

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**ELECTRÓNICA**



**SINTONIZACIÓN DE UN PID PARA CONTROLAR REMOTAMENTE**  
**LA VARIABLE NIVEL EN UN MÓDULO EDUCATIVO**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. Gómez Avalos Oscar Omar**

**Bach. Betalleluz Wong Alexander**

**ASESOR: Dr. Pedro Huamaní Navarrete.**

**LIMA – PERÚ**

**AÑO: 2015**

## **DEDICATORIA**

Dedico de manera especial a mis padres pues ellos fueron el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, sentando en mí las bases de responsabilidad y deseos de superación.

A mi hermana por su comprensión y apoyo en este proceso de mi vida.

***OSCAR OMAR GÓMEZ ÁVALOS***

A mis padres, hermanos y Tía por su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. No lo hubiera logrado sin ustedes.

***ALEXANDER BETALLELUZ WONG***

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a todas las personas que colaboraron para que este proyecto sea una realidad, como a las autoridades e Ingenieros de nuestra querida Universidad, que mediante su dedicación y conocimientos lograron formarnos como profesionales.

Agradecemos a nuestro asesor el Dr. Ing Pedro Huamani, que con su experiencia y sabiduría nos guio durante el desarrollo del proyecto

***OSCAR OMAR GÓMEZ ÁVALOS***

***ALEXANDER BETALLELUZ WONG***

## INDICE

<b>RESUMEN</b>	XIV
<b>ABSTRACT</b>	XV
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>MARCO SITUACIONAL</b>	2
<b>PROBLEMATIZACION</b>	3
<b>OBJETIVOS</b>	4
<b>ANTECEDENTES</b>	5
<b>CAPÍTULO 1: DEFINICIONES TÉCNICAS</b>	10
1.1 SISTEMAS DE CONTROL	10
1.2 CONTROL P, PI y PID	12
1.3 TIPOS DE MÉTODOS DE SINTONÍA DE CONTROLADORES PID	20
1.4 MEDICIÓN Y CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDOS	24
1.5 CONTROL REMOTO, O A DISTANCIA, DE VARIABLES	27
<b>CAPÍTULO 2: REDISEÑO DEL MÓDULO DE MEDICIÓN DE NIVEL DEL LABORATORIO DE CONTROL DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD RICARDO PALMA</b>	30
2.1 ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DEL MÓDULO DE MEDICIÓN DE NIVEL DEL LABORATORIO DE CONTROL DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	30

2.1.1. Análisis de estado de la bomba	32
2.1.2. Análisis de estado de recipientes	32
2.1.3. Análisis de estado de la válvula	33
2.1.4. Análisis de estado de sensor ultrasónico y acondicionamiento	33
2.1.5. Análisis de estado de regulador de potencia de la bomba	34
<b>2.2 CAMBIOS Y MEJORAS EN MÓDULO DE MEDICIÓN DE NIVEL DEL LABORATORIO DE CONTROL DE LA FACULTAD DE ING. ELECTRÓNICA</b>	<b>35</b>
2.2.1. Válvula de control de nivel	36
2.2.2. Bomba de impulsión de agua	37
2.2.3. Sensor de nivel y acondicionamiento	38
2.2.4. Tanque para medición de nivel de agua y alimentación	39
2.2.5. Filtros en tuberías	41
<b>2.3 GRÁFICO P&amp;ID DE MÓDULO DE MEDICIÓN DE NIVEL MEJORADO</b>	<b>46</b>
<b>CAPÍTULO 3: PUESTA EN MARCHA Y PRUEBAS</b>	<b>47</b>
<b>3.1 DESARROLLO DE INTERFAZ, EN SOFTWARE LABVIEW, PARA LA MEDICIÓN DE NIVEL</b>	<b>47</b>
3.1.1. Desarrollo de Ventana de Panel Frontal.	47
3.1.2. Desarrollo de Ventana de Programación.	49
<b>3.2 PRUEBAS DE AQUISICIÓN DE DATOS, DE SINTONÍA DE CONTROLADOR PID Y DE ESTABILIDAD DEL SISTEMA.</b>	<b>52</b>
3.2.1. Adquisición de datos	52
3.2.1.1 Pruebas de adquisición de datos	55
3.2.2. Pruebas de sintonía controlador PID y estabilidad del sistema	67

3.2.2.1 Prueba de Sintonía por método de Ganancia Limite (Ziegler-Nichols)	67
3.2.2.1.1 Pruebas de Estabilidad de control del sistema	75
3.2.2.2 Prueba de Sintonía por método de Tanteo.	76
3.2.2.2.1 Prueba de Estabilidad de control del sistema	90
3.3 PRUEBAS DE CONTROL REMOTO, O A DISTANCIA, DE LA VARIABLE NIVEL	92
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	96
4.1 RESULTADOS DE PRUEBA DE SINTONÍA DE PID POR MÉTODO DE GANANCIA LÍMITE (ZIEGLER-NICHOLS) Y ESTABILIDAD DEL SISTEMA.	96
4.1.1. Análisis de las características de la Variable del Proceso – Sintonía por Ganancia Límite.	97
4.2 RESULTADOS DE PRUEBA DE SINTONÍA DE PID POR MÉTODO DE TANTEO Y ESTABILIDAD DEL SISTEMA.	100
4.2.1. Análisis de las características de la Variable del Proceso – Sintonía por Tanteo.	101
4.3 COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA VARIABLE DEL PROCESO AL SINTONIZAR EL PID POR MÉTODO DE GANANCIA LÍMITE Y TANTEO.	104
<b>CONCLUSIONES</b>	106
<b>RECOMENDACIONES</b>	108

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	109
<b>ANEXOS</b>	112
ANEXO 1: CUADRO DE COSTO DE PROYECTO DE TESIS	112
ANEXO 2: TABLA DE DATOS EXPORTADOS A EXCEL–SINTONÍA POR MÉTODO DE GANANCIA LÍMITE, SP=10 cm	113
ANEXO 3: TABLA DE DATOS EXPORTADOS A EXCEL – SINTONÍA POR MÉTODO DE GANANCIA LÍMITE, SP=30 cm	119
ANEXO 4: TABLA DE DATOS EXPORTADOS A EXCEL – SINTONÍA POR MÉTODO TANTEO, SP=10 cm	125
ANEXO 5: TABLA DE DATOS EXPORTADOS A EXCEL – SINTONÍA POR MÉTODO TANTEO, SP=30 cm	133

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Representación de sistema de control	10
Figura 1.2: Sistema de control en lazo abierto	11
Figura 1.3: Sistema de lazo cerrado	12
Figura 1.4: Sistema de lazo cerrado mejorado	12
Figura 1.5: Respuesta de Acción Proporcional	13
Figura 1.6: Respuesta de Acción Proporcional e Integral	16
Figura 1.7: Comportamientos de un sistema de control	18
Figura 1.8: Características de la variable del proceso	19
Figura 1.9: Respuesta de oscilaciones sostenidas al aplicar sintonía por ganancia Límite	21
Figura 1.10: Medidor de nivel ultrasónico	25
Figura 2.1 : Módulo de medición de nivel desarrollado por de la URP en el curso de taller 4	30
Figura 2.2: Bomba de módulo de medición de nivel	32
Figura 2.3: Recipiente de módulo de medición de nivel	33
Figura 2.4: Válvula OnOff	33
Figura 2.5: Sensor ultrasónico HC-SR04	34
Figura 2.6: Acondicionamiento de Sensor ultrasónico HC-SR04	34
Figura 2.7: Módulo de medición de nivel con cambios y mejoras	35
Figura 2.8: Válvula de control proporcional Danfoss-EV260B	37
Figura 2.9: Bomba QB60 para impulsión de agua	38
Figura 2.10: Sensor de nivel y acondicionamiento para el nuevo módulo.	39



Figura 2.11: Tanque para medición de nivel en nuevo módulo	40
Figura 2.12: Tanque para alimentación en nuevo módulo	41
Figura 2.13: Válvula Check tipo Y	42
Figura 2.14: Malla filtro a la salida de tanque de alimentación	43
Figura 2.15: Vista Frontal de nuevo módulo	44
Figura 2.16: Vista lateral de nuevo módulo	45
Figura 2.17: Gráfico P&ID de modulo de medición de nivel mejorado	46
Figura 3.1: Ventana de Panel Frontal de Proyecto de Tesis	48
Figura 3.2: Ventana de Programación de Proyecto de Tesis	50
Figura 3.3: Características de trabajo de librería PID.VI	51
Figura 3.4: DAQ NI USB-6008	53
Figura 3.5: DAQ NI USB-6008, conexiones	54
Figura 3.6: Circuito amplificador de voltaje de 0-5 VDC a 0-10 VDC	55
Figura 3.7: Llenado de agua en recipiente a 30.5 cm	56
Figura 3.8: Lectura de altura de tanque y voltaje recibido de sensor ultrasónico a 30.5 cm	56
Figura 3.9: Llenado de agua en recipiente a 25 cm	57
Figura 3.10: Lectura de altura de tanque y voltaje recibido de sensor ultrasónico a 25 cm	57
Figura 3.11: Llenado de agua en recipiente a 15 cm	58
Figura 3.12: Lectura de altura de tanque y voltaje recibido de sensor ultrasónico a 15 cm	58
Figura 3.13: Llenado de agua en recipiente a 10 cm	59

Figura 3.14: Lectura de altura de tanque y voltaje recibido de sensor ultrasónico a 10 cm	59
Figura 3.15: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ	60
Figura 3.16: Lectura a la salida del amplificador de voltaje y entrada de la válvula	60
Figura 3.17: Visualización de apertura de válvula y salida de 5 VDC	61
Figura 3.18: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ, de 5 VDC	61
Figura 3.19: Lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula, de 10 VDC	62
Figura 3.20: Visualización de apertura de la válvula y salida de 3.5 VDC	62
Figura 3.21: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ, de 3.5 VDC	63
Figura 3.22: Lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula, de 7 VDC	63
Figura 3.23: Visualización de apertura de válvula y salida de 2.5 VDC	64
Figura 3.24: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ, de 2.5 VDC	64
Figura 3.25: Lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula, de 5 VDC	64
Figura 3.26: Visualización de apertura de válvula y salida de 1.5 VDC	65
Figura 3.27: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ, de 1.5 VDC	65
Figura 3.28: Lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula, de 3 VDC	66
Figura 3.29: Visualización de apertura de válvula y salida de 0 VDC	66
Figura 3.30: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ, de 0 VDC	67

Figura 3.31: Lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula, de 0 VDC	67
Figura 3.32: Sintonía a $K_{cr}=0.1$	68
Figura 3.33: Sintonía a $K_{cr}=0.3$	69
Figura 3.34: Sintonía a $K_{cr}=0.5$	69
Figura 3.35: Sintonía a $K_{cr}=0.8$	70
Figura 3.36: Sintonía a $K_{cr}=1$	70
Figura 3.37: Sintonía a $K_{cr}=3$	71
Figura 3.38: Sintonía a $K_{cr}=4$	71
Figura 3.39: Sintonía a $K_{cr}=6$	72
Figura 3.40: Sintonía a $K_{cr}=8$	72
Figura 3.41: Sintonía a $K_{cr}=25$	73
Figura 3.42: Periodo $P_{cr}=8$ segundos a $K_{cr}=1$	74
Figura 3.43: Prueba Set Point=10 cm, $K_p=0.6$ , $T_i=0.067$ y $T_d=0.017$	75
Figura 3.44: Prueba Set Point=30 cm, $K_p=0.6$ , $T_i=0.067$ y $T_d=0.017$	76
Figura 3.45: Prueba $K_p=0.3$ – Método Tanteo	77
Figura 3.46: Prueba $K_p=0.6$ – Método Tanteo	78
Figura 3.47: Prueba $K_p=1.2$ – Método Tanteo	78
Figura 3.48: Prueba $K_p=0.7$ – Método Tanteo	79
Figura 3.49: Prueba $K_p=0.65$ – Método Tanteo	79
Figura 3.50: Prueba $K_p=0.63$ – Método Tanteo	80
Figura 3.51: Prueba $K_p=0.62$ –Método Tanteo	80
Figura 3.52: Prueba $K_p=0.62$ , $T_i=10$ - Método Tanteo	81

Figura 3.53: Prueba $K_p=0.62$ , $T_i=5$ - Método Tanteo	82
Figura 3.54: Prueba $K_p=0.62$ , $T_i=2.5$ -Método Tanteo	82
Figura 3.55: Prueba $K_p=0.62$ , $T_i=1.25$ - Método Tanteo	83
Figura 3.56: Prueba $K_p=0.62$ , $T_i=0.62$ - Método Tanteo	83
Figura 3.57: Prueba $K_p=0.62$ , $T_i=0.31$ - Método Tanteo	84
Figura 3.58: Prueba $K_p=0.62$ , $T_i=0.15$ - Método Tanteo	84
Figura 3.59: Prueba $K_p=0.62$ , $T_i=0.075$ - Método Tanteo	85
Figura 3.60: Prueba $K_p=0.62$ , $T_i=0.038$ - Método Tanteo	85
Figura 3.61: Prueba $K_p=0.62$ , $T_i=0.019$ - Método Tanteo	86
Figura 3.62: Prueba $K_p=0.62$ , $T_i=0.019$ a $SP=30\text{cm}$ -Método Tanteo	87
Figura 3.63: Prueba $K_p=0.3$ , $T_i=0.019$ a $SP=10\text{cm}$ - Método Tanteo	88
Figura 3.64: Prueba $K_p=0.3$ , $T_i=0.019$ a $SP=30\text{cm}$ - Método Tanteo	88
Figura 3.65: Prueba $K_p=0.3$ , $T_i=0.019$ y $T_d= 0.01$ .-Método Tanteo	89
Figura 3.66: Prueba Set Point=10 cm, $K_p=0.3$ , $T_i=0.019$ y $T_d=0.01$	90
Figura 3.67: Prueba Set Point=30 cm, $K_p=0.3$ , $T_i=0.019$ y $T_d=0.01$	91
Figura 3.68: Menú de modo Wifi de celular y conexiones	93
Figura 3.69: Pantalla inicial de Software “Team Viewer	93
Figura 3.70: Control de proceso en dos máquinas, control remoto	94
Figura 3.71: Máquina 1 con el control PID	95
Figura 3.72: Máquina 2 – visualizando el control del proceso	95
Figura 4.1: Estabilidad del Sistema al sintonizar PID por método de Ganancia Límite– $SP=10\text{ cm}$	96

Figura 4.2: Estabilidad del Sistema al sintonizar PID por método de Ganancia	
Límite–SP=30 cm	97
Figura 4.3: Gráfica de estabilidad del sistema al sintonizar PID por Ganancia	
Límite–SP=10 cm	98
Figura 4.4: Gráfica de estabilidad del sistema al sintonizar PID por	
Ganancia Límite–SP=30 cm	99
Figura 4.5: Estabilidad del Sistema al sintonizar PID por método de	
Tanteo–SP=10 cm	100
Figura 4.6: Estabilidad del Sistema al sintonizar PID por método de	
Tanteo–SP=30 cm	101
Figura 4.7: Gráfica de estabilidad del sistema al sintonizar PID por	
Tanteo–SP=10 cm	102
Figura 4.8: Gráfica de estabilidad del sistema al sintonizar PID por	
Tanteo–SP=30 cm	103

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Tabla de valores para aplicación de sintonía de Ziegler-Nichols	21
Tabla 2.1: Tabulación de relación de voltaje de DAQ y voltaje entrada de válvula	55
Tabla 2.2: Resumen de parámetros de sintonía obtenidos por ambos métodos	91
Tabla 3.1: Características de Variable de Proceso a Set Point=10 cm–por Ganancia	98
Tabla 3.2: Características de Variable de Proceso a Set Point=30 cm –por Ganancia Límite	100
Tabla 3.3: Características de Variable de Proceso a Set Point=10cm–Sintonía por Tanteo	102
Tabla 3.4: Características de Variable de Proceso a Set Point=30 cm–Sintonía por Tanteo	104
Tabla 4.1: Tabla de datos exportados SP=10 cm – Ganancia Límite	113
Tabla 4.2: Tabla de datos exportados SP=30 cm – Ganancia Límite	119
Tabla 4.3: Tabla de datos exportados SP=10 cm – Tanteo	125
Tabla 4.4: Tabla de datos exportados SP=30 cm – Tanteo	133

## RESUMEN

El fin de este proyecto de tesis fue Sintonizar un controlador PID, por los métodos de Ganancia Límite y Tanteo, para controlar de manera remota la variable Nivel en un módulo educativo del Laboratorio de control de la Universidad Ricardo Palma, esto se hizo con la finalidad que el alumno pueda entender la sintonía de un PID, lo cual es siempre recurrente en el campo. El control remoto permitió asemejar mucho a los procesos actuales.

Al finalizar la tesis se obtuvo un control PID sintonizado bajo el método de Ganancia Límite con valores de  $K_p=0.6$ ,  $T_i=0.067$  minutos y  $T_d=0.017$  minutos; el cual dio valores de Error de estado estacionario=3.41% o 0.341, Tiempo de estabilización=30 segundos, Máximo sobre impulso=5.505% y Tiempo de subida=26 segundos; para un Set Point de 10 cm. Por otro lado, para un Set Point de 30 cm, dio valores de Error de estado estacionario=3.03% o 0.91, Tiempo de estabilización=67 segundos, Máximo sobre impulso=0.381% y Tiempo de subida=66 segundos.

Además, se sintonizó bajo el método de Tanteo con valores de  $K_p=0.3$ ,  $T_i=0.019$  minutos y  $T_d=0.01$  minutos; el cual dio valores de Error de estado estacionario=2.99% o 0.299, Tiempo de estabilización=40 segundos, Máximo sobre impulso=6.69% y Tiempo de subida=39 segundos; para un Set Point de 10 cm. Por otro lado, para un Set Point de 30 cm, dio valores de Error de estado estacionario=1.87% o 0.56, Tiempo de estabilización=75 segundos, Máximo sobre impulso=0.398% y Tiempo de subida=73 segundos.

**Palabras Clave:** Controlador, PID, sintonía, Ganancia limite, tanteo, estabilidad, Variable del proceso, Labview, remoto, nivel.

## ABSTRACT

The purpose of this thesis project was Tuning a PID controller, using methods of grope and Gain Limit to remotely control the variable level in an educational module Control Laboratory of the University Ricardo Palma, this was done in order that students can understand the tuning of a PID, which is always recurring in the field. The remote control allowed much resembles the current processes.

After the thesis tuned PID control method gain under the limit values of  $K_p = 0.6$  was obtained,  $T_i = T_d = 0067$  minutes and  $0017$  minutes; which gave values of steady state error = 3.41% or 0.341, Settling time = 30 seconds Maximum overshoot = 5.505% and Rise Time = 26 seconds; Set for a Point of 10 cm. On the other hand, for a set point of 30 cm, gave values of steady state error = 3.03% or 0.91 Settling time = 67 seconds Maximum overshoot = 0.381% and Rise Time = 66 seconds.

Furthermore, it was tuned under trial and error with values of  $K_p = 0.3$ ,  $T_i = T_d = 0019$  minutes and  $0.01$  minutes; which gave values of steady state error = 2.99% or 0.299, Settling time = 40 seconds Maximum = 6.69% overshoot and rise time = 39 seconds; Set for a Point of 10 cm. On the other hand, for a set point of 30 cm, gave values of steady state error = 1.87% or 0.56 Settling time = 75 seconds Maximum overshoot = 0.398% and Rise Time = 73 seconds.

