
329	309,02	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,6325
330	309,77	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,5125
331	310,84	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,3400
332	311,92	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,1525
333	312,67	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,8975
334	313,77	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6200
335	314,53	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,7325
336	315,61	560,00	570	10,00	1,75	1,75	19,6350
337	316,67	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4775
338	317,42	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,5975
339	318,48	552,00	570	18,00	3,16	3,16	19,4925
340	319,58	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,3350
341	320,39	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4475
342	321,34	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,6125
343	322,11	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5150
344	323,30	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6125
345	324,44	560,00	570	10,00	1,75	1,75	19,5900
346	325,17	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4850
347	326,17	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5975
348	326,94	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,4850
349	328,02	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,3125
350	329,16	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,4025
351	329,92	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,2750
352	331,03	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,3725
353	332,09	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,2600
354	332,84	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,3725
355	333,95	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5075
356	335,03	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,3950
357	335,81	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5225
358	336,91	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6800
359	337,66	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8975
360	338,80	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,1375
361	339,88	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,3700
362	340,63	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,5875
363	341,72	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,5050
364	342,80	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,3400
365	343,63	559,71	570	10,29	1,80	1,80	20,1225
366	344,69	559,71	570	10,29	1,80	1,80	19,8675
367	345,45	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,6500
368	346,44	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,7175
369	347,55	563,71	570	6,29	1,10	1,10	19,6200
370	348,42	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,4550
371	349,59	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,2450
372	350,69	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	18,9975
373	351,42	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,0950
374	352,39	564,00	570	6,00	1,05	1,05	18,9975
375	353,16	568,00	570	2,00	0,35	0,35	18,8400

376	354,31	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	18,9300
377	355,48	560,00	570	10,00	1,75	1,75	19,0875
378	356,23	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	18,9825
379	357,22	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,0950
380	358,00	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	18,9900
381	358,97	580,14	570	-10,14	-1,78	1,78	19,1025
382	360,06	584,00	570	-14,00	-2,46	2,46	19,2450
383	360,84	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,1175
384	361,81	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	18,9600
385	362,56	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,0500
386	363,64	584,14	570	-14,14	-2,48	2,48	19,2000
387	364,73	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,4175
388	365,45	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	19,2975
389	366,55	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,3950
390	367,30	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5525
391	368,27	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4550
392	369,36	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5525
393	370,11	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,7025
394	371,20	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,9125
395	371,94	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,1675
396	373,00	568,00	570	2,00	0,35	0,35	20,4225
397	373,97	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,3250
398	374,77	559,71	570	10,29	1,80	1,80	20,1600
399	375,83	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,9500
400	376,56	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,0475
401	377,73	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,9500
402	378,72	560,00	570	10,00	1,75	1,75	20,0550
403	379,47	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,9575
404	380,53	560,00	570	10,00	1,75	1,75	20,0775
405	381,31	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,9875
406	382,52	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,1000
407	383,61	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,0100
408	384,47	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,1150
409	385,47	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,0100
410	386,55	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,1300
411	387,42	559,71	570	10,29	1,80	1,80	20,2800
412	388,48	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,1825
413	389,25	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,2500
414	390,30	563,71	570	6,29	1,10	1,10	20,4000
415	391,28	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,2950
416	392,17	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,1525
417	393,23	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,9575
418	394,00	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,7025
419	395,20	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4550
420	396,28	556,00	570	14,00	2,46	2,46	19,5600
421	397,03	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4550
422	398,11	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,5600
423	399,20	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4625
424	400,05	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,5525
425	401,11	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4175
426	402,17	559,71	570	10,29	1,80	1,80	19,5225
427	403,03	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,4100
428	404,34	551,71	570	18,29	3,21	3,21	19,5150
429	405,33	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4250
430	406,08	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5375
431	407,14	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,6950
432	407,88	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5900
433	408,84	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6725
434	409,81	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8225

435	410,66	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,0100
436	411,75	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,2350
437	412,61	568,00	570	2,00	0,35	0,35	20,1450
438	413,56	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,2275
439	414,55	568,00	570	2,00	0,35	0,35	20,1300
440	415,28	568,00	570	2,00	0,35	0,35	20,2275
441	416,27	568,00	570	2,00	0,35	0,35	20,1525
442	417,03	559,71	570	10,29	1,80	1,80	20,0100
443	418,03	560,00	570	10,00	1,75	1,75	19,8075
444	418,91	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,5825
445	419,89	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6650
446	420,84	556,00	570	14,00	2,46	2,46	19,7925
447	421,59	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,7250
448	422,56	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8075
449	423,31	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,9500
450	424,30	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8600
451	425,27	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,9575
452	426,02	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8825
453	426,95	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,9725
454	427,70	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,8750
455	428,67	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,7325
456	429,41	559,71	570	10,29	1,80	1,80	19,8225
457	430,38	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,7325
458	431,34	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,8225
459	432,20	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,9575
460	433,16	559,71	570	10,29	1,80	1,80	19,8750
461	433,92	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,7475
462	434,91	559,71	570	10,29	1,80	1,80	19,8075
463	435,86	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,7175
464	436,63	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,8000
465	437,59	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,7250
466	438,34	563,71	570	6,29	1,10	1,10	19,8300
467	439,44	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,7250
468	440,44	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,8150
469	441,20	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,7250
470	442,25	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8225
471	443,02	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,8000
472	443,97	556,00	570	14,00	2,46	2,46	19,7100
473	444,70	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5675
474	445,78	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6425
475	446,75	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5525
476	447,52	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,6350
477	448,48	560,00	570	10,00	1,75	1,75	19,5450
478	449,23	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4100
479	450,19	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4925
480	450,94	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,3950
481	451,98	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4850
482	452,94	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6125
483	453,70	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8000
484	454,77	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,0325
485	455,48	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,2875
486	456,59	559,71	570	10,29	1,80	1,80	20,2050
487	457,64	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,0700
488	458,39	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,1375
489	459,44	560,00	570	10,00	1,75	1,75	20,0400
490	460,17	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,8975
491	461,14	563,71	570	6,29	1,10	1,10	19,9725
492	462,22	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,8750
493	462,97	559,71	570	10,29	1,80	1,80	19,7400

494	464,00	559,71	570	10,29	1,80	1,80	19,5600
495	464,73	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,3200
496	465,70	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,3725
497	466,45	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,2750
498	467,52	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,3650
499	468,48	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,3200
500	469,25	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4175
501	470,31	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,5600
502	471,08	556,00	570	14,00	2,46	2,46	19,7400
503	472,14	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6425
504	473,11	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,7100
505	473,86	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6275
506	474,92	559,71	570	10,29	1,80	1,80	19,7100
507	475,67	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,6125
508	476,73	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,7025
509	477,78	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6125
510	478,53	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,7025
511	479,52	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8375
512	480,27	556,00	570	14,00	2,46	2,46	20,0325
513	481,31	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,9500
514	482,39	563,71	570	6,29	1,10	1,10	20,0325
515	483,14	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,9500
516	484,09	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,0475
517	484,83	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,9575
518	485,80	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,0400
519	486,88	563,71	570	6,29	1,10	1,10	19,9500
520	487,64	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8075
521	488,72	560,00	570	10,00	1,75	1,75	19,8900
522	489,58	559,71	570	10,29	1,80	1,80	19,8075
523	490,63	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6800
524	491,72	564,00	576	12,00	2,08	2,08	19,7550
525	492,47	568,00	580	12,00	2,07	2,07	19,6575
526	493,53	560,00	580	20,00	3,45	3,45	19,5225
527	494,30	572,00	580	8,00	1,38	1,38	19,3350
528	495,39	572,00	580	8,00	1,38	1,38	19,4100
529	496,36	572,00	580	8,00	1,38	1,38	19,3200
530	497,09	572,00	580	8,00	1,38	1,38	19,1775
531	498,05	576,00	580	4,00	0,69	0,69	18,9975
532	498,80	572,00	580	8,00	1,38	1,38	18,8850
533	499,98	584,14	580	-4,14	-0,71	0,71	18,6900
534	501,06	580,00	580	0,00	0,00	0,00	18,7800
535	501,80	580,14	580	-0,14	-0,02	0,02	18,6900
536	502,75	580,14	580	-0,14	-0,02	0,02	18,7350
537	503,52	580,00	580	0,00	0,00	0,00	18,7650
538	504,47	576,00	580	4,00	0,69	0,69	18,7200
539	505,20	588,29	580	-8,29	-1,43	1,43	18,5700
540	506,28	580,14	580	-0,14	-0,02	0,02	18,6525
541	507,23	596,43	580	-16,43	-2,83	2,83	18,5700
542	507,97	584,00	580	-4,00	-0,69	0,69	18,6600
543	508,94	580,14	580	-0,14	-0,02	0,02	18,5775
544	509,72	588,14	580	-8,14	-1,40	1,40	18,6450
545	510,78	588,14	580	-8,14	-1,40	1,40	18,7875
546	511,52	588,29	580	-8,29	-1,43	1,43	18,6975
547	512,59	588,14	580	-8,14	-1,40	1,40	18,7950
548	513,64	588,00	580	-8,00	-1,38	1,38	18,9450
549	514,36	580,14	580	-0,14	-0,02	0,02	19,1325
550	515,33	588,00	580	-8,00	-1,38	1,38	19,0650
551	516,09	580,00	580	0,00	0,00	0,00	19,1625
552	517,31	576,00	580	4,00	0,69	0,69	19,0725

553	518,25	576,00	580	4,00	0,69	0,69	18,9600
554	519,00	580,14	580	-0,14	-0,02	0,02	18,7650
555	520,08	580,14	580	-0,14	-0,02	0,02	18,8475
556	520,83	588,14	580	-8,14	-1,40	1,40	18,7800
557	521,81	580,00	580	0,00	0,00	0,00	18,8700
558	522,86	592,29	580	-12,29	-2,12	2,12	18,7875
559	523,61	580,14	580	-0,14	-0,02	0,02	18,8700
560	524,67	580,00	580	0,00	0,00	0,00	18,7800
561	525,42	580,00	580	0,00	0,00	0,00	18,8700
562	526,38	584,14	580	-4,14	-0,71	0,71	18,8625
563	527,13	584,00	580	-4,00	-0,69	0,69	18,9525
564	528,19	580,00	580	0,00	0,00	0,00	19,0875
565	529,23	584,00	580	-4,00	-0,69	0,69	19,0125
566	529,98	576,00	580	4,00	0,69	0,69	19,0950
567	531,03	572,00	580	8,00	1,38	1,38	18,9975
568	531,77	580,00	580	0,00	0,00	0,00	18,8550
569	532,72	580,00	581	1,00	0,17	0,17	18,9300
570	533,47	580,00	587	7,00	1,19	1,19	18,8475
571	534,66	576,00	594	18,00	3,03	3,03	18,7200
572	535,69	588,14	600	11,86	1,98	1,98	18,5250
573	536,42	584,00	604	20,00	3,31	3,31	18,2850
574	537,61	588,00	609	21,00	3,45	3,45	18,0000
575	538,67	596,29	614	17,71	2,89	2,89	17,7375
576	539,75	608,43	615	6,57	1,07	1,07	17,4300
577	540,83	604,57	615	10,43	1,70	1,70	17,5125
578	541,91	596,43	615	18,57	3,02	3,02	17,4300
579	542,64	604,29	615	10,71	1,74	1,74	17,3025
580	543,64	600,43	615	14,57	2,37	2,37	17,3775
581	544,38	604,43	615	10,57	1,72	1,72	17,2875
582	545,42	604,43	615	10,57	1,72	1,72	17,1525
583	546,50	600,43	615	14,57	2,37	2,37	16,9725
584	547,25	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,7325
585	548,17	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,8075
586	548,94	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,7175
587	550,00	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,5825
588	550,72	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,6800
589	551,78	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,5975
590	552,88	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,6800
591	553,73	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,8150
592	554,72	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,7400
593	555,78	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,5975
594	556,52	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,6875
595	557,45	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,6050
596	558,20	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,5600
597	559,27	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,6425
598	560,03	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,7850
599	561,08	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,6950
600	562,05	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,7625
601	562,78	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,8975
602	563,75	624,86	615	-9,86	-1,60	1,60	16,8300
603	564,52	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,9200
604	565,45	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,8375
605	566,20	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,9200
606	567,28	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,8375
607	568,38	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,9125
608	569,13	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,8150
609	570,06	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,8900
610	570,81	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	17,0175
611	571,77	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,9275

612	572,52	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,7925
613	573,58	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,8825
614	574,55	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,8000
615	575,30	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,8825
616	576,38	612,57	615	2,43	0,39	0,39	17,0400
617	577,13	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,9500
618	578,20	612,43	615	2,57	0,42	0,42	16,8150
619	579,28	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,6200
620	580,00	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,3800
621	580,95	624,86	615	-9,86	-1,60	1,60	16,4550
622	581,72	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,5900
623	582,78	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,5000
624	583,88	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,5900
625	584,64	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,5075
626	585,69	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,6050
627	586,44	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,7475
628	587,61	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,9275
629	588,58	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,8375
630	589,44	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,9275
631	590,36	624,86	615	-9,86	-1,60	1,60	16,8450
632	591,09	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,9275
633	592,17	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,8450
634	593,14	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,9275
635	593,86	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,8375
636	594,94	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,7175
637	595,67	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,5300
638	596,61	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,5900
639	597,34	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,7325
640	598,44	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,6500
641	599,47	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,5150
642	600,22	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,6050
643	601,27	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,7325
644	602,00	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,9350
645	603,06	612,57	615	2,43	0,39	0,39	17,1600
646	603,80	612,71	615	2,29	0,37	0,37	17,0775
647	604,75	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,9500
648	605,72	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,7700
649	606,47	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,5300
650	607,53	624,86	615	-9,86	-1,60	1,60	16,6275
651	608,30	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,7550
652	609,36	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,6650
653	610,09	624,86	615	-9,86	-1,60	1,60	16,7625
654	611,16	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,8975
655	612,23	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,8150
656	612,97	608,43	615	6,57	1,07	1,07	16,8975
657	613,94	624,86	615	-9,86	-1,60	1,60	16,8225
658	614,70	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,9050
659	615,66	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,8225
660	616,39	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,9050
661	617,48	612,71	615	2,29	0,37	0,37	17,0550
662	618,52	616,57	615	-1,57	-0,26	0,26	16,9725
663	619,27	612,71	615	2,29	0,37	0,37	17,0550
664	620,22	608,57	615	6,43	1,05	1,05	16,9650
665	620,97	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,8225
666	621,91	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,9050
667	622,66	612,71	615	2,29	0,37	0,37	17,0550
668	623,61	608,57	615	6,43	1,05	1,05	16,9725
669	624,69	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,8375
670	625,44	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,9350

671	626,38	612,71	615	2,29	0,37	0,37	17,0625
672	627,14	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,9800
673	628,08	612,71	615	2,29	0,37	0,37	17,0550
674	628,81	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,9650
675	629,91	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,8375
676	630,97	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,9275
677	631,73	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,8375
678	632,78	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,9350
679	633,53	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,8375
680	634,59	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,9200
681	635,34	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,8375
682	636,41	608,57	615	6,43	1,05	1,05	16,6950
683	637,47	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,5225
684	638,23	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,6125
685	639,20	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,5150
686	639,94	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,6200
687	641,13	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,7700
688	642,19	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,9575
689	642,91	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,8600
690	643,97	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,7250
691	644,73	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,5300
692	645,81	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,6125
693	646,73	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,5375
694	647,48	624,86	615	-9,86	-1,60	1,60	16,6275
695	648,55	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,7550
696	649,30	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,6575
697	650,39	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,7625
698	651,33	624,86	615	-9,86	-1,60	1,60	16,6800
699	652,08	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,7775
700	653,03	624,86	615	-9,86	-1,60	1,60	16,7175
701	653,78	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,8075
702	654,86	608,57	615	6,43	1,05	1,05	16,7250
703	655,61	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,5900
704	656,66	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,6725
705	657,63	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,8075
706	658,38	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	17,0025
707	659,44	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,9125
708	660,19	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,7700
709	661,14	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,8450
710	662,20	612,71	615	2,29	0,37	0,37	16,9800
711	662,94	608,43	615	6,57	1,07	1,07	16,8900
712	664,02	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,7550
713	664,75	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,8375
714	665,70	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,9650
715	666,45	612,71	615	2,29	0,37	0,37	17,1450
716	667,53	612,71	615	2,29	0,37	0,37	17,0625
717	668,50	612,43	615	2,57	0,42	0,42	17,0325
718	669,23	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,9350
719	670,30	612,71	615	2,29	0,37	0,37	17,0175
720	671,06	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,9350
721	672,00	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,8000
722	672,77	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	16,8900
723	673,83	612,57	615	2,43	0,39	0,39	16,8075
724	674,91	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	16,6650
725	675,64	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,7475
726	676,59	620,71	615	-5,71	-0,93	0,93	16,8750
727	677,33	620,86	615	-5,86	-0,95	0,95	17,0700
728	678,42	616,71	615	-1,71	-0,28	0,28	17,3100
729	679,48	612,71	613	0,29	0,05	0,05	17,2200

730	680,34	616,71	608	-8,71	-1,43	1,43	17,0775
731	681,38	616,71	602	-14,71	-2,44	2,44	17,1825
732	682,11	616,71	598	-18,71	-3,13	3,13	17,3325
733	683,19	612,43	593	-19,43	-3,28	3,28	17,5350
734	684,27	616,71	588	-28,71	-4,88	4,88	17,7825
735	685,00	612,71	584	-28,71	-4,92	4,92	18,0300
736	686,30	600,43	578	-22,43	-3,88	3,88	18,3375
737	687,02	604,57	578	-26,57	-4,60	4,60	18,6000
738	688,09	596,43	578	-18,43	-3,19	3,19	18,8850
739	689,06	588,29	578	-10,29	-1,78	1,78	18,8025
740	689,81	592,29	578	-14,29	-2,47	2,47	18,6675
741	690,86	588,29	578	-10,29	-1,78	1,78	18,7575
742	691,59	596,43	581	-15,43	-2,66	2,66	18,8925
743	692,55	584,00	586	2,00	0,34	0,34	19,0875
744	693,30	588,29	590	1,71	0,29	0,29	18,9975
745	694,39	588,14	596	7,86	1,32	1,32	19,0275
746	695,44	588,29	602	13,71	2,28	2,28	18,9525
747	696,17	588,14	606	17,86	2,95	2,95	18,8250
748	697,17	588,29	612	23,71	3,87	3,87	18,6375
749	698,00	596,43	617	20,57	3,33	3,33	18,3900
750	699,06	596,29	621	24,71	3,98	3,98	18,1200
751	700,22	604,43	627	22,57	3,60	3,60	17,8575
752	701,19	600,43	630	29,57	4,69	4,69	17,5500
753	702,25	604,43	630	25,57	4,06	4,06	17,2650
754	703,42	608,43	630	21,57	3,42	3,42	17,0100
755	704,19	612,71	630	17,29	2,74	2,74	16,7325
756	705,27	616,71	630	13,29	2,11	2,11	16,4700
757	706,31	620,86	630	9,14	1,45	1,45	16,2000
758	707,17	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,8925
759	708,14	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,9750
760	708,88	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,8850
761	709,94	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,7575
762	711,02	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,5850
763	711,75	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	15,6675
764	712,83	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,7950
765	713,59	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,7050
766	714,70	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,7950
767	715,77	645,43	630	-15,43	-2,45	2,45	15,7200
768	716,52	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,8025
769	717,48	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	15,7125
770	718,20	645,43	630	-15,43	-2,45	2,45	15,8025
771	719,16	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	15,9525
772	720,22	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,8775
773	721,00	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,9675
774	722,08	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,1025
775	722,83	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,2975
776	723,78	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2225
777	724,84	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0875
778	725,59	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,8925
779	726,53	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,9750
780	727,28	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,8925
781	728,23	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,9600
782	728,97	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,8700
783	729,95	645,43	630	-15,43	-2,45	2,45	15,9525
784	730,73	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,0875
785	731,80	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,0050
786	732,84	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,0800
787	733,59	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,9975
788	734,55	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,0650

789	735,33	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2000
790	736,38	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,1100
791	737,45	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1850
792	738,20	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,0875
793	739,27	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,1850
794	740,02	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3275
795	741,08	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2450
796	742,13	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3275
797	742,88	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4625
798	743,83	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3800
799	744,59	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4625
800	745,67	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3650
801	746,63	624,86	630	5,14	0,82	0,82	16,4550
802	747,38	620,71	630	9,29	1,47	1,47	16,3800
803	748,34	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2450
804	749,08	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3275
805	750,05	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2375
806	750,81	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0875
807	751,89	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,8925
808	752,84	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	15,9675
809	753,59	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	16,1100
810	754,55	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0200
811	755,31	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,8850
812	756,28	645,43	630	-15,43	-2,45	2,45	15,9675
813	757,03	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,1175
814	758,00	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,0425
815	758,95	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1325
816	759,70	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,0500
817	760,75	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,1400
818	761,50	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,0575
819	762,47	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,1550
820	763,20	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0575
821	764,16	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,9450
822	764,91	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,0275
823	765,95	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,1775
824	767,03	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3650
825	767,77	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2825
826	768,75	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3650
827	769,52	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2900
828	770,58	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3800
829	771,64	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2975
830	772,39	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3800
831	773,44	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5150
832	774,19	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4325
833	775,31	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3050
834	776,38	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,1250
835	777,14	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,9750
836	778,19	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,0650
837	779,30	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2075
838	780,02	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,1250
839	780,97	645,43	630	-15,43	-2,45	2,45	16,2150
840	781,70	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3575
841	782,80	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2750
842	783,95	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1325
843	784,69	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,2225
844	785,77	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	16,3500
845	786,50	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,2600
846	787,58	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,1250
847	788,53	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	16,2000

848	789,30	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3350
849	790,38	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2525
850	791,13	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1100
851	792,19	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1850
852	793,25	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3200
853	794,02	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,5150
854	794,95	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4325
855	795,72	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,2825
856	796,77	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3575
857	797,52	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2600
858	798,58	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3500
859	799,52	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5000
860	800,28	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,4100
861	801,20	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,4925
862	801,94	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,6350
863	803,02	624,86	630	5,14	0,82	0,82	16,8225
864	803,77	624,86	630	5,14	0,82	0,82	16,7325
865	804,81	616,57	630	13,43	2,13	2,13	16,5900
866	805,89	620,71	630	9,29	1,47	1,47	16,3875
867	806,63	624,86	630	5,14	0,82	0,82	16,1475
868	807,61	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2525
869	808,38	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3875
870	809,44	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3050
871	810,50	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,1700
872	811,23	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,9825
873	812,30	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	15,7500
874	813,05	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,8400
875	814,11	645,57	630	-15,57	-2,47	2,47	15,9825
876	815,20	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1700
877	815,94	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,0875
878	816,89	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1700
879	817,63	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3125
880	818,70	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,5000
881	819,78	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,7400
882	820,53	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6650
883	821,63	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,5225
884	822,39	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6125
885	823,58	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5150
886	824,75	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5375
887	826,05	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4625
888	826,91	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3425
889	828,06	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,1775
890	829,25	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,0125
891	830,05	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,0875
892	831,23	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2375
893	832,30	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,1475
894	833,06	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,2375
895	834,09	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3725
896	834,89	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,5600
897	835,95	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4625
898	836,91	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3275
899	837,66	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,1550
900	838,72	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2450
901	839,50	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	16,1625
902	840,61	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,2675
903	841,67	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	16,4100
904	842,44	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,6050
905	843,39	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,5150
906	844,14	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,5750

907	845,09	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,7100
908	845,84	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6050
909	846,91	620,71	630	9,29	1,47	1,47	16,4775
910	847,91	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2975
911	848,64	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3875
912	849,61	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2975
913	850,38	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1475
914	851,34	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,2150
915	852,42	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3575
916	853,19	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2750
917	854,25	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1475
918	855,02	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,2375
919	855,97	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3725
920	857,03	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2750
921	857,77	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,1325
922	858,83	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2150
923	859,59	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,1250
924	860,56	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2225
925	861,77	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1175
926	862,53	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,2075
927	863,59	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,3350
928	864,34	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	16,2375
929	865,41	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,3275
930	866,52	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,4700
931	867,28	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,3800
932	868,22	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,4700
933	868,98	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6125
934	869,97	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5225
935	870,72	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6200
936	871,81	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5375
937	872,77	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,4250
938	873,52	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5150
939	874,50	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,4475
940	875,23	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5450
941	876,22	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4475
942	876,97	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4925
943	878,05	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4250
944	879,05	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2900
945	879,80	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,1250
946	880,91	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,9450
947	881,91	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,0425
948	882,67	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,1850
949	883,72	645,29	630	-15,29	-2,43	2,43	16,3650
950	884,47	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,2825
951	885,53	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,1325
952	886,52	645,29	630	-15,29	-2,43	2,43	16,2375
953	887,27	645,43	630	-15,43	-2,45	2,45	16,3725
954	888,33	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,2825
955	889,09	645,43	630	-15,43	-2,45	2,45	16,1625
956	890,19	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,2525
957	891,27	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,3800
958	892,02	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,5900
959	892,97	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,7850
960	893,75	629,00	630	1,00	0,16	0,16	17,0175
961	894,70	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,9275
962	895,50	629,00	630	1,00	0,16	0,16	17,0025
963	896,59	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,9125
964	897,55	620,71	630	9,29	1,47	1,47	16,7775
965	898,27	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5675

966	899,25	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6650
967	900,03	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,5675
968	900,97	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6575
969	902,03	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5600
970	902,80	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4625
971	903,77	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2900
972	904,52	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3875
973	905,45	645,29	630	-15,29	-2,43	2,43	16,5225
974	906,23	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4400
975	907,33	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3050
976	908,30	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3950
977	909,08	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,3125
978	910,03	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3950
979	910,83	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,5450
980	911,89	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,7550
981	912,66	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,6575
982	913,73	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,7400
983	914,78	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6575
984	915,53	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5300
985	916,61	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3575
986	917,72	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,4550
987	918,61	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,5975
988	919,67	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,7850
989	920,44	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,6950
990	921,41	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,7700
991	922,61	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6725
992	923,36	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5675
993	924,53	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4025
994	925,53	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	16,2075
995	926,27	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,2900
996	927,34	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,4250
997	928,09	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,5900
998	929,06	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,8300
999	929,81	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,7400
1000	930,75	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6275
1001	931,88	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4400
1002	932,61	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2675
1003	933,67	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3575
1004	934,42	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,2600
1005	935,39	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,3575
1006	936,14	645,29	630	-15,29	-2,43	2,43	16,5000
1007	937,22	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,6950
1008	938,19	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,5975
1009	938,92	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4475
1010	940,05	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,2675
1011	940,81	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3575
1012	941,89	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,5000
1013	942,95	645,57	630	-15,57	-2,47	2,47	16,7025
1014	943,72	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,9425
1015	944,78	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,8600
1016	945,77	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,9500
1017	946,52	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,8750
1018	947,61	620,71	630	9,29	1,47	1,47	16,7550
1019	948,38	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5525
1020	949,36	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6500
1021	950,45	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,5525
1022	951,31	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6275
1023	952,36	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5375
1024	953,13	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,5975

1025	954,22	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,7325
1026	955,28	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,6425
1027	956,03	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,7400
1028	957,02	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6500
1029	958,09	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,7475
1030	958,83	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6725
1031	959,91	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5375
1032	960,67	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3350
1033	961,67	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,4250
1034	962,75	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3425
1035	963,50	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2150
1036	964,47	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,3125
1037	965,25	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,4550
1038	966,23	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3575
1039	967,30	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,4475
1040	968,06	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,5975
1041	969,03	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,5000
1042	969,81	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,5975
1043	970,88	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,7325
1044	972,00	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,9200
1045	972,75	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,8225
1046	973,84	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6800
1047	974,63	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5075
1048	975,66	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,2900
1049	976,61	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,3800
1050	977,39	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,5150
1051	978,34	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,4175
1052	979,11	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,5150
1053	980,19	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,6425
1054	980,92	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,7850
1055	981,91	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,7100
1056	982,88	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,7550
1057	983,61	616,57	630	13,43	2,13	2,13	16,7025
1058	984,66	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5675
1059	985,44	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6500
1060	986,41	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,5675
1061	987,19	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4175
1062	988,28	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2150
1063	989,33	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3050
1064	990,09	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2150
1065	991,08	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2975
1066	991,80	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,2000
1067	992,78	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,2825
1068	993,78	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,4250
1069	994,52	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3350
1070	995,52	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4325
1071	996,25	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3275
1072	997,38	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,1775
1073	998,50	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,9975
1074	999,33	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,0800
1075	1000,39	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,9900
1076	1001,17	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,0875
1077	1002,33	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,0050
1078	1003,30	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1025
1079	1004,08	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,0050
1080	1005,16	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,1100
1081	1005,91	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,2450
1082	1006,88	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	16,1625
1083	1007,92	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2600

1084	1008,67	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,1700
1085	1009,75	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2525
1086	1010,84	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,1625
1087	1011,59	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,2525
1088	1012,67	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3950
1089	1013,44	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3050
1090	1014,52	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3950
1091	1015,58	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,3050
1092	1016,34	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3950
1093	1017,33	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2900
1094	1018,08	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3725
1095	1019,30	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2675
1096	1020,23	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3500
1097	1020,98	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,4925
1098	1022,17	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6950
1099	1023,25	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,6050
1100	1024,03	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,4625
1101	1025,13	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2600
1102	1025,86	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,0650
1103	1026,83	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,1475
1104	1027,78	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2900
1105	1028,56	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,2000
1106	1029,48	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	16,2900
1107	1030,36	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,4175
1108	1031,33	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,3350
1109	1032,30	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,1925
1110	1033,03	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0575
1111	1034,02	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,8700
1112	1034,72	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	15,9600
1113	1035,70	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0875
1114	1036,45	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,9825
1115	1037,44	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,0725
1116	1038,53	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	16,2150
1117	1039,39	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,3950
1118	1040,36	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,2975
1119	1041,36	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,1625
1120	1042,09	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0350
1121	1043,05	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,8550
1122	1043,80	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,9525
1123	1044,75	645,29	630	-15,29	-2,43	2,43	16,0950
1124	1045,50	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,0200
1125	1046,53	629,00	630	1,00	0,16	0,16	15,8775
1126	1047,50	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	15,6900
1127	1048,44	641,43	630	-11,43	-1,81	1,81	15,7650
1128	1049,52	641,29	630	-11,29	-1,79	1,79	15,9000
1129	1050,27	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	16,0950
1130	1051,34	637,14	630	-7,14	-1,13	1,13	15,9900
1131	1052,41	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0725
1132	1053,14	633,14	630	-3,14	-0,50	0,50	15,9825
1133	1054,09	629,00	630	1,00	0,16	0,16	16,0800
1134	1054,88	637,29	630	-7,29	-1,16	1,16	15,9975
1135	1055,92	629,00	624	-5,00	-0,80	0,80	16,0875
1136	1056,86	645,43	619	-26,43	-4,27	4,27	16,2075
1137	1057,64	629,00	614	-15,00	-2,44	2,44	16,3950
1138	1058,59	629,00	609	-20,00	-3,28	3,28	16,3200
1139	1059,33	629,00	605	-24,00	-3,97	3,97	16,4175
1140	1060,41	629,00	600	-29,00	-4,83	4,83	16,5375
1141	1061,16	620,71	596	-24,71	-4,15	4,15	16,7250
1142	1062,20	619,00	591	-28,00	-4,74	4,74	16,9575