**Key Words:** Controller, PID, tune, Gain limit, grope, stability, Process Variable, Labview, remote.



## INTRODUCCIÓN

El proyecto realizado es un primer paso para el apoyo de la enseñanza de Ingeniería Electrónica. Se busca fortalecer los conocimientos de control del alumno de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Ricardo Palma (URP), haciendo uso de un módulo donde se pueda entender el control de la variable nivel y conocer 2 métodos de sintonía para un controlador PID. Este proyecto de tesis aborda 4 capítulos.

En el capítulo 1, se desarrolló la base de definiciones técnicas para poder comprender el tema de sintonía de controlador PID y el control de la variable nivel.

En el capítulo 2, se hizo un análisis del estado del módulo desarrollado por los alumnos de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la URP y se plantearon los cambios y mejoras para el correcto trabajo de un módulo de control de nivel.

En el capítulo 3, se presentó la puesta en marcha del proyecto mostrando la interfaz con la que se va a trabajar; desarrollada en Labview. Además, se realizó pruebas de 2 distintos tipos de sintonía para el controlador PID y se mostró el control remoto de la variable.

Finalmente, en el capítulo 4, se presentó los resultados de las pruebas de los 2 tipos de sintonía para el controlador PID y se analizó la estabilidad conseguida bajo estos métodos.

## MARCO SITUACIONAL

La aplicación de este proyecto de tesis se va dar al módulo educativo de nivel del laboratorio de control de la URP, para apoyar la enseñanza de ingeniería electrónica en los temas de control PID y sintonía de este.

A lo largo de la carrera de Ingeniería Electrónica es necesario conseguir habilidades que complementen lo aprendido en las aulas, para esto sirve de mucho las experiencias de los laboratorios. En ellos se llevan a práctica lo aprendido y complementan los conocimientos de manera que el alumno pueda salir al campo con una base teórica y práctica sólida.

La URP cuenta con el laboratorio de control donde a lo largo de la carrera, sobre todo a partir de quinto ciclo, se llevan distintos cursos de la especialidad de control y automatización. En este laboratorio encontramos módulos de entrenamiento de control con PLC (S7-200), módulos de medición y control de temperatura mediante un controlador PID, donde se puede apreciar la respuesta de esta variable y, así mismo, se encuentra un módulo de medición de nivel por medio de un sensor ultrasónico en lazo cerrado, desarrollado por un grupo de alumnos en el curso de taller 4.

La práctica y enseñanza del control de nivel permite al alumno entender los conceptos básicos de control, aplicado a un proceso encontrado cotidianamente en el campo laboral. Si se le suma el concepto de control PID y su sintonía, se podrá tener una enseñanza más exacta a la encontrada en campo.

## PROBLEMATIZACION

Es una realidad que en la enseñanza de los cursos de carrera, en las profesiones de ingeniería, es necesario complementar lo enseñado con actividades que simulen la realidad encontrada en los ambientes laborales. De esta manera, el estudiante podrá entender y encontrar respuestas rápidas a problemas que usualmente se encuentran en el campo laboral, aplicando lo aprendido en aulas y bajo una sólida formación básica.

La carrera de Ingeniería Electrónica no se encuentra absuelta de esta necesidad de complementación de la enseñanza teórica. Es, por esta razón, que se tiene el Laboratorio de Control, en el cual se complementa las clases teóricas haciendo prácticas en los módulos que se tienen. Sin embargo, este laboratorio no se encuentra totalmente actualizado, lo que ocasiona un problema para la práctica de la teoría enseñada.

Actualmente el laboratorio de control cuenta con un módulo de control de nivel en lazo cerrado por medio de un sensor ultrasónico con un control ON/OFF, este módulo fue diseñado por los alumnos en un curso de taller. No obstante, debido a que este módulo simula un proceso muy común en la industria, debería contener un control que se asemeja a lo que se encuentra en campo (control PID), para poder situar más las bases teóricas.

Al combinar un módulo de un proceso básico con un control más común usado en la industria, se podrá preparar al alumno para lo que le espera en el campo.

## **OBJETIVOS**

### **1. Objetivo General**

Sintonizar un PID para controlar de manera remota la variable Nivel en un módulo educativo del laboratorio de control de la Universidad Ricardo Palma.

### **2. Objetivos Específicos**

- Sintonizar el controlador PID utilizando los métodos de Ziegler-Nichols por ganancia límite y empírico por tanteo.
- Analizar y comparar el desempeño de la variable de proceso al utilizar los dos métodos de sintonización planteados, basado en 4 características de la variable de proceso (Tiempo de subida “ $t_r$ ”, Máximo sobre impulso “ $M_p$ ”, Tiempo de estabilización “ $t_s$ ” y Error en estado estacionario “ $E_p$ ”).
- Analizar y modificar el prototipo de módulo de medición de nivel desarrollado, en el curso de Taller 4, por los alumnos de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Ricardo Palma.
- Implementar una interfaz gráfica en el software Labview, haciendo uso de la librería PID.VI, para el control de la variable nivel en el módulo educativo del laboratorio de control de la URP.
- Utilizar el software “Team Viewer” para el control remoto de la variable nivel en el módulo educativo.

## ANTECEDENTES

### 1. Desarrollo e implementación de un sistema retroalimentado de control de nivel de líquidos con alimentación continua y variable [1]

“Este trabajo plantea desarrollar e implementar un sistema de control de nivel de líquidos con retroalimentación, para ser usado en el laboratorio como material didáctico. El desarrollo del control del sistema está basado en un control proporcional integral derivativo (PID).

Durante la operación de control de nivel de líquidos retroalimentado, en el equipo, es posible controlar el nivel por medio del valor asignado al Set Point (SP) en un rango de 0 a 70 cm, que son regulados por medio de la función de transferencia y el control proporcional integral derivativo programados en la interface de control. Los valores conseguidos para la estabilidad fueron  $K_p=10$ ,  $T_i= 0.05$  y  $T_d=0.07$ ; con estos valores se consigue la mayor estabilidad” [1]

En este trabajo [1] se desarrolló un sistema de control de nivel en un tanque, usando la lógica de control PID y monitoreándolo desde Labview. Sin embargo, no se da detalló cómo se hizo la sintonía del controlador.

El proyecto de tesis presentado se centró en mostrar la sintonía de un PID por dos métodos y controlar remotamente el nivel a manera que se entienda los conceptos de PID.

## 2. Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquidos [2]

“El presente trabajo tiene por objetivo diseñar y construir un prototipo para realizar el control de nivel de líquidos tanto de manera analógica como digital, orientado a su utilización en prácticas de control automático sobre un prototipo a escala que representa un sistema real.

Para realizar el control digital del prototipo se requiere de un sistema de adquisición de datos y de un computador que deben ser conectados al módulo principal de control. Además, el nivel es medido por un sensor de presión diferencial colocado en el último tanque (en un arreglo de 3 tanques)

Se concluye, que la respuesta del sistema utilizando el control digital es aceptable, aunque está limitada a sistemas de primer orden, pues con sistemas de segundo (2 tanques) y tercer orden (3 tanques) este tipo de control es pobre, debido especialmente a la saturación de la señal de control. Los resultados obtenidos de las pruebas en control digital para sistemas de primer orden fueron:

$K_p=20$ ,  $K_i=2$  y  $T_i=300\text{ms}$ . Resultados:  $M_p=3.7\%$  ,  $T_s=7.8\text{s}$  y  $E_p=1.9\%$  ” [2]

A diferencia de este trabajo [2], el proyecto de tesis que se desarrolló, usó un sensor ultrasónico para la medida de nivel y se centró en un control digital de manera remota. Además, se utilizó un solo tanque para simplificar y hacer más efectivo la muestra de la utilización y sintonía de PID

### **3. Control de nivel implementado en la estación de entrenamiento GUNT RT 450 del laboratorio de instrumentación industrial [3]**

“En el presente trabajo se muestra el proceso involucrado en el control de una planta, el cual abarca en general tres aspectos: control, comunicación y la interfaz. Se controla una planta de nivel por medio de un controlador PID implementado en un PLC, un controlador industrial y mediante el software de Labview, desarrollando un interfaz de Labview en cada caso.

La comunicación entre la planta y la PC se realiza mediante el bus de campo Profibus. Adicional a esto se utiliza el módulo de entrada y salidas analógicas del PLC como un recurso de comunicación.

Se concluye, que luego de las pruebas, el control PI es el indicado para la planta de nivel. Los valores más apropiados son  $K_p=5$  y  $T_i=0.5$  min, puesto que ofrecen más robustez a la perturbación, y una respuesta aceptable frente a cambios de setpoint” [3]

En el proyecto de tesis se trabajó con el desarrollo de un controlador PID en Labview, que se comparó mucho al desarrollado en el trabajo base [3]. Sin embargo, se utilizó 2 métodos de sintonía (Ganancia límite y Tanteo), con la idea de diferenciar lo usado en campo y lo aprendido teóricamente. Además, se buscó tener un control remoto para complementar la enseñanza.

#### **4. Diseño y construcción de un módulo didáctico para medir y controlar caudal y nivel [4]**

“El presente trabajo tiene la finalidad de proveer al laboratorio de instrumentación de un sistema de medición y control de caudal y de nivel de agua que sea funcional y útil para el aprendizaje de quienes realizan prácticas en este laboratorio.

Para el control de caudal se utiliza un sensor de paletas y para el de nivel un sensor de presión diferencial. El sistema puede ser controlado y visualizado de manera local y remota.

Como resultado en la sintonía del controlador PID se obtiene un K crítico de 80, a partir de este se obtienen los diferentes valores del controlador PID, obteniendo (ajuste adicional):  $K_p=8$ ,  $T_i=0.4$  y  $T_d=0.01$  con un tiempo de establecimiento de 1.5 min” [4]

En comparación con el proyecto de tesis, el proyecto base [4], apoyó en el método de sintonía, ya que, fue el mismo usado (ganancia límite); sin embargo, se diferenció en que el proyecto de tesis usó un método más, que fue el empírico por tanteo. No obstante, se usó un sensor de ultrasonido para la medición de nivel y la adquisición de datos fue por medio de un DAQ, hacia la PC donde se tenía el controlador PID.



## **5. Módulo virtual para control de nivel y flujo de agua [5]**

“En este proyecto se implementó una plataforma de software que sirve como módulo virtual para el laboratorio de control de procesos de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

El módulo virtual permite controlar dos variables de control comunes en el campo industrial como lo son el nivel y el flujo. Además, permite implementar diferentes estrategias de control. El módulo virtual se desarrolló en Labview y Matlab como plataforma de programación.

Se pudo demostrar con el desarrollo del modelado matemático del sistema, que dicho lazo de control debe ser realimentado, es decir en lazo cerrado, ya que al modelar el mismo sistema en lazo abierto, por más que el desarrollo matemático se encuentre bien, se verán perturbaciones en la salida del sistema”. [5]

En el proyecto de tesis se planteó crear una interfaz que simule el proceso de la planta, así como elaborar el control PID con la posibilidad de sintonía. A diferencia de este proyecto [5], se controló el proceso desde una PC y se vio la respuesta de la variable del proceso, al ser controlado por un PID sintonizado.

# CAPÍTULO 1: DEFINICIONES TÉCNICAS

## 1.1 SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema automático de control es un conjunto de componentes físicos conectados o relacionados entre sí, de manera que regulen o dirijan su actuación por sí mismos, es decir, sin intervención de agentes exteriores (incluido el factor humano), corrigiendo además los posibles errores que se presenten en su funcionamiento. [6]

Actualmente, cualquier mecanismo, sistema o planta industrial presenta una parte actuadora, que corresponde al sistema físico que realiza la acción, y otra parte de mando o control, que genera las ordenes necesarias para que esa acción se lleve, o no, a cabo.

En automática se sustituye la presencia del ser humano por un mecanismo, circuito eléctrico o, más modernamente por un ordenador. El sistema de control será, en este caso, automático.

Los sistemas de control se pueden representar en forma de diagramas de bloques, en los que se ofrece una expresión visual y simplificada de las relaciones entre la entrada y la salida de un sistema físico. (Figura 1.1)



Figura 1.1: Representación de sistema de control. [6]

Los sistemas de control se pueden clasificar en:

- Sistemas de control en lazo abierto.

Es aquel en el que la señal de salida no influye sobre la señal de entrada. El diagrama de bloque de un sistema en lazo abierto se muestra en la Figura 1.2.



Figura 1.2: Sistema de Lazo Abierto [6]

Los sistemas de lazo abierto dependen de la variable tiempo y la salida no depende de la entrada. El principal inconveniente es que son extremadamente sensibles a las perturbaciones.

- Sistemas de control en lazo cerrado.

Es aquel en el que la acción de control es dependiente de la salida. La señal de salida influye en la entrada, esto se consigue por medio de lo que llamamos realimentación o retroalimentación (feedback).

La realimentación es la propiedad de un sistema, en lazo cerrado, por la cual la salida se compara con la entrada del sistema de manera que la acción de control se establezca como una función de ambas.

El diagrama de bloques correspondientes a un sistema de lazo cerrado se muestra en la Figura 1.3.

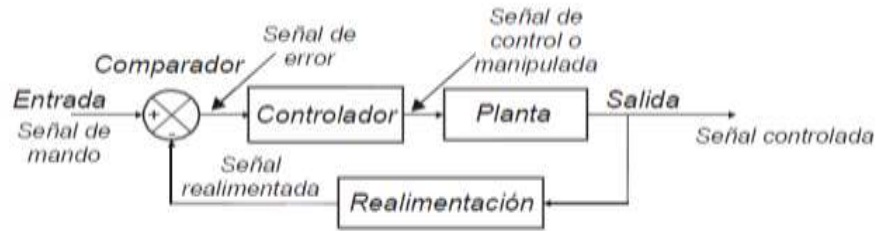


Figura 1.3: Sistema de lazo cerrado [6]

La figura 1.3 se puede sustituir y mejorar por la figura 1.4:

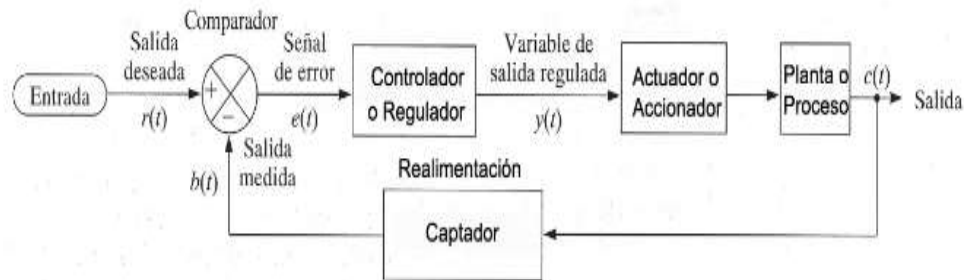


Figura 1.4: Sistema de lazo cerrado mejorado. [6]

Los sistemas en lazo cerrado son mucho menos sensibles a las perturbaciones que los de lazo abierto, ya que cualquier modificación de las condiciones del sistema afectará a la salida. Este cambio será registrado por medio de la realimentación como un error que es, en definitiva, la variable que actúa sobre el sistema de control.

## 1.2 CONTROL P, PI y PID

Hoy en día, muchas aplicaciones automáticas utilizan el computador como elemento de control.

El controlador o regulador constituye el elemento fundamental en un sistema de control, pues determina el comportamiento del bucle; ya que, condiciona la acción

del elemento actuador en función del error obtenido. La forma en que el regulador genera la señal de control se denomina acción de control. Algunas de estas acciones se conocen como acciones básicas de control, mientras que otras, se pueden presentar como combinaciones de las acciones básicas.

- *Controlador de acción Proporcional (P) [7]*

La señal de accionamiento es proporcional a la señal de error del sistema. Si la señal de error es grande, el valor de la variable regulada es grande y si la señal de error del sistema es pequeña, el valor de la variable regulada es pequeña. La variable “ $K_p$ ” determinara el nivel de amplificación del elemento de control.

En la figura 1.5 se aprecia la respuesta de acción proporcional para dos valores de  $k_p$ .,

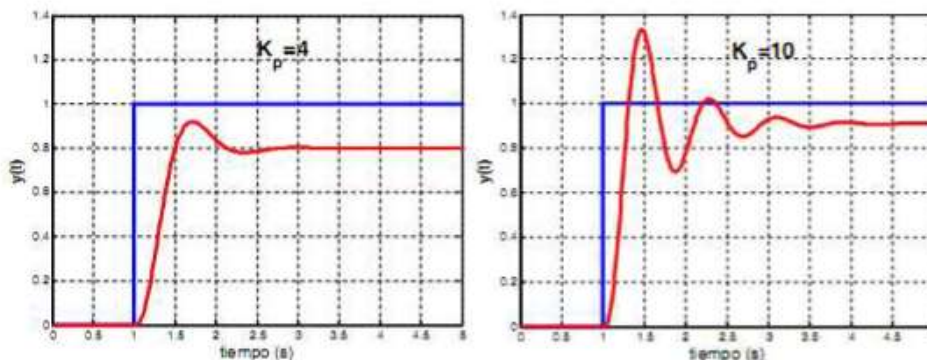


Figura 1.5: Respuesta de Acción Proporcional [7]

El control proporcional presenta el problema que la variable a controlar jamás se estabiliza justo en el valor deseado sino que se tiene un “error estacionario”, esta es la característica principal de este tipo de control.

El error estacionario se puede reducir aumentando la acción proporcional, pero aumentarla demasiado volverá oscilatorio el sistema (parecido a un control ON-

OFF), además existe un límite inferior y siempre habrá algo de error estacionario.

Existen procesos en los cuales es necesario disminuir la acción proporcional para corregir oscilaciones de la variable, pero al hacerlo se produce un mayor error estacionario. Otro problema generado al disminuir la acción proporcional para eliminar las oscilaciones, es que el control pierde efectividad para responder rápidamente a perturbaciones externas.

La acción de control proporcional, da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir:  $u(t) = KP.e(t)$ , que descrita desde su función de transferencia queda como en la fórmula (1):

$$Cp(s) = Kp.....(1)$$

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

Al hablar de ganancia proporcional debemos mencionar BANDA PROPORCIONAL "PB", que es la variación de la variable controlada necesaria para provocar una carrera completa del elemento final de control. La banda proporcional se expresa en porcentaje y está dada bajo la fórmula (2):

$$Kp = 100/PB; PB = 100/Kp.....(2)$$

- *Controlador de acción proporcional e integral (PI) [8]*

Estas dos acciones se complementan. La primera en actuar es la acción proporcional (instantáneamente), mientras que la integral actúa durante un intervalo de tiempo. Así y por medio de la acción integral se elimina la desviación remanente (proporcional).

Es decir, el control es proporcional, pero a la salida se le suma la acción integral, que corrige el problema estacionario tomando en cuenta la magnitud del error y el tiempo que este ha permanecido.

Para ello, se le programa al control una constante  $I$ , que es formalmente “la cantidad de veces que aumenta la acción proporcional por segundo”.

La salida se corrige en una cantidad equivalente a la integral del error multiplicada por  $I$ . La integral de error es, simplemente, la suma acumulada de los errores medidos por el control cada segundo.