1143	1062,94	615,00	587	-28,00	-4,77	4,77	17,2200
1144	1064,00	610,00	581	-29,00	-4,99	4,99	17,4825
1145	1065,06	601,00	576	-25,00	-4,34	4,34	17,7450
1146	1065,83	600,43	573	-27,43	-4,79	4,79	18,0075
1147	1066,98	599,00	571	-28,00	-4,90	4,90	18,3150
1148	1068,05	596,43	570	-26,43	-4,64	4,64	18,5775
1149	1068,78	596,43	570	-26,43	-4,64	4,64	18,8400
1150	1070,06	592,00	570	-22,00	-3,86	3,86	19,1400
1151	1071,23	588,00	570	-18,00	-3,16	3,16	19,4400
1152	1072,34	584,00	570	-14,00	-2,46	2,46	19,8150
1153	1073,39	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	20,0775
1154	1074,34	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,9875
1155	1075,08	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8375
1156	1076,03	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,9125
1157	1076,77	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,0625
1158	1077,75	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,2500
1159	1078,48	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,4900
1160	1079,42	551,43	570	18,57	3,26	3,26	20,7300
1161	1080,16	559,71	570	10,29	1,80	1,80	20,6325
1162	1081,22	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,7225
1163	1082,19	568,00	570	2,00	0,35	0,35	20,8650
1164	1082,94	563,71	570	6,29	1,10	1,10	20,7675
1165	1083,88	555,71	570	14,29	2,51	2,51	20,6400
1166	1084,61	559,71	570	10,29	1,80	1,80	20,4675
1167	1085,67	559,71	570	10,29	1,80	1,80	20,2275
1168	1086,53	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,9575
1169	1087,61	563,71	570	6,29	1,10	1,10	20,0325
1170	1088,55	563,71	570	6,29	1,10	1,10	19,9425
1171	1089,31	564,00	570	6,00	1,05	1,05	19,8075
1172	1090,55	555,43	570	14,57	2,56	2,56	19,6275
1173	1091,33	555,71	570	14,29	2,51	2,51	19,3875
1174	1092,61	559,71	570	10,29	1,80	1,80	19,1100
1175	1093,66	564,00	570	6,00	1,05	1,05	18,8175
1176	1094,42	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	18,9150
1177	1095,39	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,0500
1178	1096,36	568,00	570	2,00	0,35	0,35	18,9750
1179	1097,08	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	18,8400
1180	1098,03	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	18,9225
1181	1098,77	584,00	570	-14,00	-2,46	2,46	19,0650
1182	1099,73	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	18,9825
1183	1100,48	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	18,8400
1184	1101,42	584,00	570	-14,00	-2,46	2,46	18,9300
1185	1102,19	584,14	570	-14,14	-2,48	2,48	19,0575
1186	1103,16	584,14	570	-14,14	-2,48	2,48	18,9675
1187	1104,13	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	18,8325
1188	1104,86	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	18,9150
1189	1105,91	584,00	570	-14,00	-2,46	2,46	19,0425
1190	1106,64	584,00	570	-14,00	-2,46	2,46	19,2300
1191	1107,59	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,1475
1192	1108,34	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	19,0125
1193	1109,31	580,14	570	-10,14	-1,78	1,78	19,0950
1194	1110,06	580,14	570	-10,14	-1,78	1,78	19,2375
1195	1111,13	580,14	570	-10,14	-1,78	1,78	19,1475
1196	1112,08	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	19,2225
1197	1112,81	580,14	570	-10,14	-1,78	1,78	19,3575
1198	1113,78	588,14	570	-18,14	-3,18	3,18	19,5525
1199	1114,53	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,4625
1200	1115,48	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,3200
1201	1116,22	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	19,4100

1202	1117,28	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,5525
1203	1118,23	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,4700
1204	1118,97	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,5525
1205	1119,94	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	19,6725
1206	1120,69	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8600
1207	1121,75	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,7625
1208	1122,48	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,8375
1209	1123,47	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	19,9650
1210	1124,52	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	20,1675
1211	1125,30	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,0700
1212	1126,41	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,9500
1213	1127,17	559,71	570	10,29	1,80	1,80	20,0325
1214	1128,27	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,9500
1215	1129,20	560,00	570	10,00	1,75	1,75	20,0250
1216	1129,95	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,9350
1217	1131,02	560,00	570	10,00	1,75	1,75	20,0175
1218	1132,09	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,9425
1219	1132,86	564,00	570	6,00	1,05	1,05	20,0250
1220	1133,83	559,71	570	10,29	1,80	1,80	19,9425
1221	1134,56	563,71	570	6,29	1,10	1,10	19,8000
1222	1135,73	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,6275
1223	1136,72	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,6650
1224	1137,45	568,00	570	2,00	0,35	0,35	19,5900
1225	1138,52	556,00	570	14,00	2,46	2,46	19,4475
1226	1139,23	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,2450
1227	1140,33	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,3275
1228	1141,30	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	19,2375
1229	1142,03	580,00	570	-10,00	-1,75	1,75	19,3425
1230	1143,08	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,4850
1231	1143,83	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6875
1232	1144,78	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,6050
1233	1145,53	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6800
1234	1146,59	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,5900
1235	1147,67	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6800
1236	1148,41	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,5975
1237	1149,36	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6800
1238	1150,09	576,00	570	-6,00	-1,05	1,05	19,5900
1239	1151,08	572,00	570	-2,00	-0,35	0,35	19,6650
1240	1151,86	572,00	573	1,00	0,17	0,17	19,5750
1241	1152,89	572,00	579	7,00	1,21	1,21	19,4175
1242	1153,95	580,00	584	4,00	0,68	0,68	19,2375
1243	1154,72	572,00	588	16,00	2,72	2,72	19,2825
1244	1155,80	580,00	594	14,00	2,36	2,36	19,1925
1245	1156,53	580,00	598	18,00	3,01	3,01	19,0725
1246	1157,58	580,00	600	20,00	3,33	3,33	18,8775
1247	1158,66	588,29	600	11,71	1,95	1,95	18,6375
1248	1159,42	588,29	600	11,71	1,95	1,95	18,6675
1249	1160,42	580,00	600	20,00	3,33	3,33	18,5850
1250	1161,19	596,43	600	3,57	0,60	0,60	18,4425
1251	1162,23	596,43	600	3,57	0,60	0,60	18,5175
1252	1163,20	592,29	600	7,71	1,29	1,29	18,4425
1253	1163,94	596,29	600	3,71	0,62	0,62	18,2925
1254	1165,00	588,29	600	11,71	1,95	1,95	18,3825
1255	1165,73	596,29	600	3,71	0,62	0,62	18,2850
1256	1166,67	592,29	600	7,71	1,29	1,29	18,3750
1257	1167,44	592,29	600	7,71	1,29	1,29	18,2850
1258	1168,50	592,29	600	7,71	1,29	1,29	18,1575
1259	1169,56	588,14	600	11,86	1,98	1,98	17,9700
1260	1170,30	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,7375

1261	1171,27	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,8275
1262	1172,03	596,43	600	3,57	0,60	0,60	17,7300
1263	1173,11	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,5800
1264	1174,05	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,6775
1265	1174,91	608,43	600	-8,43	-1,40	1,40	17,8125
1266	1175,98	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,7375
1267	1176,73	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,6025
1268	1177,78	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,4075
1269	1178,73	608,57	600	-8,57	-1,43	1,43	17,4900
1270	1179,48	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	17,6325
1271	1180,53	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	17,5350
1272	1181,28	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	17,3775
1273	1182,20	604,29	600	-4,29	-0,71	0,71	17,4600
1274	1183,20	604,29	600	-4,29	-0,71	0,71	17,3700
1275	1183,94	612,57	600	-12,57	-2,10	2,10	17,4675
1276	1184,89	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,6175
1277	1185,66	612,57	600	-12,57	-2,10	2,10	17,5275
1278	1186,70	612,57	600	-12,57	-2,10	2,10	17,6250
1279	1187,44	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,7600
1280	1188,53	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,6850
1281	1189,48	612,57	600	-12,57	-2,10	2,10	17,5875
1282	1190,22	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,6775
1283	1191,17	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,5950
1284	1191,92	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	17,6850
1285	1192,91	600,29	600	-0,29	-0,05	0,05	17,8200
1286	1193,66	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,7225
1287	1194,63	612,57	600	-12,57	-2,10	2,10	17,8125
1288	1195,34	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,9550
1289	1196,31	596,00	600	4,00	0,67	0,67	17,8575
1290	1197,25	596,14	600	3,86	0,64	0,64	17,7300
1291	1198,00	604,57	600	-4,57	-0,76	0,76	17,5275
1292	1198,94	612,71	600	-12,71	-2,12	2,12	17,6100
1293	1199,69	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	17,7525
1294	1200,73	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,6700
1295	1201,47	604,43	600	-4,43	-0,74	0,74	17,7525
1296	1202,44	608,57	600	-8,57	-1,43	1,43	17,8800
1297	1203,19	600,43	600	-0,43	-0,07	0,07	18,0750
PROM						1,06	17,51
MIN						0,00	15,03
MAX						5,00	20,87

**B – HOJAS DE DATOS TÉCNICOS DE SOFTWARE Y
HARDWARE**



PL-2303HX-Edition (Rev D) USB to Serial Bridge Controller

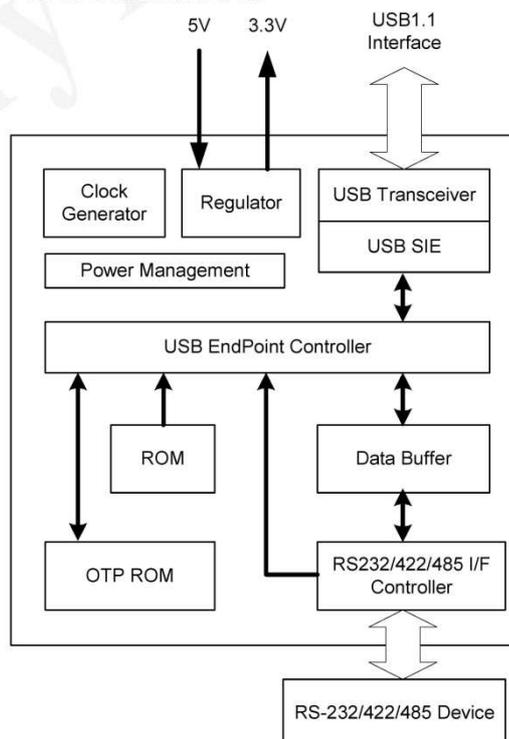
OVERVIEW

The PL-2303HX is a low cost and high performance USB-to-Serial Bridge Controller. The PL-2303HX provides a convenient solution for connecting an RS-232 full-duplex asynchronous serial device to any Universal Serial Bus (USB) capable host. The PL-2303HX highly compatible drivers could simulate the traditional COM port on most operating systems allowing the existing applications based on COM port to easily migrate and be made USB ready. The PL-2303HX is exclusively designed for mobile and embedded solutions in mind, providing a small footprint that could easily fit in to any connectors and handheld devices. With very small power consumption in either operating or suspend mode, the PL-2303HX is perfect for bus power operation with plenty of power left for the attached devices. Flexible signal level requirement on the RS-232 serial port side also allows the PL-2303HX to connect directly to 3.3V ~ 1.8V devices. PL-2303HX integrates on-chip clock generator and OTP ROM to save external crystal and EEPROM. Customers can design with effective BOM cost and compact PCB size.

FEATURES

- Full compliance with the USB Specification v1.1
- On-chip USB 1.1 transceiver and 5V→3.3V regulator
- Supports RS-232 serial interface with Programmable baud rate from 75 bps to 12 Mbps (Rev D)
- Supports RS422/RS485 interface (Rev D)
- Integrates on-chip Clock Generator (Rev D)
- On-chip OTP (One Time Programming) ROM for startup device configurations like product string and serial number string (Rev D)
- Extensive flow control mechanism like adjustable high/low watermark level, automatic hardware or software flow control, and inbound data buffer overflow detection
- Configurable 256-byte outbound buffer and 256-byte inbound buffer; or 128-byte outbound buffer and 384-byte inbound buffer
- Supports remote wake-up from MODEM input signals
- Supports up to 8 GPIO pins (Rev D) - 4 General Purpose I/O pins & 4 Auxiliary General Purpose I/O
- Package type: SSOP28 / QFN32

BLOCK DIAGRAM



Prolific Technology Inc.

7F, #48, Sec.3, Nan-Kang Rd., Taipei, Taiwan 115, ROC
Tel: 886-2-2654-6363 Fax: 886-2-2654-6161
E-mail: sales@prolific.com.tw
<http://www.prolific.com.tw>



**C – INSTRUCCIONES RELEVANTES UTILIZADAS EN EL
CÓDIGO DEL SISTEMA DE CONTROL**

Creating Graphical User Interfaces



Creating GUIs with GUIDE

MATLAB implements GUIs as figure windows containing various [uicontrol objects](#). You must program each object to perform the action you intend it to do when a user activates the component. In addition, you must be able to save and run your GUI. All of these tasks are simplified by GUIDE, the MATLAB graphical user interface development environment.

This section covers the following topics:

- [GUI Development Environment](#)
- [Editing Version 5 GUIs with Version 6 GUIDE](#)

GUI Development Environment

Creating a GUI involves two basic tasks:

- Laying out the GUI components
- Programming the GUI components

For an example of these tasks, see [Example: Creating a GUI](#).

GUIDE primarily is a set of [layout tools](#). However, GUIDE also generates an M-file that contains code to handle the initialization and launching of the GUI. This M-file provides a framework for the implementation of the *callbacks* -- the functions that execute when users activate components in the GUI.

GUIDE Generated Files

While it is possible to write an M-file that contains all the commands to lay out a GUI, it is much easier to use GUIDE to lay out the components interactively. When you save or run the GUI, GUIDE automatically generates two files:

- A FIG-file -- a file with a `.fig` file name extension, which contains a complete description of the GUI figure and all of its children (uicontrols and axes), as well as the values of all object properties. You make changes to the FIG-file by editing the GUI in the Layout Editor. See [Laying Out GUIs - The Layout Editor](#) for more information.
- An M-file -- a file with a `.m` file name extension, which contains the functions that run and control the GUI and the callbacks. This file is referred to as the *GUI M-file*. For a detailed explanation of programming the M-file, see [Programming GUIs](#).

Note that the M-file does not contain the code that lays out the uicontrols; this information is saved in the FIG-file.

Features of the GUI M-file

GUIDE simplifies the process of creating GUIs by automatically generating the GUI M-file directly from your layout. GUIDE generates callbacks for each component in the GUI that requires a callback. Initially, GUIDE generates just a function definition line for each callback. You can add code to the callback to make it perform the operation you want.

The M-file contains two other functions where you might also need to add code:

- Opening function -- performs tasks before the GUI becomes visible to the user, such as creating data for the GUI. GUIDE names this function `my_gui_OpeningFcn`, where `my_gui` is the name of the GUI.
- Output function -- outputs variables to the command line, if necessary. GUIDE names this function `my_gui_OutputFcn`, where `my_gui` is the name of the GUI.

See [Understanding the GUI M-File](#) for more details.

 What Is a GUI?

Editing Version 5 GUIs with Version 6 GUIDE 



function

Declare M-file function

Syntax

```
function [out1, out2, ...] = funname(in1, in2, ...)
```

Description

`function [out1, out2, ...] = funname(in1, in2, ...)` defines function `funname` that accepts inputs `in1`, `in2`, etc. and returns outputs `out1`, `out2`, etc.

You add new functions to the MATLAB[®] vocabulary by expressing them in terms of existing functions. The existing commands and functions that compose the new function reside in a text file called an *M-file*.

M-files can be either *scripts* or *functions*. Scripts are simply files containing a sequence of MATLAB statements. Functions make use of their own local variables and accept input arguments.

The name of an M-file begins with an alphabetic character and has a filename extension of `.m`. The M-file name, less its extension, is what MATLAB searches for when you try to use the script or function.

A line at the top of a function M-file contains the syntax definition. The name of a function, as defined in the first line of the M-file, should be the same as the name of the file without the `.m` extension.

The variables within the body of the function are all local variables.

A *subfunction*, visible only to the other functions in the same file, is created by defining a new function with the `function` keyword after the body of the preceding function or subfunction. Subfunctions are not visible outside the file where they are defined.

You can terminate any function with an `end` statement but, in most cases, this is optional. `end` statements are required only in M-files that employ one or more nested functions. Within such an M-file, every function (including primary, nested, private, and subfunctions) must be terminated with an `end` statement. You can terminate any function type with `end`, but doing so is not required unless the M-file contains a nested function.

Functions normally return when the end of the function is reached. Use a `return` statement to force an early return.

When MATLAB does not recognize a function by name, it searches for a file of the same name on disk. If the function is found, MATLAB compiles it into memory for subsequent use. The section [Determining Which Function Gets Called](#) in the MATLAB Programming Fundamentals documentation explains how MATLAB interprets variable and function names that you enter, and also covers the precedence used in function dispatching.

When you call an M-file function from the command line or from within another M-file, MATLAB parses the function and stores it in memory. The parsed function remains in memory until cleared with the `clear` command or you `quit` MATLAB. The `pcode` command performs the parsing step and stores the result on the disk as a P-file to be loaded later.

Examples

Example 1

The existence of a file on disk called `stat.m` containing this code defines a new function called `stat` that calculates the mean and standard deviation of a vector:

```
function [mean,stdev] = stat(x)
n = length(x);
mean = sum(x)/n;
stdev = sqrt(sum((x-mean).^2/n));
```

Example 2

`avg` is a subfunction within the file `stat.m`:

```
function [mean,stdev] = stat(x)
```

```
n = length(x);  
mean = avg(x,n);  
stdev = sqrt(sum((x-avg(x,n)).^2)/n);  
  
function mean = avg(x,n)  
mean = sum(x)/n;
```

See Also

[nargin](#), [nargout](#), [pcode](#), [varargin](#), [varargout](#), [what](#)

 [func2str](#)

[Provide feedback about this page](#)

[function_handle \(@\)](#) 

[Provide feedback about this page](#)

function_handle (@)

Handle used in calling functions indirectly

Syntax

```
handle = @functionname
handle = @(arglist)anonymous_function
```

Description

`handle = @functionname` returns a handle to the specified MATLAB[®] function.

A [function handle](#) is a MATLAB value that provides a means of calling a function indirectly. You can pass function handles in calls to other functions (often called *function functions*). You can also store function handles in data structures for later use (for example, as Handle Graphics callbacks). A function handle is one of the standard MATLAB data types.

At the time you create a function handle, the function you specify must be on the MATLAB path and in the current scope. This condition does not apply when you evaluate the function handle. You can, for example, execute a subfunction from a separate (out-of-scope) M-file using a function handle as long as the handle was created within the subfunction's M-file (in-scope).

`handle = @(arglist)anonymous_function` constructs an [anonymous function](#) and returns a handle to that function. The body of the function, to the right of the parentheses, is a single MATLAB statement or command. `arglist` is a comma-separated list of input arguments. Execute the function by calling it by means of the function handle, `handle`.

Remarks

The function handle is a standard MATLAB data type. As such, you can manipulate and operate on function handles in the same manner as on other MATLAB data types. This includes using function handles in structures and cell arrays:

```
S.a = @sin; S.b = @cos; S.c = @tan;
C = {@sin, @cos, @tan};
```

However, standard matrices or arrays of function handles are not supported:

```
A = [@sin, @cos, @tan]; % This is not supported
```

For nonoverloaded functions, subfunctions, and private functions, a function handle references just the one function specified in the `@functionname` syntax. When you evaluate an overloaded function by means of its handle, the arguments the handle is evaluated with determine the actual function that MATLAB dispatches to.

Use `isa(h, 'function_handle')` to see if variable `h` is a function handle.

Examples

Example 1 — Constructing a Handle to a Named Function

The following example creates a function handle for the `humps` function and assigns it to the variable `fhandle`.

```
fhandle = @humps;
```

Pass the handle to another function in the same way you would pass any argument. This example passes the function handle just created to `fminbnd`, which then minimizes over the interval `[0.3, 1]`.

```
x = fminbnd(fhandle, 0.3, 1)
x =
    0.6370
```

The `fminbnd` function evaluates the `@humps` function handle. A small portion of the `fminbnd` M-file is shown below. In line 1, the `funfcn` input parameter receives the function handle `@humps` that was passed in. The statement, in line 113, evaluates the handle.

```
1 function [xf,fval,exitflag,output] = ...
```

```

        fminbnd(funfcn, ax, bx, options, varargin)
        :
        :
113  fx = funfcn(x, varargin{:});

```

Example 2 — Constructing a Handle to an Anonymous Function

The statement below creates an anonymous function that finds the square of a number. When you call this function, MATLAB assigns the value you pass in to variable `x`, and then uses `x` in the equation `x.^2`:

```
sqr = @(x) x.^2;
```

The `@` operator constructs a function handle for this function, and assigns the handle to the output variable `sqr`. As with any function handle, you execute the function associated with it by specifying the variable that contains the handle, followed by a comma-separated argument list in parentheses. The syntax is

```
fhandle(arg1, arg2, ..., argN)
```

To execute the `sqr` function defined above, type

```

a = sqr(5)
a =
    25

```

Because `sqr` is a function handle, you can pass it in an argument list to other functions. The code shown here passes the `sqr` anonymous function to the MATLAB [quad](#) function to compute its integral from zero to one:

```

quad(sqr, 0, 1)
ans =
    0.3333

```

See Also

[str2func](#), [func2str](#), [functions](#), [isa](#)

[Provide feedback about this page](#)

 [function](#)

[functions](#) 

External Interfaces/API**Events and Callbacks**

You can enhance the power and flexibility of your serial port application by using *events*. An event occurs after a condition is met and might result in one or more callbacks.

While the serial port object is connected to the device, you can use events to display a message, display data, analyze data, and so on. Callbacks are controlled through *callback properties* and *callback functions*. All event types have an associated callback property. Callback functions are M-file functions that you construct to suit your specific application needs.

You execute a callback when a particular event occurs by specifying the name of the M-file callback function as the value for the associated callback property.

Example: Introduction to Events and Callbacks

This example uses the M-file callback function `instrcallback` to display a message to the command line when a bytes-available event occurs. The event is generated when the terminator is read.

```
s = serial('COM1');
fopen(s)
s.BytesAvailableFcnMode = 'terminator';
s.BytesAvailableFcn = @instrcallback;
fprintf(s, '*IDN?')
out = fscanf(s);
```

The resulting display from `instrcallback` is shown below.

```
BytesAvailable event occurred at 17:01:29 for the object:
Serial-COM1.
```

End the serial port session.

```
fclose(s)
delete(s)
clear s
```

You can use the [type](#) command to display `instrcallback` at the command line.



try

Attempt to execute block of code, and catch errors

Syntax

```
try
```

Description

`try` marks the start of a *try block* in a *try-catch statement*. If the MATLAB[®] software detects an error while executing code in the *try* block, it immediately jumps to the start of the respective *catch block* and executes the error handling code in that block.

A *try-catch* statement is a programming device that enables you to define how certain errors are to be handled in your program. This bypasses the default MATLAB error-handling mechanism when these errors are detected. The *try-catch* statement consists of two blocks of MATLAB code, a *try block* and a *catch block*, delimited by the keywords `try`, `catch`, and `end`:

```
try
    MATLAB commands      % Try block
catch ME
    MATLAB commands      % Catch block
end
```

Each of these blocks consists of one or more MATLAB commands. The `try` block is just another piece of your program code; the commands in this block execute just like any other part of your program. Any errors MATLAB encounters in the `try` block are dealt with by the respective `catch` block. This is where you write your error-handling code. If the `try` block executes without error, MATLAB skips the `catch` block entirely. If an error occurs while executing the `catch` block, the program terminates unless this error is caught by another *try-catch* block.

Specifying the `try`, `catch`, and `end` commands, as well as the commands that make up the `try` and `catch` blocks, on separate lines is recommended. If you combine any of these components on the same line, separate them with commas:

```
try, surf, catch ME, ME.stack, end
ans =
    file: 'matlabroot\toolbox\matlab\graph3d\surf.m'
    name: 'surf'
    line: 54
```

Examples

The `catch` block in this example checks to see if the specified file could not be found. If this is the case, the program allows for the possibility that a common variation of the filename extension (e.g., `jpeg` instead of `jpg`) was used by retrying the operation with a modified extension. This is done using a *try-catch* statement that is nested within the original *try-catch*.

```
function d_in = read_image(filename)
[path name ext] = fileparts(filename);
try
    fid = fopen(filename, 'r');
    d_in = fread(fid);
catch ME1
    % Get last segment of the error message identifier.
    idSegLast = regexp(ME1.identifier, '{<=:\}\w+$', 'match');

    % Did the read fail because the file could not be found?
    if strcmp(idSegLast, 'InvalidFid') && ~exist(filename, 'file')

        % Yes. Try modifying the filename extension.
        switch ext
        case '.jpg' % Change jpg to jpeg
            filename = strrep(filename, '.jpg', '.jpeg')
        case '.jpeg' % Change jpeg to jpg
```

```

        filename = strrep(filename, '.jpeg', '.jpg')
    case '.tif' % Change tif to tiff
        filename = strrep(filename, '.tif', '.tiff')
    case '.tiff' % Change tiff to tif
        filename = strrep(filename, '.tiff', '.tif')
    otherwise
        fprintf('File %s not found\n', filename);
        rethrow(ME1);
    end

    % Try again, with modified filenames.
    try
        fid = fopen(filename, 'r');
        d_in = fread(fid);
    catch ME2
        fprintf('Unable to access file %s\n', filename);
        ME2 = addCause(ME2, ME1);
        rethrow(ME2)
    end
end
end
end

```

See Also

[catch](#), [rethrow](#), [end](#), [lasterror](#), [eval](#), [evalin](#)

[Provide feedback about this page](#)

tscollection 

 true

© 1984-2008 The MathWorks, Inc. · [Terms of Use](#) · [Patents](#) · [Trademarks](#) · [Acknowledgments](#)

MATLAB Function Reference



catch

Begin `catch` block

Description

The general form of a `try` statement is:

```

try,
statement ,
...,
statement ,
catch,
statement ,
...,
statement ,
end

```

Normally, only the statements between the `try` and `catch` are executed. However, if an error occurs while executing any of the statements, the error is captured into `lasterr`, and the statements between the `catch` and `end` are executed. If an error occurs within the `catch` statements, execution stops unless caught by another `try...catch` block. The error string produced by a failed `try` block can be obtained with `lasterr`.

See Also

[end](#), [eval](#), [evalin](#), [try](#)

 cat

caxis 


[Provide feedback about this page](#)

if

Execute statements if condition is true

Syntax

```
if expression, statements, end
```

Description

`if expression, statements, end` evaluates *expression* and, if the evaluation yields logical 1 (true) or a nonzero result, executes one or more MATLAB® commands denoted here as *statements*.

expression is a MATLAB expression, usually consisting of variables or smaller expressions joined by relational operators (e.g., `count < limit`), or logical functions (e.g., `isreal(A)`). Simple expressions can be combined by logical operators (`&&`, `||`, `~`) into compound expressions such as the following. MATLAB evaluates compound expressions from left to right, adhering to [operator precedence](#) rules.

```
(count < limit) && ((height - offset) >= 0)
```

Nested `if` statements must each be paired with a matching `end`.

The `if` function can be used alone or with the `else` and `elseif` functions. When using `elseif` and/or `else` within an `if` statement, the general form of the statement is

```
if expression1
    statements1
elseif expression2
    statements2
else
    statements3
end
```

See [Program Control Statements](#) in the MATLAB Programming Fundamentals documentation for more information on controlling the flow of your program code.

Remarks

Nonscalar Expressions

If the evaluated *expression* yields a nonscalar value, then every element of this value must be true or nonzero for the entire expression to be considered true. For example, the statement `if (A < B)` is true only if each element of matrix *A* is less than its corresponding element in matrix *B*. See [Example 2](#), below.

Partial Evaluation of the expression Argument

Within the context of an `if` or `while` expression, MATLAB does not necessarily evaluate all parts of a logical expression. In some cases it is possible, and often advantageous, to determine whether an expression is true or false through only partial evaluation.

For example, if *A* equals zero in statement 1 below, then the expression evaluates to `false`, regardless of the value of *B*. In this case, there is no need to evaluate *B* and MATLAB does not do so. In statement 2, if *A* is nonzero, then the expression is true, regardless of *B*. Again, MATLAB does not evaluate the latter part of the expression.

```
1) if (A && B)           2) if (A || B)
```

You can use this property to your advantage to cause MATLAB to evaluate a part of an expression only if a preceding part evaluates to the desired state. Here are some examples.

```
while (b ~= 0) && (a/b > 18.5)
if exist('myfun.m') && (myfun(x) >= y)
if iscell(A) && all(cellfun('isreal', A))
```

Empty Arrays

In most cases, using `if` on an empty array treats the array as `false`. There are some conditions however under which `if` evaluates as `true` on an empty array. Two examples of this, where `A` is equal to `[]`, are

```
if all(A), do_something, end
if 1|A, do_something, end
```

The latter expression is `true` because of short-circuiting, which causes MATLAB to ignore the right side operand of an OR statement whenever the left side evaluates to `true`.

Short-Circuiting Behavior

When used in the context of an `if` or `while` expression, and only in this context, the element-wise `|` and `&` operators use short-circuiting in evaluating their expressions. That is, `A|B` and `A&B` ignore the second operand, `B`, if the first operand, `A`, is sufficient to determine the result.

See [Short-Circuiting in Elementwise Operators](#) for more information on this.

Examples

Example 1 - Simple if Statement

In this example, if both of the conditions are satisfied, then the student passes the course.

```
if ((attendance >= 0.90) && (grade_average >= 60))
    pass = 1;
end;
```

Example 2 - Nonscalar Expression

Given matrices `A` and `B`,

```
A =      B =
     1     0     1     1
     2     3     3     4
```

Expression	Evaluates As	Because
<code>A < B</code>	<code>false</code>	<code>A(1,1)</code> is not less than <code>B(1,1)</code> .
<code>A < (B + 1)</code>	<code>true</code>	Every element of <code>A</code> is less than that same element of <code>B</code> with 1 added.
<code>A & B</code>	<code>false</code>	<code>A(1,2)</code> is false, and <code>B</code> is ignored due to short-circuiting.
<code>B < 5</code>	<code>true</code>	Every element of <code>B</code> is less than 5.

See Also

[else](#), [elseif](#), [end](#), [for](#), [while](#), [switch](#), [break](#), [return](#), [relational operators](#), logical operators ([elementwise](#) and [short-circuit](#)),

[Provide feedback about this page](#)

 [idivide](#)

[ifft](#) 



while

Repeatedly execute statements while condition is true

Syntax

```
while expression, statements, end
```

Description

`while expression, statements, end` repeatedly executes one or more MATLAB[®] *statements* in a loop, continuing until *expression* no longer holds true or until MATLAB encounters a [break](#), or [return](#) instruction, thus forcing an immediate exit of the loop. If MATLAB encounters a [continue](#) statement in the loop code, it immediately exits the current pass at the location of the `continue` statement, skipping any remaining code in that pass, and begins another pass at the start of the loop *statements* with the value of the loop counter incremented by 1.

expression is a MATLAB expression that evaluates to a result of logical 1 (`true`) or logical 0 (`false`). *expression* can be scalar or an array. It must contain all real elements, and the statement `all(A(:))` must be equal to logical 1 for the expression to be true.

expression usually consists of variables or smaller expressions joined by relational operators (e.g., `count < limit`) or logical functions (e.g., `isreal(A)`). Simple expressions can be combined by logical operators (`&&`, `||`, `~`) into compound expressions such as the following. MATLAB evaluates compound expressions from left to right, adhering to [Operator Precedence](#) rules.

```
(count < limit) && ((height - offset) >= 0)
```

statements is one or more MATLAB statements to be executed only while the *expression* is `true` or nonzero.

The scope of a `while` statement is always terminated with a matching `end`.

See [Program Control Statements](#) in the MATLAB Programming Fundamentals documentation for more information on controlling the flow of your program code.

Remarks

Nonscalar Expressions

If the evaluated *expression* yields a nonscalar value, then every element of this value must be `true` or nonzero for the entire expression to be considered `true`. For example, the statement `while (A < B)` is `true` only if each element of matrix *A* is less than its corresponding element in matrix *B*. See [Example 2 – Nonscalar Expression](#), below.

Partial Evaluation of the Expression Argument

Within the context of an `if` or `while` expression, MATLAB does not necessarily evaluate all parts of a logical expression. In some cases it is possible, and often advantageous, to determine whether an expression is `true` or `false` through only partial evaluation.

For example, if *A* equals zero in statement 1 below, then the expression evaluates to `false`, regardless of the value of *B*. In this case, there is no need to evaluate *B* and MATLAB does not do so. In statement 2, if *A* is nonzero, then the expression is `true`, regardless of *B*. Again, MATLAB does not evaluate the latter part of the expression.

```
1) while (A && B)           2) while (A || B)
```

You can use this property to your advantage to cause MATLAB to evaluate a part of an expression only if a preceding part evaluates to the desired state. Here are some examples.

```
while (b ~= 0) && (a/b > 18.5)
if exist('myfun.m') && (myfun(x) >= y)
if iscell(A) && all(cellfun('isreal', A))
```

Empty Arrays

In most cases, using `while` on an empty array returns `false`. There are some conditions however under which `while`

evaluates as `true` on an empty array. Two examples of this are

```
A = [];
while all(A), do_something, end
while 1|A, do_something, end
```

Short-Circuiting Behavior

When used in the context of a `while` or `if` expression, and only in this context, the element-wise `|` and `&` operators use short-circuiting in evaluating their expressions. That is, `A|B` and `A&B` ignore the second operand, `B`, if the first operand, `A`, is sufficient to determine the result.

See [Short-Circuiting in Elementwise Operators](#) for more information on this.