Por muy pequeño que sea el valor programado de  $I$ , siempre corrige el error estacionario, pero tarda más tiempo en hacerlo. Al revés, si se programa un valor excesivo de  $I$ , entonces la acción integral tendrá mucha fuerza en la salida y el sistema alcanzará rápidamente el valor deseado, y lo más probable es que alcance valores mayores por efectos de la inercia del sistema. Entonces, la acción integral (con error negativo) será en sentido contrario; el valor de la salida ira disminuyendo rápidamente con la magnitud del error. Como consecuencia habrá una excesiva disminución de la potencia de salida y la variable probablemente baje del valor deseado, entrando así el sistema en ciclo oscilatorio.

Normalmente  $I$  debe ser grande solo en sistemas que reaccionan rápidamente, (por ejemplo controles de velocidad de motores) y pequeño para sistemas lentos con mucha inercia (por ejemplo hornos). En la Figura 1.6 se aprecia la respuesta de acción proporcional e integral para dos valores de “ $T_i$ ”.

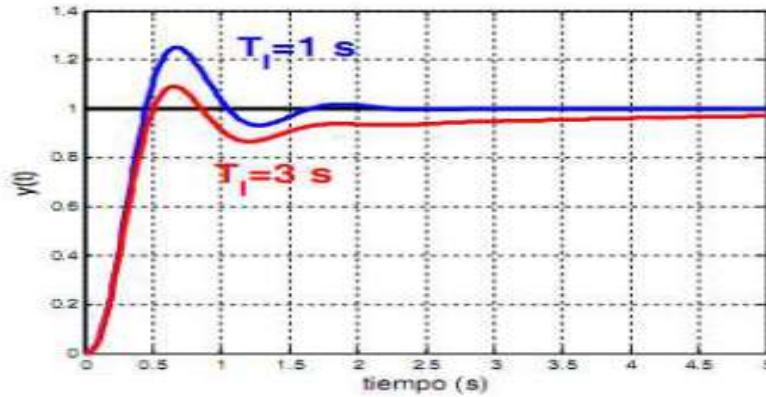


Figura 1.6: Respuesta de Acción Proporcional e Integral. [8]

Las variables “ $K_p$ ” y “ $T_i$ ” son parámetros ajustables del sistema. A “ $T_i$ ” se le denomina tiempo integral y controla la acción integral del sistema, mientras que “ $K_p$ ” controla ambas.

La acción de control proporcional-integral [8], se define mediante la fórmula en (3):

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(3)$$

La función de transferencia resulta como en (4):

$$C_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$



- *Controlador de acción PID (Proporcional , integral , derivativo) [9]*

Aprovecha las características de los tres reguladores anteriores, de forma, que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral y, si la señal error varía rápidamente, predomina la acción derivativa. Tiene la ventaja de tener una respuesta más rápida y una inmediata compensación de la señal de error en el caso de cambios o perturbaciones. Tiene como desventaja que el bucle de regulación es más propenso a oscilar y los ajustes son más difíciles de realizar.

La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante la ecuación (5):

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots(5)$$

Y su función transferencia resulta como en (5):

$$C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

Kp: Ganancia Proporcional.

Ti: Tiempo integral (minutos).

Td: Tiempo derivativo (minutos).

Siempre se busca que el sistema de control sea estable, pero además, dentro de las condiciones de estabilidad existen tres tipos de comportamiento bien

definidos: control sub-amortiguado, control con amortiguamiento crítico y control sobre-amortiguado.

En la figura 1.7 se muestran ejemplos de estos comportamientos. En cada uno de estos casos varía la velocidad de respuesta del sistema ante perturbaciones y, a la vez, propensión a tener comportamiento inestable u oscilatorio. [9]

El sistema sobre-amortiguado tiene una velocidad de respuesta lenta. Después de que ocurra una perturbación, el sistema puede tardar en volver al valor deseado, pero la ventaja es que el sistema es muy estable y no adquiere comportamientos oscilatorios indeseables. Esta condición tiende a ocurrir cuando la banda proporcional es más grande de lo necesario. También puede deberse a una constante derivativa  $D$  muy grande.

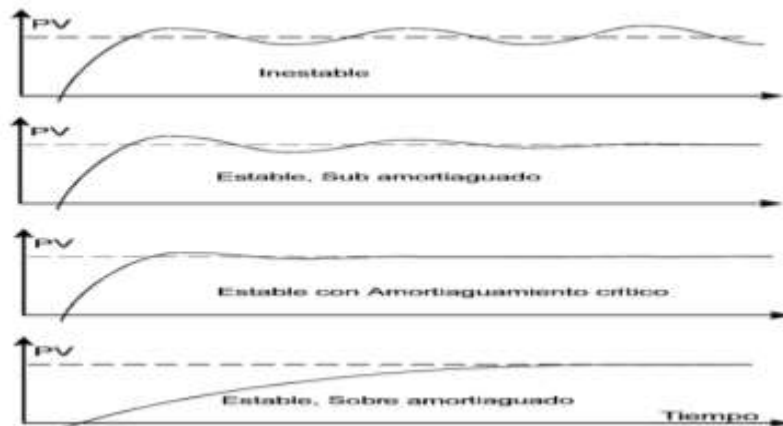


Figura 1.7: Comportamientos de un sistema de control. [9]

En el otro extremo, cuando un sistema se comporta de modo sub-amortiguado, la velocidad de respuesta es muy buena pero pueden ocurrir varias oscilaciones de cierta amplitud antes que la variable llegue a un valor estable.

Suele ocurrir esta condición cuando la banda proporcional es pequeña, la constante derivativa D chica y la constante de integración I grande.

El punto medio entre las condiciones anteriores es el amortiguamiento crítico. A esta condición corresponden los valores óptimos de los parámetros P, D, I. En este caso el sistema es bastante estable y la velocidad de respuesta es la mejor que se puede lograr.

- *Características de la variable de proceso*

En la figura 1.8 se aprecia un gráfico de las características encontradas en la variable del proceso. [2]

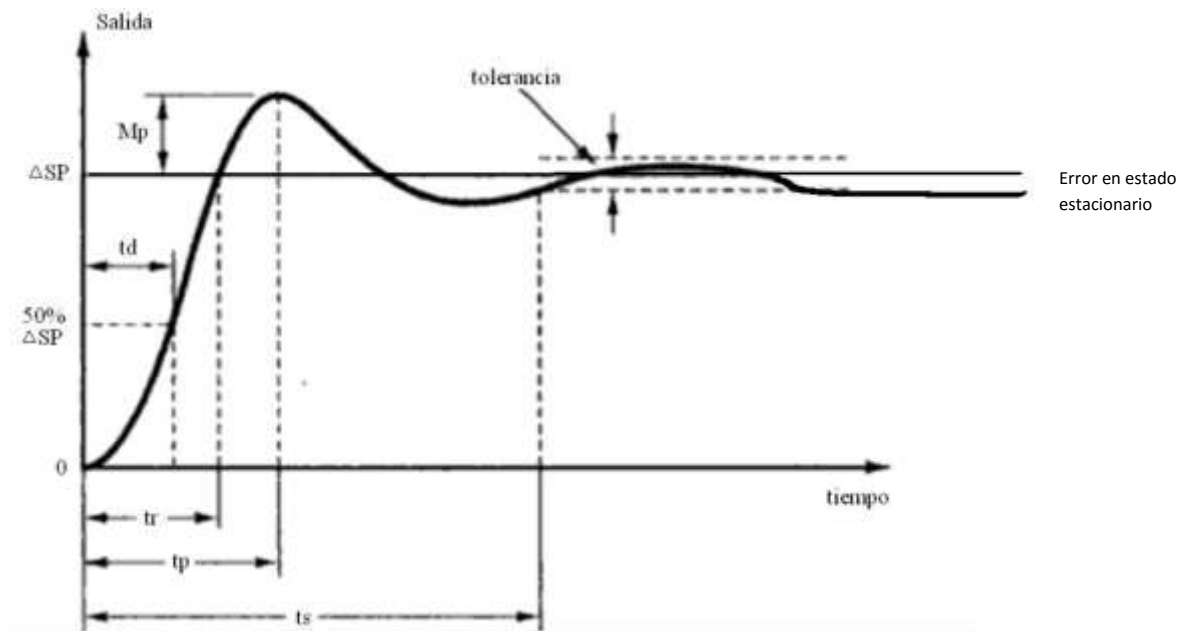


Figura 1.8: Características de la variable del proceso. [2]

-Tiempo de retardo "td": Es el tiempo requerido para que la respuesta alcance la mitad del valor final.

-Tiempo de subida “tr”: Es el tiempo requerido para que la respuesta suba generalmente desde el 10% al 90% de su valor final.

-Tiempo pico “tp”: Es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el valor máximo de sobre nivel.

-Máximo sobre nivel “Mp”: Es el máximo valor que alcanza la salida en toda su respuesta.

-Tiempo de estabilización “ts”: Es el tiempo que toma la salida en alcanzar un estado en el cual la señal permanece dentro de un rango definido por la tolerancia.

-Error en estado estacionario “Ep”: Error que se presenta cuando la salida en estado estable no coincide exactamente con el valor de referencia deseado, indica la precisión del sistema. Para el proyecto de tesis se calcula en porcentaje respecto al Set point.

### **1.3 TIPOS DE MÉTODOS DE SINTONÍA DE CONTROLADORES PID**

Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones del transitorio y del estado estacionario del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de controlador PID. En este caso, se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID, como lo siguiente



- *Método del tanteo* [11]

Los pasos a seguir para la sintonía por el método tanteo son:

1) Empezar con “Kp” pequeño, p.ej. 0.3, “Ti” grande, p.ej. 1000 minutos, y “Td” cero minutos.

2) Ir aumentando el “Kp” por pasos, cada uno al doble del valor anterior, dejando estabilizar a la medición entre paso y paso, y continuar hasta que ésta haga ciclos. Cuando ello ocurra disminuir el “Kp” regresando al último paso en que no hubo ciclos en la medición, y volver aumentar el “Kp” con pasos menores. Dejar un valor de “Kp” que no produzca ciclos pero que esté relativamente próximo al valor con el que ya empieza a producirlos.

3) Mover el PC (punto de consigna) y producir variaciones de carga del proceso (temperaturas, presiones, caudales, etc), y ver cómo responde. Si en algún punto hace ciclos, volver a disminuir la “Kp” lo suficiente para que desaparezcan tomando un margen de seguridad.

4) Mover la consigna y fijarse si la medición se estabiliza en un punto distinto al del PC (que será lo más probable). En tal caso ir reduciendo el “Ti” por pasos, cada uno la mitad del valor anterior, hasta que la medición se estabilice en el punto de consigna «rápidamente y con pocos ciclos» con la rapidez y la amortiguación más adecuada para cada proceso concreto. Entre paso y paso, si la medición está en el PC o muy cerca del mismo, conviene hacer cambios del PC de +5% o de -5% respecto al valor deseado, antes de hacer cada disminución del Ti.

5) Antes se ha dicho: « ... ir reduciendo el “Ti” por pasos, cada uno la mitad del valor anterior, hasta que la medición se estabilice en el punto de consigna «rápidamente y con pocos ciclos» con la rapidez y la amortiguación más adecuada para cada proceso concreto.» La decisión de cómo debe de entrar la medición en el PC corresponde definirla al «Manual de Operación del Proceso» y si aquí no se especifica, al responsable de la operación del proceso: el Operador. Este puede preferir que no haga ciclos y que la medición vaya lentamente hacia cada nueva consigna aunque tarde más tiempo, o, incluso, aunque no llegue a alcanzarla (lo que implicaría dejar al controlador en cuestión con un Ti grande; o máximo, es decir, solo con acción proporcional) prefiriendo un control laxo en algún lazo para que no haya perturbaciones en otros lazos del proceso, más sensibles, que pudieran haber aguas arriba o aguas abajo del PID que está siendo ajustado. Puede ser malo forzar a mantener a toda costa algunas variables en sus consignas cuando realmente es innecesario; los controladores con «zona muerta» y el «control flotante» son dos alternativas a considerar.

6) Después de ajustar el “Kp” y el “Ti”, si la señal de medición carece de ruido, ir aumentando a pequeños pasos “Td” variando cada vez el PC y las cargas del proceso y fijándose si se observan mejoras. Cuando esto no ocurra dar marcha atrás en el valor de “Td”. Conviene dejar  $Td \leq 0,12 \cdot Ti$ . A veces, el aumento de “Td” puede permitir reducir un poco más el valor de “Ti” que se había obtenido, logrando una respuesta mejorada que produce entradas de la medición en consigna con oscilaciones de menor amplitud y con una mayor rapidez en la

estabilización ante variaciones de cargas del proceso. Si la medición tiene ruido dejar  $T_d = 0$ .

Otros métodos de sintonía existentes son:

- Curva de reacción por Ziegler-Nichols [12]
- Método de Cohen y Coon [12]
- Método de Lopez, Miller, Smith y Murrill [12]
- Método de Kaya y Sheib [12]
- Método de Sung, O, Lee , Lee y Yi [12]

#### **1.4 MEDICIÓN Y CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDOS**

“Dentro de los procesos industriales, la medición y el control de nivel, en recipientes, se hace necesario cuando se pretende tener una producción continua, cuando se desea mantener una presión hidrostática, cuando un proceso requiere de control y medición de volúmenes de líquido o bien, en el caso más simple, para evitar que un líquido se derrame.”[13].

Existen diferentes técnicas de medición de nivel de líquidos en recipientes como:

- *Varillas de nivel.*
- *Sistema de flotador*
- *Métodos de presión diferencial*
- *Métodos capacitivos*
- *Medidor de nivel ultrasónico (usado en este proyecto de tesis):*



Se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo en un receptor. El retardo en la captación del eco depende del nivel del tanque. La medición se hace del exterior del tanque. Los sensores trabajan a frecuencias cercanas a 20 KHz. Estas ondas atraviesan el medio ambiente de gases o vapores con cierto amortiguamiento y se reflejan en la superficie del sólido o del líquido.

Son usados para todo tipo de tanque y líquido o lodo. Pueden usarse en áreas clasificadas. Son sensibles a la densidad de los fluidos y dan señales erróneas cuando la superficie del nivel de líquido no es nítida (por ej. Líquido que forme espuma), ya que se crean falsos ecos de los ultrasonidos.

Puede medirse, el tiempo empleado desde la emisión a la recepción del impulso reflejado. Puesto que el tiempo empleado depende de la distancia de la superficie del líquido desde el transmisor/receptor, puede determinarse entonces el nivel del líquido. En la figura 1.10 se muestra el funcionamiento de un medidor de nivel ultrasónico.

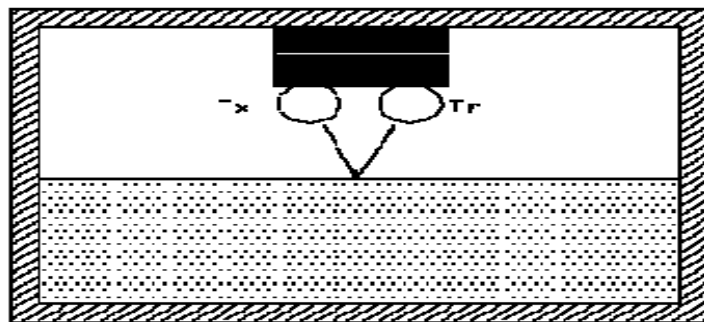


Figura 1.10: Medidor de nivel ultrasónico [14]

Para el control de nivel, en primer lugar, hay que mencionar que los criterios para control en recipientes de proceso son totalmente diferentes de los criterios utilizados para el resto de variables (presión, temperatura, etc). Mientras que, por ejemplo, en un control de temperatura no se permite que la variable de proceso se aleje de su punto de consigna, en el control de nivel de un recipiente no suele tener demasiada importancia el que la medida se aleje de su punto de consigna en la mayoría de los casos, siempre que esta medida permanezca dentro del rango del medidor.

Debido a las diferentes características del proceso donde se tiene que efectuar el control de nivel, este puede llevarse a cabo de las siguientes maneras: [9]

- *Entre límites alto y bajo:* Este modo de control es suficientemente válido cuando el nivel puede oscilar entre ambos límites, sin afectar al proceso. Se conoce con el nombre de control ON-OFF y utiliza como elementos detectores de nivel dos levostatos, situados en los límites superior e inferior del rango de nivel a controlar.
- *Nivel medio:* Se utiliza, cuando el recipiente sobre el cual se efectúa control de nivel, puede absorber perturbaciones y, de esta forma, evitar que se trasladen aguas abajo del proceso. Se suele conocer como averaging control y se lleva a cabo sintonizando el controlador de nivel con ganancia proporcional baja y tiempo integral alto.
- *Nivel ajustado:* Se utiliza, cuando la capacidad del recipiente es pequeña para el caudal de entrada y salida. En otras palabras, cuando el tiempo de residencia del producto en el recipiente es pequeño. Se

suele conocer como tight control y se lleva a cabo sintonizando el controlador de nivel con ganancia relativamente alta y tiempo integral relativamente bajo.

Tanto para nivel medio como para nivel ajustado, los valores de sintonía de la ganancia proporcional y tiempo integral dependen, fundamentalmente, de la geometría del recipiente, del tiempo de residencia del producto dentro del mismo, de la máxima perturbación esperada en caudal de entrada o salida y del grado de variabilidad permitido en función del tipo de proceso. Esta variabilidad condiciona el tipo de control a realizar, bien sea tipo de nivel medio o ajustado.

## **1.5 CONTROL REMOTO, O A DISTANCIA, DE VARIABLES**

Una de las formas habituales de trabajo en los procesos industriales es el tener un sistema centralizado que permita el control directo de las variables principales de operación del proceso.

Con el avance de la tecnología, a través de los años, se ha observado una sobresaliente evolución en el campo de la industria y por ende una mejora en sus procesos desde cualquier punto de vista y más específicamente el acceso a múltiples fuentes de información. [19]

La adquisición, supervisión y control remoto de variables en tiempo real a través de medio inalámbricos, permite realizar una adecuada vigilancia y optimización en la producción y por lo tanto un manejo administrativo más efectivo de una empresa.

Por medio de interfaces diseñadas para un sistema supervisor/controlador (PC de escritorio) se puede tener absoluto monitoreo y control de los procesos de la planta, y realizar monitoreo remoto desde un dispositivo aleatorio (Pc, móvil, etc.) por medio de comunicación inalámbrica. En dicho dispositivo se tendrá la visualización, o control, de la variable del proceso; así como los distintos controles que tome la interfaz.

El objetivo primordial de esta forma de control se basa en implementar nuevas estaciones de supervisión y control, que permitan desarrollar alternativas y establecer soluciones viables a dificultades que se presentan con frecuencia en sitios de producción en la industria. Un claro ejemplo de lo mencionado anteriormente, es el caso en que la persona encargada de una planta se encuentre a una distancia fuera del alcance del cuarto de control o centro de supervisión de dicha planta, por lo tanto le es imposible de cierta forma estar al tanto de cualquier eventualidad que se presente en la misma; esto ocurre en algunos momentos de cambio de turnos, salidas a campo, hora de alimentación o cuando se presenta cualquier suceso en la supervisión del proceso o la producción, o peor aún, cuando se requiere realizar el monitoreo de algún procedimiento en el cual dicha persona estaría expuesta a algún peligro latente y correr algún tipo de riesgo. También en el caso de que se deseara monitorear alguna variable en un lugar de difícil acceso,

con atmosferas peligrosas o donde la instrumentación este en lugares apartados y de alguna forma incomunicados.

Es por esta razón, que el control remoto o a distancia favorece a la telemetría de las distintas variables de los procesos industriales, lo que genera aumento significativo en la productividad en una compañía.