Examples

Example 1 – Simple while Statement

The variable `eps` is a tolerance used to determine such things as near singularity and rank. Its initial value is the *machine epsilon*, the distance from 1.0 to the next largest floating-point number on your machine. Its calculation demonstrates `while` loops.

```
eps = 1;
while (1+eps) > 1
    eps = eps/2;
end
eps = eps*2
```

This example is for the purposes of illustrating `while` loops only and should not be executed in your MATLAB session. Doing so will disable the `eps` function from working in that session.

Example 2 – Nonscalar Expression

Given matrices `A` and `B`,

```
A =      B =
     1     0     1     1
     2     3     3     4
```

Expression	Evaluates As	Because
<code>A < B</code>	<code>false</code>	<code>A(1,1)</code> is not less than <code>B(1,1)</code> .
<code>A < (B + 1)</code>	<code>true</code>	Every element of <code>A</code> is less than that same element of <code>B</code> with 1 added.
<code>A & B</code>	<code>false</code>	<code>A(1,2)</code> is false, and <code>B</code> is ignored due to short-circuiting.
<code>B < 5</code>	<code>true</code>	Every element of <code>B</code> is less than 5.

See Also

[end](#), [for](#), [break](#), [continue](#), [return](#), [all](#), [any](#), [if](#), [switch](#)

[Provide feedback about this page](#)

 which

whitebg 



for

Execute block of code specified number of times

Syntax

```
for x=initval:endval, statements, end
for x=initval:stepval:endval, statements, end
```

Description

`for x=initval:endval, statements, end` repeatedly executes one or more MATLAB[®] *statements* in a loop. Loop counter variable *x* is initialized to value *initval* at the start of the first pass through the loop, and automatically increments by 1 each time through the loop. The program makes repeated passes through *statements* until either *x* has incremented to the value *endval*, or MATLAB encounters a `break`, or `return` instruction, thus forcing an immediate exit of the loop. If MATLAB encounters a `continue` statement in the loop code, it immediately exits the current pass at the location of the `continue` statement, skipping any remaining code in that pass, and begins another pass at the start of the loop *statements* with the value of the loop counter incremented by 1.

The values *initval* and *endval* must be real numbers or arrays of real numbers, or can also be calls to functions that return the same. The value assigned to *x* is often used in the code within the loop, however it is recommended that you do not assign to *x* in the loop code.

`for x=initval:stepval:endval, statements, end` is the same as the above syntax, except that loop counter *x* is incremented (or decremented when *stepval* is negative) by the value *stepval* on each iteration through the loop. The value *stepval* must be a real number or can also be a call to a function that returns a real number.

The general format is

```
for variable = initval:endval
    statement
    ...
    statement
end
```

The scope of the `for` statement is always terminated with a matching `end`.

See [Program Control Statements](#) in the MATLAB Programming Fundamentals documentation for more information on controlling the flow of your program code.

Remarks

It is recommended that you do not assign to the loop control variable while in the body of a loop. If you do assign to a variable that has the same name as the loop control variable (see *k* in the example below), then the value of that variable alternates between the value assigned by the `for` statement at the start of each loop iteration and the value explicitly assigned to it in the loop code:

```
for k=1:2
    disp(sprintf(' At the start of the loop, k = %d', k))
    k = 10;
    disp(sprintf(' Following the assignment, k = %d\n', k))
end

At the start of the loop, k = 1
Following the assignment, k = 10

At the start of the loop, k = 2
Following the assignment, k = 10
```

Examples

Assume *k* has already been assigned a value. Create the Hilbert matrix, using `zeros` to preallocate the matrix to conserve memory:

```

a = zeros(k,k) % Preallocate matrix
for m = 1:k
    for n = 1:k
        a(m,n) = 1/(m+n -1);
    end
end
end

```

Step `s` with increments of `-0.1`:

```

for s = 1.0: -0.1: 0.0, ..., end

```

Step `s` with values `1, 5, 8, and 17`:

```

for s = [1,5,8,17], ..., end

```

Successively set `e` to the unit `n`-vectors:

```

for e = eye(n), ..., end

```

The line

```

for V = A, ..., end

```

has the same effect as

```

for k = 1:n, V = A(:,k); ..., end

```

except `k` is also set here.

See Also

[end](#), [while](#), [break](#), [continue](#), [parfor](#), [return](#), [if](#), [switch](#), [colon](#)

[Provide feedback about this page](#)

 [fopen \(serial\)](#)

format 



switch

Switch among several cases based on expression

Syntax

```
switch switch_expr
    case case_expr
        statement,...,statement
    case {case_expr1,case_expr2,case_expr3,...}
        statement,...,statement
    ...
    otherwise
        statement,...,statement
end
```

Discussion

The `switch` statement syntax is a means of conditionally executing code. In particular, `switch` executes one set of statements selected from an arbitrary number of alternatives. Each alternative is called a `case`, and consists of:

- The `case` statement
- One or more case expressions
- One or more statements

In its basic syntax, `switch` executes the statements associated with the first case where `switch_expr == case_expr`. When the case expression is a cell array (as in the second case above), the `case_expr` matches if any of the elements of the cell array match the `switch` expression. If no case expression matches the `switch` expression, then control passes to the `otherwise` case (if it exists). After the case is executed, program execution resumes with the statement after the `end`.

The `switch_expr` can be a scalar or a string. A scalar `switch_expr` matches a `case_expr` if `switch_expr==case_expr`. A string `switch_expr` matches a `case_expr` if `strcmp(switch_expr,case_expr)` returns 1 (true).

Note for C Programmers Unlike the C language `switch` construct, the MATLAB `switch` does not "fall through." That is, `switch` executes only the first matching case, subsequent matching cases do not execute. Therefore, `break` statements are not used.

Examples

To execute a certain block of code based on what the string, `method`, is set to,

```
method = 'Bilinear';

switch lower(method)
    case {'linear','bilinear'}
        disp('Method is linear')
    case 'cubic'
        disp('Method is cubic')
    case 'nearest'
        disp('Method is nearest')
    otherwise
        disp('Unknown method.')
end
```

Method is linear

See Also

[case](#), [end](#), [if](#), [otherwise](#), [while](#)

 [svds](#)

[symamd](#) 

MATLAB Function Reference



timer

Construct timer object

Syntax

```
T = timer
T = timer('PropertyName1', PropertyValue1, 'PropertyName2',
          PropertyValue2, ...)
```

Description

`T = timer` constructs a timer object with default attributes.

`T = timer('PropertyName1', PropertyValue1, 'PropertyName2', PropertyValue2, ...)` constructs a timer object in which the given Property name/value pairs are set on the object. See [Timer Object Properties](#) for a list of all the properties supported by the timer object.

Note that the property name/property value pairs can be in any format supported by the [set](#) function, i.e., property/value string pairs, structures, and property/value cell array pairs.

Example

This example constructs a timer object with a timer callback function handle, `mycallback`, and a 10 second interval.

```
t = timer('TimerFcn',@mycallback, 'Period', 10.0);
```

See Also

[delete](#), [disp](#), [get](#), [isvalid](#), [set](#), [start](#), [startat](#), [stop](#), [timerfind](#), [wait](#)

Timer Object Properties

The timer object supports the following properties that control its attributes. The table includes information about the data type of each property and its default value.

To view the value of the properties of a particular timer object, use the [get](#) function. To set the value of the properties of a timer object, use the [set](#) function.

Property Name	Property Description	Datatypes, Values, and Defaults
AveragePeriod	The average time between <code>TimerFcn</code> executions since the timer started. Note: Value is <code>NaN</code> until timer executes two timer callbacks.	Datatype: <code>double</code> Default: <code>NaN</code> Readonly: Always

BusyMode	<p>Action taken when a timer has to execute <code>TimerFcn</code> before the completion of previous execution of <code>TimerFcn</code>.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 'drop' --Do not execute the function. • 'error' --Generate an error. • 'queue' --Execute function at next opportunity. 	<p>Datatype: Enumerated string</p> <p>Values: 'drop' 'queue' 'error'</p> <p>Default: 'drop'</p> <p>Readonly: Only when Running='on'</p>
ErrorFcn	<p>Function that the timer executes when an error occurs. This function executes before the <code>StopFcn</code>. See Creating Timer Callback Functions for more information.</p>	<p>Datatype: Text string, function handle, or cell array.</p> <p>Default:</p> <p>Readonly: Never</p>
ExecutionMode	<p>Determines how the timer object schedules timer events. See Timer Execution Modes for more information.</p>	<p>Datatype: Enumerated string</p> <p>Values: 'singleShot' 'fixedSpacing' 'fixedDelay' 'fixedRate'</p> <p>Default: 'singleShot'</p> <p>Readonly: When Running='on'</p>
InstantPeriod	<p>The time between the last two executions of <code>TimerFcn</code>.</p>	<p>Datatype: double</p> <p>Default: NaN</p> <p>Readonly: Always</p>
Name	<p>User-supplied name</p>	<p>Datatype: Text string</p> <p>Default: 'timer-<i>i</i>', where <i>i</i> is a number indicating the <i>i</i>th timer object created this session.</p> <p>Note: If you issue the <code>clear classes</code> command, the timer object resets <i>i</i> to 1.</p> <p>Readonly: Never</p>
Period	<p>Specifies the delay, in seconds, between executions of <code>TimerFcn</code>.</p>	<p>Datatype: double</p> <p>Value: Any number <0.001</p> <p>Default: 1.0</p> <p>Readonly: When Running='on'</p>
Running	<p>Indicates whether the timer is currently executing.</p>	<p>Datatype: Enumerated string:</p> <p>Values: 'off' 'on'</p> <p>Default: 'off'</p> <p>Readonly: Always</p>
StartDelay	<p>Specifies the delay, in seconds, between the start of the timer and the first execution of the function specified in <code>TimerFcn</code>.</p>	<p>Datatype: double</p> <p>Value: Any number <=0</p> <p>Default: 0</p> <p>Readonly: When Running='on'</p>

StartFcn	Function the timer calls when it starts. See Creating Timer Callback Functions for more information.	Datatype: Text string, function handle, or cell array Default: ReadOnly: Never
StopFcn	Function the timer calls when it stops. The timer stops when: <ul style="list-style-type: none"> You call the timer <code>stop</code> function When the timer finishes executing <code>TimerFcn</code>, i.e., the value of <code>TasksExecuted</code> reaches the limit set by the <code>TasksToExecute</code>. An error occurs (The <code>ErrorFcn</code> is called first, followed by the <code>StopFcn</code>.) See Creating Timer Callback Functions for more information.	Datatype: Text string, function handle, or cell array. Default: ReadOnly: Never
Tag	User supplied label	Datatype: Text string Default: ' ' (empty string)
TasksToExecute	Specifies the number of times the timer should execute the function specified in the <code>TimerFcn</code> property.	Datatype: double Value: Any number <0 Default: 1 ReadOnly: Never
TasksExecuted	The number of times the timer has executed <code>TimerFcn</code> since the timer was started	Datatype: double Value: Any number <=0 Default: 0 ReadOnly: Always
TimerFcn	Timer callback function. See Creating Timer Callback Functions for more information.	Datatype: Text string, function handle, or cell array. Default: ReadOnly: Never
Type	Identifies the object type	Datatype: Text string Value: 'timer' ReadOnly: Always
UserData	User-supplied data	Datatype: User-defined Default: [] ReadOnly: Never

**D – GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO DE
MECÁNICA DE FLUIDOS – TURBINA PELTON
(PROPUESTA)**

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO

“TURBINA PELTON”

PROPUESTA POR:

SR. FABIÁN FLORES VACA

SR. OSWALDO SANTIAGO BONILLA BÁEZ

REVISIÓN:

ING. CARLOS VALLADARES

ING. IVÁN SOLA

Quito, noviembre de 2008

CONTENIDO

1.- TEMA: TURBINA PELTON.....	3
2.- OBJETO DEL ENSAYO	3
3.- MARCO TEÓRICO	3
3.1. TURBINA PELTON	3
3.1.1. INTRODUCCIÓN.....	3
3.1.2. PARTES PRINCIPALES.....	3
3.1.2.1. Distribuidor	3
3.1.2.2. Rodete.....	4
4.- DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE LABORATORIO.....	5
4.1. ESQUEMA DE INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE TURBINA PELTON ...	6
5.- TERMINOLOGÍA Y FÓRMULAS.....	7
6.- PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.....	9
7.- PREPARACIÓN DE INFORME	12
8.- ANEXOS	14

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Detalle de tobera (válvula de aguja o inyector).	4
Figura 3.2. Esquema de rodete de turbina Pelton con varias toberas (inyectores).....	4
Figura 3.3. Esquema de cazoleta (paleta en forma de doble cuchara).	5
Figura 4.1. Elementos Constitutivos del equipo de práctica.....	6

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6.1. Tabla de datos en unidades inglesas.	10
Tabla 6.2. Tabla de datos en unidades S.I.	10

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS
GUÍA DE PRÁCTICA

1.- TEMA: TURBINA PELTON

2.- OBJETO DEL ENSAYO

El objetivo principal del ensayo es la puesta en práctica de los conceptos adquiridos en clase teórica acerca de la Turbina Pelton, además se busca determinar las características de éste tipo de motor hidráulico.

3.- MARCO TEÓRICO

3.1. TURBINA PELTON

3.1.1. INTRODUCCIÓN

Las ruedas Pelton ó turbinas de impulsión, son motores que se emplean en general para grandes saltos y pequeños caudales. Su campo efectivo varía entre 300 y los 2.000 metros de caída.

3.1.2. PARTES PRINCIPALES

3.1.2.1. Distribuidor

El distribuidor de este tipo de turbinas se conoce con el nombre de Tobera, Inyector o Válvula de Aguja. El modelo que se usa en la actualidad es la tobera

circular, que consiste en un tubo de sección circular decreciente, cuya apertura se pueda variar por medio de una aguja en forma de huso, desplazable axialmente (ver figura 3.1). La tobera tiene la propiedad de producir un chorro cilíndrico y perfectamente compacto, para cualquier posición de la aguja. El agua sale con velocidad máxima permitida por el salto útil.

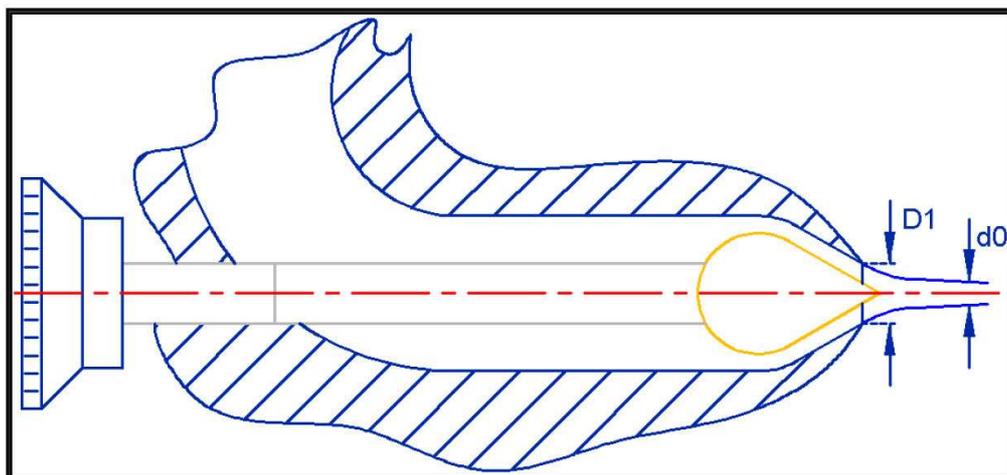


Figura 3.1. Detalle de tobera (válvula de aguja o inyector).

3.1.2.2. Rodete

Está constituido por un disco montado sobre el árbol motor, y por un cierto número de paletas colocadas periféricamente sobre el mismo.

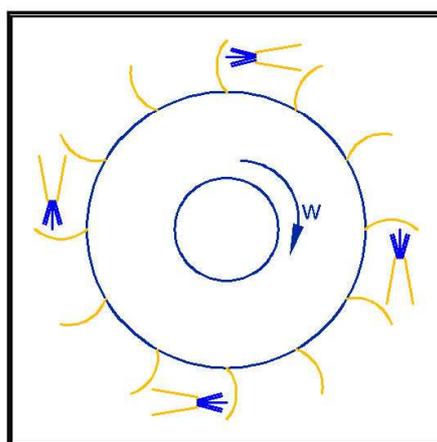


Figura 3.2. Esquema de rodete de turbina Pelton con varias toberas (inyectores).

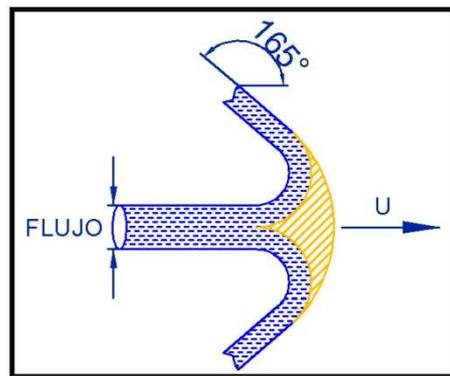


Figura 3.3. Esquema de cazoleta (paleta en forma de doble cuchara).

La alimentación la verifica un chorro de agua dispuesto en un plano medio y tangente a la circunferencia media de las paletas.

Como muestra la figura 3.2, una turbina Pelton moderna puede contar con varios distribuidores. La figura 3.3 muestra un detalle de las paletas.

4.- DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE LABORATORIO

Este es un equipo típico de laboratorio, que permite realizar una amplia serie de experiencias. La altura de caída de agua se crea por medio de una bomba y existe un dispositivo (válvula de descarga de la bomba) que permite variar la altura de caída de agua. El caudal que circula por la máquina se determina con ayuda de un vertedero triangular acoplado en el tanque. Vea en la figura de la sección siguiente el esquema de todos los elementos constitutivos de la instalación.

4.1. ESQUEMA DE INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE TURBINA PELTON

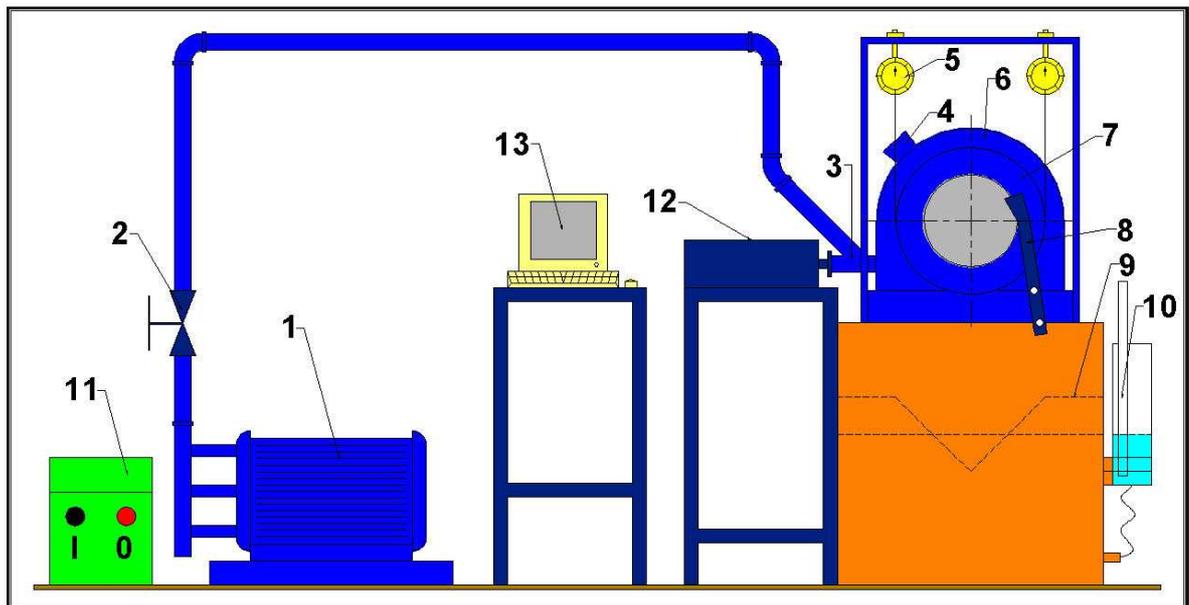


Figura 4.1. Elementos Constitutivos del equipo de práctica.

1. Bomba.
2. Válvula de descarga de bomba.
3. Válvula de aguja (Inyector).
4. Manómetro.
5. Balanza (2 balanzas y la correa corresponden al sistema de Freno Pronny).
6. Turbina Pelton.
7. Tambor del freno.
8. Sensor de velocidad.
9. Vertedero triangular.
10. Medidor del nivel en vertedero (Regleta).
11. Caja de encendido y apagado.
12. Actuador.
13. Computador.

La lectura del régimen de velocidades, los valores de la altura desde la que cae el agua y demás, se registran directamente con los instrumentos que se indican a continuación:

- Velocidad Angular - Tacómetro Digital: Localizado en la Aplicación de Medición de Velocidad y Posicionamiento de Inyector.
- Altura de Agua – Manómetro: Acoplado a la carcasa de la turbina.
- Caudal – Medidor de Nivel de Vertedero: Localizado a un costado del tanque de descarga del equipo.
- Posición de Inyector – Posicionador: Localizado en la Aplicación de Medición de Velocidad y Posicionamiento de Inyector.
- Torque – Freno Pronny: El torque se puede medir mediante las lecturas que se toman en los dinamómetros del freno Pronny.

5.- TERMINOLOGÍA Y FÓRMULAS

N_W = potencia de agua de entrada de agua [Hp] (WHP)

$$N_W = \frac{H \cdot Q \cdot 62,4}{550 \cdot 60} = 1,89 \cdot H \cdot Q \cdot 10^{-3} \quad [\text{Hp}]$$

N_T = potencia de salida de la Turbina [Hp] (BHP)

$$N_T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot W_n \cdot N}{550 \cdot 60} \quad [\text{Hp}]$$

Q = flujo de agua [pie^3/min]

$$Q = \frac{8}{15} \cdot C_d \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2g \cdot h} \cdot h^{5/2} \quad [\text{pie}^3/\text{min}]$$

g = 32,1740 gravedad [pies / s^2] = 115826,4 [$\text{pies} / \text{min}^2$]

h = altura de nivel de vertedero [pies]

N = velocidad del eje de la turbina [rpm]

η = rendimiento de la Turbina [%]

$$\eta = \left(\frac{N_T}{N_W}\right) \times 100 \quad [\%]$$

r = radio del tambor del freno [pies] (el espesor de la banda se supone despreciable).

W_1 = Lectura de la balanza 1 [lb]

W_2 = Lectura de la balanza 2 [lb]

$W_n = W_1 - W_2 =$ Carga neta [lb]

62,4 = Peso específico del agua [lb / pie³]

Z = Apertura del inyector [%]; [mm]

H = Salto neto [pies]

Θ = Apertura de válvula de descarga de bomba [vueltas]

Todos los datos anteriores han sido citados en unidades inglesas debido a que el equipo de Turbina Pelton tiene aparatos de medida que trabajan en unidades inglesas. Para la conversión de datos a unidades internacionales se deben utilizar los siguientes coeficientes:

Potencia: [Hp] x 0,7456999 = [Kw]

Flujo: [pie³/min] x 1,699011 = [m³/h]

Longitud: [pies] x 0,3048 = [m]

Torque: [lbf.pie] x 1,3558 = [N.m]

6.- PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

A) Calibrar el vertedero con el método volumétrico ya conocido, obtener un C_d promedio y con éste valor construir la curva correspondiente de Caudal vs. Altura de Vertedero (Q vs. h – Curva de calibración de vertedero).

B) Calibración de la válvula: monte el equipo computacional, el sensor y actuador del equipo. Siga las instrucciones que se indican en la APLICACIÓN DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD Y POSICIONAMIENTO DE INYECTOR DE TURBINA PELTON.

IMPORTANTE: siga correctamente todos los pasos indicados en el programa de calibración, pues en caso de cometer errores podría provocar daños permanentes en el equipo o lesiones personales.

C) Procedimientos de Toma de Datos:

- Para realizar los procedimientos en 1) y 2) asegúrese previamente que el Freno Pronny no se encuentre cargado al tambor de inercia de la turbina (Pruebas de Par-Motor nulo).
- Para el procedimiento 3) encere los dinamómetros antes de comenzar.
- Utilice los siguientes modelos de tablas de datos al momento de realizar la práctica (en unidades inglesas) y al momento de presentar el informe (en unidades S.I.):

1) Salto vs. Caudal (20 tomas de datos)

- Posicione el inyector
- Para 5 diferentes aperturas de válvula de descarga de bomba tome las medidas de altura de agua y nivel de vertedero para calcular el caudal.
- Repita la instrucción anterior para 4 posiciones de inyector.

2) Caudal vs. Posición del Inyector (16 tomas de datos)

- Posicione el Inyector.
- Manipule la válvula de descarga de la bomba hasta llegar a la altura de salto necesitada.
- Tome el valor de la altura de nivel del vertedero.
- Repita los pasos anteriores para 4 posiciones de inyector.
- Al terminar los pasos anteriores vuelva a realizar el procedimiento para un total de 3 alturas de caída de agua diferentes.

3) Velocidad vs. Par-Motor (20 tomas de datos)

Potencia al Freno (BHP) vs. Velocidad

Potencia Útil (WHP) vs. Velocidad

Eficiencia vs. Velocidad

Velocidad de Fuga (Embalamiento) vs. Apertura de Inyector

Curvas de Isorendimiento en plano de Caudal vs. Velocidad

- Posicione el Inyector.
- Manipule la válvula de descarga de la bomba hasta llegar a la altura de salto necesitada.
- Tome el valor de la altura de nivel del vertedero, la velocidad del eje de la turbina, las medidas que marquen los dinamómetros.
- Realice los pasos anteriores para Cargas Netas iguales a: 0, 2, 4, 6 y 8 [lbf]

- Luego de completar el paso anterior, proceda desde el primer paso para 4 posiciones del inyector en total.

7.- PREPARACIÓN DE INFORME

Este deberá constar de las siguientes partes:

1. Curva de calibración del Vertedero
2. Para la Válvula de Aguja:
 - 1) Curva de Sección Libre vs. Desplazamiento de Aguja,
 - 2) Determine el Coeficiente de Descarga de la Válvula de Aguja, considere un coeficiente de Velocidad igual a 0,97.
 - 3) Variación de d_0/D_1 en función del caudal.
3. Curvas características:
 1. Salto vs. Caudal; para diferentes aperturas del inyector (Procedimiento 1)
 2. Caudal vs. Posición del Inyector, para diferentes saltos (Procedimiento 2)

Las siguientes curvas deben graficarse con la información recopilada al desarrollar el procedimiento 3 (salto constante y diferentes aperturas del vástago):

3. Velocidad vs. Par-Motor,
4. Potencia al Freno (BHP) vs. Velocidad,
5. Potencia Útil (WHP) vs. Velocidad
6. Eficiencia vs. Velocidad
7. Velocidad de Fuga (Embalamiento) vs. Apertura de Inyector

8. Curvas de Isorendimiento en plano de Caudal vs. Velocidad (Colina de Rendimientos de la Turbina Pelton)

4. Conclusiones

5. Recomendaciones

6. Bibliografía

8.- ANEXOS

ANEXO 1

APLICACIÓN DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD Y POSICIONAMIENTO DE INYECTOR

TUTORIAL DE MANEJO DE APLICACIÓN

TUTORIAL DE MANEJO DE APLICACIÓN

APLICACIÓN DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD Y POSICIONAMIENTO DE INYECTOR

TUTORIAL DE MANEJO DE APLICACIÓN

1. Dar ícono en el ícono de la Aplicación que se encuentra ubicado en el escritorio de Windows.

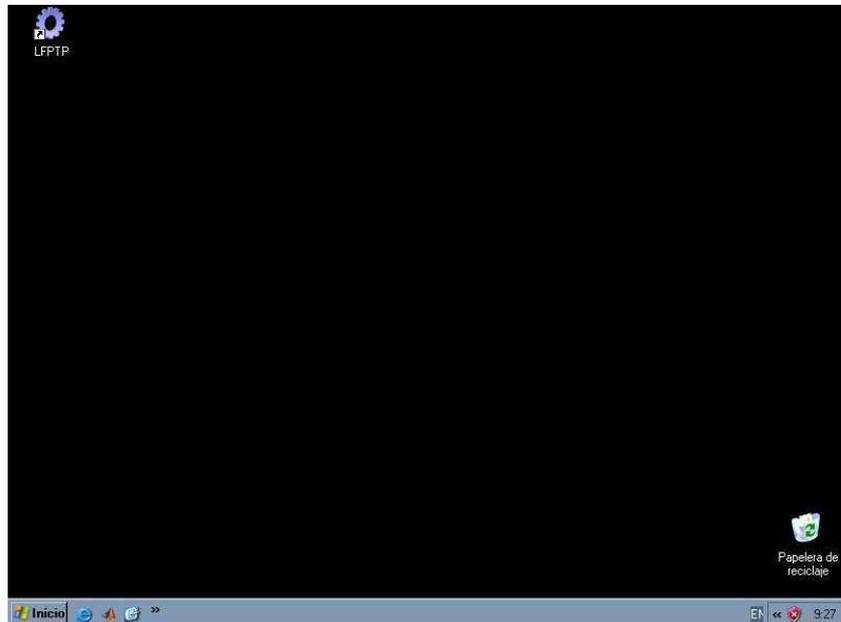


Figura 1.1. Escritorio de Windows.

Inmediatamente después aparecerá una ventana de formato MsDOS, esta ventana corresponde al soporte de la aplicación de medición de velocidad y posicionamiento de inyector.

La ventana de soporte no debe ser cerrada por ningún motivo, pues es la que mantiene funcionando la aplicación.

En caso de fallas debidas a mal manejo del hardware y/o software, basta con cerrar esta ventana y se cerrará la aplicación completa.



Figura 1.2. Ventana de soporte de aplicación.

Luego de un pequeño lapso de tiempo aparecerá la ventana que se muestra a continuación.



Figura 1.3. Ventana de presentación de la Aplicación.

La ventana anterior corresponde a la presentación de la Aplicación de Medición de Velocidad y Posicionamiento de Inyector de Turbina Pelton de Laboratorio.

- De clic en el botón “Continuar” para comenzar con el procedimiento de calibración de la posición del inyector. Aparecerá la siguiente interfaz gráfica:



Figura 1.4. Panel de Instrucciones No 1.

En la interfaz anterior se especifican los primero 6 pasos de las instrucciones de calibración del equipo. Las instrucciones son:

- Coloque los cables de los motores del actuador en el circuito de potencia y del tacómetro en el circuito de censado (VER COLORES DE LOS CONECTORES).
- Coloque los cables seriales del circuito de potencia y del circuito de censado en los conectores que les corresponden. Además coloque el

cable del puerto paralelo en el circuito de seguridad y en la PC (VER COLORES DE LOS CONECTORES).

3. Coloque los cables de energía de los circuitos (1 blanco y 1 negro) a la línea de alimentación – 110 [V] –
4. Coloque la tuerca de enlace roja en el lado del vástago del actuador (Pulse el botón “Ayuda Gráfica” para guiarse).
5. Cierre manualmente la válvula de aguja. Verifique el cierre total por la tapa transparente de la carcasa de la turbina.
6. Presione el botón continuar para realizar los pasos que siguen.

Esta ventana de instrucciones puede ser abierta cuando se requiera desde la interfaz de calibración, además contiene la referencia a la ayuda gráfica de la aplicación. Al final del presente documento se indican las pantalla de la ayuda gráfica.

3. De clic en el botón “Continuar” para abrir la siguiente ventana de instrucciones, esta se muestra a continuación:

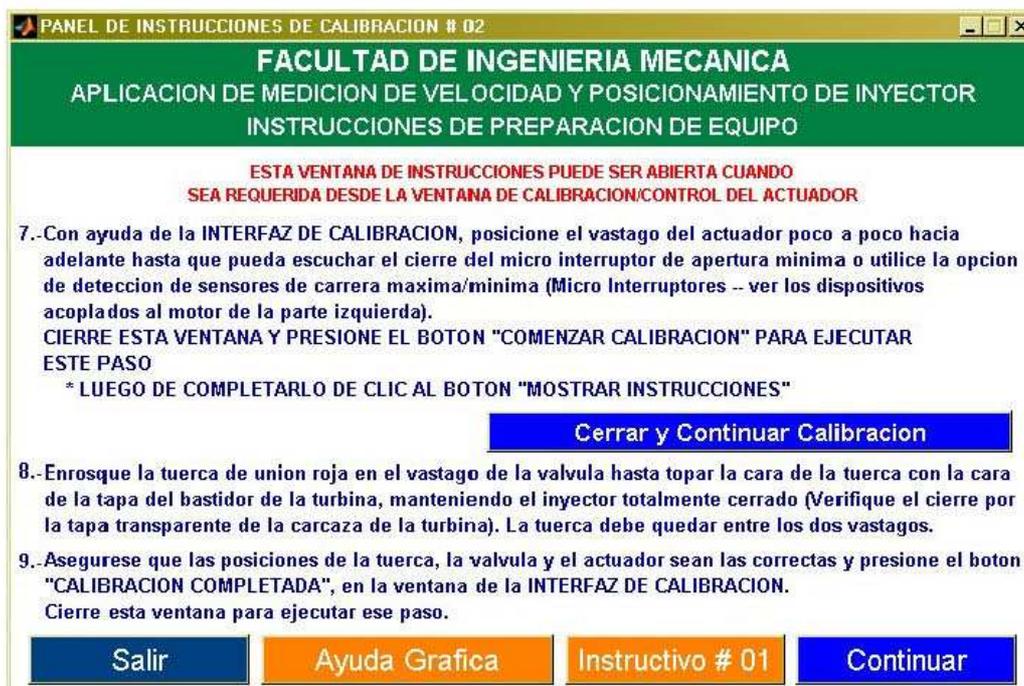


Figura 1.5. Panel de instrucciones No 2.

Las instrucciones del segundo panel son:

7. Con ayuda de la INTERFAZ DE CALIBRACIÓN, posicione el vástago del actuador poco a poco hacia adelante hasta que pueda escuchar el cierre del micro interruptor de apertura mínima o utilice la opción de detección de sensores de carrera máxima/mínima (Micro Interruptores -- Ver los dispositivos acoplados al motor de la parte izquierda del actuador).
CIERRE ESTA VENTANA Y PRESIONE EL BOTON “COMENZAR CALIBRACIÓN” PARA EJECUTAR ESTE PASO
LUEGO DE COMPLETARLO DÉ CLIC AL BOTÓN “MOSTRAR INSTRUCCIONES”
8. Enrosque la tuerca de unión roja en el vástago de la válvula hasta topar la cara de la tuerca con la tapa del bastidor de la turbina, manteniendo el inyector totalmente cerrado (Verifique el cierre por la tapa transparente de la carcasa de la turbina). La tuerca debe quedar entre los dos vástagos.
9. Asegúrese que las posiciones de la tuerca, la válvula y el actuador sean las correctas y presione el botón “CALIBRACIÓN COMPLETADA”, en la ventana de la INTERFAZ DE CALIBRACIÓN.
Cierre esta ventana para ejecutar este paso.

Para ejecutar la instrucción de calibración No. 7 se debe cerrar este panel.

4. De clic en el botón "Cerrar y continuar calibración", el diálogo que aparecerá será el siguiente:



Figura 1.6. Interfaz de calibración.

5. De clic en el botón "COMENZAR CALIBRACIÓN", se presentará una ventana de pregunta:

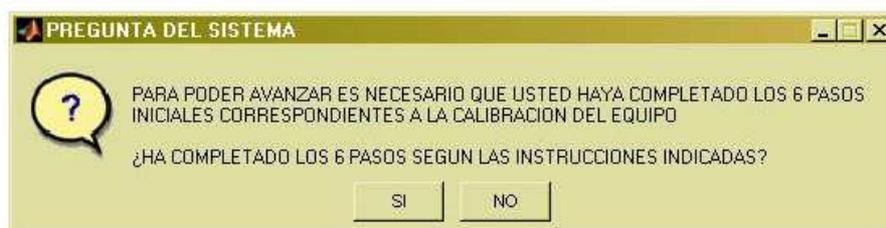


Figura 1.7. Pregunta del sistema.

De contestar afirmativamente, se debe seguir los pasos siguientes, caso contrario se volverá al paso No. 4.

Además, si no se puede establecer comunicación con el circuito de motores, aparecerá el siguiente cuadro de diálogo y no será posible avanzar con las instrucciones posteriores:



Figura 1.8. Error de detección de circuito de motores.

6. La INTERFAZ DE CALIBRACIÓN se muestra a continuación. En esta ventana debe utilizarse los botones "ADELANTE (+)" y "ATRÁS [-]" para colocar el vástago del actuador en la posición requerida, para chequear la instrucción que se está realizando es posible pulsar el botón "MOSTRAR INSTRUCCIONES". Además para la detección automática de los sensores de carrera es posible dar clic al botón "ACTIVAR DETECCIÓN DE SENSORES DE CARRERA" y posteriormente elegir uno de los siguientes botones: "HACIA ADELANTE - MÁXIMO" o "HACIA ATRÁS - MÁXIMO".



Figura 1.9. Interfaz de Calibración activada.

7. Cuando haya terminado de realizar las 9 primeras instrucciones deberá dar clic en el botón "CALIBRACIÓN COMPLETADA", inmediatamente aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:

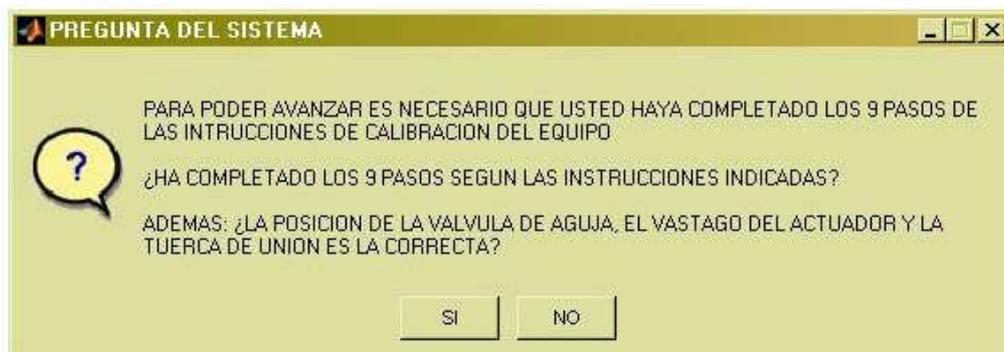


Figura 1.10. Pregunta del sistema.

Dé clic sobre el botón “SI” para continuar con la ejecución de la aplicación o de clic en “NO” para continuar realizando las 9 instrucciones de calibración del actuador.

8. Para comenzar a usar la aplicación de posicionamiento de inyector y medición de velocidad es necesario seguir las instrucciones que serán mostradas de la forma siguiente:



Figura 1.11. Instrucciones de uso de aplicación.

A continuación se listan las instrucciones que se encuentran en la gráfica anterior:

Paso Previo: llene el tanque de agua hasta los niveles requeridos por la bomba y la turbina.

1. Abra el inyector mediante la APLICACIÓN DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD Y POSICIONAMIENTO DE INYECTOR (0 – 24[mm]), según sea requerido. (PRESIONE EL BOTÓN CONTINUAR Y LUEGO EL BOTÓN ABRIR INYECTOR, CUANDO NECESITE VER LAS INSTRUCCIONES PRESIONE EL BOTÓN “MOSTRAR INSTRUCCIONES”)
2. Mueva la tuerca de unión manualmente hasta llegar a colocarla contra el bastidor (cara contra cara).
3. Coloque la carga a la turbina (Freno Pronny).
4. Abra la válvula de descarga de la bomba según lo requiera.
5. Bloquee y active (de clic en el botón respectivo) el programa de medición.
6. Encienda la bomba, espere como mínimo 30 segundos y tome los datos necesarios.
7. Apague la bomba y espere hasta que la turbina frene.
8. Separe la tuerca de unión del bastidor de la turbina y colóquela en la posición normal de movimiento del actuador (entre vástagos de actuador y válvula).
9. Desbloquee el programa de medición.
10. Vuelva a repetir el procedimiento desde el paso #1 para nuevas condiciones de operación.

9. La interfaz principal de la aplicación se muestra a continuación.

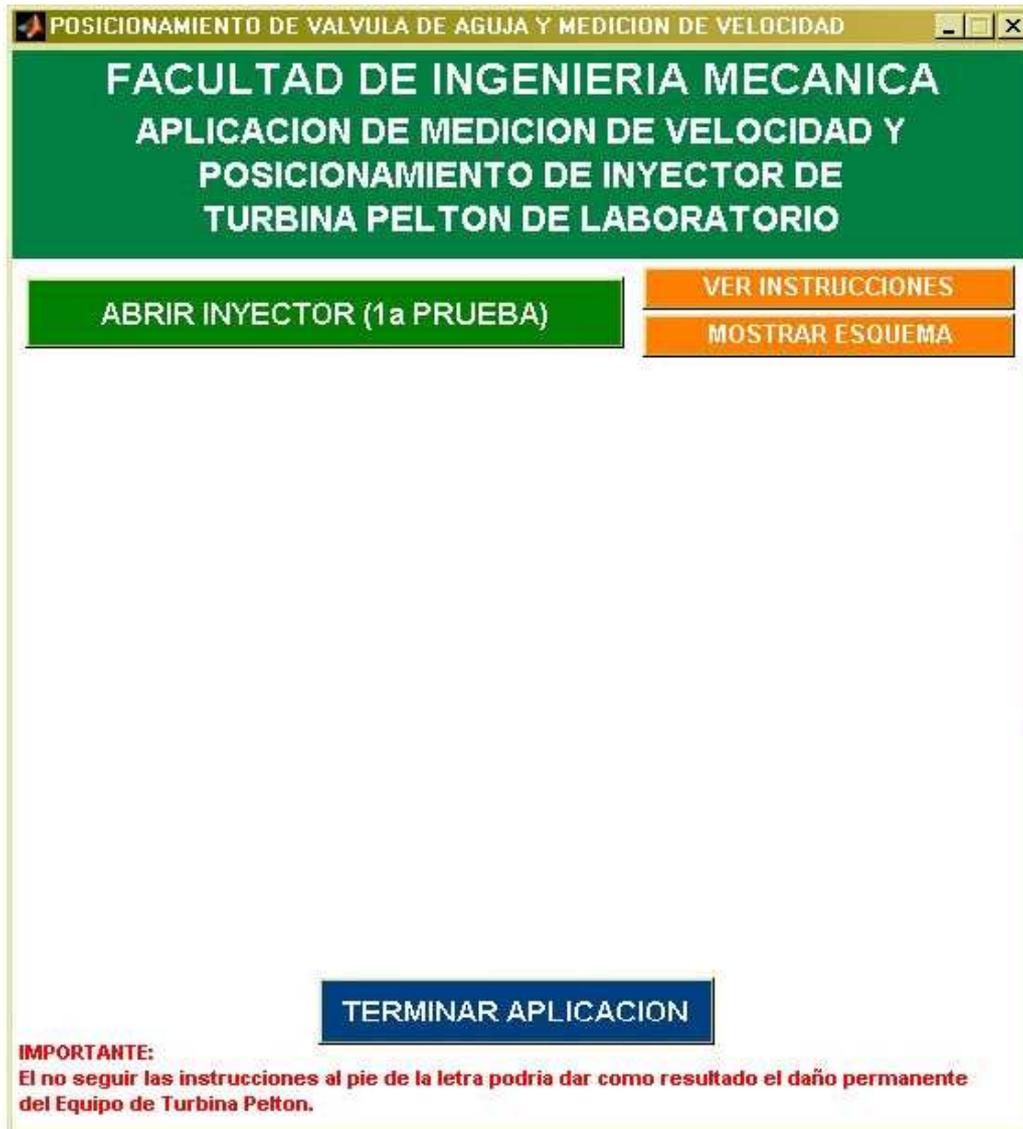


Figura 1.12. Interfaz principal de la aplicación.

10. Para dar inicio a la aplicación de clic en el botón: "ABRIR INYECTOR (1ª PRUEBA)"

Luego de lo cual se mostraran las siguientes ventanas que incluyen mensajes del sistema:

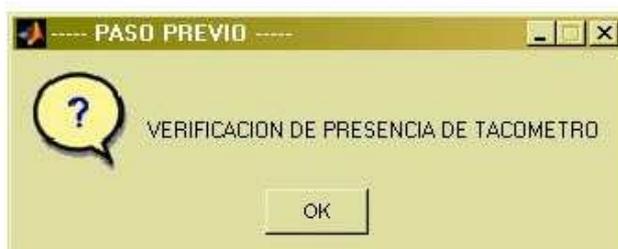


Figura 1.13. Verificación de presencia de tacómetro digital.

En caso de no localizarse el tacómetro digital o el dispositivo de puerto paralelo el programa se cerrará inmediatamente y aparecerá el siguiente mensaje:



Figura 1.14. Error de detección de dispositivo de medición de velocidad.

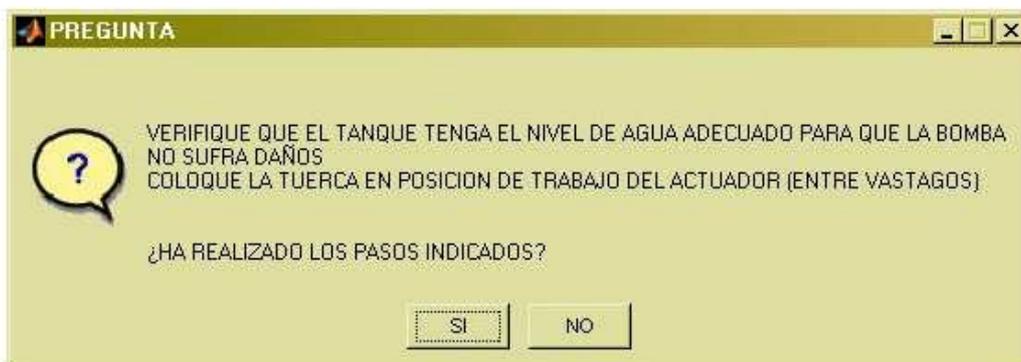


Figura 1.15. Verificación de nivel de tanque de alimentación.

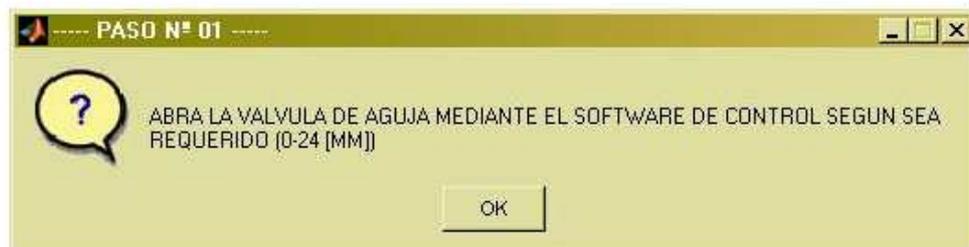


Figura 1.16. Paso No 01.

De clic sobre cada una de las opciones de las preguntas que estén de acuerdo con la situación al instante.

Luego aparecerá desplegada la interfaz que se indica a continuación.



Figura 1.17. Interfaz de Posicionamiento de Inyector y Medición de Velocidad.

- En la ventana anterior se deberá seleccionar la posición del inyector que se desee. Se debe siempre seguir las instrucciones de manipulación de la tuerca del actuador.

A continuación se indica el comportamiento de la aplicación mientras se posiciona el actuador:



Figura 1.18. Interfaz bloqueada mientras se posiciona el actuador en el 50% de apertura de inyector.

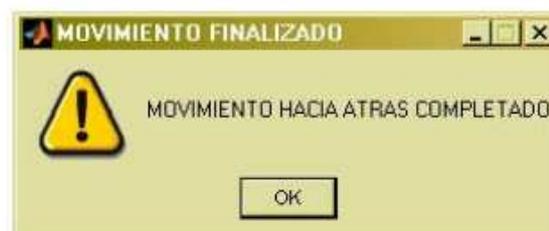


Figura 1.19. Ventana de confirmación de movimiento



Figura 1.20. Interfaz actualizada luego de posicionamiento de inyector.

12. Cuando haya sido posicionado el inyector en la apertura necesitada se debe dar clic al botón "BLOQUEAR Y EVALUAR RESPUESTA DE TURBINA". No olvide seguir las instrucciones para colocar la tuerca de enlace roja en la posición requerida por el programa.

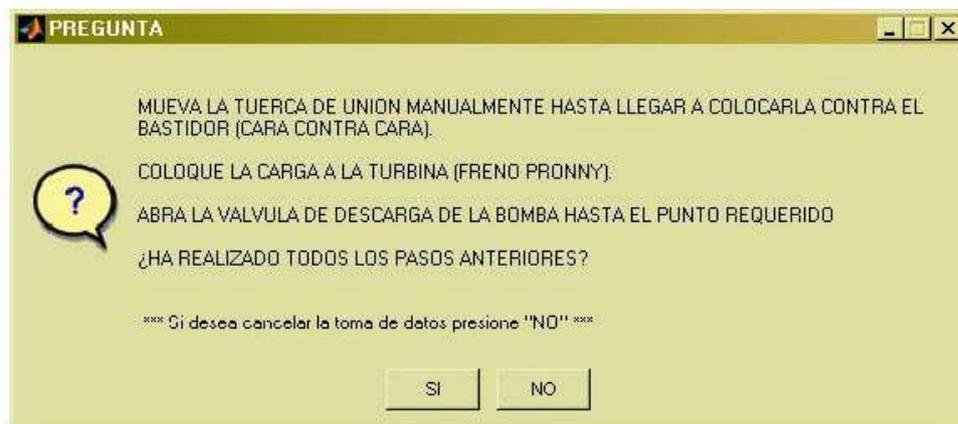


Figura 1.21. Pregunta del sistema.

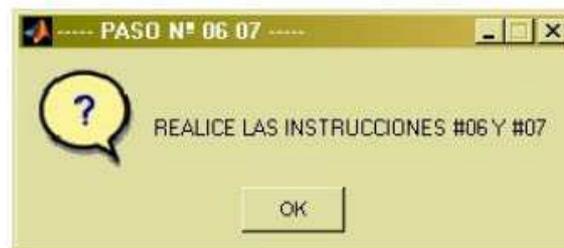


Figura 1.22. Instrucciones del sistema.

13. Espere por lo menos 30 segundos hasta que el sistema se estabilice y tome el dato de velocidad, en caso de que muestren varios valores distintos continuamente seleccione un promedio de estos. A continuación se muestra la información que se adquiere del tacómetro digital:

POSICIONAMIENTO DE VALVULA DE AGUJA Y MEDICION DE VELOCIDAD

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA APLICACION DE MEDICION DE VELOCIDAD Y POSICIONAMIENTO DE INYECTOR DE TURBINA PELTON DE LABORATORIO

NUEVA POSICION

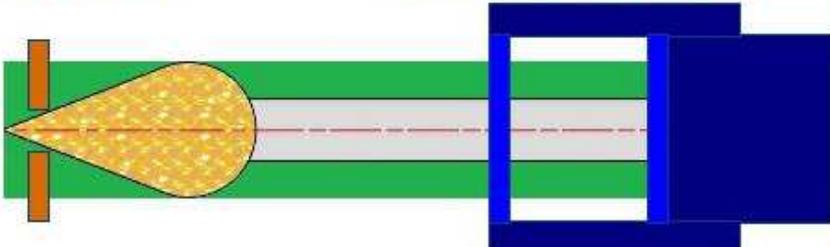
VER INSTRUCCIONES

MOSTRAR ESQUEMA

- POSICION BLOQUEADA -

Apertura min. = 0.00 [mm] - 0 [%]

Apertura max. = 24.00 [mm] - 100 [%]



APERTURA ACTUAL		VELOCIDAD ACTUAL	
0	[mm]	0	[rpm]
0	[%]	TIEMPO DE MUESTREO 1,5 [s] (Aprox.)	

TERMINAR APLICACION

IMPORTANTE:
 El no seguir las instrucciones al pie de la letra podria dar como resultado el daño permanente del Equipo de Turbina Pelton.

Figura 1.23. Medición de Velocidad de la Turbina Pelton.

14. Luego de que hayan sido tomado los datos necesarios (velocidad, altura de nivel de vertedero - Caudal, apertura de inyector, fuerza de balanzas de freno Pronny) presione el botón "NUEVA POSICIÓN", luego siga las instrucciones que le indique la aplicación.

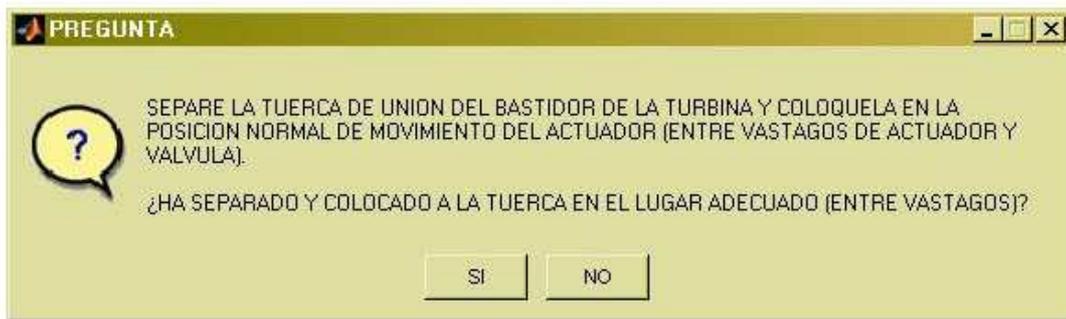


Figura 1.24. Instrucción de la aplicación.

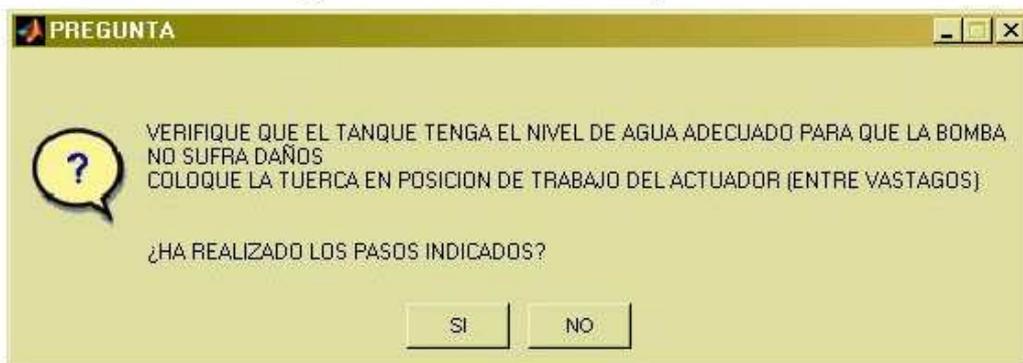


Figura 1.25. Instrucción de la aplicación.

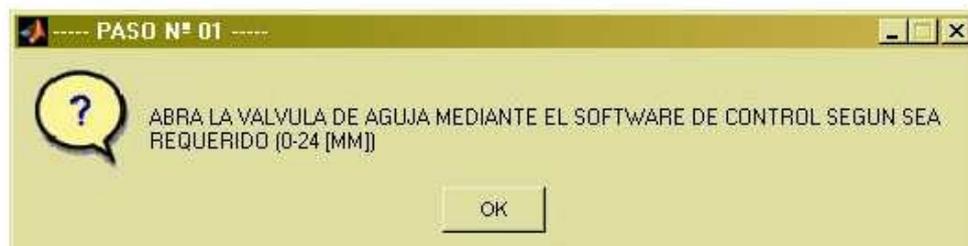


Figura 1.26. Instrucción de la aplicación.

15. Repita los pasos para posicionar el inyector.

16. En caso de que desee terminar con la aplicación presione el botón: "TERMINAR APLICACIÓN", para luego visualizar la siguiente ventana:

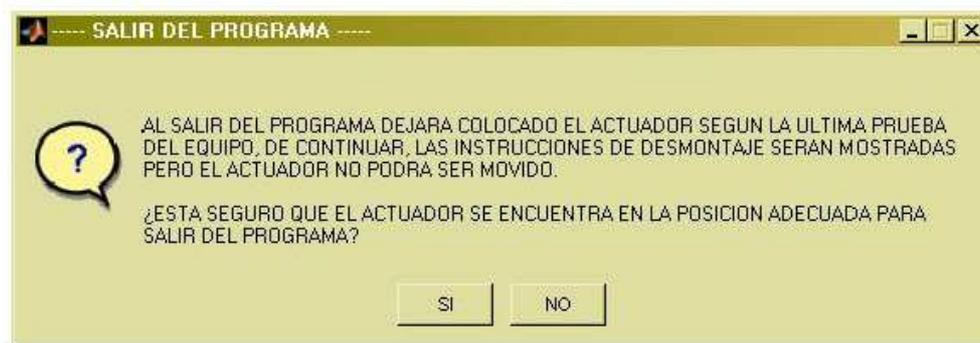


Figura 1.27. Pregunta de la aplicación.

17. Luego se debe seguir los pasos de desmontaje del equipo de laboratorio, que se indican a continuación. Al terminar los pasos debe presionar el botón: "SALIR".

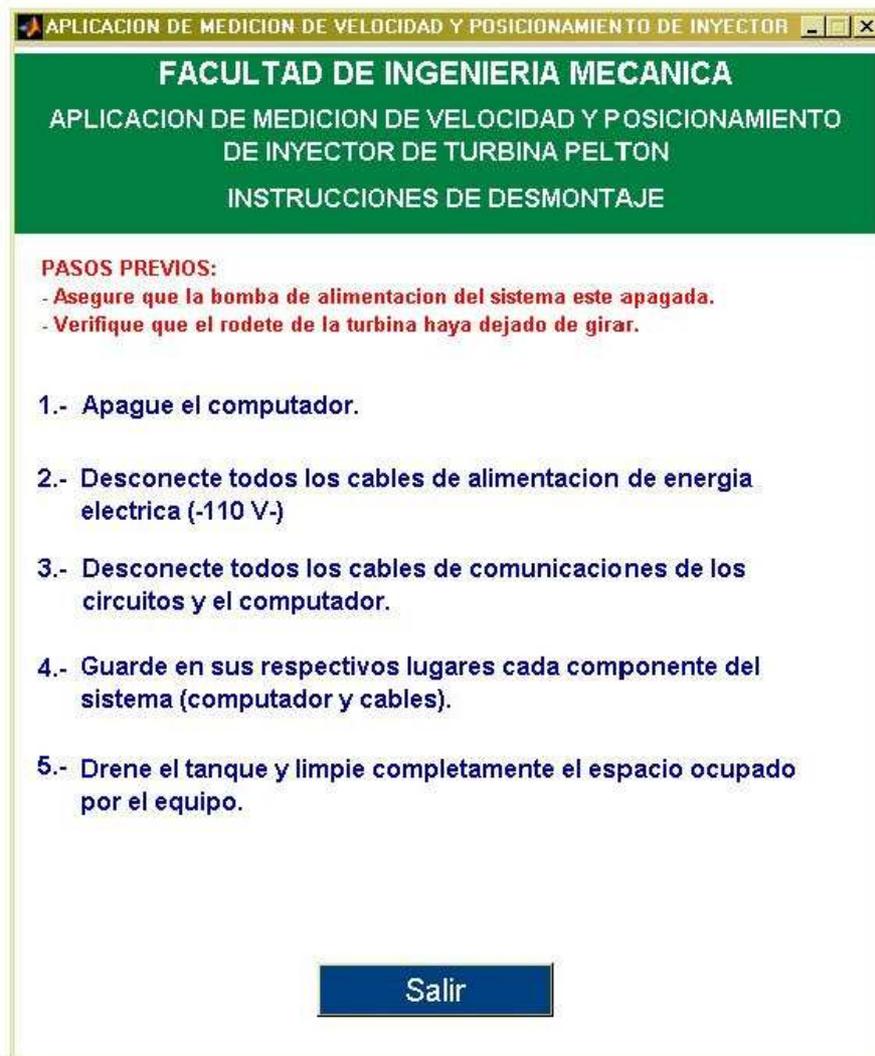


Figura 1.28. Instrucciones de desmontaje de equipo de laboratorio.

Las instrucciones de desmontaje se indican a continuación:

1. Apague el computador.
2. Desconecte todos los cables de alimentación de energía eléctrica (-110 V-)
3. Desconecte todos los cables de comunicaciones de los circuitos del computador.
4. Guarde en sus respectivos lugares cada componente del sistema (computador y cables).
5. Drene el tanque y limpie completamente el espacio ocupado por el equipo.

18. Al terminar correctamente la aplicación aparecerá la siguiente ventana, pulse el botón "OK":

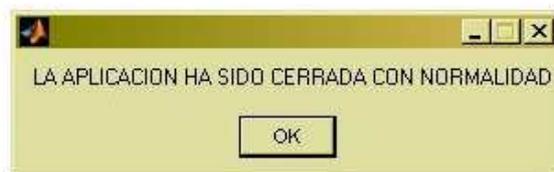


Figura 1.29. Ventana de cierre.

A continuación se indica como referencia cada una de las pantallas de la ayuda gráfica de la aplicación:



Figura 1.30. Ventana de inicio de la ayuda gráfica.

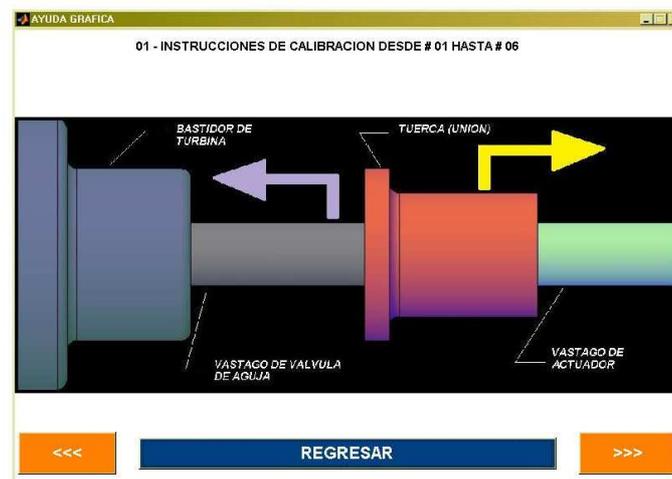


Figura 1.31. Ayuda gráfica - Instrucciones del Panel No 01.

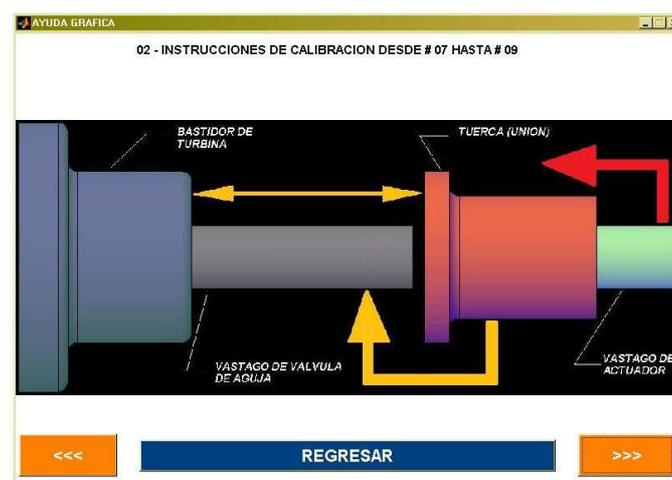


Figura 1.32. Ayuda gráfica - Instrucciones del Panel No 02.



Figura 1.33. Esquema de actuador e inyector después de finalizar el proceso de calibración.



Figura 1.34. Esquema del Equipo de Turbina Pelton de Laboratorio.

ANEXO 2

APLICACIÓN DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD Y POSICIONAMIENTO DE INYECTOR

INSTRUCTIVO DE CONEXIÓN DE CIRCUITOS

INSTRUCTIVO DE CONEXIÓN DE CIRCUITOS

Circuito de Potencia de Motores

1. Los alambres provenientes de los motores conéctelos en los socket numerados.
2. De igual forma conecte en el socket de la conexión serial del circuito, luego conecte el otro extremo en el puerto serial de la computadora.
3. Finalmente conecte a la red eléctrica de 110[V] el cable.