## **CAPÍTULO 2: REDISEÑO DEL MÓDULO DE MEDICIÓN DE NIVEL DEL LABORATORIO DE CONTROL DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

### **2.1 ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DEL MÓDULO DE MEDICIÓN DE NIVEL DEL LABORATORIO DE CONTROL DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA.**

El presente proyecto de tesis se trabajó sobre el módulo de medición de nivel (Figura 2.1) que se encontraba en el laboratorio de control de la URP; el cual fue desarrollado por un grupo de alumnos en el curso de Taller 4, perteneciente a la carrera de Ingeniería Electrónica de la URP.



Figura 2.1: Módulo de Medición de Nivel desarrollado por alumnos de la URP en el curso de Taller 4.

El módulo mencionado se encontraba formado por:

- 01 Bomba: Para la impulsión de líquido.  
Marca: Pedrollo  
Voltaje: 220 VAC  
Frecuencia: 60Hz  
Potencia: 0.5 HP  
Corriente: 2.6 A
- 02 Baldes: Para el almacenamiento y alimentación de líquido.  
Dimensión: altura= 35 cm, diámetro= 30 cm.
- 01 Válvula OnOff: Para el control de nivel de líquido en el módulo.  
Marca: Queen  
Alimentación: 220 VAC  
Tamaño: NPT1/2”  
Presión: 0-10 Kg/cm<sup>2</sup>
- 01 Sensor Ultrasónico: Para la medición de nivel de líquido en el reservorio.  
Marca: ELEC Freaks  
Modelo: HC-SR04  
Dimensión: 45x20x15 mm  
Voltaje de trabajo. 5 VDC
- 01 Acondicionamiento de Sensor Ultrasónico: En conjunto con el sensor ultrasónico permite la lectura de datos de altura de agua en el recipiente.  
Conformado: Tarjeta Arduino  
Alimentación: 12 VAC

Lectura: 0 – 40 cm / 0 – 5 VDC

- 01 Regulador de potencia de Bomba: Conformado por circuito que regula la potencia de la bomba permitiendo el control, en forma manual, de la bomba.

Conformado: Tarjeta Arduino.

Alimentación: 24 VAC

### 2.1.1. Análisis de estado de la bomba

Después de la revisión técnica y prueba de funcionamiento de la bomba (Figura 2.2), se concluye que la bomba no se encontraba operativa. A pesar de alimentar con 220 VAC la bomba no realizaba ninguna operación.



Figura 2.2: Bomba de módulo de medición de nivel

### 2.1.2. Análisis de estado de recipientes

Al analizar el estado de los recipientes se pudo observar, que a pesar de no tener una eficiente conexión, el estado para el trabajo es el necesario. Es decir, los recipientes (Figura 2.3) se encontraron en óptimas condiciones para poder trabajar.





Figura 2.3: Recipiente de módulo de medición de nivel

### 2.1.3. Análisis de estado de la válvula

El análisis del estado de la válvula nos indicó que se encontraba operativa. Al alimentar la válvula con 220 VAC, y empezar hacer cambios a los voltajes de control, se pudo observar que respondía normalmente a la apertura (24 VAC) y al cierre (0 VAC). Sin embargo, para el proyecto de tesis no se usó la válvula. En la figura 2.4 se aprecia la válvula OnOff.



Figura 2.4: Válvula OnOff

### 2.1.4. Análisis de estado de sensor ultrasónico y acondicionamiento

El sensor y el acondicionamiento se encontraron, todo en un conjunto, en una caja hermética cerrada; al momento de analizarlo se pudo comprobar

que se encontraba funcionando óptimamente. El sensor mide de 0 a 40 cm, escalando esto en voltaje de 0 a 5 VDC respectivamente; además, esta lectura se visualizó en una pantalla led que fue diseñada, junto con todo el acondicionamiento, por los estudiantes que realizaron el módulo. En la figura 2.5 se muestra el sensor ultrasónico usado y en la figura 2.6 se aprecia el acondicionador del sensor ultrasónico.



Figura 2.5: Sensor ultrasónico HC-SR04.



Figura 2.6: Acondicionamiento de Sensor ultrasónico HC-SR04

### **2.1.5. Análisis de estado de regulador de potencia de la bomba**

Al analizar el regulador de potencia para la bomba, el cual fue diseñado por los alumnos que diseñaron el módulo, se pudo verificar que se

encontraba respondiendo con normalidad. Sin embargo, esta prueba no se pudo realizar con la bomba original del módulo, para esto se usó otra bomba en la cual se vio que podía controlarse su potencia para el bombeo de líquido.

## **2.2 CAMBIOS Y MEJORAS EN MÓDULO DE MEDICIÓN DE NIVEL DEL LABORATORIO DE CONTROL DE LA FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA**

Después de realizar el análisis sobre cada componente del módulo desarrollado por los alumnos de la facultad de Ingeniería Electrónica, se llegó a la conclusión de que se deben realizar cambios notorios al módulo para poder alcanzar los objetivos que se plantearon. Los cambios se visualizan en la figura 2.7



Figura 2.7: Módulo de medición de nivel con cambios y mejoras

Los cambios realizados sobre el módulo, son los siguientes:

### **2.2.1. Válvula de control de nivel.**

Se cambia la válvula OnOff por una válvula Proporcional; ya que, es la que permitió controlar mejorar el nivel buscado y apoyó a conseguir el alcance de los objetivos (Sintonización de controlador PID).

#### **Datos Técnicos:**

Marca: Danfoss

Modelo: EV260B

Señal de Control: 0-10 VDC

Presión diferencial: 0.5-10 bar

Tamaño: NPT1/2"

Alimentación: 24 VDC

La válvula se ubicó a la entrada del recipiente, donde se va medir el nivel de altura de agua; es decir, a la entrada del llenado del recipiente (véase figura 2.8). De esta forma, se aseguró poder controlar mejor el nivel, al regular la entrada de agua al recipiente para conseguir el nivel que se requirió.



Figura 2.8: Válvula de control proporcional Danfoss – EV260B

### 2.2.2. Bomba de impulsión de agua.

De acuerdo al análisis que se hizo a la bomba inicialmente, se descartó su uso y se procedió a cambiar por otra bomba que cumpla con las mismas características para la impulsión del agua a través de una tubería de ½". Véase Figura 2.9

#### **Datos Técnicos:**

Marca: Power Machine

Modelo: QB60

Altura máxima: 15m

Caudal máximo: 30 L/min

Potencia: 0.55 HP

Frecuencia: 60Hz



Figura 2.9: Bomba QB60 para impulsión de agua

La ubicación de la bomba se consideró en el mismo lugar que se tenía en el módulo inicial, por lo que solo se procedió a retirar la anterior e instalar la nueva sobre la misma plataforma de soporte.

### **2.2.3. Sensor de nivel y acondicionamiento.**

Se usó el mismo sensor y acondicionamiento que se tenía en el módulo inicial. Este nos permitió medir el nivel de agua (Figura 2.10). Esto fue programado por los alumnos que realizaron el primer módulo.

La ubicación para este sensor fue el mismo (sobre el tanque donde se consideró medir el nivel), pero teniendo la idea de posicionarlo de forma que no pueda moverse; ya que, los ligeros movimientos afectan a la medición de nivel.



Figura 2.10: Sensor de Nivel y acondicionamiento para el nuevo módulo.

#### **2.2.4. Tanque para medición de nivel de agua y alimentación**

Al analizar, inicialmente, los tanques para la medición de nivel de agua y alimentación descartamos que tuvieran problemas. Sin embargo, durante la fase de instalación, el tanque para medición resultó ser demasiado grande para lograr una buena lectura; es decir, al momento de llenado se generaban demasiadas burbujas lo que hacía dificultoso el trabajo de toma de medidas. Es por esta razón, que se cambió el tanque por uno más pequeño donde se pudiera tener menor líquido que medir y sea más uniforme (Figura 2.11).

##### **Datos Técnicos de Tanque para medición:**

Tipo: Tanque Rectangular

Medidas: Base 14x13cm / Altura 35 cm

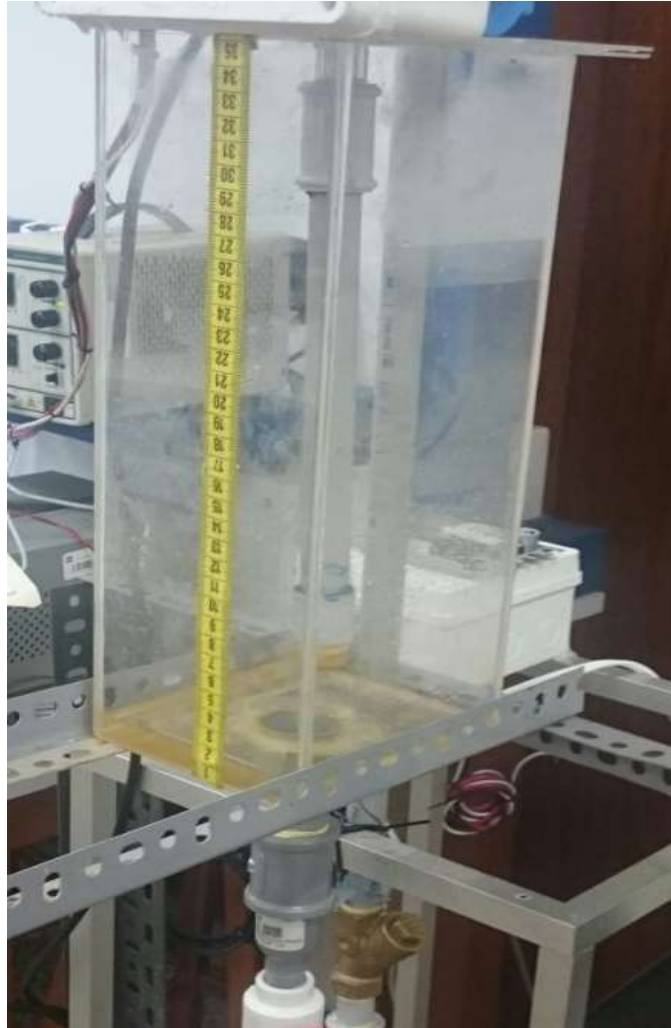


Figura 2.11: Tanque para medición de nivel en nuevo módulo.

Con respecto al tanque para la alimentación del agua siguió siendo el mismo que se usó para el módulo inicial. El cual tenía, por la parte inferior, la conexión de  $\frac{1}{2}$ " para la succión de agua de la bomba y posterior alimentación al tanque para medición. Además, se aumentó, como parte de la tubería de succión, una tubería en T que permitió el drenaje del tanque de alimentación (drenaje de mantenimiento). Ver Figura 2.12





Figura 2.12: Tanque para alimentación en nuevo módulo.

### 2.2.5. Filtros en tuberías

En el proceso de instalación, a diferencia del módulo inicial, se aumentaron filtros en la tubería. Se agregó una válvula de filtro en Y (Válvula Check tipo Y) en la tubería de subida (antes de llegar a la válvula) y una malla de filtro a la salida del recipiente de alimentación.

El filtro en Y en la tubería de subida (Figura 2.13) se instaló para evitar que pasen sedimentos o partículas que puedan dañar la operación de la válvula, ya que esta necesita trabajar con líquidos puros para evitar su obstrucción.

### Datos Técnicos de Filtro en Y:

Material: bronce

Filtro: acero inoxidable

Dimensión: ½"



Figura 2.13: Válvula Check tipo Y.

La malla a la salida del recipiente de alimentación (Figura 2.14) se instaló para evitar el paso de sedimentos que puedan albergar en este recipiente. Esto es debido a que es un recipiente con agua que sirve como reservorio.



Figura 2.14: Malla filtro a la salida de tanque de alimentación.

Finalmente, se consiguió un nuevo módulo basado en el desarrollado por los alumnos, en el cual se logró obtener los objetivos de la tesis.

Las siguientes Figuras 2.15 y 2.16 muestran el nuevo módulo desde 2 distintas vistas: Frontal y lateral.



Figura 2.15: Vista Frontal de Nuevo módulo



Figura 2.16: Vista lateral de Nuevo módulo

### 2.3 GRÁFICO P&ID DE MÓDULO DE MEDICIÓN DE NIVEL MEJORADO.

La figura 2.17 muestra el gráfico P&ID del módulo de medición de nivel mejorado, desarrollado para el proyecto de tesis.

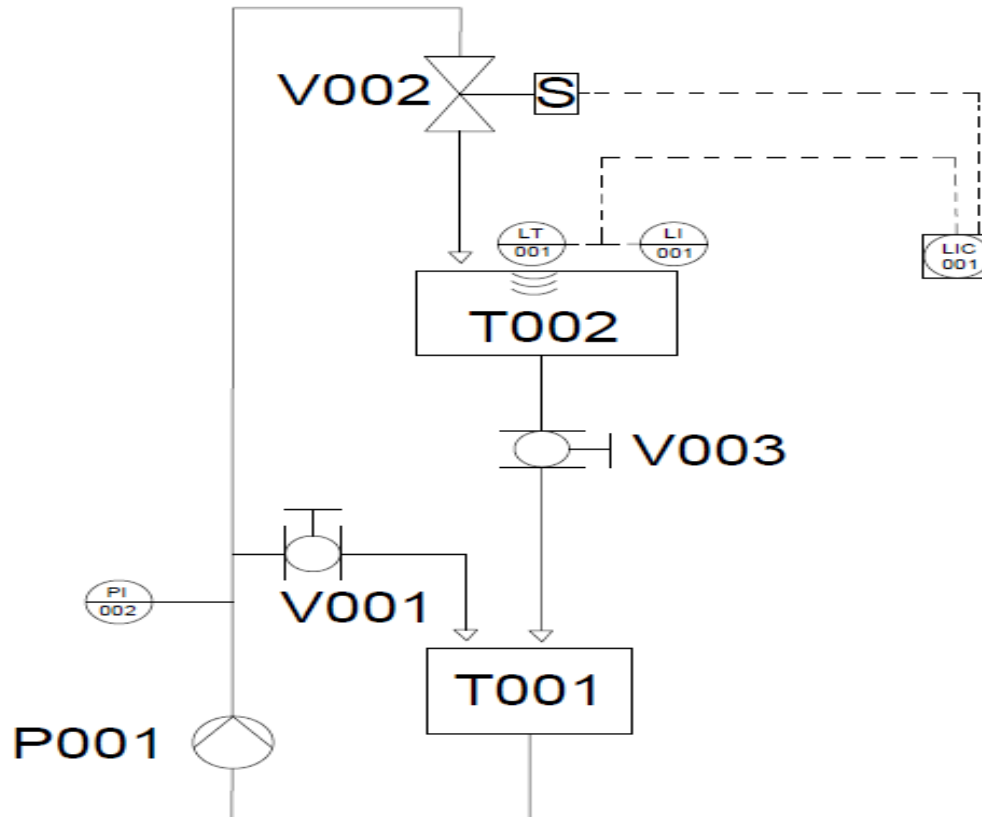


Figura 2.17: Gráfico P&ID de módulo de medición de nivel mejorado.

- T001: Tanque de alimentación.
- T002: Tanque de medición de nivel.
- P001: Bomba.
- V001: Válvula de bola manual de drenaje.
- V002: Válvula solenoide de control.
- V003: Válvula de bola manual de evacuación.

## **CAPÍTULO 3: PUESTA EN MARCHA Y PRUEBAS**

### **3.1 DESARROLLO DE INTERFAZ, EN SOFTWARE LABVIEW, PARA LA MEDICIÓN DE NIVEL**

Se desarrolló una interfaz en el software de Labview, software usado para monitoreo, control y simulación de procesos, con el fin de trasladar el proceso de medición de nivel a forma virtual. Esto, a manera de que se pueda monitorear de una estación (PC) todo el proceso; visualizando de esta forma el llenado y altura de nivel de agua en el tanque, traducido a voltaje.

Además se visualizó las variables pertinentes para la sintonía del controlador PID, como son: Ganancia Proporcional “Kp”, Tiempo integral “Ti” (min) y Tiempo derivativo “Td” (min).

La interfaz gráfica se dividió en 2 ventanas: Ventana de Panel Frontal y Ventana de Programación.

#### **3.1.1. Desarrollo de Ventana de Panel Frontal.**

La ventana de Panel Frontal es la interfaz de usuario del software. En ella se visualizó la simulación del proceso que se desarrolló.

Para el proyecto de Tesis se desarrolló una ventana de panel frontal que contenía las áreas de: Supervisión de la planta, Visualización del Controlador, Parámetros del PID y Gráfica en tiempo Real (Ver figura 3.1).

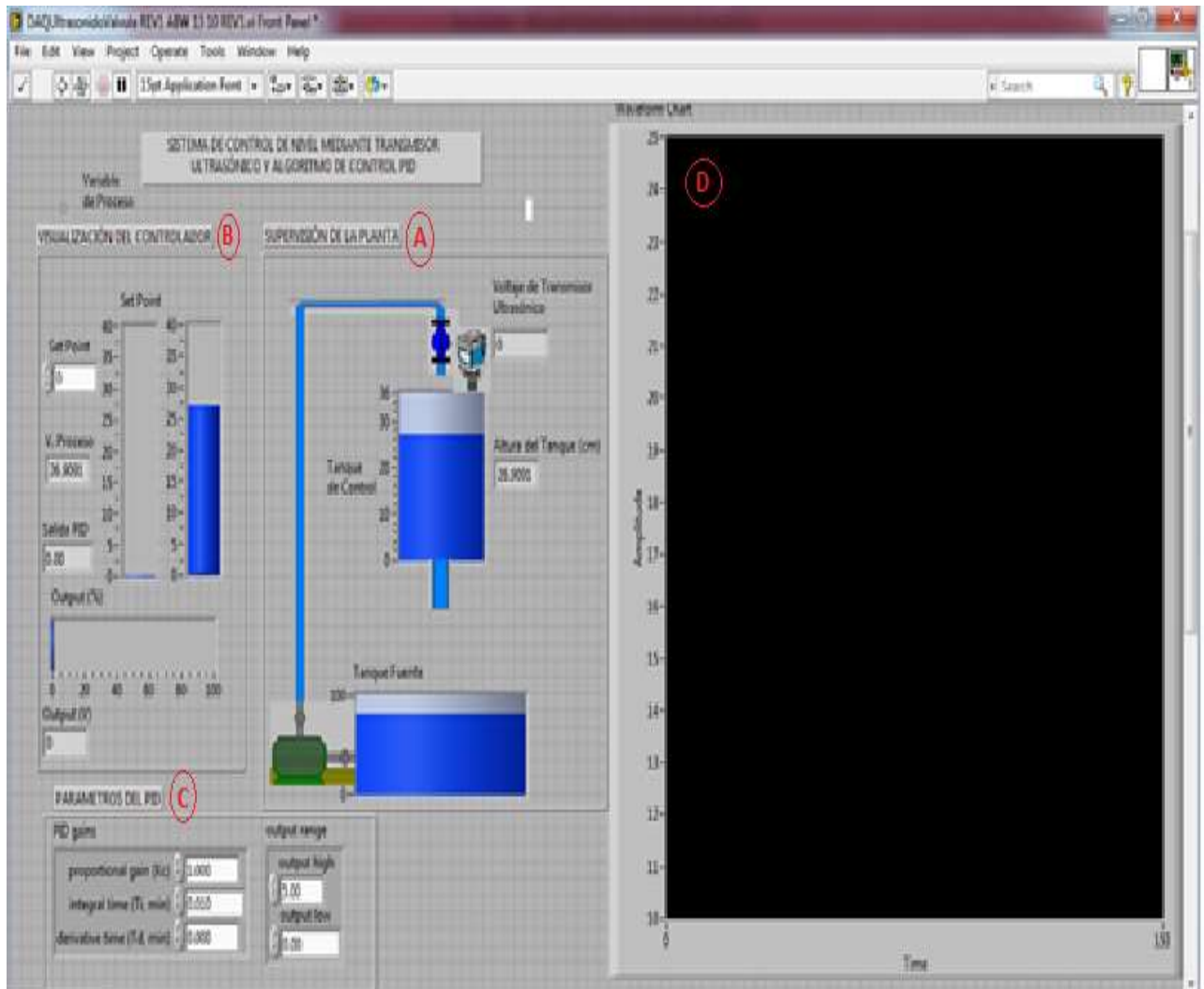


Figura 3.1: Ventana de Panel Frontal de Proyecto de Tesis.