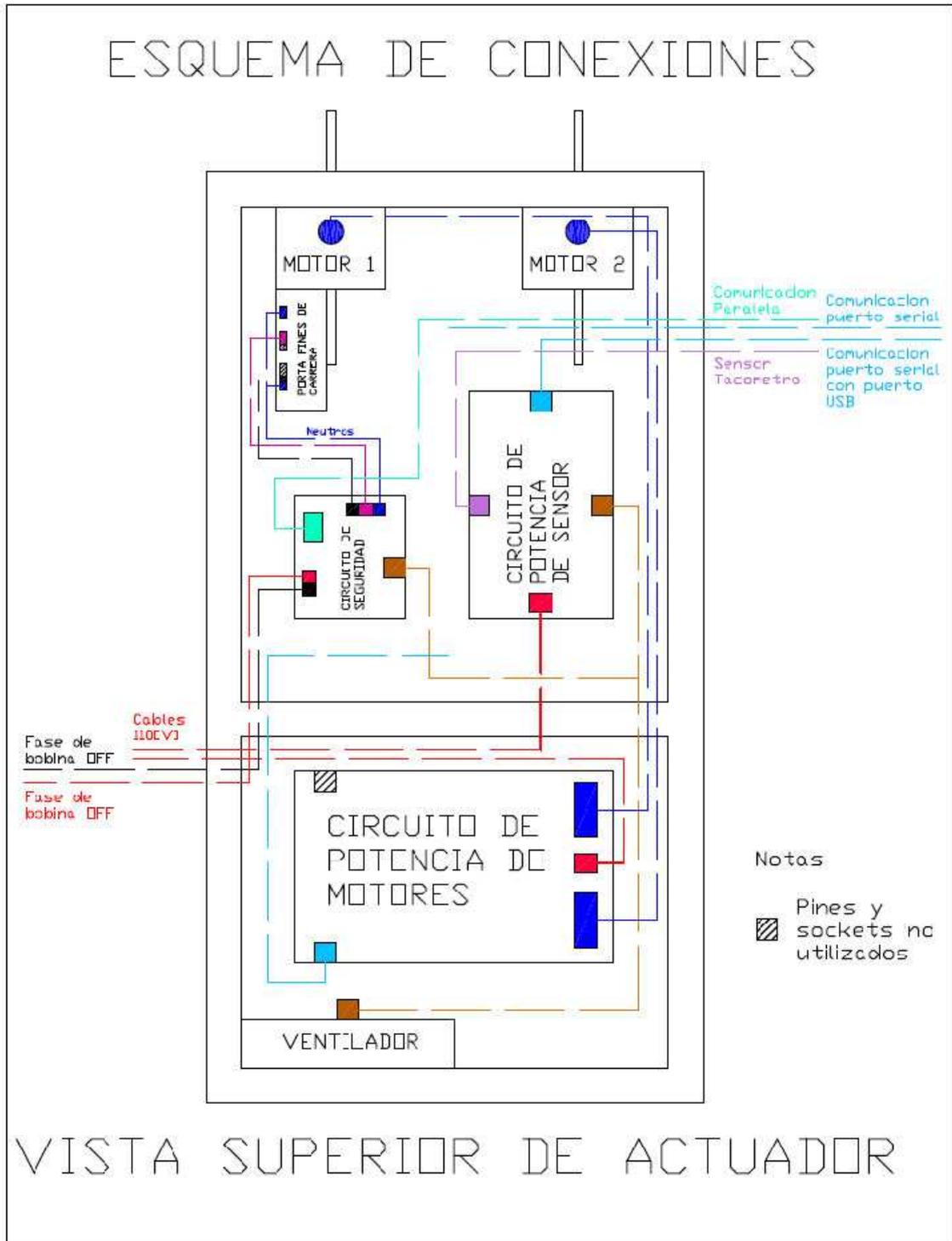
Circuito de Potencia de Sensor.

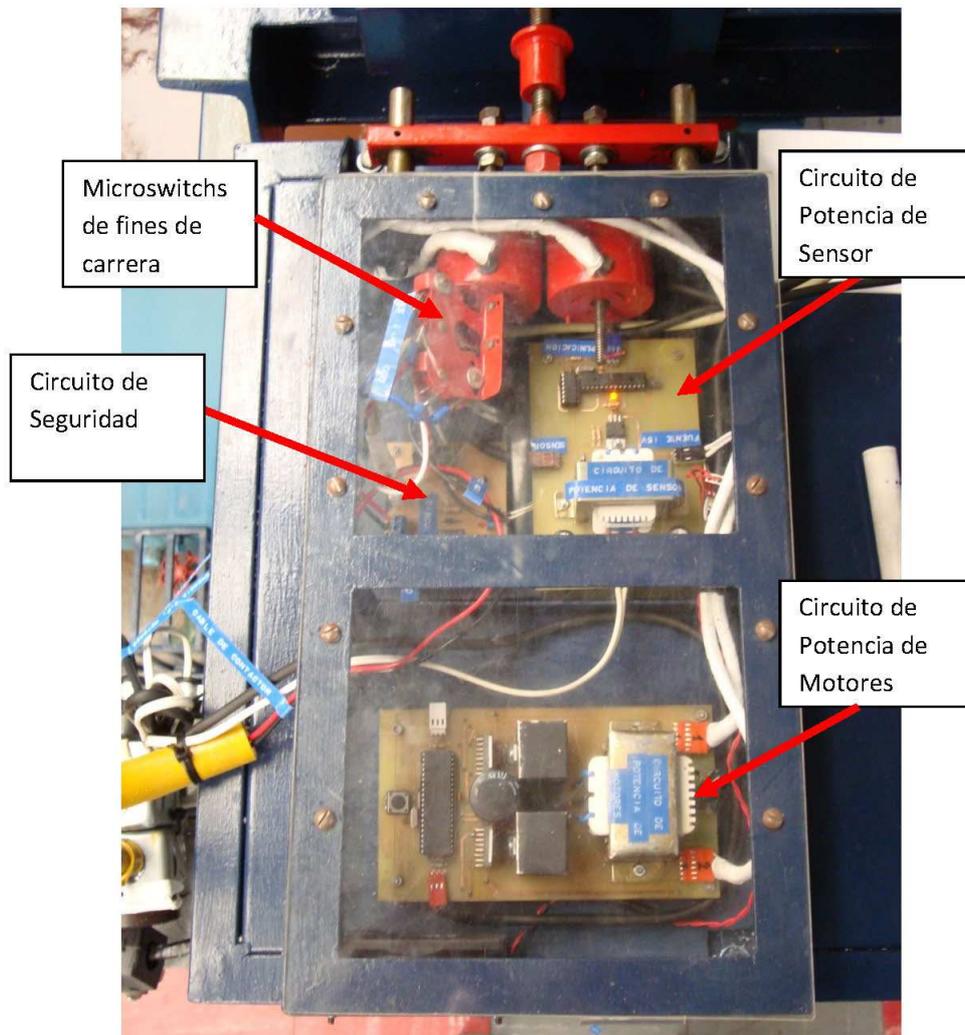
1. Conecte el cable proveniente del sensor tacómetro.
2. Conecte en el socket establecido el cable de comunicación serial, luego conecte el otro extremo al cable serial con puerto USB, finalmente conecte el USB en la computadora.
3. Conecte el cable de fuente de potencia para el ventilador y el circuito de seguridad.
4. Conecte a la red eléctrica de 110[V].

Circuito de Seguridad y micro switchs de fines de carrera.

1. Conecte cada cable de color según el grafico adjunto en cada pin de los micro switchs, tomar en cuenta que existen pines que no deben de ser conectados.
2. Conecte los extremos de los cables en el circuito de seguridad respetando los colores que están marcados.
3. Conecte el socket de conexión paralela, el otro extremo debe de ser colocado en el puerto paralelo del computador.
4. Conecte el cable de potencia proveniente del circuito de potencia del sensor.
5. Apagando el suministro de corriente del laboratorio de fluidos conecte los cables provenientes de una de las fases de la bobina a el circuito según el grafico. **VERIFIQUE QUE SEAN APAGADOS LOS BREAKERS CASO CONTRARIO EN CORTO CIRCUITO PUEDE CAUSAR UNA GRAN DESCARGA ELECTRICA.**

ESQUEMA DE CONEXIONES





**E – PRÁCTICA DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE
FLUIDOS – TURBINA PELTON (PROPUESTA) –
DESARROLLADA**

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

PRÁCTICA DE LABORATORIO

“TURBINA PELTON”

REALIZADA POR:

SR. FABIÁN FLORES VACA

SR. OSWALDO SANTIAGO BONILLA BÁEZ

REVISIÓN:

ING. CARLOS VALLADARES

ING. IVÁN SOLA

Quito, noviembre de 2008

CONTENIDO

1.- TEMA: TURBINA PELTON	5
2.- OBJETO DEL ENSAYO	5
3.- TERMINOLOGÍA Y FÓRMULAS	5
4.- DESARROLLO.....	7
4.1. CALIBRACIÓN DE VERTEDERO.....	7
4.2. CURVA DE SECCIÓN LIBRE VS. DESPLAZAMIENTO DE AGUJA.....	10
4.3. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DE LA VÁLVULA DE AGUJA	13
4.4. VARIACIÓN DE D_0/D_1 EN FUNCIÓN DEL CAUDAL	15
4.5. CURVAS CARACTERÍSTICAS:	19
4.5.1. SALTO VS. CAUDAL; PARA DIFERENTES APERTURAS DEL INYECTOR	22
4.5.2. CAUDAL VS. POSICIÓN DEL INYECTOR, PARA DIFERENTES SALTOS	23
4.5.3. VELOCIDAD VS. PAR-MOTOR	23
4.5.4. POTENCIA AL FRENO (BHP) VS. VELOCIDAD	24
4.5.5. POTENCIA ÚTIL (WHP) VS. VELOCIDAD	24
4.5.6. RENDIMIENTO VS. VELOCIDAD	25
4.5.7. VELOCIDAD DE FUGA (EMBALAMIENTO) VS. APERTURA DE INYECTOR	25
4.5.8. CURVAS DE ISO-RENDIMIENTO EN PLANO DE CAUDAL VS. VELOCIDAD (COLINA DE RENDIMIENTOS DE LA TURBINA PELTON)	26
5.- CONCLUSIONES	30
6.- RECOMENDACIONES	31
7.- BIBLIOGRAFÍA.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Curva de Calibración de Vertedero.	9
Figura 4.2. Casos de posición de aguja de inyector.....	10
Figura 4.3. Sección anular que se debe determinar ($A_{v//}$) – esquema frontal de aguja.	11
Figura 4.4. Sección Libre vs. Posición Desplazamiento de Aguja (Ver datos en tabla 4.5 y ejemplo de cálculo a continuación de la misma).....	12
Figura 4.5. Coeficiente de Descarga vs. Caudal (Gasto) (Ver datos en tabla 4.5 y ejemplo de cálculo a continuación de la misma)	14
Figura 4.6. Esquema de Aguja y áreas de acción de flujo.....	15
Figura 4.7. d_0/D_1 vs. Caudal (Ver datos en tabla 4.5 y ejemplo de cálculo a continuación de la misma).....	17
Figura 4.8. Familia de curvas de Salto vs. Caudal para diferentes aperturas de inyector.....	22
Figura 4.9. Caudal vs. Posición del Inyector ($H = 15,24 - 30,48 - 39,62$ [m]).	23
Figura 4.10. Velocidad vs. Par-Motor ($Z = 25 - 50 - 75 - 100$ [%])	23
Figura 4.11. Potencia al Freno (BHP) vs. Velocidad ($Z = 25 - 50 - 75 - 100$ [%]).....	24
Figura 4.12. Potencia Útil (WHP) vs. Velocidad ($Z = 25 - 50 - 75 - 100$ [%])	24
Figura 4.13. Rendimiento vs. Velocidad ($Z = 25 - 50 - 75 - 100$ [%])	25
Figura 4.14. Velocidad de Fuga vs. Apertura de Inyector.	25
Figura 4.15. $N = f(\eta)$; Aproximación a funciones polinómicas de 2 ^{do} grado	26
Figura 4.16. Curvas de Iso-rendimiento en plano de Caudal vs. Velocidad (Ecuaciones aproximadas).....	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Tabla de datos obtenidos para calibración de vertedero.....	7
Tabla 4.2. Cálculo del coeficiente de descarga.....	8
Tabla 4.3. Datos necesarios para graficar la curva de calibración.....	9
Tabla 4.4. Datos utilizados para cálculos de Sección Libre, Coeficiente de Descarga y d_0/D_1	17
Tabla 4.5. Valores de gravedad.....	18
Tabla 4.6. Datos tomados durante la práctica – Unidades Inglesas.....	19
Tabla 4.7. Datos tomados durante la práctica – Unidades Internacionales....	21
Tabla 4.8. Cálculo de las ecuaciones de $N = a + b.\eta + c.\eta^2$ (Número de datos = 5 = n).....	28
Tabla 4.9. Datos para graficar Caudal vs. Velocidad en curvas de Iso-rendimiento.....	29
Tabla 4.10. Datos de Curvas de Caudal vs. Velocidad - Posición de Inyector.	29

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS
PRÁCTICA DE LABORATORIO

1.- TEMA: TURBINA PELTON

2.- OBJETO DEL ENSAYO

El objetivo principal del ensayo es la puesta en práctica de los conceptos adquiridos en clase teórica acerca de la Turbina Pelton, además se busca determinar las características de éste tipo de motor hidráulico.

3.- TERMINOLOGÍA Y FÓRMULAS

N_W = potencia de agua de entrada de agua [Hp] (WHP)

$$N_W = \frac{H \cdot Q \cdot 62,4}{550 \cdot 60} = 1,89 \cdot H \cdot Q \cdot 10^{-3} \quad [\text{Hp}]$$

N_T = potencia de salida de la Turbina [Hp] (BHP)

$$N_T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot W_n \cdot N}{550 \cdot 60} \quad [\text{Hp}]$$

Q = flujo de agua [pie^3/min]

$$Q = \frac{8}{15} \cdot C_d \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sqrt{2g \cdot h}^{5/2} \quad [\text{pie}^3/\text{min}]$$

$g = 32,1740$ gravedad [pies / s^2] = 115826,4 [$\text{pies} / \text{min}^2$]

h = altura de nivel de vertedero [pies]

N = velocidad del eje de la turbina [rpm]

η = rendimiento de la Turbina [%]

$$\eta = \left(\frac{N_T}{N_W} \right) \times 100 \quad [\%]$$

r = radio del tambor del freno [pies] (el espesor de la banda se supone despreciable).

W_1 = Lectura de la balanza 1 [lb]

W_2 = Lectura de la balanza 2 [lb]

$W_n = W_1 - W_2 =$ Carga neta [lb]

62,4 = Peso específico del agua [lb / pie³]

H = Salto neto [pies]

Θ = Apertura de válvula de descarga de bomba [vueltas]

Todos los datos anteriores han sido citados en unidades inglesas debido a que el equipo de Turbina Pelton tiene aparatos de medida que trabajan en unidades inglesas. Para la conversión de datos a unidades internacionales se deben utilizar los siguientes coeficientes:

Potencia: [Hp] x 0,7456999 = [Kw]

Flujo: [pie³/min] x 1,699011 = [m³/h]

Longitud: [pies] x 0,3048 = [m]

Torque: [lbf.pie] x 1,3558 = [N.m]

4.- DESARROLLO

4.1. CALIBRACIÓN DE VERTEDERO

Ejemplo de cálculo de Q_{REAL} :

Dato # 5:

$$Q_{\text{REAL}5} = \frac{V_5}{T_5} = \frac{11,00}{3,22} = 3,42 \left[\frac{\text{lt}}{\text{s}} \right] = 3,42 * 2,11888 = 7,24 \left[\frac{\text{pie}^3}{\text{min}} \right]$$

Tabla 4.1. Tabla de datos obtenidos para calibración de vertedero.

#	θ	T	h	V	Q_{REAL}	Q_{REAL}	N	Temp.
	[Vueltas]	[s]	[in]	[lt]	[lt/s]	[ft ³ /min]	[rpm]	[C]
1	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,0
2	1,000	6,03	2,22	7,00	1,16	2,46	86	
3	1,250	4,24	2,86	10,00	2,36	5,00	240	
4	1,375	3,43	3,06	9,40	2,74	5,81	360	
5	1,500	3,22	3,36	11,00	3,42	7,24	485	
6	1,625	2,43	3,57	10,00	4,12	8,72	600	
7	1,750	2,97	3,80	15,40	5,19	10,99	725	27,6
8	1,875	3,19	3,90	16,40	5,14	10,89	795	
9	2,000	2,71	4,14	16,80	6,20	13,14	930	
10	2,125	2,66	4,38	17,50	6,58	13,94	1045	34,0
11	2,250	2,14	4,51	15,60	7,29	15,45	1150	
12	2,375	2,15	4,59	16,30	7,58	16,06	1216	
13	2,500	2,15	4,73	18,00	8,37	17,74	1245	
14	2,750	1,78	4,96	15,80	8,88	18,81	1405	
15	3,000	1,82	5,22	17,50	9,62	20,37	1550	
16	3,250	1,39	5,37	16,70	12,01	25,46	1690	

Para obtener la curva de calibración del vertedero se tomó en cuenta aquellos valores que proveían valores de C_d mayores o menores al C_d promedio en no más de 5%. Así pues, solo aquellos valores que cumplieran esta condición fueron tomados para evaluar el C_d final.

Ejemplo de cálculo; dato # 5:

$$Q_{\text{TEÓRICO}5} = \frac{8}{15} * \tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right) * \sqrt{2 * \frac{115826,4 \text{ pie}}{\text{min}^2}} * \left(\frac{3,36 \text{ in}}{12 \text{ in}} \text{ pie}\right)^{5/2} = 10,64 [\text{pie}^3 / \text{min}]$$

$$Cd_5 = \frac{Q_{REAL5}}{Q_{TEÓRICO5}} = \frac{3,42 \text{ lt} \cdot \text{seg}}{\text{seg}} \cdot \frac{2,11888 \text{ pie}^3}{1 \text{ lt}} \cdot \frac{\text{min}}{10,64 \text{ pie}^3} = 0,68 [1]$$

Tabla 4.2. Cálculo del coeficiente de descarga.

#	$Q_{teórico}$	$Q_{teórico}$	Cd	h	Qreal	FILTRO Cd(+5%)	Cderror
	[lt/s]	[ft ³ /min]					
1	0,00	0,00					
2	1,78	3,77	0,65				5,84%
3	3,36	7,11	0,70	2,86	2,36	0,70	1,50%
4	3,97	8,42	0,69	3,06	2,74	0,69	0,38%
5	5,02	10,64	0,68	3,36	3,42	0,68	1,71%
6	5,84	12,38	0,70	3,57	4,12	0,70	1,74%
7	6,83	14,47	0,76				9,62%
8	7,29	15,44	0,71	3,90	5,14	0,71	1,89%
9	8,46	17,93	0,73				5,80%
10	9,74	20,64	0,68	4,38	6,58	0,68	2,43%
11	10,48	22,20	0,70	4,51	7,29	0,70	0,47%
12	10,95	23,20	0,69	4,59	7,58	0,69	0,00%
13	11,80	25,01	0,71	4,73	8,37	0,71	2,43%
14	13,29	28,16	0,67	4,96	8,88	0,67	3,52%
15	15,10	32,00	0,64				8,00%
16	16,21	34,35	0,74				7,00%
Cd _{PROMEDIO}			0,70	Cd _{PROMEDIO}		0,69	3,49%
CORRECCIÓN							

$$Cd = 0,69 [1]$$

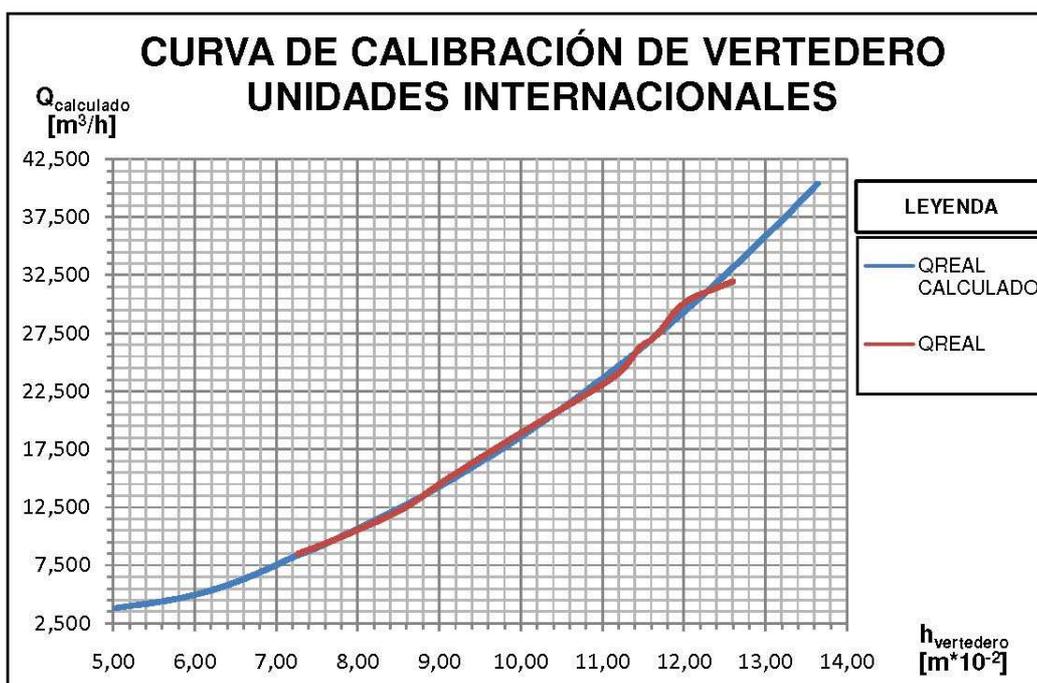
Luego de obtener el Cd se procedió a desarrollar los cálculos de caudal para determinar los puntos necesarios para graficar la curva de calibración de vertedero, en unidades internacionales.

Ejemplo de cálculo; dato # 5:

$$Q_{REAL\ CALCULADO5} = 0,69 \cdot \frac{8}{15} \cdot \tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{127094184 \text{ m}}{h^2}} \cdot (8,53 \text{ m} \cdot 10^{-2})^{5/2} = 12,585 [\text{m}^3/\text{h}]$$

Tabla 4.3. Datos necesarios para graficar la curva de calibración.

#	$h_{\text{vertedero}}$	Q_{REAL}
	$[\text{m} \cdot 10^{-2}]$	$[\text{m}^3/\text{h}]$
1	0,00	0,000
2	5,64	4,466
3	7,26	8,412
4	7,77	9,961
5	8,53	12,585
6	9,07	14,644
7	9,65	17,118
8	9,91	18,267
9	10,52	21,208
10	11,13	24,416
11	11,46	26,269
12	11,66	27,449
13	12,01	29,590
14	12,60	33,320
15	13,26	37,859
16	13,64	40,638

**Figura 4.1.** Curva de Calibración de Vertedero.

4.2. CURVA DE SECCIÓN LIBRE VS. DESPLAZAMIENTO DE AGUJA

Hipótesis:

- La punta del inyector – aguja – es un cono perfecto medido desde la punta hasta la longitud Z_1 (Ver figura), el resto de la aguja se supone no importante.
- La apertura mínima del inyector ($Z = 0$) permite tener una sección anular nula ($A_{///} = 0$).
- La apertura $Z \geq Z_1$ del inyector permite tener una sección libre máxima que depende del radio constante ($R_2 = D_1/2$) de la tobera del inyector.

Tesis:

Encuentre la sección libre en función de la posición del inyector (Sección

Anular): $A_{///} = f(Z)$

Desarrollo:

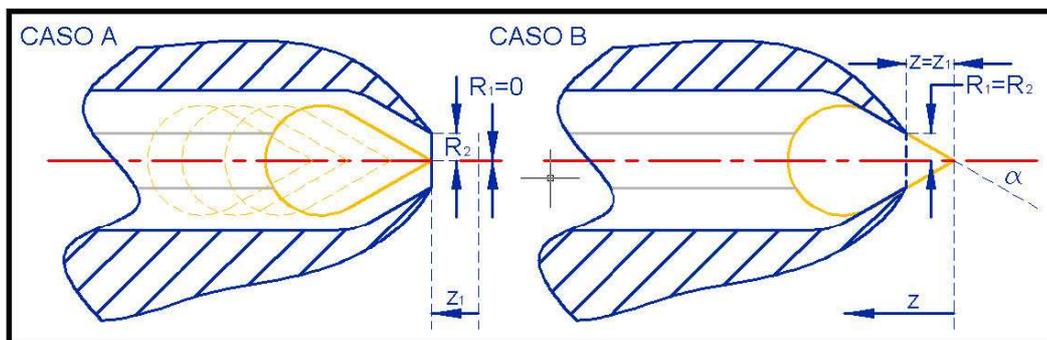


Figura 4.2. Casos de posición de aguja de inyector.

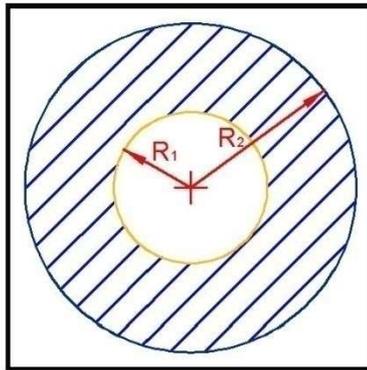


Figura 4.3. Sección anular que se debe determinar ($A_{///}$) – esquema frontal de aguja.

$$\tan(\alpha) = \frac{R_2}{Z_1} = \frac{R_1}{(Z_1 - Z)}$$

$$A_{///} = \pi * (r_2^2 - r_1^2)$$

$$r_1 = f(Z) = \begin{cases} 0 & ; Z > Z_1 \\ (Z_1 - Z) * \frac{R_2}{Z_1} & ; 0 \leq Z \leq Z_1 \end{cases}$$

$$A_{///} = f(Z) = \begin{cases} \pi * r_2^2 & ; Z > Z_1 \\ \pi * \left(r_2^2 - \left[(Z_1 - Z) * \frac{R_2}{Z_1} \right]^2 \right) & ; 0 \leq Z \leq Z_1 \end{cases}$$

$$r_2 = \frac{D_1}{2}$$

$$A_{///} = f(Z) = \begin{cases} \pi * \left(\frac{D_1}{2} \right)^2 & ; Z > Z_1 \\ \pi * \left(\left(\frac{D_1}{2} \right)^2 - \left[(Z_1 - Z) * \frac{D_1}{2 \cdot Z_1} \right]^2 \right) & ; 0 \leq Z \leq Z_1 \end{cases}$$

La función que se indica sobre estas líneas depende de 2 constantes: D_1 y Z_1 , las cuales deben determinarse físicamente abriendo la tapa de la

carcasa de la turbina y colocando al inyector de la misma en las posiciones de los Casos A y B (figura).

Realizando las mediciones de la aguja se obtuvo las medidas siguientes:

$$Z1 = 23 \text{ [mm]}$$

$$D1 = 24 \text{ [mm]}$$

Al reemplazar los valores obtenidos en la función del área del orificio anular, $A_{///}$, se tiene:

$$A_{///} = f(Z) = \begin{cases} 144 * \pi & ; Z > 23[\text{mm}] \\ \pi * \left(144 - \left[(23-Z) * \frac{12}{23} \right]^2 \right) & ; 0 \leq Z \leq 23[\text{mm}] \end{cases}$$

A continuación se indica la gráfica desarrollada de $A_{///}$ vs. Z:

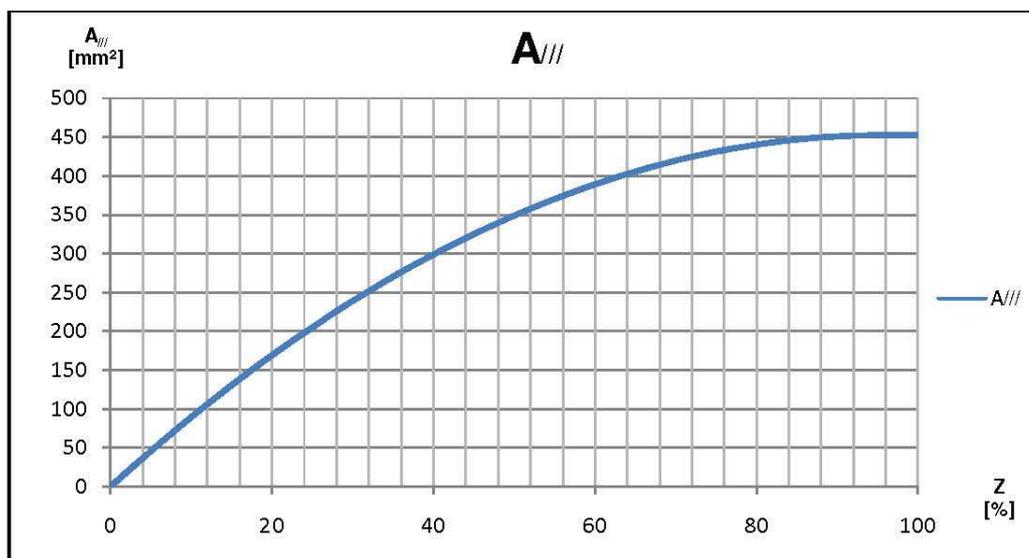


Figura 4.4. Sección Libre vs. Posición Desplazamiento de Aguja (Ver datos en tabla 4.5 y ejemplo de cálculo a continuación de la misma)

4.3. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DE LA VÁLVULA DE AGUJA

Según Mataix:

Ecuación General de Desagüe por Orificios, Tubos y Toberas:

$$Q = C_d * A * \sqrt{2 * g * H}$$

Q = Caudal Real

$C_d = C_v * C_c$ = Coeficiente de Caudal o Descarga

$C_v = \frac{V_{REAL}}{V_{TEÓRICA}}$ = Coeficiente de velocidad

$C_c = \frac{A_{Vena Contracta}}{A_{Orificio}}$ = Coeficiente de contracción

A = Área del orificio de descarga

g = Gravedad

H = Altura de columna de agua en la tubería anterior al inyector

La ecuación es aplicable si se toma en cuenta que la velocidad del chorro se calcula de la siguiente manera, según Streeter:

$$V = C_v \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Lo cual concuerda con la fórmula anterior desarrollada por Mataix, si se reemplaza de la siguiente forma:

$$Q = (C_c * A) (C_v * \sqrt{2 * g * H})$$

Para nuestro caso, el área del orificio corresponde a un orificio anular, es el área determinada en la pregunta anterior, así se tiene:

$$A = A_{III} = f(Z) = \begin{cases} \pi * \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 & ; Z > Z_1 \\ \pi * \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - \left[(Z_1 - Z) * \frac{D_1}{2 \cdot Z_1} \right]^2 & ; 0 \leq Z \leq Z_1 \end{cases}$$

Por lo cual se deduce:

$$Q = C_d * A * \sqrt{2 * g * H}$$

$$C_d = \frac{Q}{A * \sqrt{2 * g * H}}$$

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot g}} \cdot \left(\frac{Q}{A_{III} * \sqrt{H}} \right) = f(Z, Q, H)$$

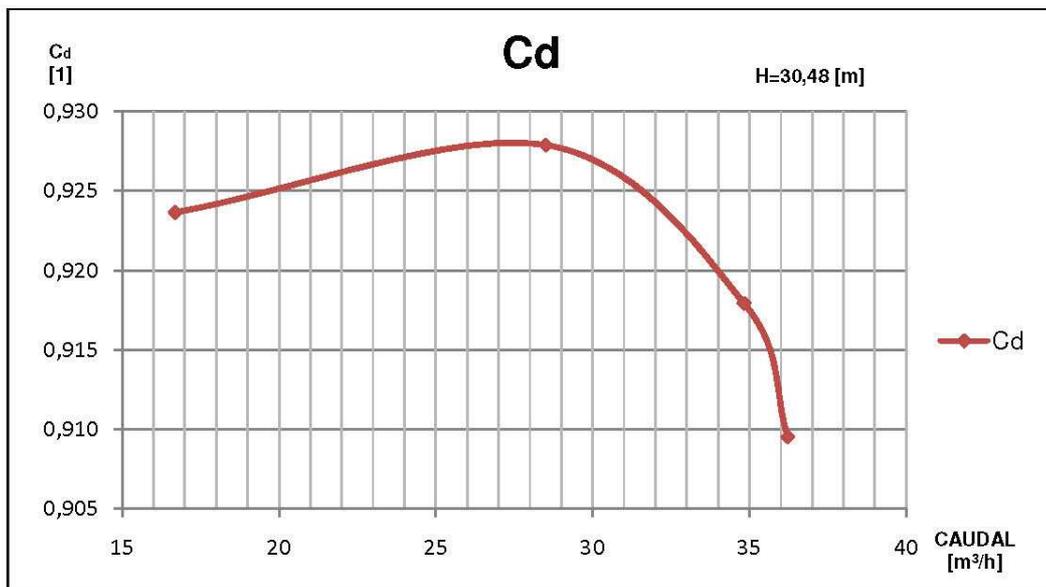


Figura 4.5. Coeficiente de Descarga vs. Caudal (Gasto) (Ver datos en tabla 4.5 y ejemplo de cálculo a continuación de la misma)

4.4. VARIACIÓN DE d_0/D_1 EN FUNCIÓN DEL CAUDAL

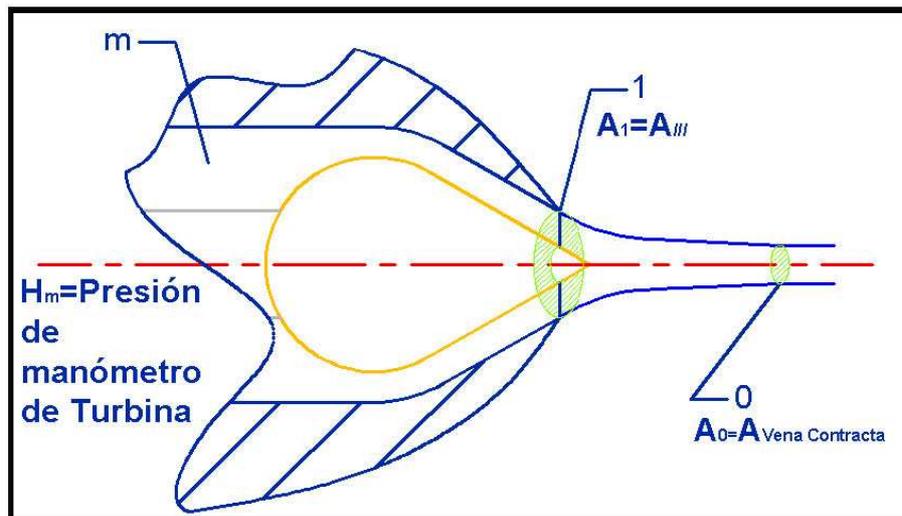


Figura 4.6. Esquema de Aguja y áreas de acción de flujo.

Aplicando la Ecuación de Bernoulli entre los puntos m y 1 se tiene:

$$H_m + Z_m + \frac{V_m^2}{2 \cdot g} = H_1 + Z_1 + \frac{V_1^2}{2 \cdot g}$$

$$Z_m = Z_1 = 0$$

$$V_m = 0$$

$$H_1 = 0$$

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot g} = H_m$$

$$H_m = H$$

$$V_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (\text{Teórica})$$

$$Q = Q_1 = Q_0 = V_0 \cdot A_0$$

$$V_0 = C_v \cdot V_1 = C_v \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$A_0 = C_c \cdot A_{III} = \pi \cdot \frac{d_0^2}{4} = \frac{Q}{V_0}$$

$$A_0 = \frac{Q}{C_v \sqrt{2 \cdot g \cdot H}}$$

$$\pi \cdot \frac{d_0^2}{4} = \frac{Q}{C_v \sqrt{2 \cdot g \cdot H}}$$

$$d_0 = 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot C_v \sqrt{2 \cdot g \cdot H}}}$$

$$\frac{d_0}{D_1} = \frac{2}{D_1} \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot C_v \sqrt{2 \cdot g}}} \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{H}}}$$

Sea:
$$F = \frac{2}{D_1} \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot C_v \sqrt{2 \cdot g}}}$$

Se tiene la siguiente relación:

$$\frac{d_0}{D_1} = F \frac{Q^{1/2}}{H^{1/4}} \text{ (Relación general)}$$

Físicamente, el caudal es función dependiente de la altura y la posición del inyector, razón por la cual, si se mantiene una altura dada, el caudal será función únicamente de la posición del inyector.

Así pues:

$$\frac{d_0}{D_1} = F \frac{(Q(Z))^{1/2}}{H_{CTE}^{1/4}} = f(Z)$$

A continuación se indica la gráfica obtenida para la relación anterior:



Figura 4.7. d_0/D_1 vs. Caudal (Ver datos en tabla 4.5 y ejemplo de cálculo a continuación de la misma)

Tabla 4.4. Datos utilizados para cálculos de Sección Libre, Coeficiente de Descarga y d_0/D_1 .

# de Toma de Datos	Vertedero		Apertura de Inyector	Área de anular en Inyector	Coeficiente de Descarga	Relación de Diámetros				
	Apert. Válvula de descarga	Apertura de Inyector					Velocidad	Salto	Altura	Caudal
	Φ	Z					N	H	h	Q
[vueltas]	[%]	R.P.M.	[m]	$[m \cdot 10^{-3}]$	$[m^3/h]$	[mm]	$[mm^2]$	[1]	[1]	
33	1,63	25	1373	30,48	0,10	16,69	6	205,24	0,924	0,657
38	2,25	50	1464	30,48	0,12	28,50	12	348,91	0,928	0,859
43	2,63	75	1502	30,48	0,13	34,82	18	431,01	0,918	0,950
48	2,81	100	1507	30,48	0,13	36,22	24	452,39	0,910	0,968
<ul style="list-style-type: none"> Los datos de la presente tabla fueron tomados de la tabla 4.5 										
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">F</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$[h^{-1/2} / m^{-3/4}]$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,3781</td> </tr> </table>							F	$[h^{-1/2} / m^{-3/4}]$	0,3781	
F										
$[h^{-1/2} / m^{-3/4}]$										
0,3781										

Ejemplos de cálculo de $A_{//}$, C_d , d_0/D_1 : para el dato No 43:

$$A_{//43} = \pi * \left(144 - \left[(23-18) * \frac{12}{23} \right]^2 \right) = 431,01 [\text{mm}^2]$$

$$C_{d43} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 127094184}} \cdot \left(\frac{34,82}{\frac{431,01}{1000 \cdot 1000} * \sqrt{30,48}} \right) = 0,918 [1]$$

$$\left(\frac{d_0}{D_1} \right)_{43} = 0,3781 \frac{(34,82)^{1/2}}{(30,48)^{1/4}} = 0,950 [1]$$

En los cálculos citados en las secciones anteriores se utilizó a la gravedad terrestre con los valores que se indican en la tabla siguiente:

Tabla 4.5. Valores de gravedad.

g	[m/s ²]	[m/h ²]	[ft /s ²]	[ft /min ²]
	9,80665	127094184	32,174	115826,4

4.5. CURVAS CARACTERÍSTICAS:

Tabla 4.6. Datos tomados durante la práctica – Unidades Inglesas.

UNIDADES INGLESAS															
PRUEBA	# de Toma de Datos	Apert. Válvula de descarga	Apertura de Inyector	Velocidad	Salto	Vertedero		Freno			Par - Motor	Potencia		Rendimiento	Obs.
		Φ				Z	N	H	h	Q		W ₁	W ₂		
		[vueltas]	[%]	R.P.M.	[ft]	[in]	[ft ³ /min]	[lb]	[lb]	[lb]	[lb.pie]	[Hp]	[Hp]	[%]	
1 - Salto vs. Caudal	1	1,00	25	295	11	2,20	2,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,053	0,000	0,000%	
	2	1,25	25	650	29	2,85	4,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,268	0,000	0,000%	
	3	1,50	25	1000	60	3,40	7,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,861	0,000	0,000%	
	4	1,75	25	1360	99	3,75	9,69	0,00	0,00	0,00	0,00	1,814	0,000	0,000%	
	5	2,00	25	1700	147	4,07	11,89	0,00	0,00	0,00	0,00	3,306	0,000	0,000%	
	6	1,50	50	660	28	3,34	7,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,384	0,000	0,000%	
	7	2,00	50	1183	70	4,21	12,94	0,00	0,00	0,00	0,00	1,713	0,000	0,000%	
	8	2,50	50	1635	124	4,79	17,87	0,00	0,00	0,00	0,00	4,190	0,000	0,000%	
	9	3,00	50	1916	165	5,10	20,90	0,00	0,00	0,00	0,00	6,522	0,000	0,000%	
	10	3,50	50	2010	188	5,24	22,37	0,00	0,00	0,00	0,00	7,952	0,000	0,000%	
	11	1,50	75	558	19	3,41	7,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,275	0,000	0,000%	
	12	2,00	75	996	50	4,26	13,33	0,00	0,00	0,00	0,00	1,260	0,000	0,000%	
	13	2,50	75	1395	90	4,87	18,63	0,00	0,00	0,00	0,00	3,170	0,000	0,000%	
	14	3,00	75	1720	130	5,27	22,69	0,00	0,00	0,00	0,00	5,578	0,000	0,000%	
	15	3,50	75	1890	152	5,45	24,68	0,00	0,00	0,00	0,00	7,093	0,000	0,000%	
	16	1,50	100	490	17	3,42	7,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,247	0,000	0,000%	
	17	2,00	100	935	45	4,30	13,65	0,00	0,00	0,00	0,00	1,161	0,000	0,000%	
	18	2,50	100	1316	79	4,89	18,82	0,00	0,00	0,00	0,00	2,811	0,000	0,000%	
	19	3,00	100	1540	108	5,24	22,37	0,00	0,00	0,00	0,00	4,568	0,000	0,000%	
	20	3,50	100	1745	138	5,52	25,48	0,00	0,00	0,00	0,00	6,648	0,000	0,000%	
2 - Caudal vs. Z	21	1,38	25	900	50	3,13	6,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,583	0,000	0,000%	
	22	1,81	50	985	50	3,92	10,83	0,00	0,00	0,00	0,00	1,024	0,000	0,000%	
	23	2,00	75	1011	50	4,28	13,49	0,00	0,00	0,00	0,00	1,275	0,000	0,000%	
	24	2,13	100	1016	50	4,41	14,53	0,00	0,00	0,00	0,00	1,374	0,000	0,000%	
	25	1,63	25	1373	100	3,64	9,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,701	0,000	0,000%	
	26	2,25	50	1469	100	4,59	16,06	0,00	0,00	0,00	0,00	3,037	0,000	0,000%	
	27	2,63	75	1497	100	5,00	19,89	0,00	0,00	0,00	0,00	3,762	0,000	0,000%	
	28	2,80	100	1493	100	5,13	21,21	0,00	0,00	0,00	0,00	4,011	0,000	0,000%	
	29	1,80	25	1583	130	3,94	10,97	0,00	0,00	0,00	0,00	2,696	0,000	0,000%	
	30	2,69	50	1664	130	4,88	18,72	0,00	0,00	0,00	0,00	4,602	0,000	0,000%	
	31	3,13	75	1721	130	5,30	23,01	0,00	0,00	0,00	0,00	5,657	0,000	0,000%	
	32	3,38	100	1720	130	5,47	24,90	0,00	0,00	0,00	0,00	6,122	0,000	0,000%	
3 - 8	33	1,63	25	1373	100	3,77	9,82	0,00	0,00	0,00	0,00	1,857	0,000	0,000%	
	34	1,63	25	1330	100	3,77	9,82	2,00	0,00	2,00	1,00	1,857	0,253	13,636%	

35	1,63	25	1263	100	3,77	9,82	4,00	0,00	4,00	2,00	1,857	0,481	25,898%
36	1,63	25	1173	100	3,77	9,82	6,00	0,00	6,00	3,00	1,857	0,670	36,079%
37	1,63	25	1087	100	3,77	9,82	8,50	0,25	8,25	4,13	1,857	0,854	45,971%
38	2,25	50	1464	100	4,67	16,77	0,00	0,00	0,00	0,00	3,172	0,000	0,000%
39	2,25	50	1411	100	4,67	16,77	2,00	0,00	2,00	1,00	3,172	0,269	8,471%
40	2,25	50	1383	100	4,67	16,77	4,00	0,00	4,00	2,00	3,172	0,527	16,605%
41	2,25	50	1335	100	4,67	16,77	6,25	0,25	6,00	3,00	3,172	0,763	24,043%
42	2,25	50	1287	100	4,67	16,77	8,50	0,40	8,10	4,05	3,172	0,992	31,292%
43	2,63	75	1502	100	5,06	20,50	0,00	0,00	0,00	0,00	3,876	0,000	0,000%
44	2,63	75	1454	100	5,06	20,50	2,00	0,00	2,00	1,00	3,876	0,277	7,143%
45	2,63	75	1425	100	5,06	20,50	4,00	0,15	3,85	1,93	3,876	0,522	13,476%
46	2,63	75	1383	100	5,06	20,50	6,30	0,25	6,05	3,03	3,876	0,797	20,552%
47	2,63	75	1354	100	5,06	20,50	8,00	0,25	7,75	3,88	3,876	0,999	25,775%
48	2,81	100	1507	100	5,14	21,32	0,00	0,00	0,00	0,00	4,031	0,000	0,000%
49	2,81	100	1483	100	5,14	21,32	2,00	0,00	2,00	1,00	4,031	0,282	7,005%
50	2,81	100	1440	100	5,14	21,32	4,30	0,25	4,05	2,03	4,031	0,555	13,774%
51	2,81	100	1397	100	5,14	21,32	6,50	0,40	6,10	3,05	4,031	0,811	20,127%
52	2,81	100	1373	100	5,14	21,32	8,30	0,50	7,80	3,90	4,031	1,020	25,294%

Ejemplo de cálculo; # 50:

$$Q_{50} = 0,69 \cdot \frac{8}{15} * \tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right) * \sqrt{2 * \frac{115826,4 \text{ pie}}{\text{min}^2} * \left(\frac{5,14 \text{ in}}{12 \text{ in}} \text{ pie}\right)^{5/2}} = 21,32 [\text{pie}^3 / \text{min}]$$

$$Q_{50} = 21,32 * 1,699011 = 36,22 [\text{m}^3 / \text{h}]$$

$$T_{50} = 2,03 * 1,3558 = 2,75 [\text{N} \cdot \text{m}]$$

$$WHP_{50} = 1,89 * 10^{-3} * H * Q = 1,89 * 10^{-3} * 100 * 21,32 = 4,031 [\text{Hp}]$$

$$WHP_{50} = 4,031 * 0,7456999 = 3,006 [\text{Kw}]$$

$$\eta_{50} = \frac{0,555}{4,031} = \frac{0,414}{3,006} = 13,774 [\%]$$

Tabla 4.7. Datos tomados durante la práctica – Unidades Internacionales.

UNIDADES INTERNACIONALES															
PRUEBA	# de Toma de Datos	Apert. Válvula de descarga	Apertura de Inyector	Velocidad	Vertedero		Freno			Par - Motor	Potencia		Rendimiento	Obs.	
		Ø	Z	N	H	h	Q	W ₁	W ₂	W _n	T	WHP	BHP		n
		[vueltas]	[%]	R. P. M.	[m]	[m ²]	[m ³ /h]	[N]	[N]	[N]	[N.m]	[Kw]	[Kw]		[%]
1 - Salto vs. Caudal	1	1,00	25	295	3,35	0,06	4,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,040	0,000	0,000%	
	2	1,25	25	650	8,84	0,07	8,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,200	0,000	0,000%	
	3	1,50	25	1000	18,29	0,09	12,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,642	0,000	0,000%	
	4	1,75	25	1360	30,18	0,10	16,47	0,00	0,00	0,00	0,00	1,353	0,000	0,000%	
	5	2,00	25	1700	44,81	0,10	20,21	0,00	0,00	0,00	0,00	2,465	0,000	0,000%	
	6	1,50	50	660	8,53	0,08	12,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,286	0,000	0,000%	
	7	2,00	50	1183	21,34	0,11	21,99	0,00	0,00	0,00	0,00	1,277	0,000	0,000%	
	8	2,50	50	1635	37,80	0,12	30,36	0,00	0,00	0,00	0,00	3,125	0,000	0,000%	
	9	3,00	50	1916	50,29	0,13	35,52	0,00	0,00	0,00	0,00	4,864	0,000	0,000%	
	10	3,50	50	2010	57,30	0,13	38,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,930	0,000	0,000%	
	11	1,50	75	558	5,79	0,09	12,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,205	0,000	0,000%	
	12	2,00	75	996	15,24	0,11	22,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,940	0,000	0,000%	
	13	2,50	75	1395	27,43	0,12	31,65	0,00	0,00	0,00	0,00	2,364	0,000	0,000%	
	14	3,00	75	1720	39,62	0,13	38,55	0,00	0,00	0,00	0,00	4,159	0,000	0,000%	
	15	3,50	75	1890	46,33	0,14	41,93	0,00	0,00	0,00	0,00	5,289	0,000	0,000%	
	16	1,50	100	490	5,18	0,09	13,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,185	0,000	0,000%	
	17	2,00	100	935	13,72	0,11	23,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,866	0,000	0,000%	
	18	2,50	100	1316	24,08	0,12	31,97	0,00	0,00	0,00	0,00	2,096	0,000	0,000%	
	19	3,00	100	1540	32,92	0,13	38,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,406	0,000	0,000%	
	20	3,50	100	1745	42,06	0,14	43,29	0,00	0,00	0,00	0,00	4,958	0,000	0,000%	
2 - Caudal vs. Z	21	1,38	25	900	15,24	0,08	10,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,435	0,000	0,000%	
	22	1,81	50	985	15,24	0,10	18,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,763	0,000	0,000%	
	23	2,00	75	1011	15,24	0,11	22,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,951	0,000	0,000%	
	24	2,13	100	1016	15,24	0,11	24,69	0,00	0,00	0,00	0,00	1,025	0,000	0,000%	
	25	1,63	25	1373	30,48	0,09	15,28	0,00	0,00	0,00	0,00	1,269	0,000	0,000%	
	26	2,25	50	1469	30,48	0,12	27,29	0,00	0,00	0,00	0,00	2,265	0,000	0,000%	
	27	2,63	75	1497	30,48	0,13	33,80	0,00	0,00	0,00	0,00	2,805	0,000	0,000%	
	28	2,80	100	1493	30,48	0,13	36,04	0,00	0,00	0,00	0,00	2,991	0,000	0,000%	
	29	1,80	25	1583	39,62	0,10	18,63	0,00	0,00	0,00	0,00	2,010	0,000	0,000%	
	30	2,69	50	1664	39,62	0,12	31,81	0,00	0,00	0,00	0,00	3,432	0,000	0,000%	
	31	3,13	75	1721	39,62	0,13	39,10	0,00	0,00	0,00	0,00	4,219	0,000	0,000%	
	32	3,38	100	1720	39,62	0,14	42,31	0,00	0,00	0,00	0,00	4,565	0,000	0,000%	
3 - 8	33	1,63	25	1373	30,48	0,10	16,69	0,00	0,00	0,00	0,00	1,385	0,000	0,000%	
	34	1,63	25	1330	30,48	0,10	16,69	8,90	0,00	8,90	1,36	1,385	0,189	13,636%	
	35	1,63	25	1263	30,48	0,10	16,69	17,79	0,00	17,79	2,71	1,385	0,359	25,898%	
	36	1,63	25	1173	30,48	0,10	16,69	26,69	0,00	26,69	4,07	1,385	0,500	36,079%	
	37	1,63	25	1087	30,48	0,10	16,69	37,81	1,11	36,70	5,59	1,385	0,637	45,971%	
	38	2,25	50	1464	30,48	0,12	28,50	0,00	0,00	0,00	0,00	2,365	0,000	0,000%	

39	2,25	50	1411	30,48	0,12	28,50	8,90	0,00	8,90	1,36	2,365	0,200	8,471%
40	2,25	50	1383	30,48	0,12	28,50	17,79	0,00	17,79	2,71	2,365	0,393	16,605%
41	2,25	50	1335	30,48	0,12	28,50	27,80	1,11	26,69	4,07	2,365	0,569	24,043%
42	2,25	50	1287	30,48	0,12	28,50	37,81	1,78	36,03	5,49	2,365	0,740	31,292%
43	2,63	75	1502	30,48	0,13	34,82	0,00	0,00	0,00	0,00	2,890	0,000	0,000%
44	2,63	75	1454	30,48	0,13	34,82	8,90	0,00	8,90	1,36	2,890	0,206	7,143%
45	2,63	75	1425	30,48	0,13	34,82	17,79	0,67	17,13	2,61	2,890	0,389	13,476%
46	2,63	75	1383	30,48	0,13	34,82	28,02	1,11	26,91	4,10	2,890	0,594	20,552%
47	2,63	75	1354	30,48	0,13	34,82	35,59	1,11	34,47	5,25	2,890	0,745	25,775%
48	2,81	100	1507	30,48	0,13	36,22	0,00	0,00	0,00	0,00	3,006	0,000	0,000%
49	2,81	100	1483	30,48	0,13	36,22	8,90	0,00	8,90	1,36	3,006	0,211	7,005%
50	2,81	100	1440	30,48	0,13	36,22	19,13	1,11	18,02	2,75	3,006	0,414	13,774%
51	2,81	100	1397	30,48	0,13	36,22	28,91	1,78	27,13	4,14	3,006	0,605	20,127%
52	2,81	100	1373	30,48	0,13	36,22	36,92	2,22	34,70	5,29	3,006	0,760	25,294%

4.5.1. SALTO VS. CAUDAL; PARA DIFERENTES APERTURAS DEL INYECTOR

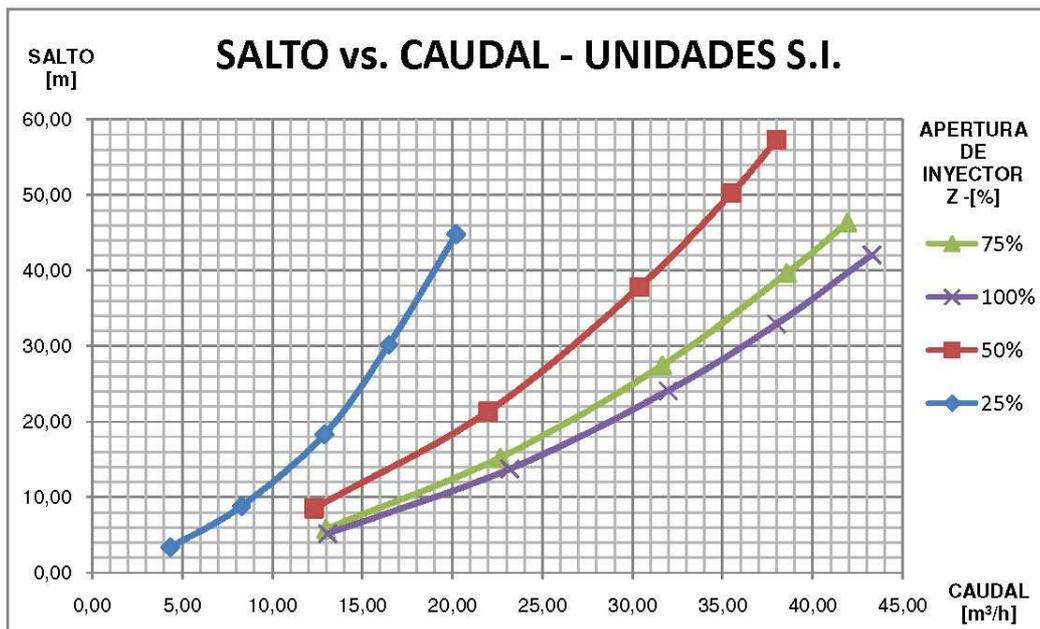


Figura 4.8. Familia de curvas de Salto vs. Caudal para diferentes aperturas de inyector.

4.5.2. CAUDAL VS. POSICIÓN DEL INYECTOR, PARA DIFERENTES SALTOS

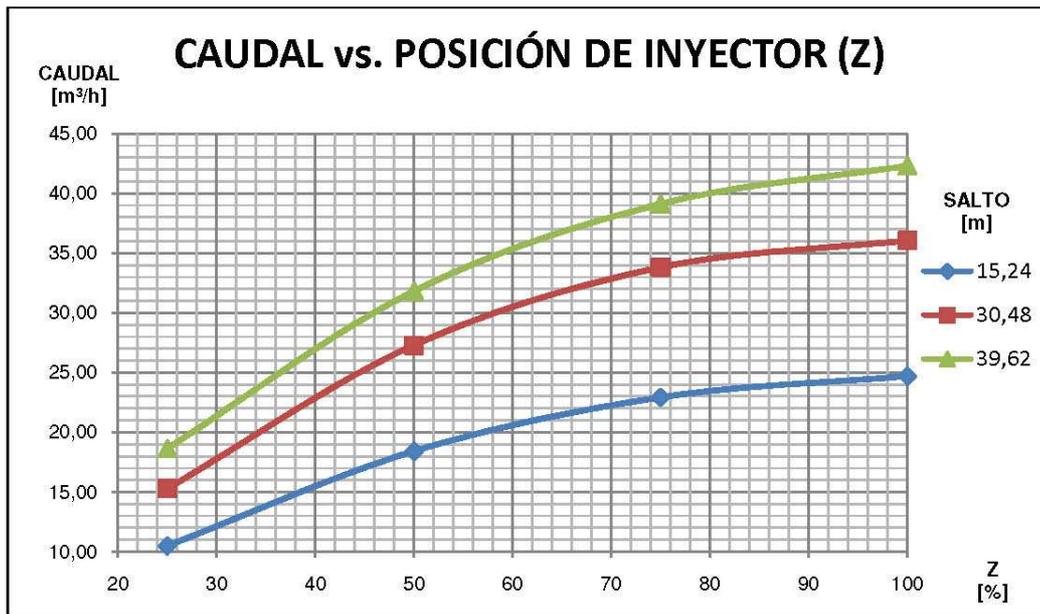


Figura 4.9. Caudal vs. Posición del Inyector ($H = 15,24 - 30,48 - 39,62$ [m])

4.5.3. VELOCIDAD VS. PAR-MOTOR

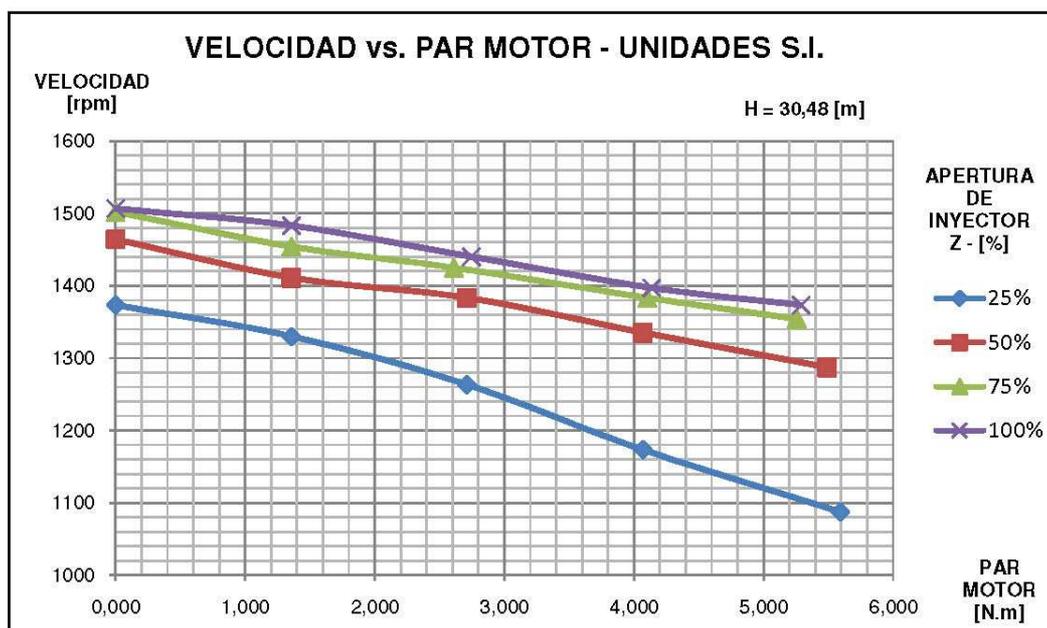


Figura 4.10. Velocidad vs. Par-Motor ($Z = 25 - 50 - 75 - 100$ [%])

4.5.4. POTENCIA AL FRENO (BHP) VS. VELOCIDAD

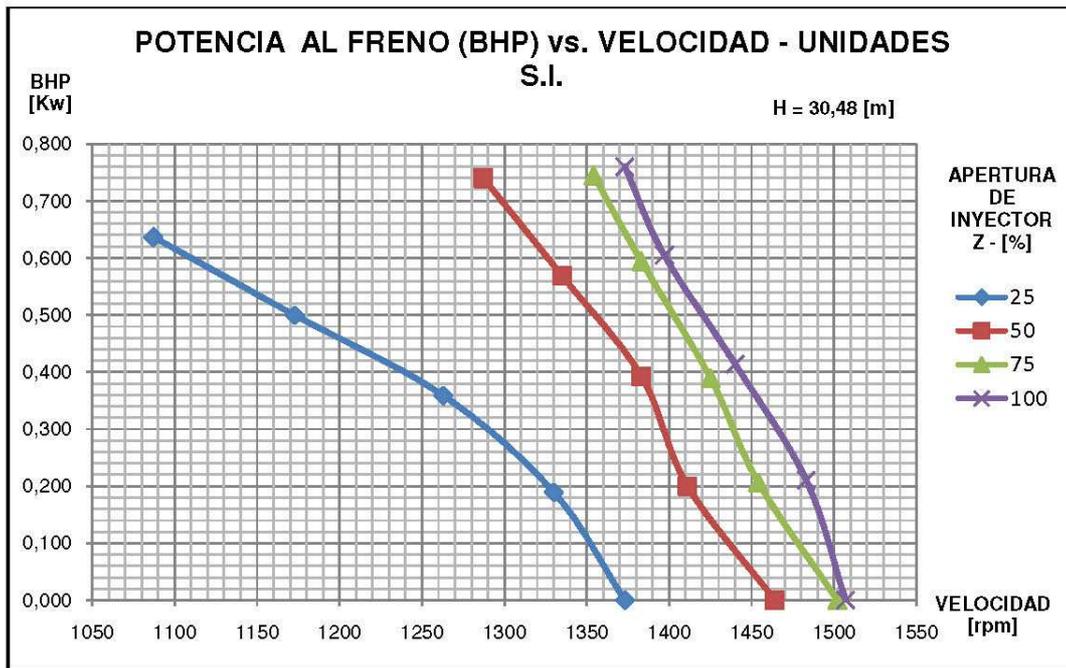


Figura 4.11. Potencia al Freno (BHP) vs. Velocidad (Z = 25 – 50 – 75 – 100 [%])

4.5.5. POTENCIA ÚTIL (WHP) VS. VELOCIDAD

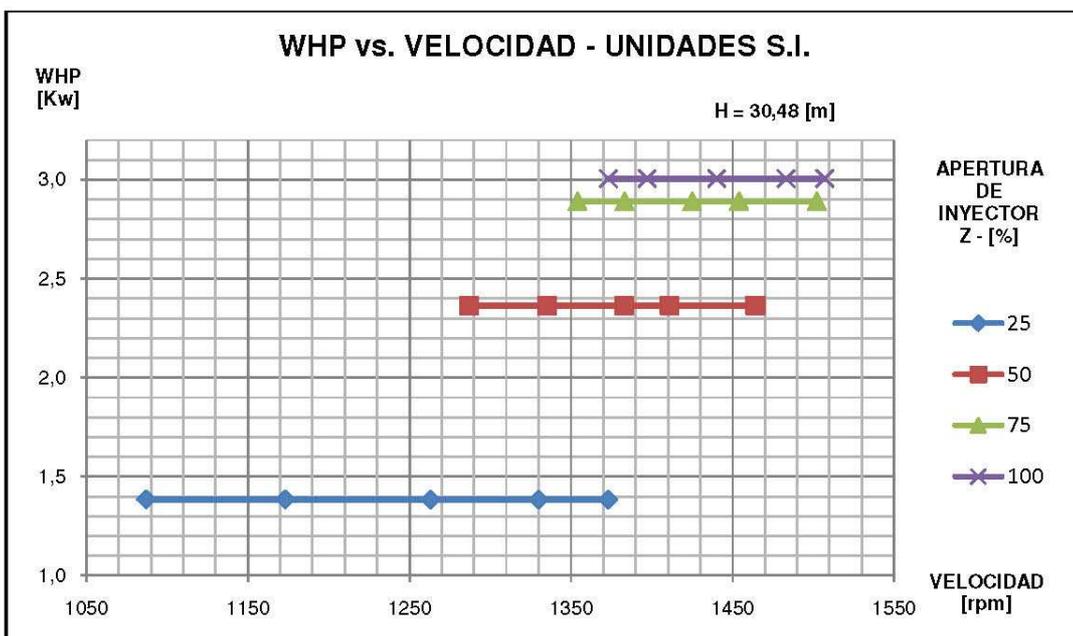


Figura 4.12. Potencia Útil (WHP) vs. Velocidad (Z = 25 – 50 – 75 – 100 [%])

4.5.6. RENDIMIENTO VS. VELOCIDAD

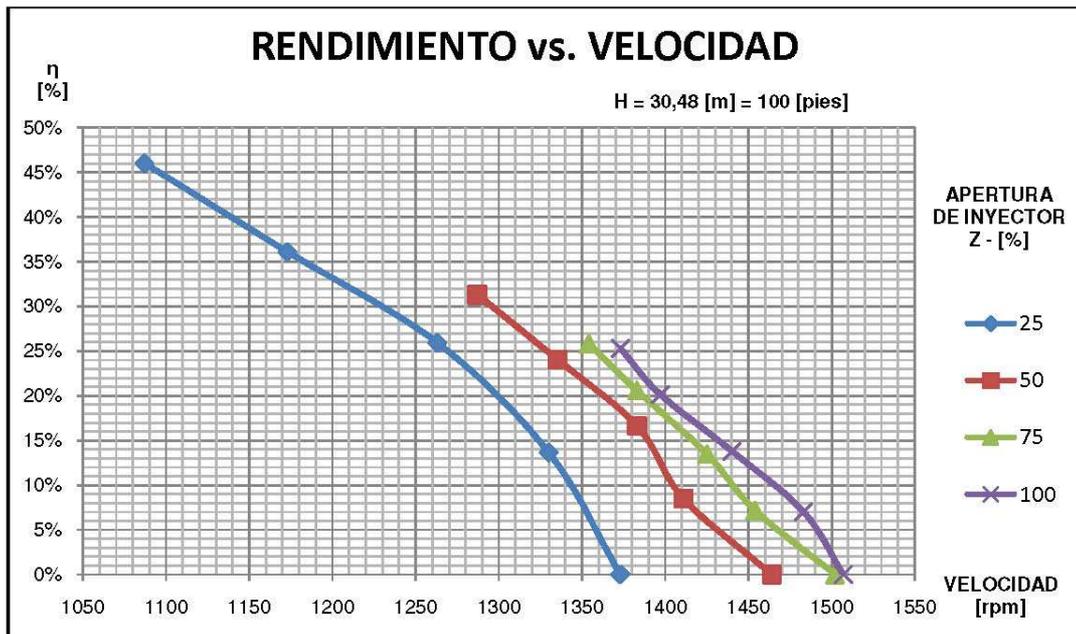


Figura 4.13. Rendimiento vs. Velocidad ($Z = 25 - 50 - 75 - 100$ [%])

4.5.7. VELOCIDAD DE FUGA (EMBALAMIENTO) VS. APERTURA DE INYECTOR

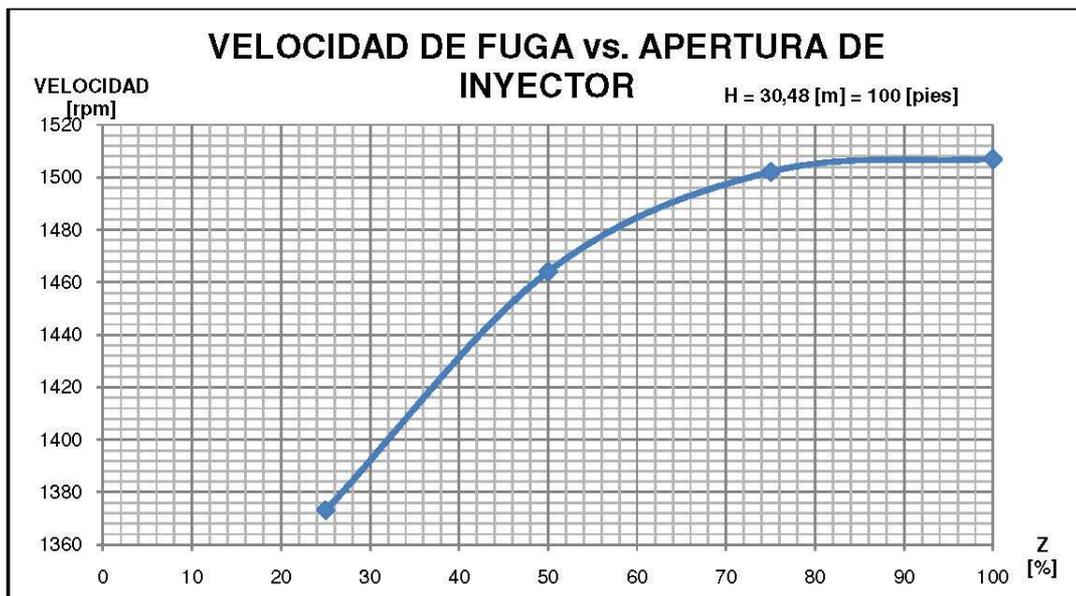


Figura 4.14. Velocidad de Fuga vs. Apertura de Inyector.