**A. Supervisión de la Planta:** Formado por la simulación de la planta de medición de nivel. El tanque para la medición mostraba su altura, la cual varío en tiempo real en relación a la altura leída por el Sensor de Nivel. Además, esta área estuvo formada por el Sensor de nivel el cual mostraba el voltaje de transmisor de nivel obtenido. Finalmente, se tuvo el tanque de llenado, el cual simuló al que se tiene en físico.



- B. Visualización del Controlador:** Esta área estuvo conformada por las variables usuales a observar en un controlador; es decir, formado por el Set Point el cual se visualizó en forma de barra y además se tuvo la posibilidad de digitar; también se tuvo la Variable de Proceso la cual se comparó con el Set Point en barra y se mostró en forma de dígitos. Finalmente se tuvo la Salida (output), en porcentaje, el cual representó la apertura de la válvula que fue la Variable Manipulada del proceso.
- C. Parámetros del PID:** Contenía los parámetros a usar para la sintonía del controlador PID y además para la búsqueda de la estabilidad del control de nivel. Las variables que lo conformaron fueron: ganancia proporcional “Kp”, tiempo integral “Ti” (min) y Tiempo derivativo “Td” (min). Además, contenía el rango de salida el cual dará el límite de voltaje a alimentar para la válvula (0-5 VDC).
- D. Gráfica en tiempo Real:** Mostró la lectura de datos traducidos a puntos reales, lo cual generó una gráfica en tiempo Real. Las variables a graficar fueron Set Point y Variable de Proceso.

### **3.1.2. Desarrollo de Ventana de Programación.**

Después de crear la ventana del panel frontal, se añadió códigos usando presentaciones gráficas de funciones para controlar los objetos del panel frontal. La ventana de programación contenía este código de fuente gráfica.

El código creado para el proyecto de tesis es el que se observa en la Figura 3.2 y contiene lo siguiente:

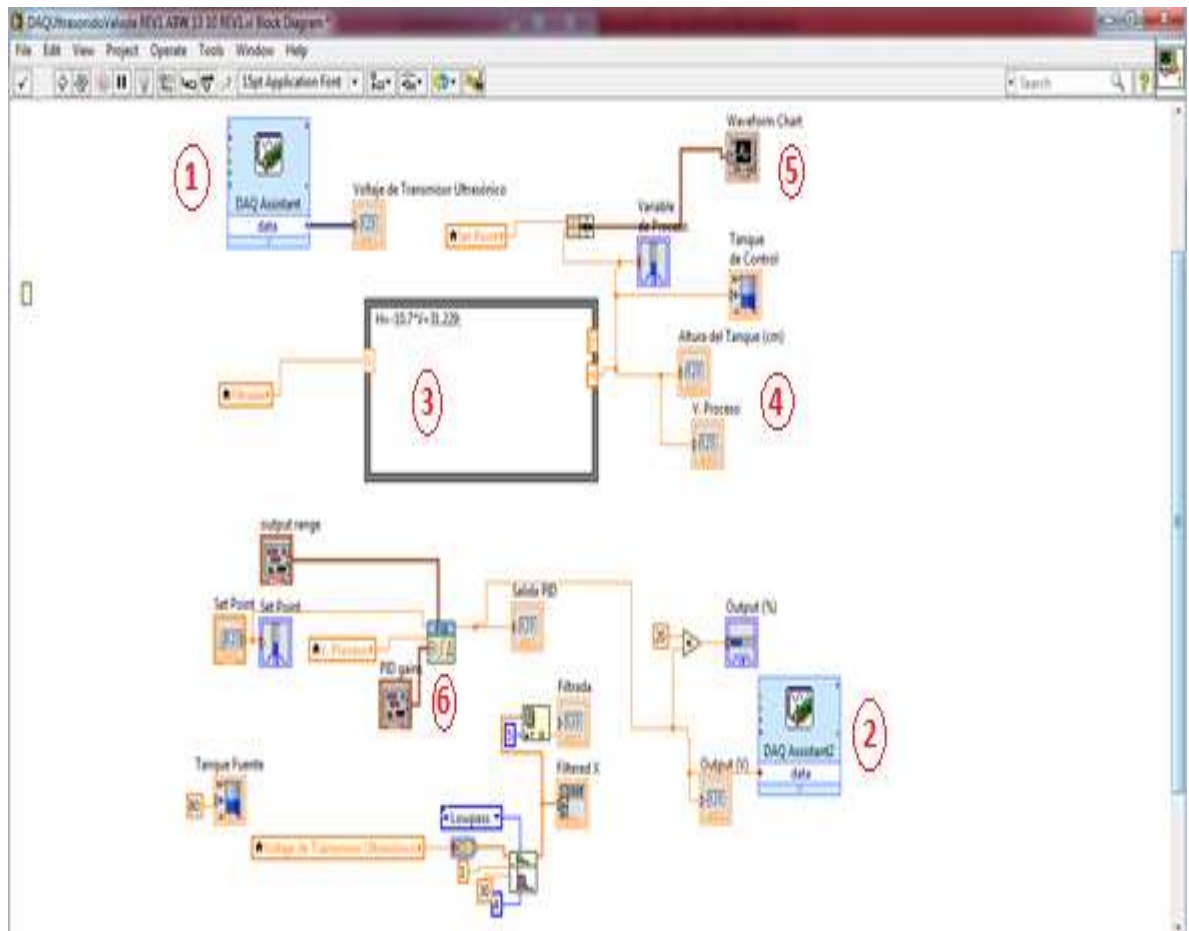


Figura 3.2: Ventana de Programación de Proyecto de Tesis.

1. **Daq Assistant (entrada):** Permitted digitalizing the voltage obtained from the ultrasonic transmitter and began to operate with it for the measurement of water level.
2. **Daq Assistant (salida):** Permitted using an output voltage of the system, converting the output signal from 0 to 5 VDC, which was used for valve actuation.
3. **Sub función para escalamiento:** This sub function permitted scaling the value read of voltage of the ultrasonic transmitter and scaling it with

precisión a la altura del tanque donde se midió el nivel. El voltaje leído fue de 0 a 5VDC traducido a una altura de 0 a 35 cm.

4. **Variable de Proceso, altura del tanque:** Al escalar la medición de nivel de agua en el tanque pasó a ser registrado como una variable del proceso, de lectura continua, y además se registró como parte de la altura del tanque.
5. **Gráfica de la Variable de Proceso y Setpoint:** De la variable de proceso obtenida en el punto “4”, se utilizó la señal y se graficó de forma continua para su posterior visualización durante la sintonía y trabajo; además, se utilizó el punto de Setpoint del sistema para también ser graficado y comparado con la Variable de Proceso.
6. **Librería PID (DBL):** La programación central tuvo como eje principal el uso de la librería PID.VI la cual forma parte del software de Labview. Para ser uso de esta librería se debió acceder a la Paleta de funciones en la opción “Control Design & Simulation” en la sub-opción PID, de esta forma se pudo hacer uso de la función PID y de sus principales atributos, vinculando las características que se necesitan para el trabajo con PID (Ver Figura 3.3).

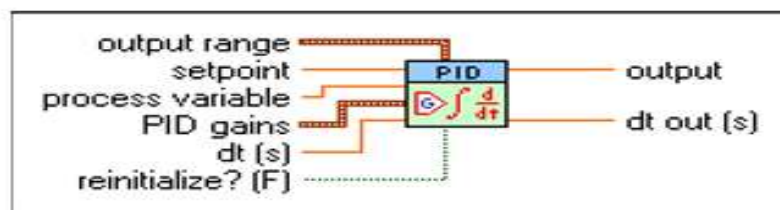


Figura 3.3: Características de trabajo de librería PID.VI.

Para el proyecto se usó solo las características de:

- **Output range:** Permitió dar un rango de voltaje de salida a la respuesta para el funcionamiento de la válvula.
- **Setpoint:** Permitió dar un punto de referencia al sistema para empezar el control.
- **Process Variable:** Permitió que el PID trabaje con la variable de proceso obtenida de la lectura del transmisor de nivel.
- **PID gains:** Permitió disponer de las opciones de ganancias propias del PID: ganancia proporcional ( $K_p$ ), tiempo integrativo ( $T_i$ ) y tiempo derivativo ( $T_d$ ).

## **3.2 PRUEBAS DE AQUISICIÓN DE DATOS, DE SINTONÍA DE CONTROLADOR PID Y DE ESTABILIDAD DEL SISTEMA.**

### **3.2.1. Adquisición de datos.**

“La adquisición de datos o adquisición de señales, consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital). Consiste, en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora. Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación

es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ)” [18].

En el proyecto de tesis se usó para la adquisición de datos una DAQ propia de NI Instruments, compañía que desarrollo el software Labview (Ver Figura 3.4).

### **Datos Técnicos de tarjeta DAQ:**

Marca: NI Instruments

Modelo: UBS-6008

Entradas Analógicas: 8

Salidas Analógicas: 2

Entradas Digitales: 8

Salidas Digitales: 4

Voltaje de alimentación: 5 VDC



Figura 3.4: DAQ NI USB-6008. [18]

Conexión a PC: Cable USB (Ver figura 3.5).

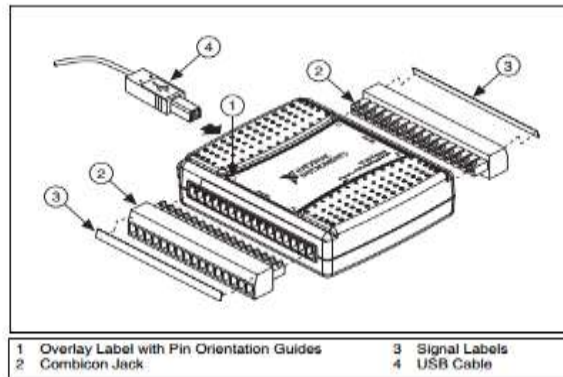


Figura 3.5: DAQ NI USB-6008, conexiones. [19]

Se conectó 2 señales al DAQ NI USB-6008. Una señal de entrada, proveniente del sensor ultrasónico y acondicionamiento, el cual brinda voltaje de 0 a 5 VDC al tener lecturas de nivel de agua en el tanque de 0 a 35cm; además, una señal de salida de 0 a 5 VDC que iba al accionamiento de la válvula proporcional.

Sin embargo, el accionamiento para la válvula era de 0 a 10 VDC por lo que se añadió un circuito amplificador de voltaje (Ver Figura 3.6) a la salida de la DAQ, convirtiendo los valores de 0-5 VDC a 0-10VDC los que reflejaban la acción de la válvula proporcional de 0 a 100%. Estos valores se encuentran tabulados en la Tabla 2.1.

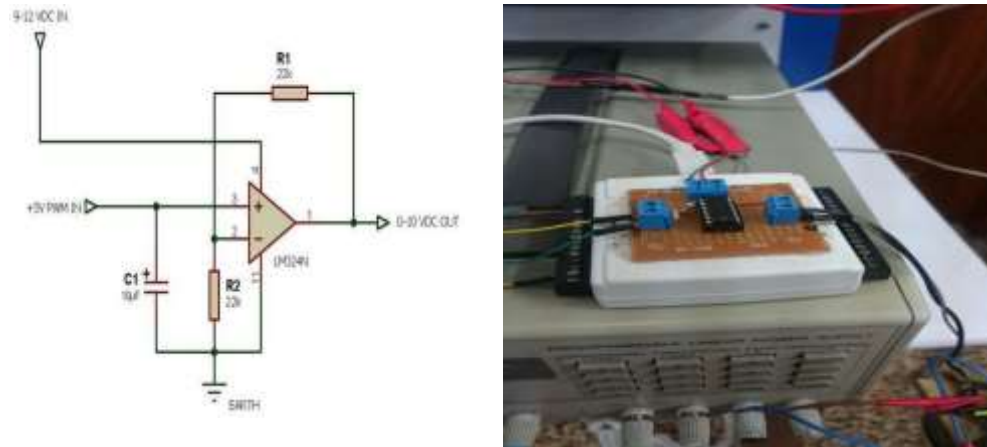


Figura 3.6: Circuito amplificador de voltaje de 0-5 VDC a 0-10 VDC.

% Apertura Válvula	Voltaje Salida DAQ	Voltaje Entrada Válvula
100%	5 VDC	10 VDC
70%	3.5 VDC	7 VDC
50%	2.5 VDC	5 VDC
30%	1.5 VDC	3VDC
0%	0 VDC	0 VDC

Tabla 2.1: Tabulación de relación de voltaje de DAQ y voltaje entrada de válvula.

### 3.2.1.1 Pruebas de adquisición de datos.

Las pruebas que se realizaron para la adquisición de datos fueron comprobando el valor de entrada proveniente del sensor ultrasónico, el cual se comparó con la lectura de la interfaz y la medida visual de nivel de agua; y el valor de salida hacia la válvula proporcional, el cual se comparó con la lectura de la interfaz y los valores medidos a la salida de la DAQ y del amplificador.

## A. Dato de entrada.

### Prueba a 30.5 cm:

Se llevó la medida de agua a 30.5 cm, traduciendo esta altura de voltaje a 0.08 VDC y visualizando estos valores en la interfaz de Labview. Para la medida de agua ver Figura 3.7 y la visualización de valores en la interfaz la Figura 3.8.



Figura 3.7: Llenado de agua en recipiente a 30.5 cm.

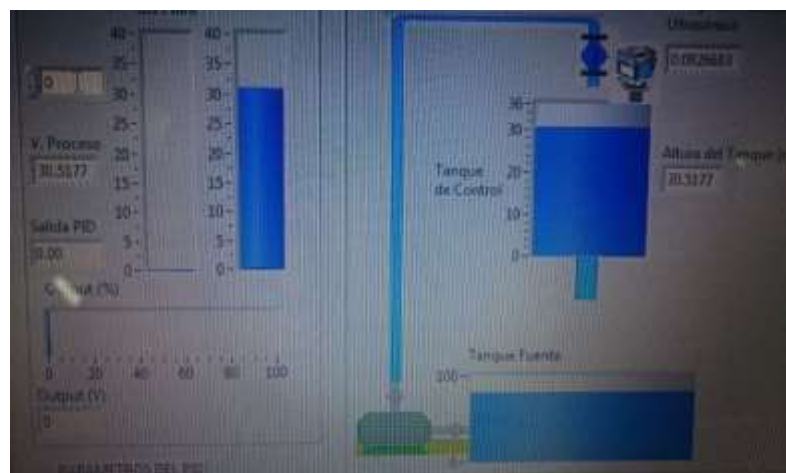


Figura 3.8: Lectura de altura de tanque y voltaje recibido de sensor ultrasónico a 30.5cm.



### Prueba a 25 cm:

Se llevó la medida de agua a 25 cm, traduciendo esta altura de voltaje a 0.53 VDC y visualizando estos valores en la interfaz de Labview. Para la medida de agua ver Figura 3.9 y la visualización de valores en la interfaz la Figura 3.10.

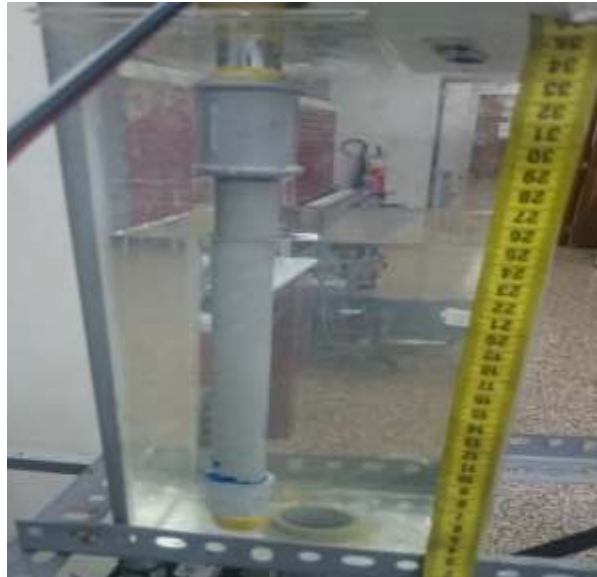


Figura 3.9: Llenado de agua en recipiente a 25 cm.

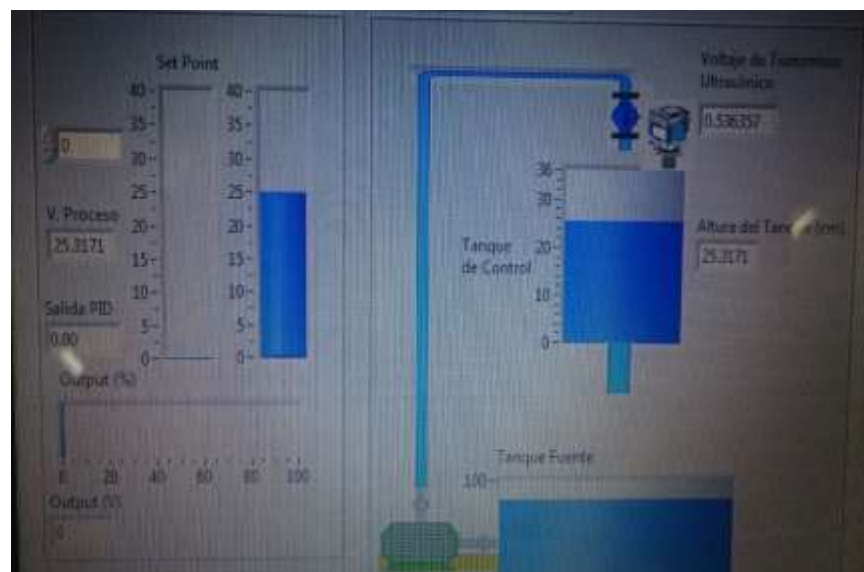


Figura 3.10: Lectura de altura de tanque y voltaje recibido de sensor ultrasónico a 25cm.

### Prueba a 15 cm:

Se llevó la medida de agua a 15 cm, traduciendo esta altura de voltaje a 1.51 VDC y visualizando estos valores en la interfaz de Labview. Para la medida de agua ver Figura 3.11 y la visualización de valores en la interfaz la Figura 3.12.



Figura 3.11: Llenado de agua en recipiente a 15 cm.