4.5.8. CURVAS DE ISO-RENDIMIENTO EN PLANO DE CAUDAL VS. VELOCIDAD (COLINA DE RENDIMIENTOS DE LA TURBINA PELTON)

Con el objetivo de realizar la gráfica de Caudal vs. Velocidad en curvas de Iso-rendimiento se desarrolló un análisis matemático de la relación entre la velocidad y el rendimiento: $N = f(\eta)$.

A continuación se indica las gráficas resultantes del análisis:

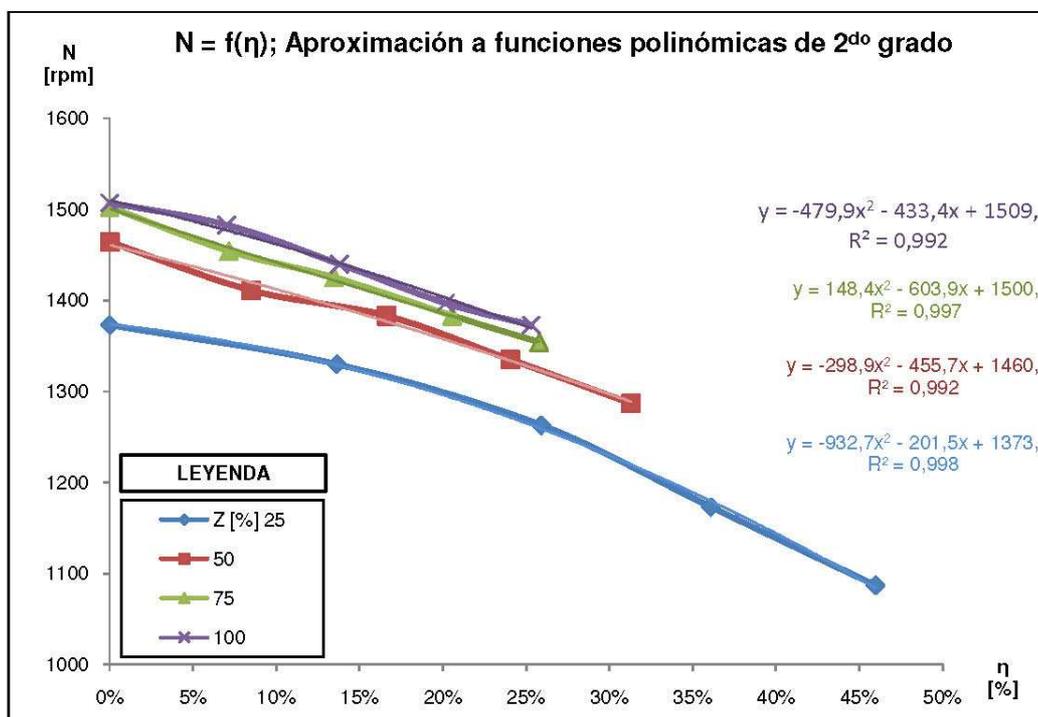


Figura 4.15. $N = f(\eta)$; Aproximación a funciones polinómicas de 2^{do} grado

Como se aprecia en la gráfica anterior, la aproximación de la función $N = f(\eta)$ a una función polinómica de segundo grado es bastante similar a las curvas reales, razón por la cual, se realizará una regresión lineal a una función de segundo grado para la función necesitada.

A continuación se indica las relaciones matriciales que se utilizará:

Se necesita obtener :

$$N = f(\eta)$$

Si :

$$Y = N$$

$$x = \eta$$

a,b,c = Coeficientes de las ecuaciones de segundo grado

Se tiene:

$\textcircled{1} \quad a n + b \sum_{i=1}^n x + c \sum_{i=1}^n x^2 = \sum_{i=1}^n Y_i$	$n \quad \sum_{i=1}^n x \quad \sum_{i=1}^n x^2 \quad \sum_{i=1}^n Y_i$
$\textcircled{2} \quad a \sum_{i=1}^n x + b \sum_{i=1}^n x^2 + c \sum_{i=1}^n x^3 = \sum_{i=1}^n x Y_i$	$\sum_{i=1}^n x \quad \sum_{i=1}^n x^2 \quad \sum_{i=1}^n x^3 \quad \sum_{i=1}^n x Y_i$
$\textcircled{3} \quad a \sum_{i=1}^n x^2 + b \sum_{i=1}^n x^3 + c \sum_{i=1}^n x^4 = \sum_{i=1}^n x^2 Y_i$	$\sum_{i=1}^n x^2 \quad \sum_{i=1}^n x^3 \quad \sum_{i=1}^n x^4 \quad \sum_{i=1}^n x^2 Y_i$

Para obtener los coeficientes de cada una de las ecuaciones se desarrolló el siguiente cuadro de datos:

Tabla 4.8. Cálculo de las ecuaciones de $N = a + b.\eta + c.\eta^2$ (Número de datos = 5 = n)

n	n ²	n ³	n ⁴	N	N*n	N*n ²	MATRIZ DE COEFICIENTES			Resp.	
[1]	[1]	[1]	[1]	R.P.M.	R.P.M.	R.P.M.	a	b	c		
0,00	0,00	0,00	0,00	1373,00	0,00	0,00	5	1,22	0,43	6226,00	Q= 16,69
0,14	0,02	0,00	0,00	1330,00	181,36	24,73	1,22	0,43	0,16	1431,36	[m3/h]
0,26	0,07	0,02	0,00	1263,00	327,09	84,71	0,43	0,16	0,07	491,85	Z= 25[%]
0,36	0,13	0,05	0,02	1173,00	423,20	152,69	0,92	-6,67	10,53	a	1373,8844
0,46	0,21	0,10	0,04	1087,00	499,71	229,72	-6,67	93,08	-186,89	b	-201,4976
1,22	0,43	0,16	0,07	6226,00	1431,36	491,85	10,53	-186,89	408,64	c	-932,7319
0,00	0,00	0,00	0,00	1464,00	0,00	0,00	5	0,80	0,19	6880,00	Q= 28,50
0,08	0,01	0,00	0,00	1411,00	119,52	10,12	0,80	0,19	0,05	1072,88	[m3/h]
0,17	0,03	0,00	0,00	1383,00	229,65	38,13	0,19	0,05	0,01	251,45	Z= 50[%]
0,24	0,06	0,01	0,00	1335,00	320,98	77,17	0,90	-9,84	23,10	a	1460,6861
0,31	0,10	0,03	0,01	1287,00	402,72	126,02	-9,84	202,24	-595,42	b	-455,7817
0,80	0,19	0,05	0,01	6880,00	1072,88	251,45	23,10	-595,42	1907,16	c	-298,8966
0,00	0,00	0,00	0,00	1502,00	0,00	0,00	5	0,67	0,13	7118,00	Q= 34,82
0,07	0,01	0,00	0,00	1454,00	103,86	7,42	0,67	0,13	0,03	929,12	[m3/h]
0,13	0,02	0,00	0,00	1425,00	192,03	25,88	0,13	0,03	0,01	181,67	Z= 75[%]
0,21	0,04	0,01	0,00	1383,00	284,24	58,42	0,91	-12,20	34,91	a	1500,5516
0,26	0,07	0,02	0,00	1354,00	348,99	89,95	-12,20	306,38	-1092,13	b	-603,9926
0,67	0,13	0,03	0,01	7118,00	929,12	181,67	34,91	-1092,13	4218,58	c	148,4871
0,00	0,00	0,00	0,00	1507,00	0,00	0,00	5	0,66	0,13	7200,00	Q= 36,22
0,07	0,00	0,00	0,00	1483,00	103,89	7,28	0,66	0,13	0,03	930,69	[m3/h]
0,14	0,02	0,00	0,00	1440,00	198,35	27,32	0,13	0,03	0,01	179,03	Z= 100[%]
0,20	0,04	0,01	0,00	1397,00	281,17	56,59	0,91	-12,28	35,72	a	1509,7044
0,25	0,06	0,02	0,00	1373,00	347,28	87,84	-12,28	317,06	-1156,67	b	-433,4070
0,66	0,13	0,03	0,01	7200,00	930,69	179,03	35,72	-1156,67	4573,90	c	-479,9305

• Las celdas coloreadas de gris corresponden a las matrices inversas de cada una de las matrices de coeficientes.

Con los coeficientes de cada una de las cuatro ecuaciones se desarrolló el siguiente cuadro de datos:

Ejemplo de cálculo de $N = f(\eta)$, para $\eta=0$ [%] , $Z = 25$ [%] y $Q = 16,69$ [m³/h]:

$$N = 1373,8844 + (-201,4976) * 0 + (-932,7319) * 0^2$$

$$N \cong 1374[\text{rpm}]$$

Tabla 4.9. Datos para graficar Caudal vs. Velocidad en curvas de Iso-rendimiento.

# de Dato Calculado	Apertura de Inyector		Caudal		Rendimiento [%]									
	Z	Q	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
			$\eta = 0\%$	$\eta = 10\%$	$\eta = 20\%$	$\eta = 30\%$	$\eta = 40\%$	$\eta = 50\%$	$\eta = 60\%$	$\eta = 70\%$	$\eta = 80\%$	$\eta = 90\%$	$\eta = 100\%$	
	[%]	[ft ³ /min]	[m ³ /h]	N [R.P.M.]										
1	25	9,82	16,69	1374	1344	1296	1229	1144	1040	917	776	616	437	240
2	50	16,77	28,50	1461	1412	1358	1297	1231	1158	1080	995	905	808	706
3	75	20,50	34,82	1501	1442	1386	1333	1283	1236	1192	1151	1112	1077	1045
4	100	21,32	36,22	1510	1462	1404	1336	1260	1173	1077	971	856	731	596

- Cada conjunto de datos resaltados (11 datos por conjunto) ha sido obtenido utilizando la respectiva función $N = f(\eta)$ para un Q dado.
- Cada columna de 4 datos de velocidad ha sido graficada para $N = f(\eta)$, haciendo relación al respectivo rendimiento y sus diferentes valores de Q.

Tabla 4.10. Datos de Curvas de Caudal vs. Velocidad - Posición de Inyector

MÍNIMA VELOCIDAD (Tomada de la tabla anterior)	Z	N	Q		MÁXIMA VELOCIDAD (Tomada de la tabla anterior)	Z	N	Q	
	[%]	[rpm]	[ft ³ /min]	[m ³ /h]		[%]	[rpm]	[ft ³ /min]	[m ³ /h]
	Z = 25[%]	240	9,82	16,69		Z = 25[%]	1510	9,82	16,69
	Z = 50[%]	240	16,77	28,50		Z = 50[%]	1510	16,77	28,50
	Z = 75[%]	240	20,50	34,82		Z = 75[%]	1510	20,50	34,82
Z = 100[%]	240	21,32	36,22	Z = 100[%]	1510	21,32	36,22		

A continuación se procedió a graficar las curvas de Q vs. N para 11 valores de rendimiento, desde 0 hasta 100% y en la misma gráfica se incluyó las curvas Q vs. N para diferentes aperturas de inyector.

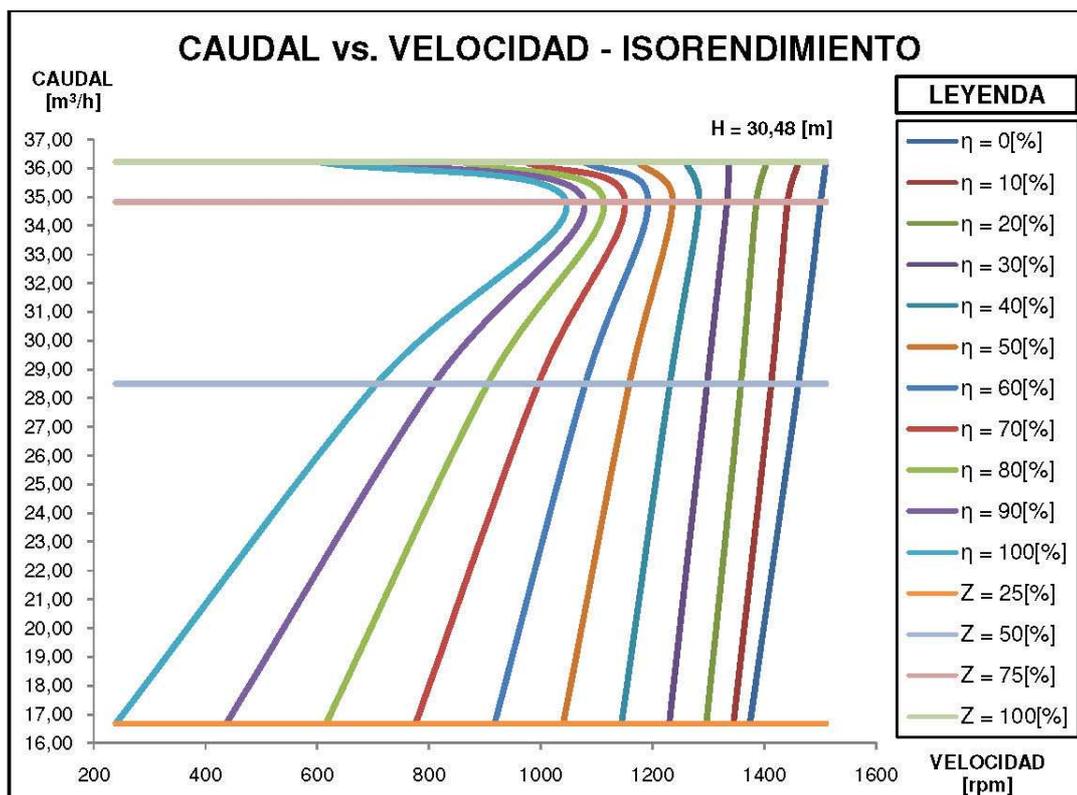


Figura 4.16. Curvas de Iso-Rendimiento en plano de Caudal vs. Velocidad (Ecuaciones aproximadas)

5.- CONCLUSIONES

- El equipo de Turbina Pelton del Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Nacional tiene las condiciones necesarias para desarrollar prácticas de laboratorio.
- Las curvas que se graficaron en la presente práctica son medios adecuados para determinar el comportamiento que una turbina Pelton presenta cuando se la somete a diferentes condiciones de trabajo. Por esta razón, la presente práctica puede ser tomada como referencia base para probar turbinas Pelton industriales y determinar sus respectivas familias de curvas de trabajo.

6.- RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar sobre el equipo pruebas que permitan determinar las curvas de rendimiento en función del salto de agua que se aplica a la turbina, para así determinar cual debiera ser el salto óptimo a utilizar en el equipo.
- No es recomendable abrir la válvula de descarga de la bomba de alimentación del equipo más de tres vueltas (son 9 vueltas de apertura en total). Al realizar esta operación y abrir el inyector más del 50% de su apertura máxima provoca que el caudal que maneja la mencionada bomba sea considerablemente grande. Por consiguiente, la corriente que se utiliza en el motor eléctrico es alta y provoca que el relé térmico, que acompaña al contactor, apague el motor.
- Es necesario verificar el salto de agua antes del inyector mediante el manómetro acoplado a la carcasa de la turbina, debido a que las variaciones en la apertura de la válvula de descarga y el inyector influyen en esta variable. Por lo explicado anteriormente, si no se toma en cuenta que el salto puede tener un valor superior a la capacidad del manómetro, es posible causar daños a este último.

7.- BIBLIOGRAFÍA

MATAIX, CLAUDIO; "Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas"; Segunda Edición; Ediciones Del Castillo; Madrid; 1986.

STREETER, VICTOR; "Mecánica de los Fluidos"; Mc Graw – Hill; México; 1975.

FERNÁNDEZ PEDRO; "Turbinas Hidráulicas"; Universidad De Cantabria – Versión Digital; Cantabria; 2003.

DIXON, S.; "Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery"; Cuarta Edición; Butterworth-Heinemann; Boston; 1998.

SOTELO, GILVERTO; "Hidráulica General"; Volumen 1; Limusa; México; 1999.

F – GUÍA DE UTILIZACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL

GUÍA DE UTILIZACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL

REQUERIMIENTOS DE UTILIZACIÓN:

Computador:

Procesador:	Pentium 4, superior o equivalente.
Disco Duro:	mínimo 5 Gb de espacio libre.
Puertos:	2 puertos seriales (DB9) y/o puertos de interfaz USB-Serial instalados.
	1 puerto paralelo (DB25)
Monitor:	Visualización mínima: 800x600 pixeles
Sistema Operativo:	Windows XP
Aplicaciones:	MATLAB® Compiler Runtime 7.8
Otros:	ratón y teclado.

Dispositivos: Actuador, sensor de velocidad.

INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN

Para instalar el sistema es necesario simplemente copiar el archivo ejecutable del mismo en el computador que va a ser utilizado.

INSTRUCCIONES DE USO

1. Dar doble clic en el archivo ejecutable de la aplicación.

Inmediatamente después aparecerá una ventana de formato MsDOS, esta ventana corresponde al soporte de la aplicación.

La ventana de soporte no debe ser cerrada por ningún motivo, pues es la que mantiene funcionando la aplicación.

En caso de fallas debidas a mal manejo del hardware y/o software, basta con cerrar esta ventana y se cerrará la aplicación completa.



Figura 1.1. Ventana de soporte de aplicación.

Luego de un pequeño lapso de tiempo aparecerá la ventana que se muestra a continuación.

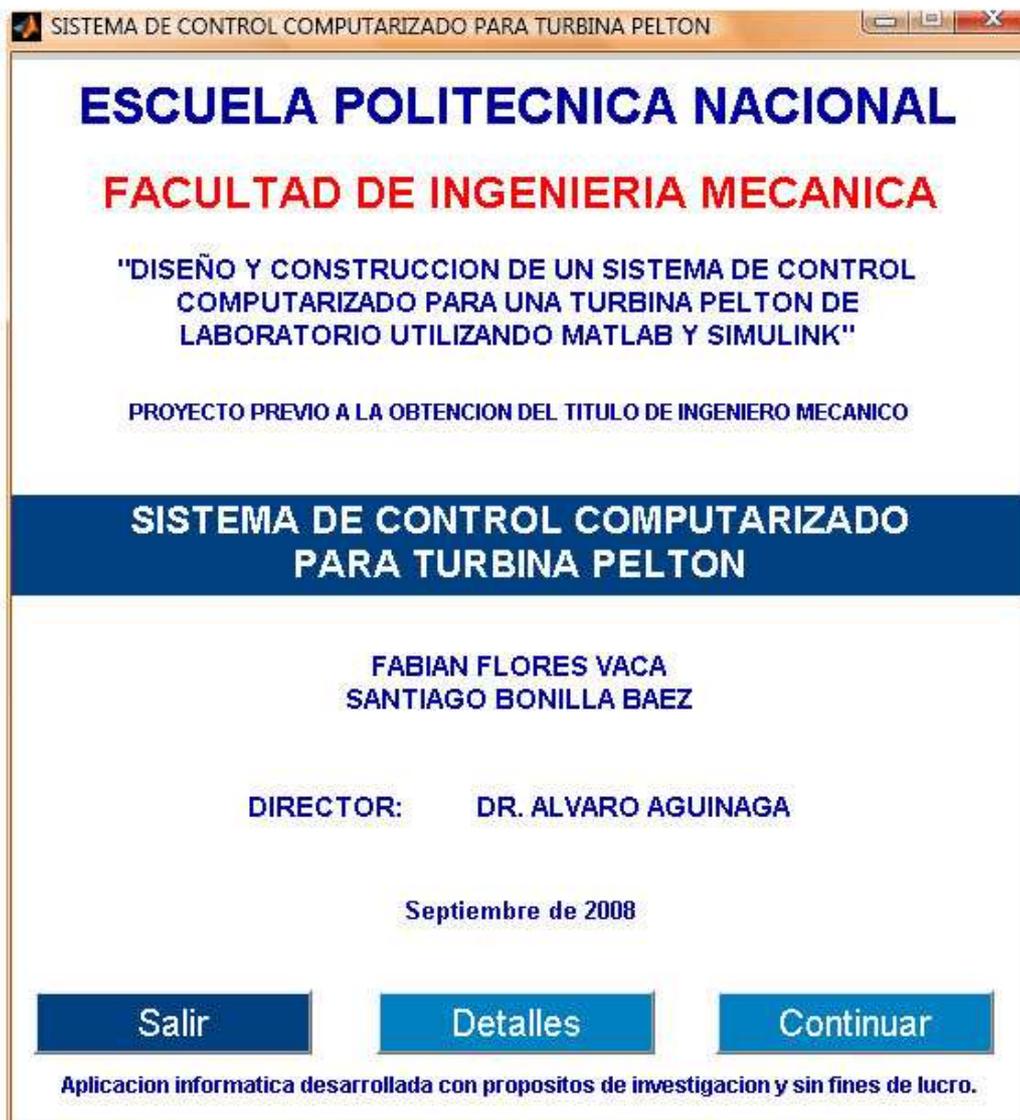


Figura 1.2. Ventana de presentación de la Aplicación.

La ventana anterior corresponde a la presentación del sistema de control.

2. De clic en el botón "Continuar" para comenzar con el procedimiento de calibración de la posición del inyector. Aparecerá la siguiente interfaz gráfica:

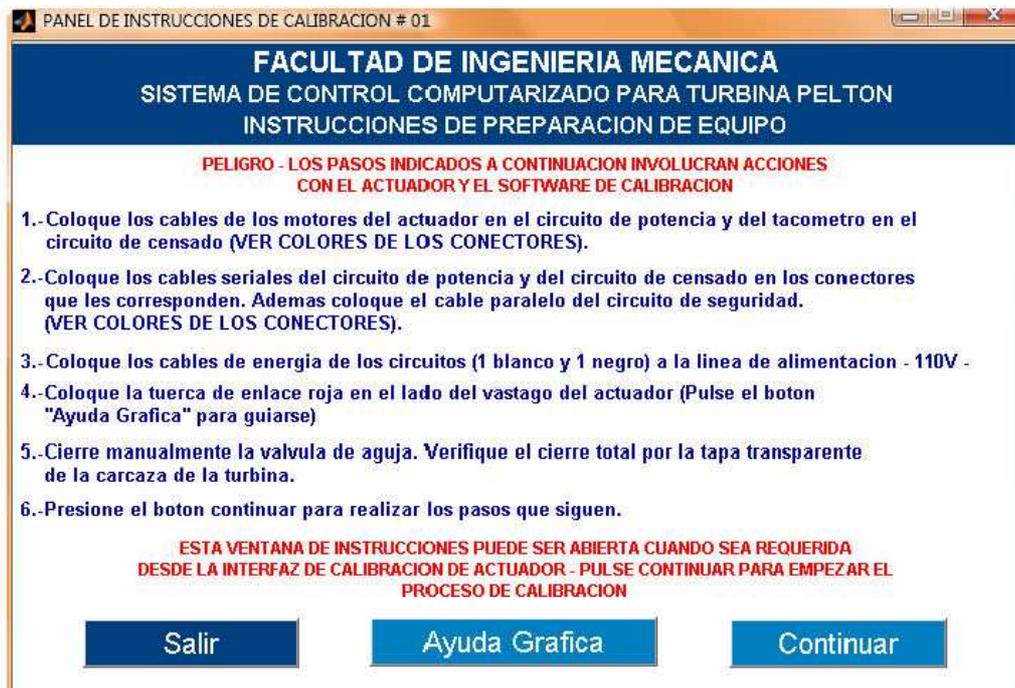


Figura 1.3. Panel de instrucciones No 1.

En la interfaz anterior se especifican los primero 6 pasos de las instrucciones de calibración del equipo. Las instrucciones son:

1. Coloque los cables de los motores del actuador en el circuito de potencia y del tacómetro en el circuito de censado (VER COLORES DE LOS CONECTORES).
2. Coloque los cables seriales del circuito de potencia y del circuito de censado en los conectores que les corresponden. Además coloque el cable del puerto paralelo en el circuito de seguridad y en la PC (VER COLORES DE LOS CONECTORES).
3. Coloque los cables de energía de los circuitos (1 blanco y 1 negro) a la línea de alimentación – 110 [V] –
4. Coloque la tuerca de enlace roja en el lado del vástago del actuador (Pulse el botón “Ayuda Gráfica” para guiarse).
5. Cierre manualmente la válvula de aguja. Verifique el cierre total por la tapa transparente de la carcasa de la turbina.

6. Presione el botón continuar para realizar los pasos que siguen.

Esta ventana de instrucciones puede ser abierta cuando se requiera desde la interfaz de calibración. Además contiene la referencia a la ayuda gráfica de la aplicación, la cual consiste en varios gráficos esquemáticos que muestran los pasos de calibración y las partes constitutivas del equipo. En esta guía se omitirán las ventanas de la ayuda gráfica.

3. De clic en el botón "Continuar" para abrir la siguiente ventana de instrucciones, esta se muestra a continuación:

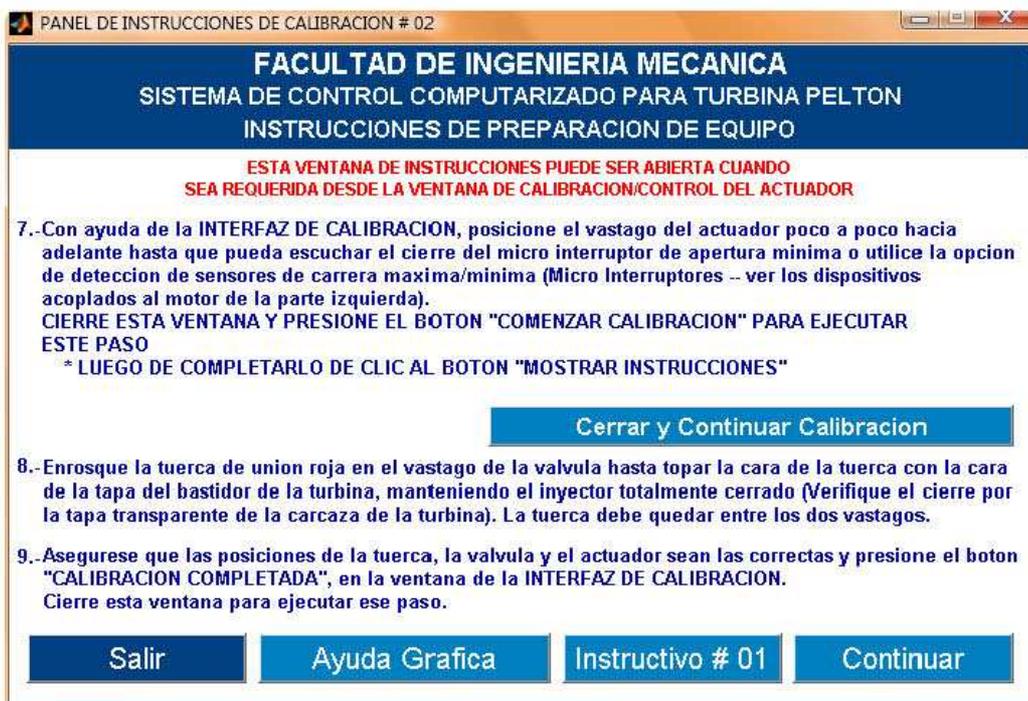


Figura 1.4. Panel de instrucciones No 2.

Las instrucciones del segundo panel son:

7. Con ayuda de la INTERFAZ DE CALIBRACIÓN, posicione el vástago del actuador poco a poco hacia adelante hasta que pueda escuchar el cierre del micro interruptor de apertura mínima o utilice la opción de detección de

sensores de carrera máxima/mínima (Micro Interruptores -- Ver los dispositivos acoplados al motor de la parte izquierda del actuador).

CIERRE ESTA VENTANA Y PRESIONE EL BOTON "COMENZAR CALIBRACIÓN" PARA EJECUTAR ESTE PASO

LUEGO DE COMPLETARLO DÉ CLIC AL BOTÓN "MOSTRAR INSTRUCCIONES"

8. Enrosque la tuerca de unión roja en el vástago de la válvula hasta topar la cara de la tuerca con la tapa del bastidor de la turbina, manteniendo el inyector totalmente cerrado (Verifique el cierre por la tapa transparente de la carcasa de la turbina). La tuerca debe quedar entre los dos vástagos.
9. Asegúrese que las posiciones de la tuerca, la válvula y el actuador sean las correctas y presione el botón "CALIBRACIÓN COMPLETADA", en la ventana de la INTERFAZ DE CALIBRACIÓN.
Cierre esta ventana para ejecutar este paso.

Para ejecutar la instrucción de calibración No. 7 se debe cerrar este panel.