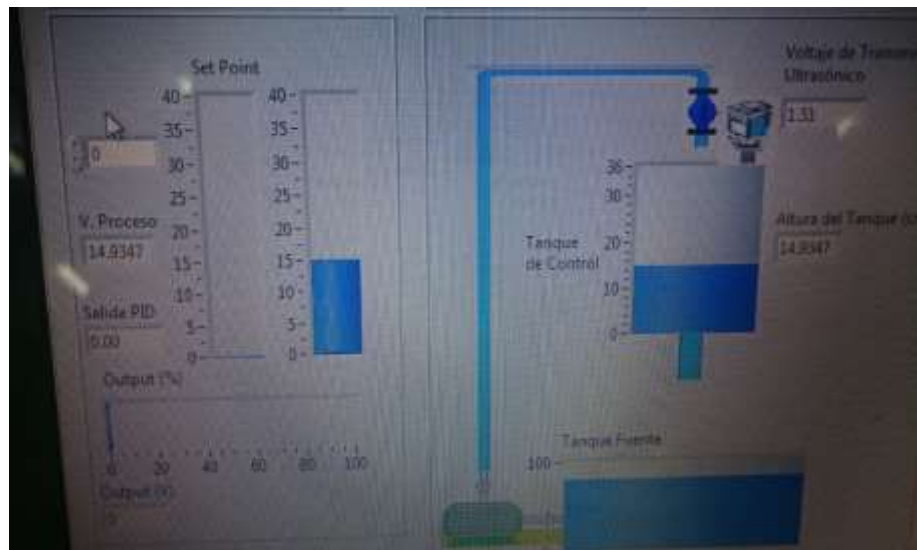


Figura 3.12: Lectura de altura de tanque y voltaje recibido de sensor ultrasónico a 15cm.

### Prueba a 10 cm:

Se llevó la medida de agua a 10 cm, traduciendo esta altura de voltaje a 1.98 VDC y visualizando estos valores en la interfaz de Labview. Para la medida de agua ver Figura 3.13 y la visualización de valores en la interfaz la Figura 3.14.



Figura 3.13: Llenado de agua en recipiente a 10 cm.



Figura 3.14: Lectura de altura de tanque y voltaje recibido de sensor ultrasónico a 10cm.

## B. Dato de salida.

La Figura 3.15 muestra el punto donde se tomó los datos de salida de la DAQ y la Figura 3.16 muestra donde se tomó los datos para la entrada a la válvula (salida del amplificador).



Figura 3.15: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ.



Figura 3.16: Lectura a la salida del amplificador de voltaje y entrada de la válvula.

### **Prueba a 100% de apertura de válvula:**

Se llevó la válvula a apertura de 100%, traduciendo esto a una salida de voltaje de 5 VDC a la salida de la DAQ y 10 VDC a la salida del amplificador de voltaje; y visualizando estos valores en la interfaz de Labview. Para la visualización de apertura de la válvula y voltaje de salida en interfaz ver Figura 3.17, para la lectura de voltaje a la salida de la DAQ ver Figura 3.18 y para la lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula proporcional ver Figura 3.19.

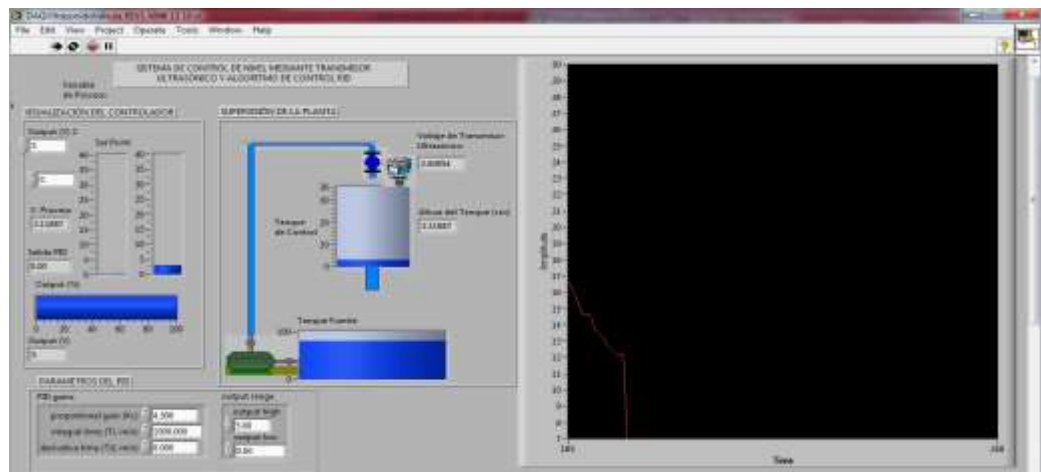


Figura 3.17: Visualización de apertura de válvula y salida de 5 VDC.



Figura 3.18: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ, de 5 VDC.



Figura 3.19: Lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula, de 10 VDC.

### **Prueba a 70% de apertura de válvula:**

Se llevó la válvula a apertura de 70%, traduciendo esto a una salida de voltaje de 3.5 VDC a la salida de la DAQ y 7 VDC a la salida del amplificador de voltaje; y visualizando estos valores en la interfaz de Labview. Para la visualización de apertura de válvula y voltaje de salida en interfaz ver Figura 3.20, para la lectura de voltaje a la salida de la DAQ ver Figura 3.21 y para la lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula proporcional ver Figura 3.22.

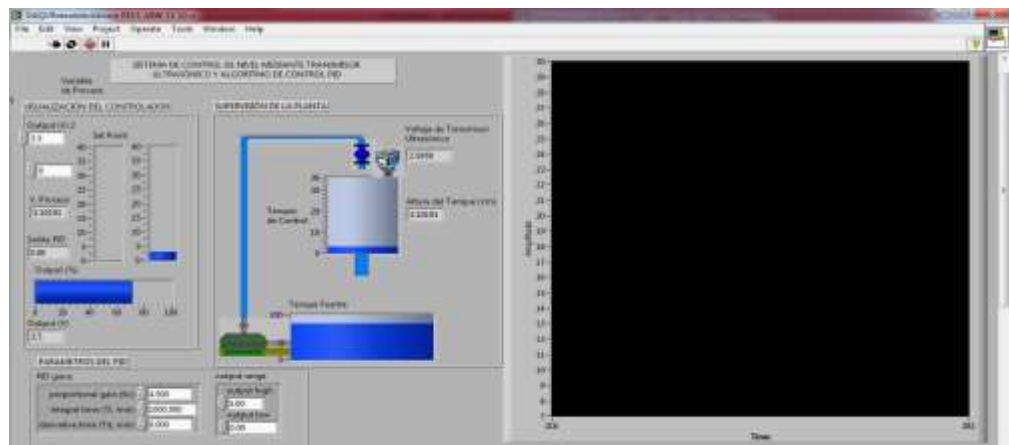


Figura 3.20: Visualización de apertura de la válvula y salida de 3.5 VDC.



Figura 3.21: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ, de 3.5 VDC.



Figura 3.22: Lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula, de 7 VDC.

### **Prueba a 50% de apertura de válvula:**

Se llevó la válvula a apertura de 70%, traduciendo esto a una salida de voltaje de 2.5 VDC, medida a la salida de la DAQ, y 5 VDC a la salida del amplificador de voltaje; visualizando estos valores en la interfaz de Labview. Para la visualización de apertura de válvula y voltaje de salida en interfaz ver Figura 3.23, para la lectura de voltaje a la salida de la DAQ ver Figura 3.24 y para la lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula proporcional ver Figura 3.25.

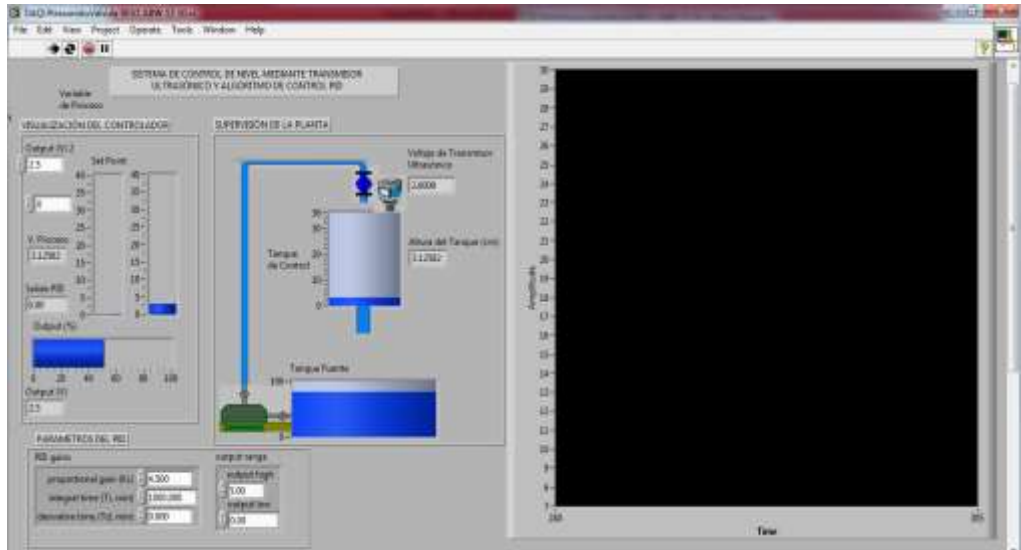


Figura 3.23: Visualización de apertura de la válvula y salida de 2.5 VDC.



Figura 3.24: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ, de 2.5VDC.



Figura 3.25: Lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula, de 5 VDC.



### **Prueba a 30% de apertura de válvula:**

Se llevó la válvula a apertura de 30%, traduciendo esto a una salida de voltaje de 1.5 VDC a la salida de la DAQ y 3 VDC a la salida del amplificador de voltaje; y visualizando estos valores en la interfaz de Labview. Para la visualización de apertura de válvula y voltaje de salida en interfaz ver Figura 3.26, para la lectura de voltaje a la salida de la DAQ ver Figura 3.27 y para la lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula proporcional ver Figura 3.28.

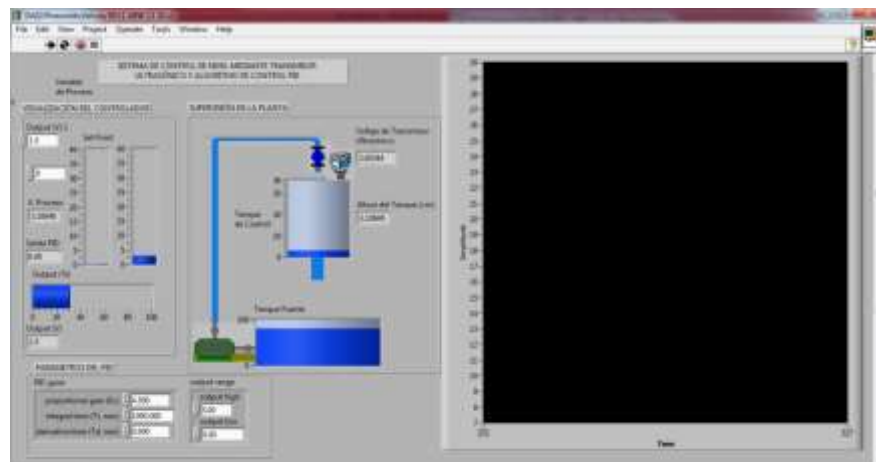


Figura 3.26: Visualización de apertura de válvula y salida de 1.5 VDC.



Figura 3.27: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ, de 1.5 VDC.



Figura 3.28: Lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula, de 3 VDC.

### **Prueba a 0% de apertura de válvula:**

Se llevó la válvula a apertura de 0%, traduciendo esto a una salida de voltaje de 0 VDC a la salida de la DAQ y 0 VDC a la salida del amplificador de voltaje; y visualizando estos valores en la interfaz de Labview. Para la visualización de apertura de válvula y voltaje de salida en interfaz ver Figura 3.29, para la lectura de voltaje a la salida de la DAQ ver Figura 3.30 y para la lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula proporcional ver Figura 3.31.

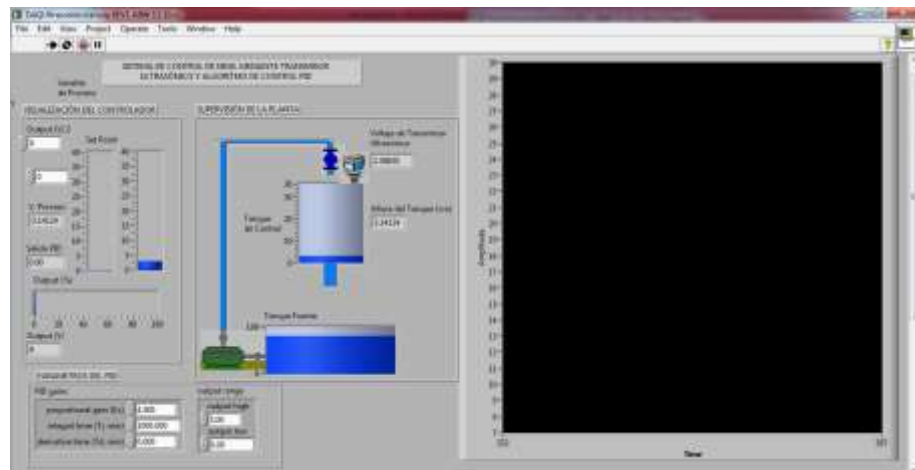


Figura 3.29: Visualización de apertura de la válvula y salida de 0 VDC.



Figura 3.30: Lectura de voltaje a la salida de la DAQ, de 0 VDC.



Figura 3.31: Lectura de voltaje a la salida del amplificador y entrada de la válvula, de 0 VDC.

## 3.2.2. Pruebas de sintonía controlador PID y estabilidad del sistema

### 3.2.2.1 Prueba de Sintonía por método de Ganancia Limite (Ziegler-Nichols)

Se comenzó sintonizando el controlador PID por el método de Ganancia Limite. Para esto, se usó solo la ganancia proporcional “Kp”, fijando el  $T_i=1000$  min. Y  $T_d=0$  min. Se buscó un “Kcr” crítico en donde la salida presentó oscilaciones sostenidas y a partir de este punto se tomó el periodo crítico “Pcr” correspondiente a la señal.

### **Prueba Kcr = 0.1**

Se empezó con un Kcr de 0.1 esperando conseguir oscilaciones sostenidas. Pero a este valor, al aplicar solo una acción proporcional, el sistema tendió a estabilizarse, llegando a un valor lejos del que se requería (Figura 3.32).

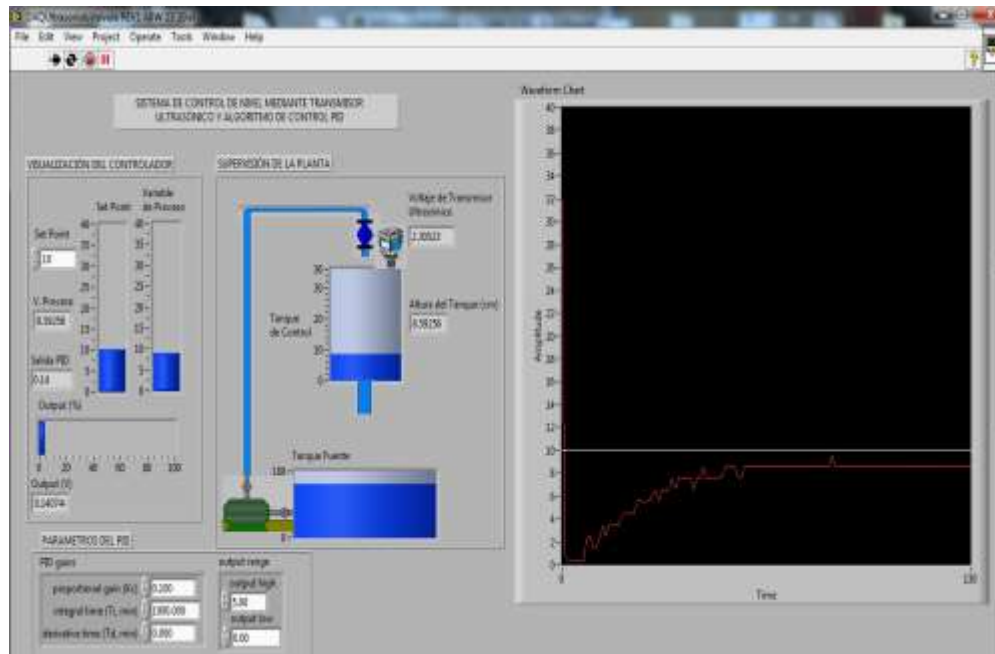


Figura 3.32: Sintonía a Kcr=0.1.

### **Prueba Kcr = 0.3**

Se empezó con un Kcr de 0.3 esperando conseguir oscilaciones sostenidas. Pero a este valor, al aplicar solo una acción proporcional, el sistema tendió a estabilizarse (Figura 3.33).

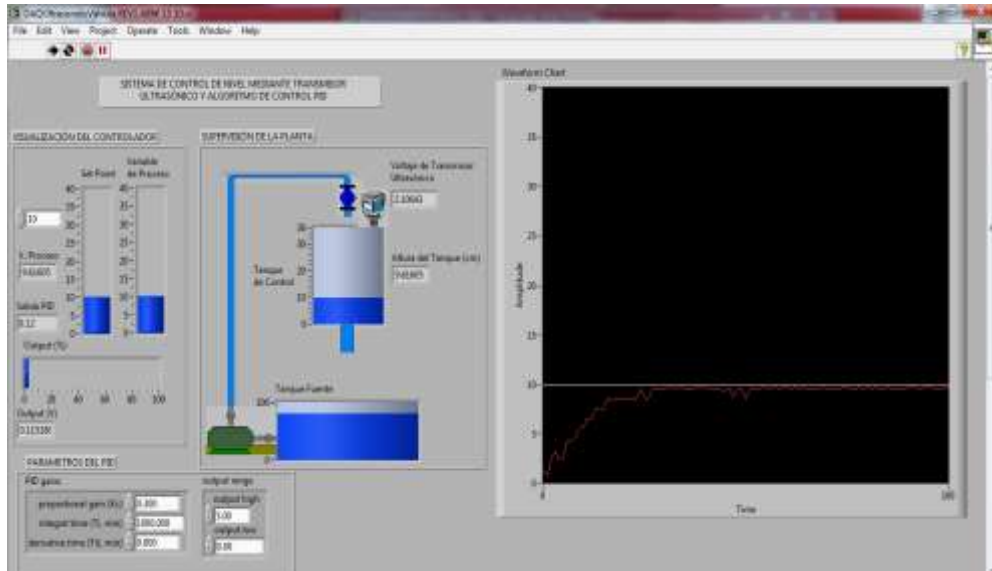


Figura 3.33: Sintonía a  $K_{cr}=0.3$ .

### **Prueba $K_{cr} = 0.5$**

Se escogió un  $K_{cr}$  de 0.5 esperando conseguir oscilaciones sostenidas. Pero el sistema tendió a estabilizarse (Figura 3.34).

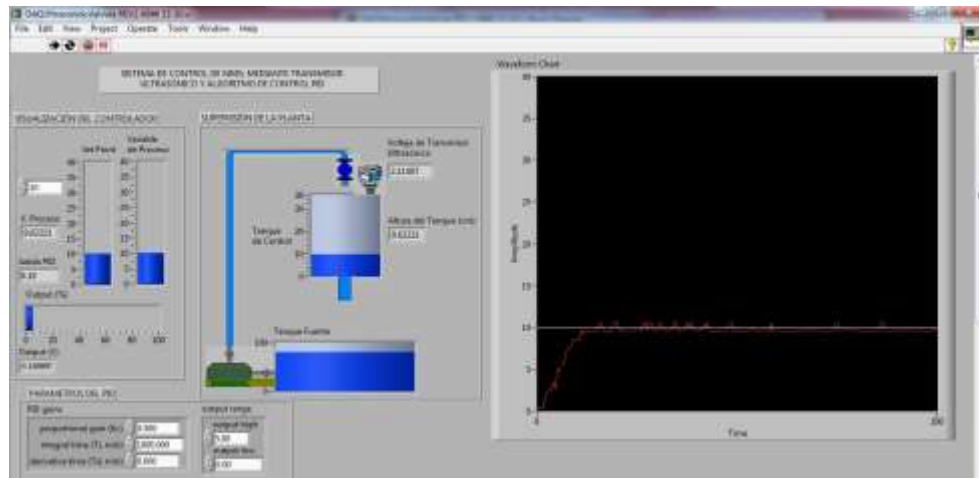


Figura 3.34: Sintonía a  $K_{cr}=0.5$ .

### **Prueba $K_{cr} = 0.8$**

Se escogió un  $K_{cr}$  de 0.8 esperando conseguir oscilaciones sostenidas. El sistema no consiguió oscilaciones sostenidas pero ya se empezó a perder estabilidad (Figura 3.35).

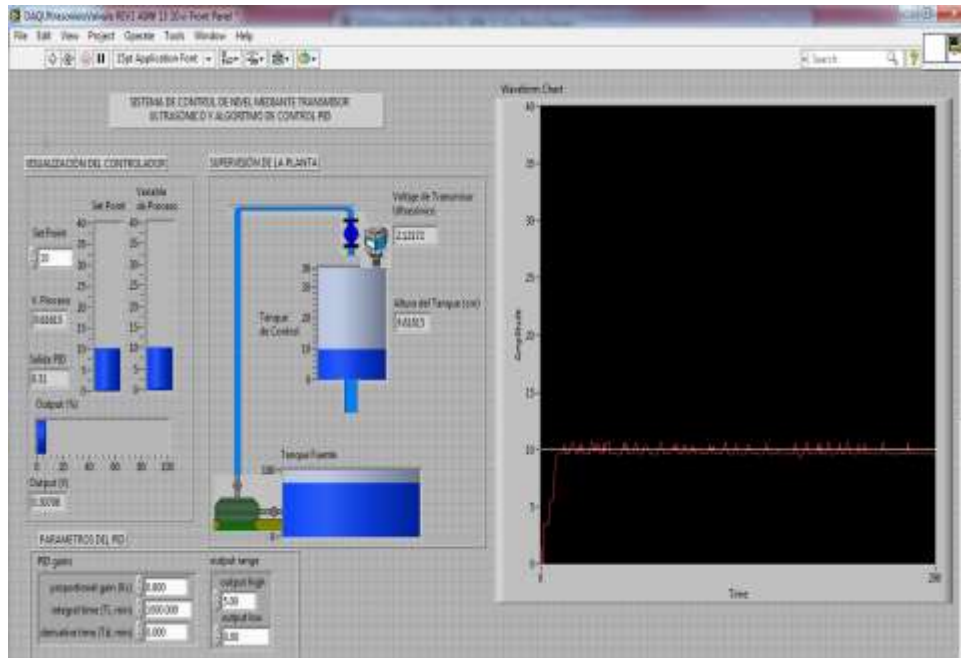


Figura 3.35: Sintonía a  $K_{cr}=0.8$ .

### Prueba $K_{cr} = 1$

Se escogió un  $K_{cr}$  de 1 y el sistema comenzó a oscilar formando oscilaciones sostenidas (Figura 3.36). Debido a la interfaz y a las perturbaciones propias del sistema, se tuvieron algunos datos que salen de la forma de una onda senoidal.

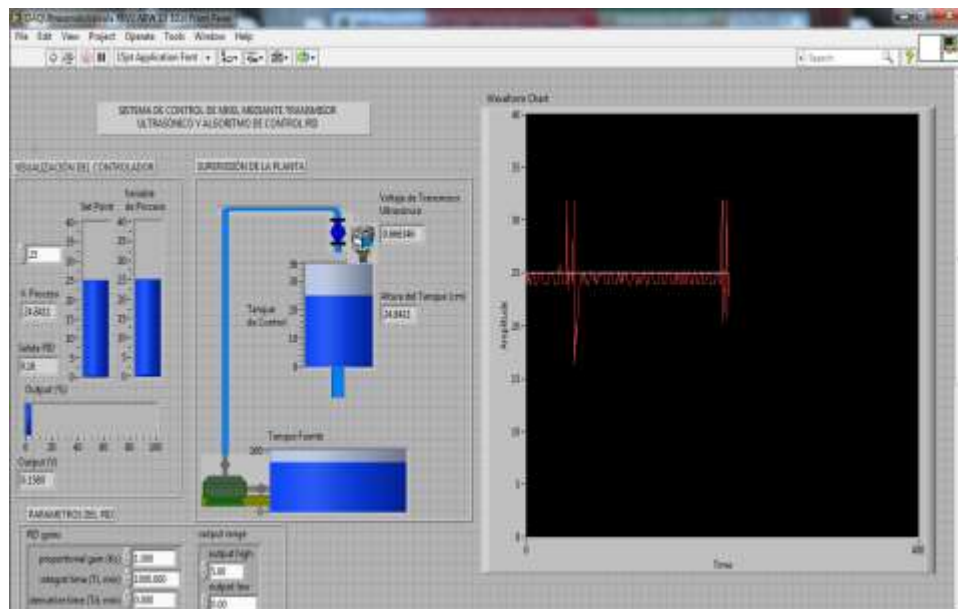


Figura 3.36: Sintonía a  $K_{cr}=1$ .

### **Prueba Kcr = 3**

Se escogió un Kcr de 3 que hizo que el sistema siga oscilando (Figura 3.37). Estas oscilaciones mantenían un periodo continuo a lo largo de segundos pero por momentos cambiaban, debido a perturbaciones del sistema.

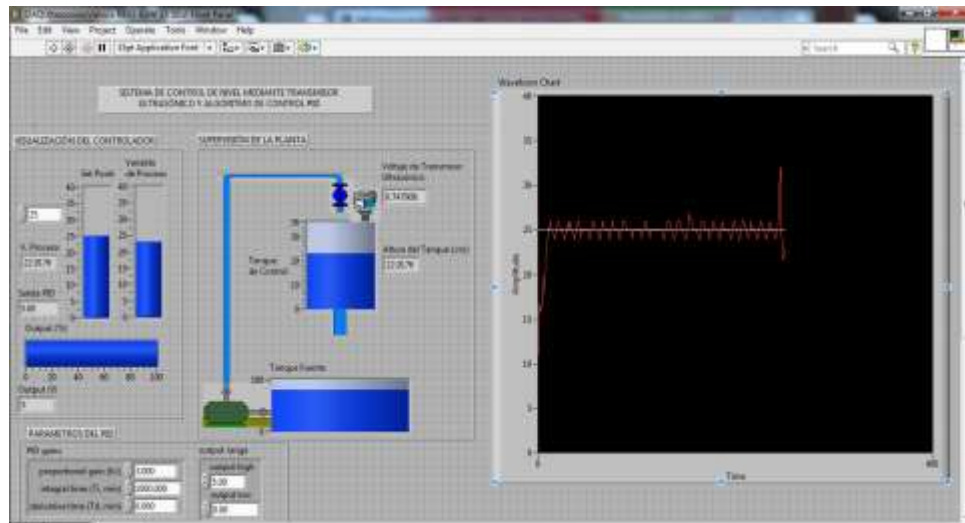


Figura 3.37: Sintonía a Kcr=3.

### **Prueba Kcr = 4**

Se escogió un Kcr de 4, el cual continuó haciendo oscilar el sistema pero perdiendo visiblemente las oscilaciones sostenidas (Figura 3.38).

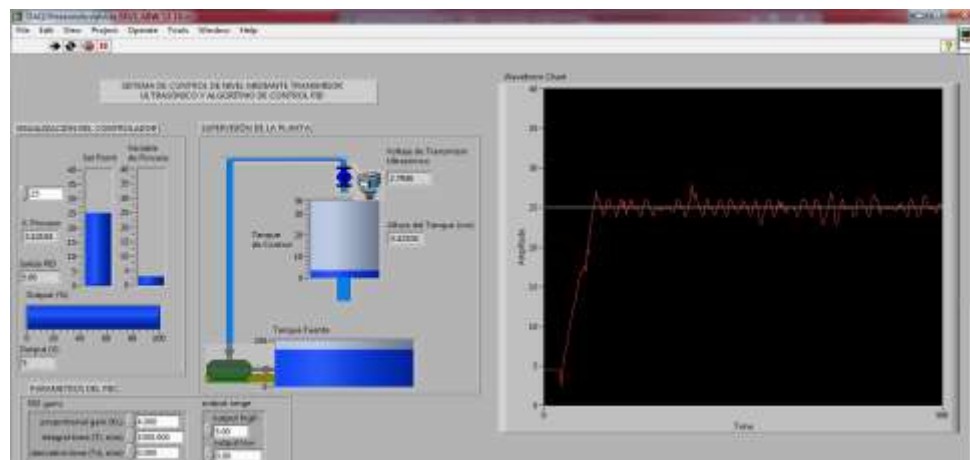


Figura 3.38: Sintonía a Kcr=4.

### Prueba Kcr = 6

Se escogió un Kcr de 6, el cual continuó haciendo oscilar el sistema pero perdiendo, mucho más visible que el punto anterior, las oscilaciones sostenidas (Figura 3.39).

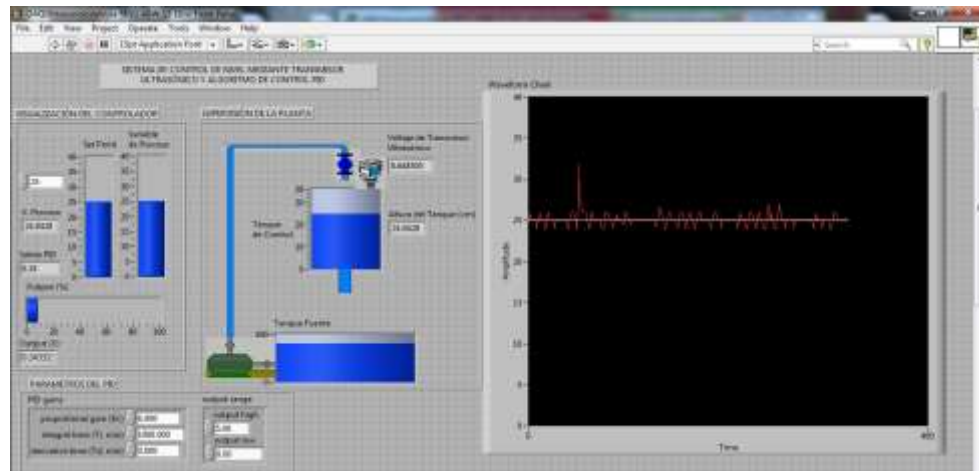


Figura 3.39: Sintonía a Kcr=6.

### Prueba Kcr = 8

Se escogió un Kcr de 8, el cual continuó haciendo oscilar el sistema pero perdiendo las oscilaciones sostenidas (Figura 3.40).

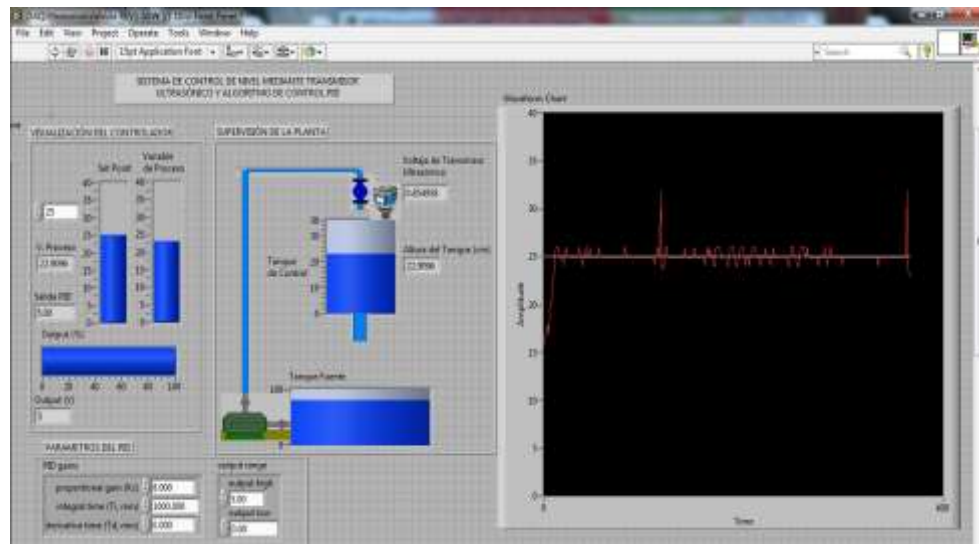


Figura 3.40: Sintonía a Kcr=8.



## Prueba Kcr = 25

Se escogió un Kcr de 25, el cual llevó al sistema a la inestabilidad y a no conseguir oscilaciones sostenidas (Figura 3.41).

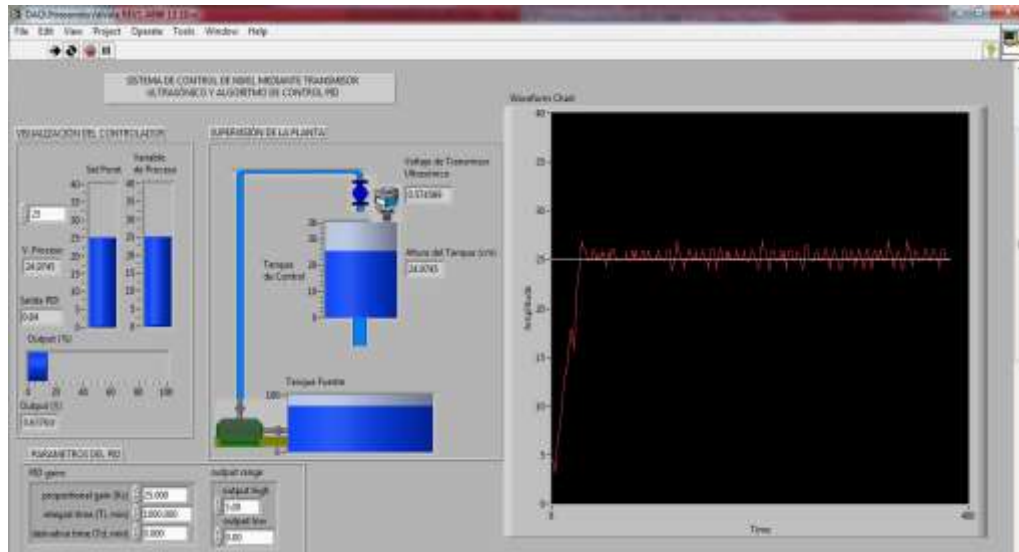


Figura 3.41: Sintonía a Kcr=25.

Luego de hacer pruebas, buscando un valor crítico de Kcr, se seleccionó el que dio mejor oscilaciones sostenidas y de este punto se tomó el periodo "Pcr" correspondiente a la señal.

El valor que se seleccionó de Kcr fue de 1, el cual dio un Pcr de 8 segundos (Figura 3.42). Para esto se ajustó la ventana gráfica, buscando los valores que encierre un periodo, de manera que se pudo visualizar únicamente este valor.

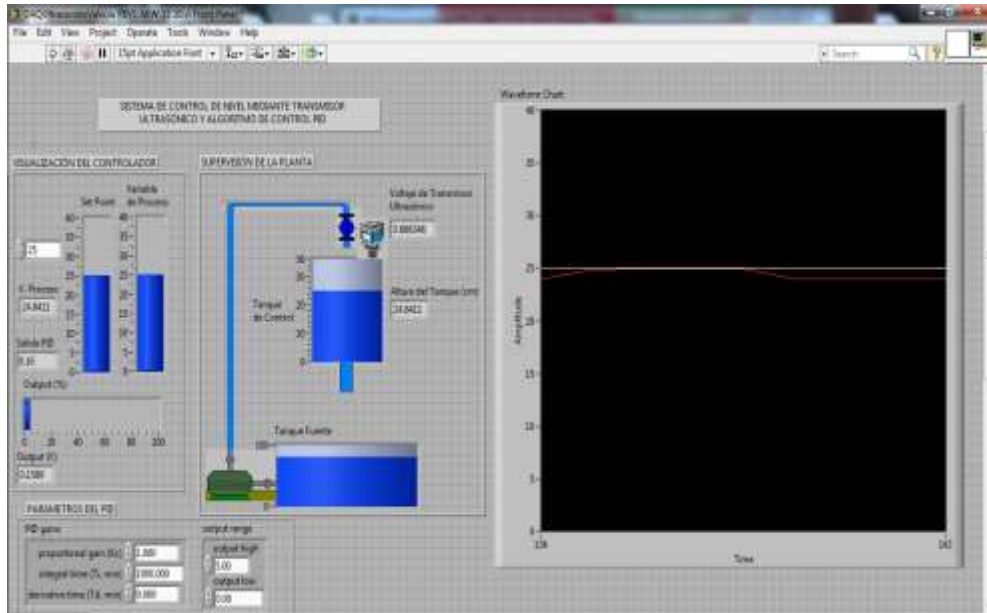


Figura 3.42: Periodo  $P_c=8$  segundos a  $K_{cr}=1$ .

Al tener los valores de  $K_{cr}=1$  y  $P_{cr}=8$  segundos, se utilizó la Tabla 1.1 para hallar los valores que se necesitaron para el PID. Con esto, se obtuvo valores de  $K_p=0.6$ ,  $T_i=4$  segundos o  $T_i=0.067$  minutos y  $T_d=1$  segundo o  $T_d=0.017$  minutos. Estos valores se obtienen de la siguiente forma:

- **Para hallar  $K_p$ :**

$$K_p = 0.6 \times K_{cr} = 0.6 \times 1 = 0.6 \quad ; \quad K_p = 0.6$$

- **Para hallar  $T_i$ :**

$$T_i = 0.5 \times P_{cr} = 0.5 \times 8 = 4s = 4/60 = 0.067 \text{ min} \quad ; \quad T_i = 4 \text{ s o } T_i = 0.067 \text{ min}$$

- **Para hallar  $T_d$ :**

$$T_d = 0.125 \times P_{cr} = 0.125 \times 8 = 1s = 1/60 = 0.017 \text{ min}; \quad T_d = 1 \text{ s o } T_d = 0.017 \text{ min}$$

### 3.2.2.1.1 Pruebas de Estabilidad de control del sistema

Al tener los valores del PID se procedió a probar la estabilidad del sistema, ingresando los valores al controlador que se realizó en Labview y modificando los valores de Set Point (Punto de consigna) para ver la respuesta a diferentes niveles.

#### **Prueba Set Point = 10 cm**

Se tomó como Set Point el valor de 10 cm, y se esperó que el sistema llega a la estabilidad (Figura 3.43). El cual obtuvo una rápida respuesta positiva a la estabilidad, llevando el sistema a ser estable ante perturbaciones que se presentan.