- De clic en el botón "Cerrar y continuar calibración", el diálogo que aparecerá será el siguiente:

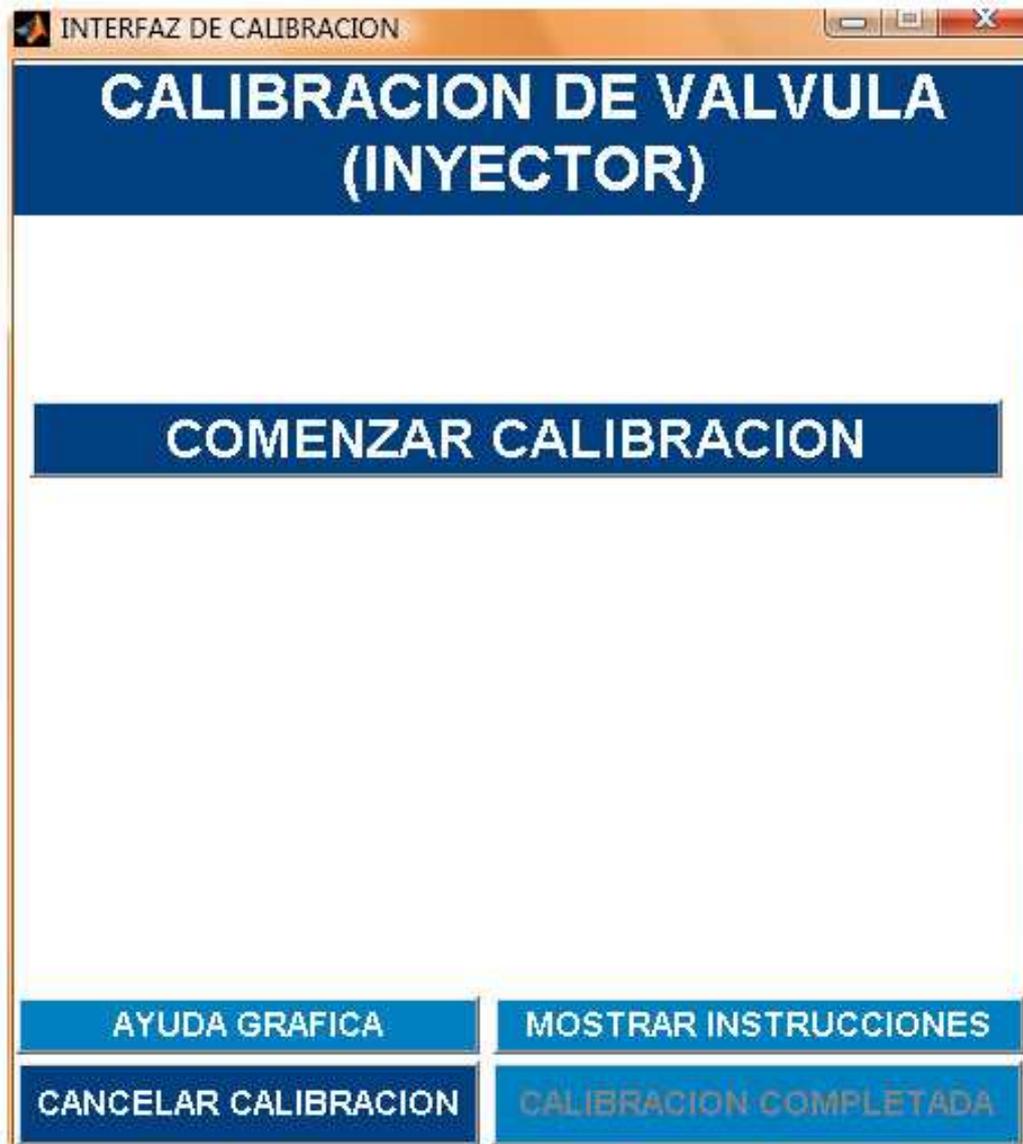


Figura 1.5. Interfaz de calibración.

- De clic en el botón "COMENZAR CALIBRACIÓN", se presentará una ventana de pregunta:

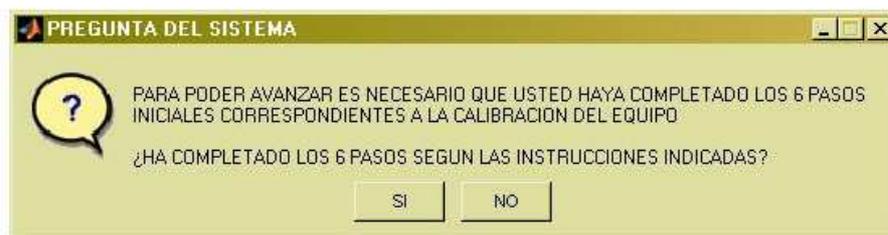


Figura 1.6. Pregunta del sistema.

De contestar afirmativamente, se debe seguir los pasos siguientes, caso contrario se volverá al paso No. 4.

Además, si no se puede establecer comunicación con el circuito de motores, aparecerá el siguiente cuadro de diálogo y no será posible avanzar con las instrucciones posteriores:

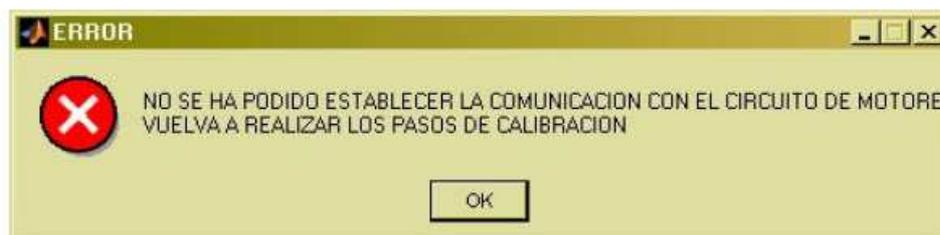


Figura 1.7. Error de detección de circuito de motores.

6. La INTERFAZ DE CALIBRACIÓN se muestra a continuación. En esta ventana debe utilizarse los botones “ADELANTE (+)” y “ATRÁS [-]” para colocar el vástago del actuador en la posición requerida, para chequear la instrucción que se está realizando es posible pulsar el botón “MOSTRAR INSTRUCCIONES”. Además para la detección automática de los sensores de carrera es posible dar clic al botón “ACTIVAR DETECCIÓN DE SENSORES DE CARRERA” y posteriormente elegir uno de los siguientes botones: “HACIA ADELANTE - MÁXIMO” o “HACIA ATRÁS - MÁXIMO”.

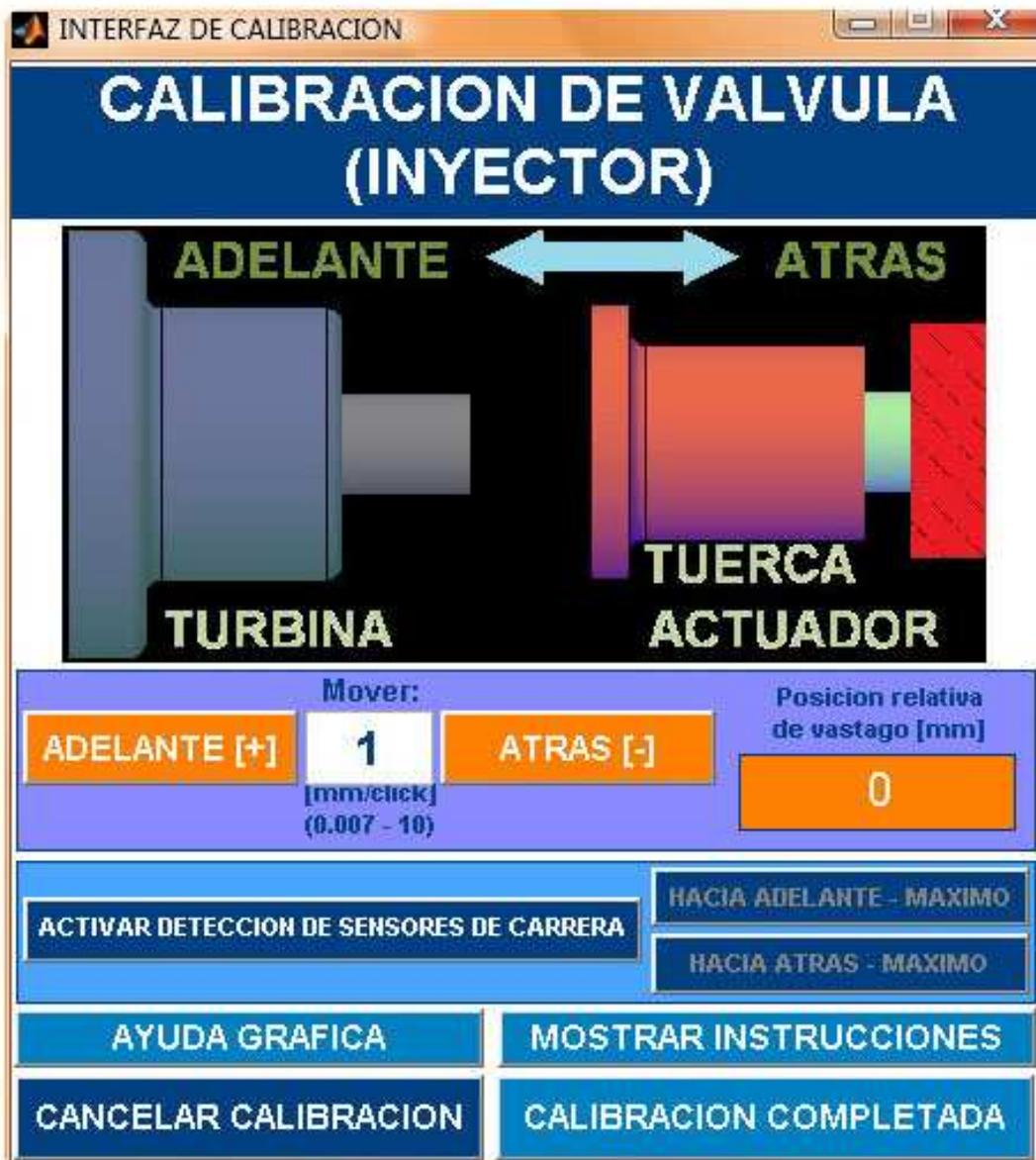


Figura 1.8. Interfaz de Calibración activada.

7. Cuando haya terminado de realizar las 9 primeras instrucciones deberá dar clic en el botón "CALIBRACIÓN COMPLETADA", inmediatamente aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:

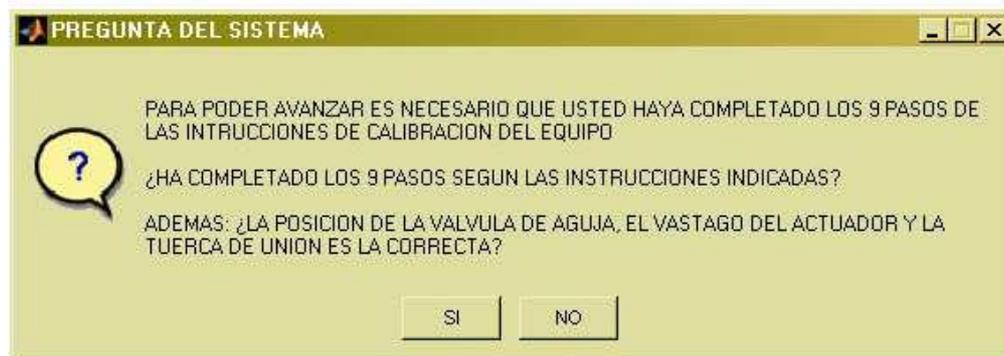


Figura 1.9. Pregunta del sistema.

Dé clic sobre el botón "SI" para continuar con la ejecución de la aplicación o de clic en "NO" para continuar realizando las 9 instrucciones de calibración del actuador.

8. Para comenzar a usar el Sistema de Control Computarizado es necesario seguir las instrucciones que serán mostradas de la forma siguiente:

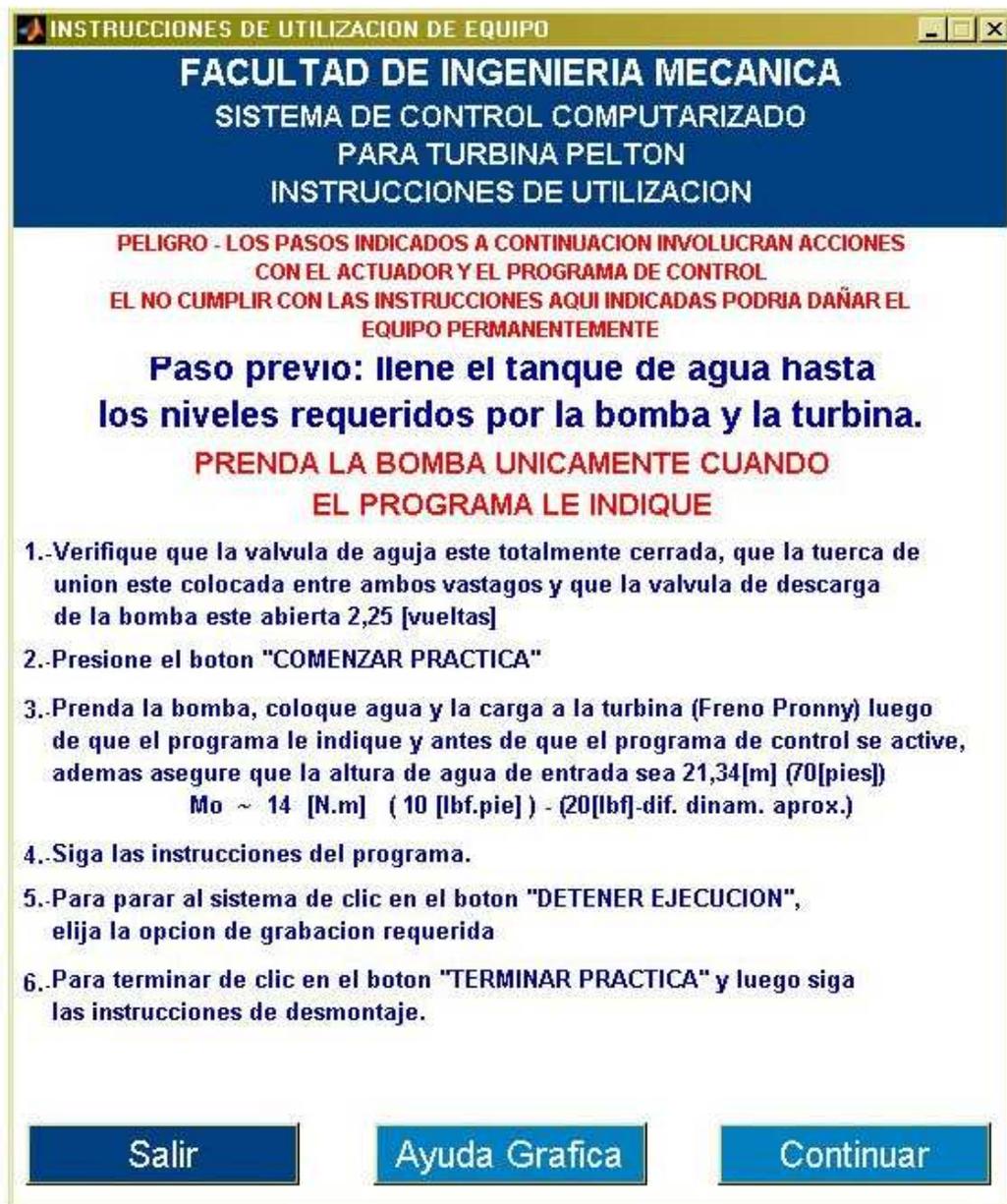


Figura 1.10. Instrucciones de uso de aplicación.

A continuación se listan las instrucciones que se encuentran en la gráfica anterior:

Paso Previo: llene el tanque de agua hasta los niveles requeridos por la bomba y la turbina.

1. Verifique que la válvula de aguja esté totalmente cerrada y que la tuerca de unión esté colocada entre ambos vástagos.
2. Presione el botón "COMENZAR PRÁCTICA"
3. Prenda la bomba, coloque agua y la carga a la turbina (Freno Pronny) luego de que el programa le indique y antes de que el programa de control se active.

$M_o \sim 14 \text{ [N.m]} (10 \text{ [lbf.pie]}) - (20 \text{ [lbf-dif. dinamómetros aprox.]})$

4. Siga las instrucciones del programa.
5. Para parar al sistema de clic en el botón "DETENER EJECUCIÓN", elija la opción de grabación requerida.
6. Para terminar de clic en el botón "TERMINAR PRÁCTICA" y luego siga las instrucciones de desmontaje.

9. La interfaz principal de la aplicación se muestra a continuación.

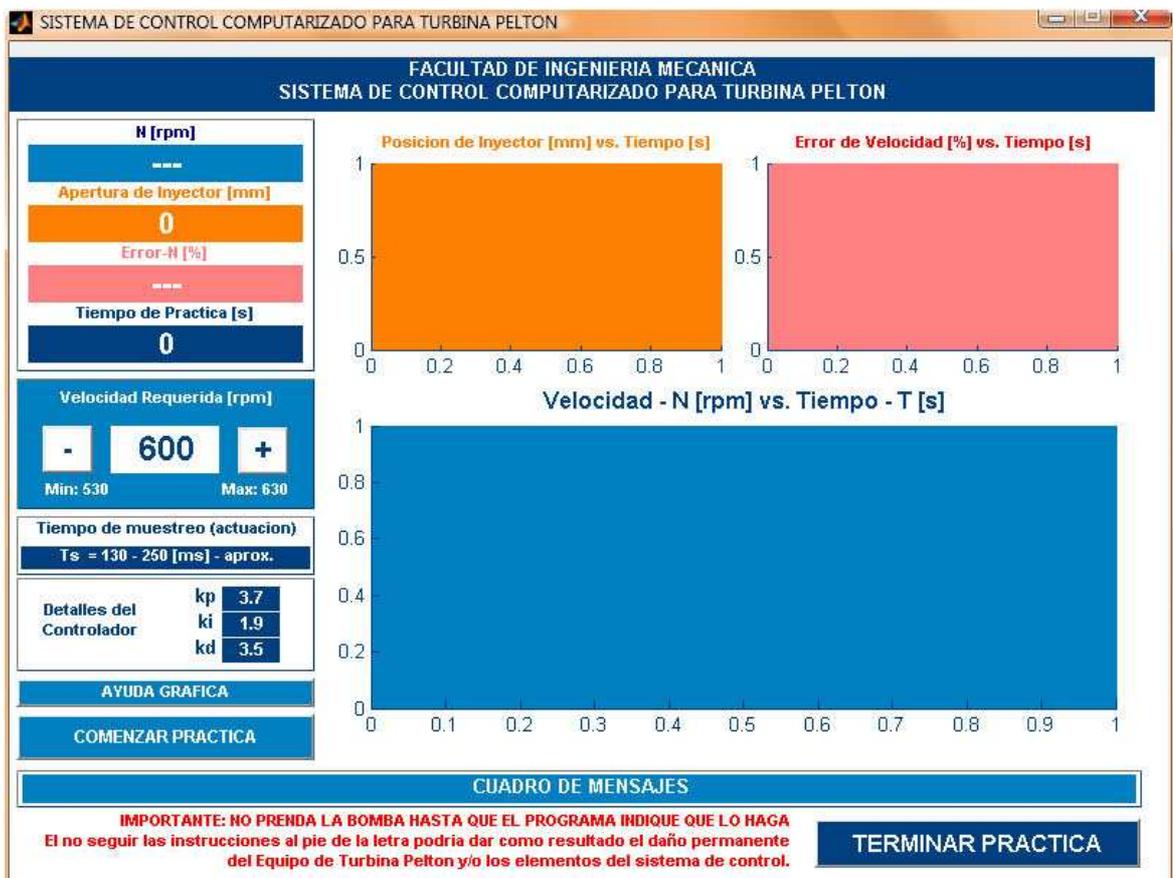


Figura 1.11. Sistema de control computarizado para turbina Pelton.

10. Para dar inicio a la aplicación de clic en el botón: "COMENZAR PRÁCTICA"

Luego de lo cual se mostraran las siguientes ventanas que incluyen mensajes del sistema:



Figura 1.12. Verificación de presencia de tacómetro digital.

En caso de no localizarse el tacómetro digital o el dispositivo de puerto paralelo el programa se cerrará inmediatamente y aparecerá el siguiente mensaje:



Figura 1.13. Error de detección de dispositivo de medición de velocidad.

Luego el sistema procederá a posicionar la apertura de la válvula de aguja en su posición nominal.

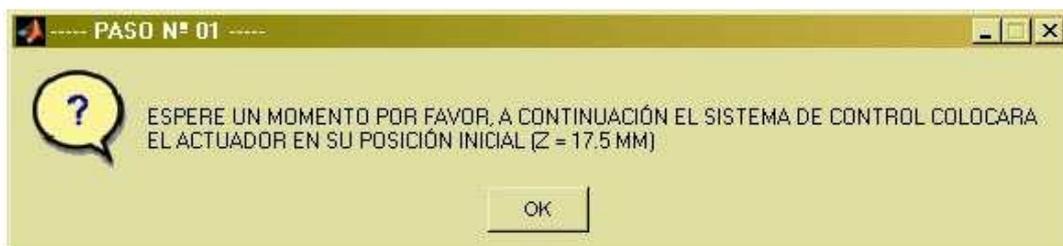


Figura 1.14. Posicionamiento inicial de inyector.

A continuación el usuario del sistema deberá asegurarse de que la bomba sea prendida, la válvula de descarga de la bomba sea colocada en la posición que permita tener en ese instante 21,34 [m] de columna de agua a la entrada del inyector. Luego coloque agua y la carga al freno Pronny.

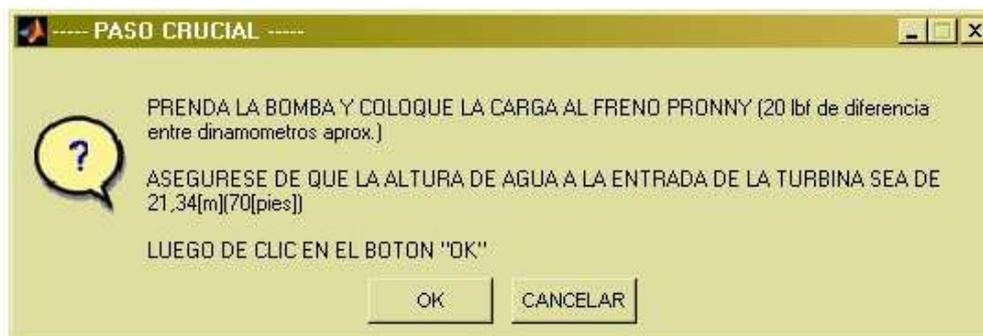


Figura 1.15. Calibración de parámetros de funcionamiento (Sistema SISO).

De clic sobre cada una de las opciones de las preguntas que estén de acuerdo con la situación al instante.

Luego aparecerá desplegada la interfaz que se indica a continuación.

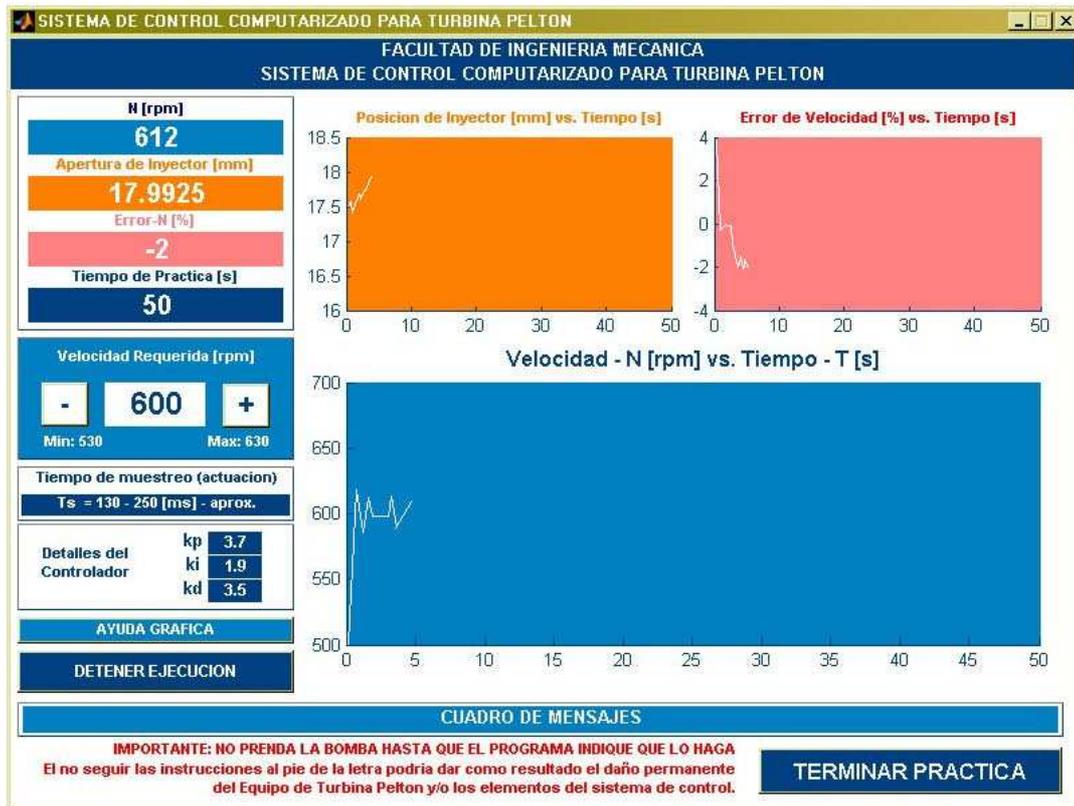


Figura 1.16. Sistema de control computarizado en funcionamiento.

11. Para dar por terminada la práctica de clic en el botón: "DETENER EJECUCIÓN". Luego elija las opciones que desee en las siguientes ventanas:

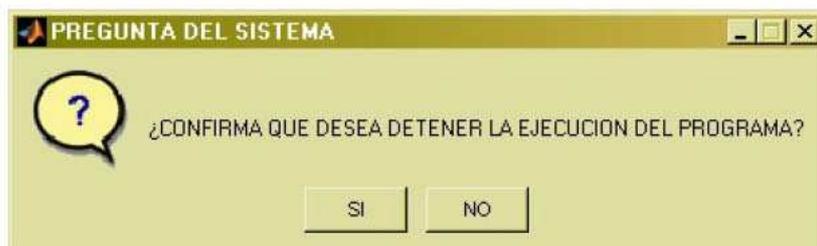


Figura 1.17. Confirmación de detención.

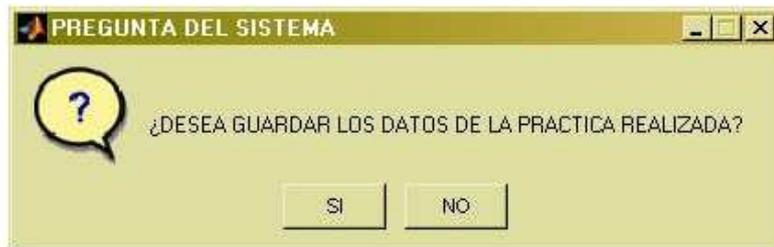


Figura 1.18. Pregunta del sistema.

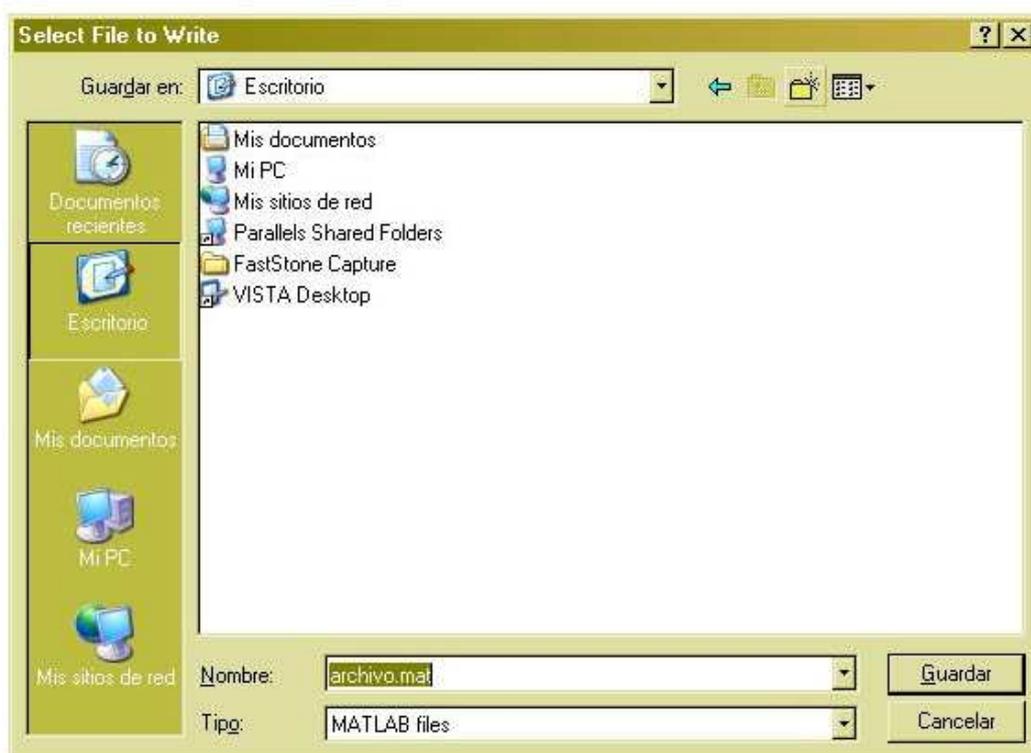


Figura 1.19. Ventana de selección de nombre y carpeta de destino.

12. Para salir de la aplicación de control dé clic en el botón "TERMINAR PRÁCTICA". Siga las instrucciones del programa para el desmontaje:

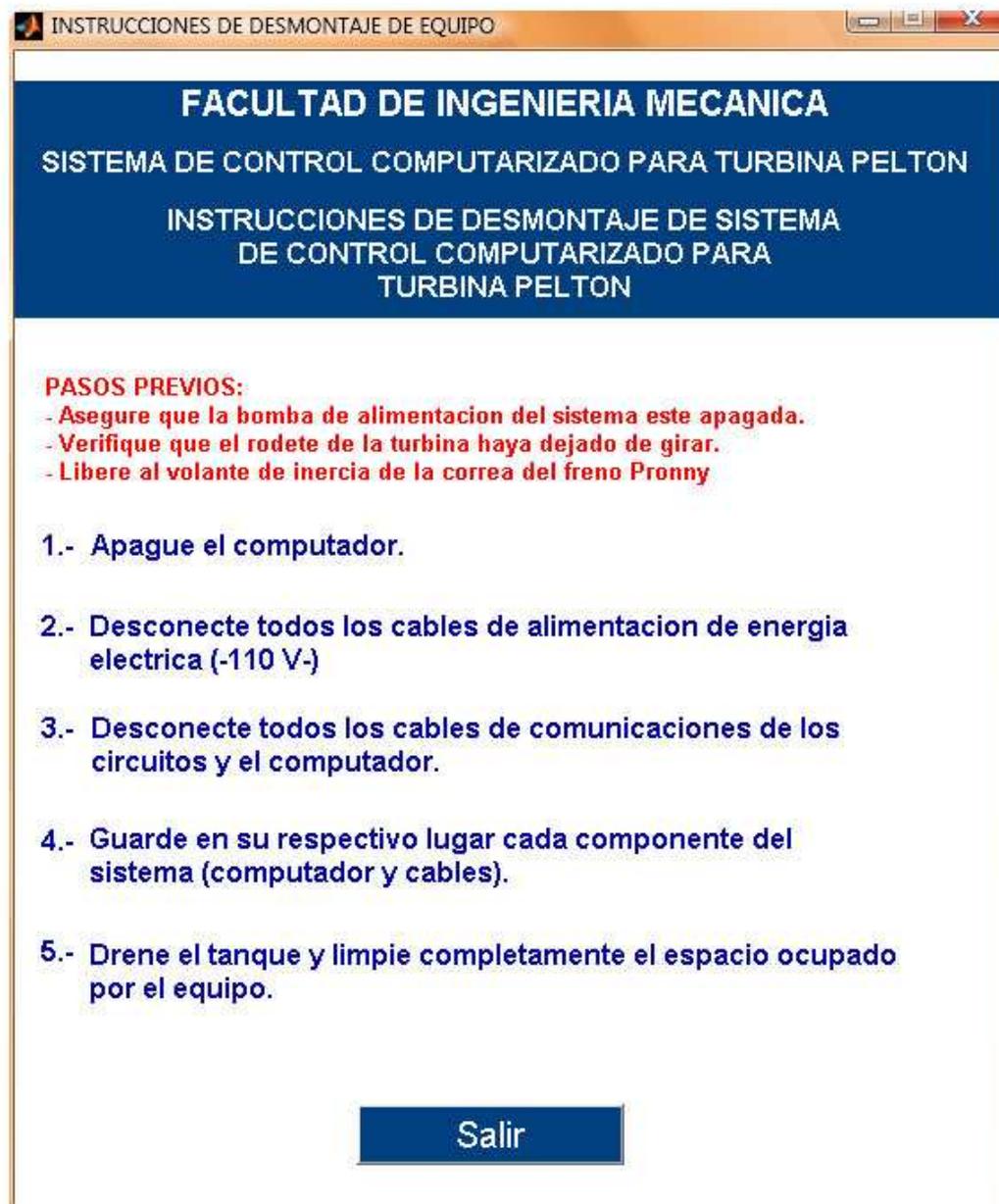


Figura 1.20. Instrucciones de desmontaje de equipo.

G – PLANOS