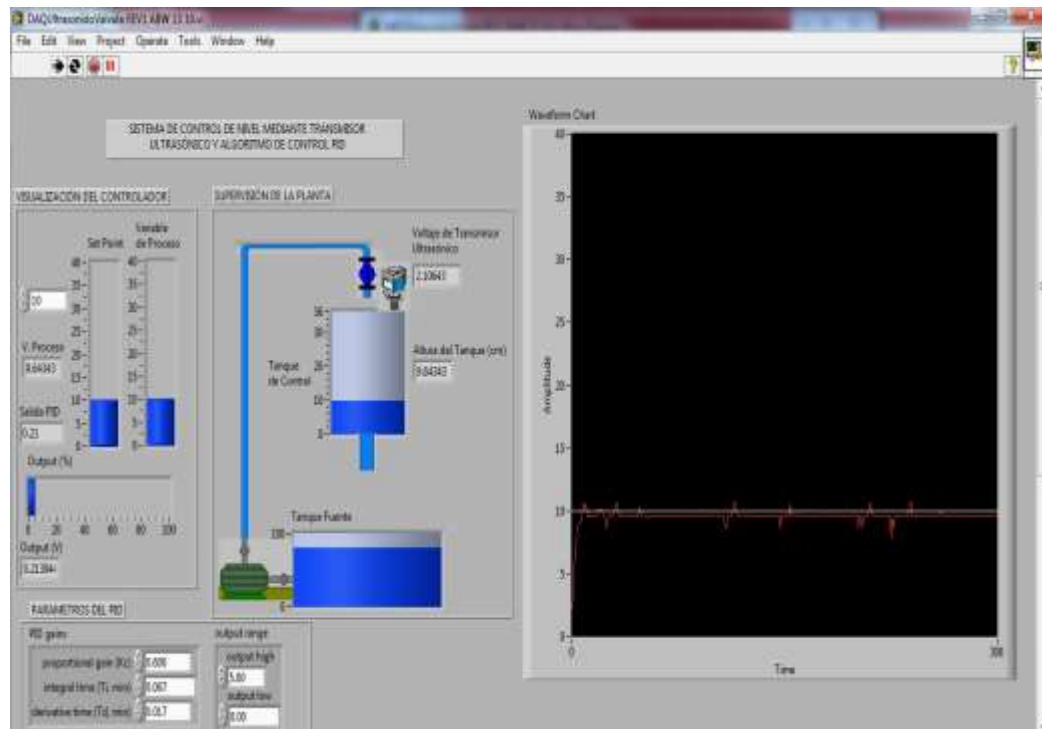


Figura 3.43: Prueba Set Point=10 cm,  $K_p=0.6$ ,  $T_i=0.067$  y  $T_d=0.017$ .

### **Prueba Set Point = 30 cm**

Se tomó como Set Point el valor de 30 cm, y se esperó que el sistema llega a la estabilidad (Figura 3.44). El cual obtuvo una respuesta positiva a la estabilidad, llevando el sistema a ser estable ante perturbaciones que se presentan.

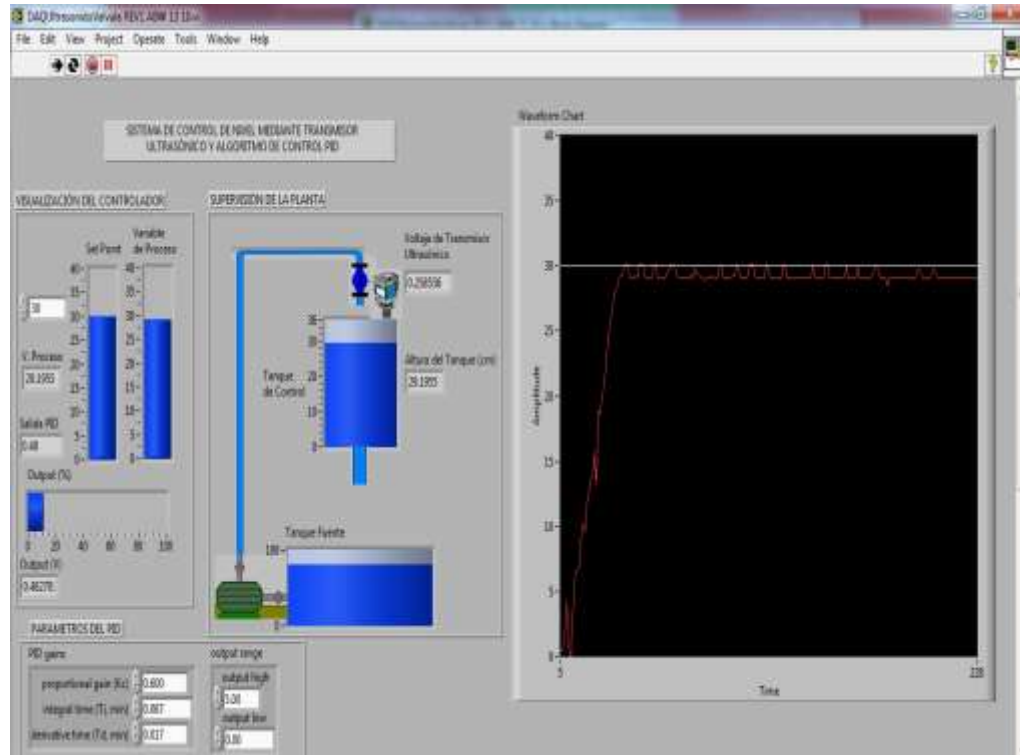


Figura 3.44: Prueba Set Point=30 cm,  $K_p=0.6$ ,  $T_i=0.067$  y  $T_d=0.017$ .

#### **3.2.2.2 Prueba de Sintonía por método de Tanteo.**

Para la sintonía por el método de Tanteo se siguieron los pasos descritos en el Capítulo 1.

Como primer paso se empezó dando valores a  $K_p=0.3$ ,  $T_i=1000$  minutos y  $T_d=0$  minutos. Estos valores fueron los iniciales considerados para la sintonía por ganancia límite.

Según los pasos para sintonizar por tanteo, se tuvo que ir subiendo el “Kp” en pasos dobles hasta obtener ciclos y al llegar a este valor de “Kp”, consideramos el anterior y ajustamos hasta un valor próximo a la obtención de ciclos.

### **Prueba Kp = 0.3**

Ajustamos los valores iniciales Kp=0.3, Ti=1000 y Td=0 y se esperó conseguir oscilaciones (Figura 3.45).

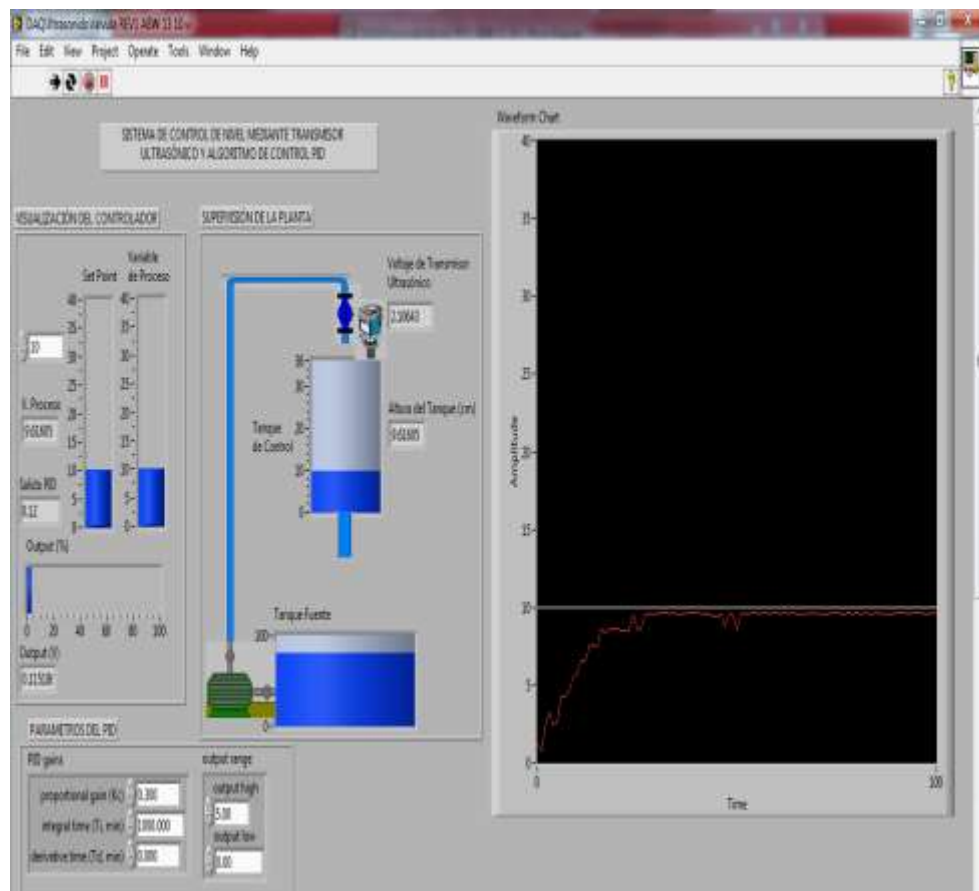


Figura 3.45: Prueba Kp=0.3 – Método Tanteo.

### **Prueba Kp = 0.6**

Debido a que no se consiguió oscilaciones, se ajustó Kp=0.6, Ti=1000 y Td=0 (Figura 3.46).

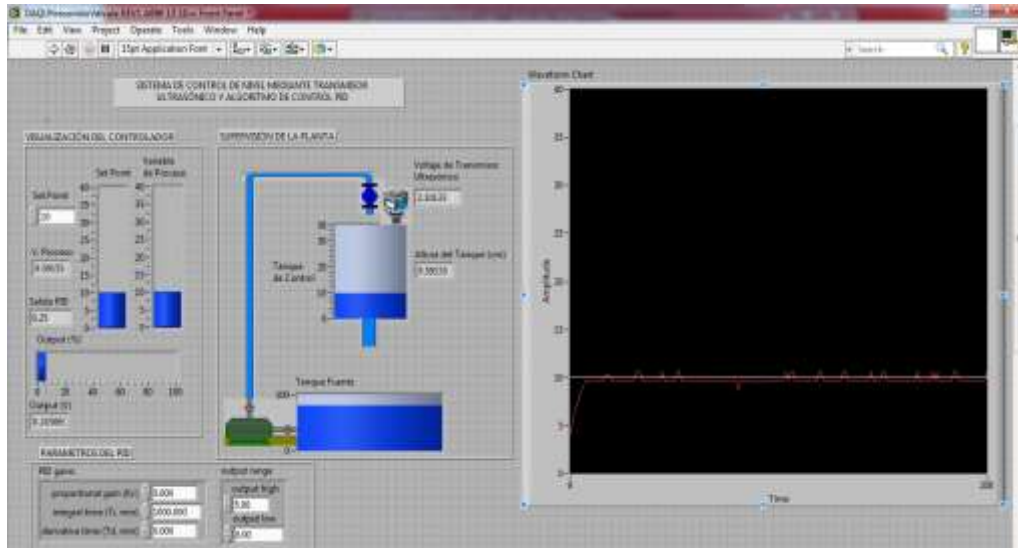


Figura 3.46: Prueba  $K_p=0.6$  – Método Tanteo.

### Prueba $K_p = 1.2$

Debido a que las oscilaciones no fueron tan claras, se ajustó  $K_p=1.2$ ,  $T_i=1000$  y  $T_d=0$ ; donde se observaron las primeras oscilaciones (Figura 3.47).

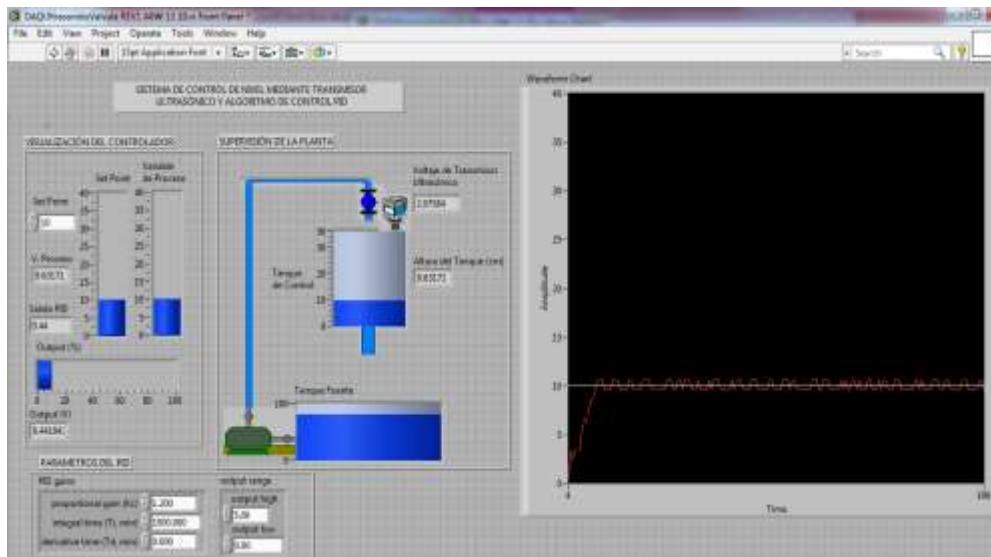


Figura 3.47: Prueba  $K_p=1.2$  – Método Tanteo.

Pudimos comprobar que el valor de  $K_p=1.2$  obtuvo ciclos más notorios; por lo que, según los pasos descritos para sintonía por tanteo, se escogió el anterior

“Kp” y se empezó ajustar hasta llegar a un “Kp” cercano al que nos arrojó oscilaciones.

### **Prueba Kp = 0.7**

Se ajustó  $K_p=0.7$ ,  $T_i=1000$  y  $T_d=0$  (Figura 3.48).

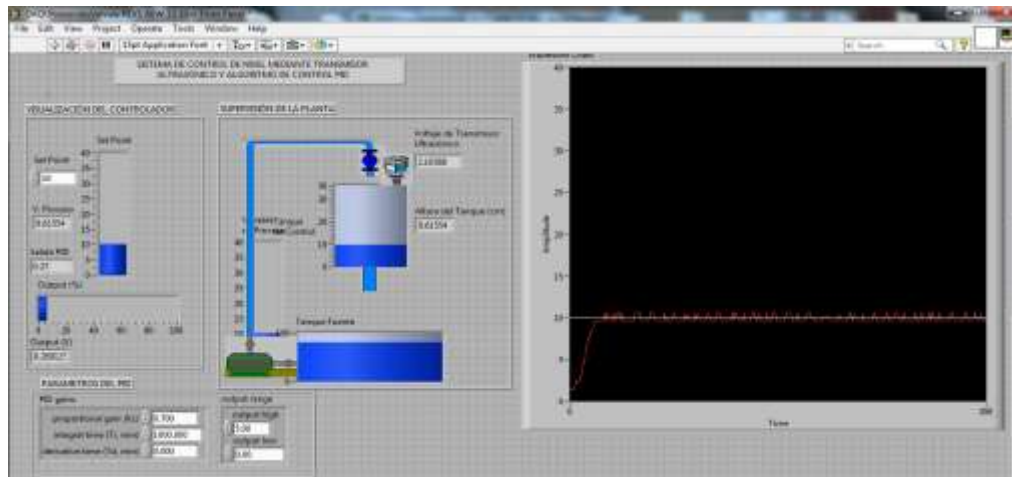


Figura 3.48: Prueba  $K_p=0.7$  – Método Tanteo.

### **Prueba Kp = 0.65**

Se ajustó  $K_p=0.65$ ,  $T_i=1000$  y  $T_d=0$  (Figura 3.49).

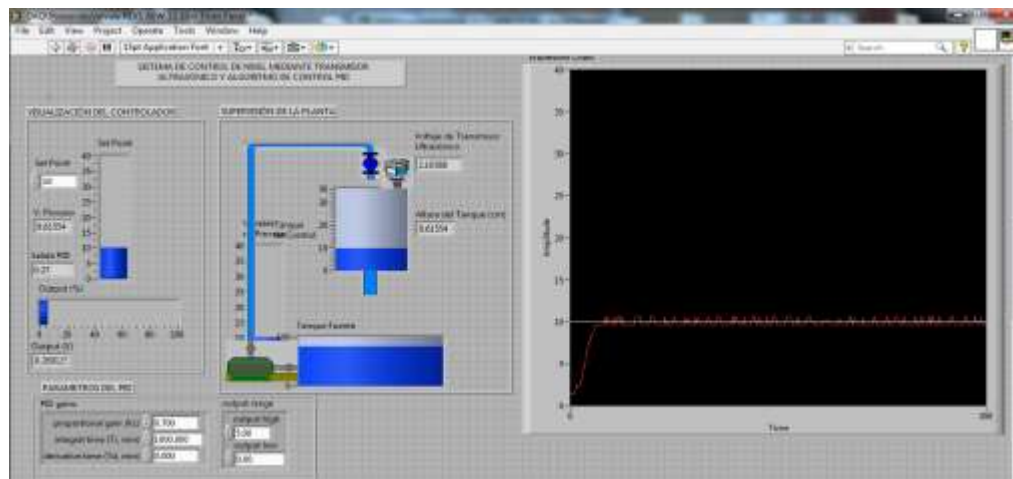


Figura 3.49: Prueba  $K_p=0.65$  – Método Tanteo.

### **Prueba Kp = 0.63**

Se ajustó  $K_p=0.63$ ,  $T_i=1000$  y  $T_d=0$  (Figura 3.50).

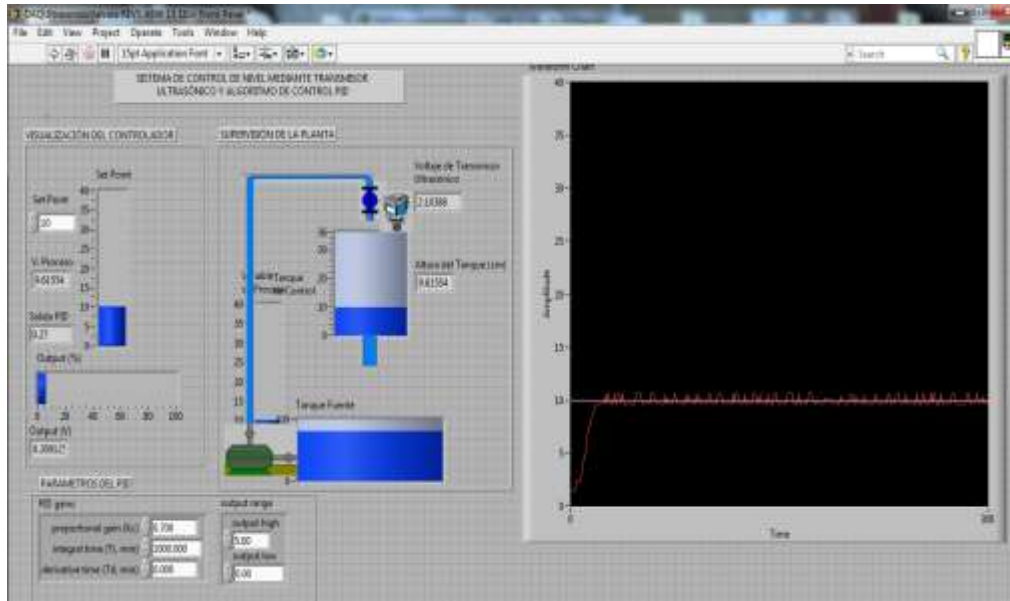


Figura 3.50: Prueba  $K_p=0.63$  - Método Tanteo.

### **Prueba $K_p = 0.62$**

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=1000$  y  $T_d=0$  (Figura 3.51).

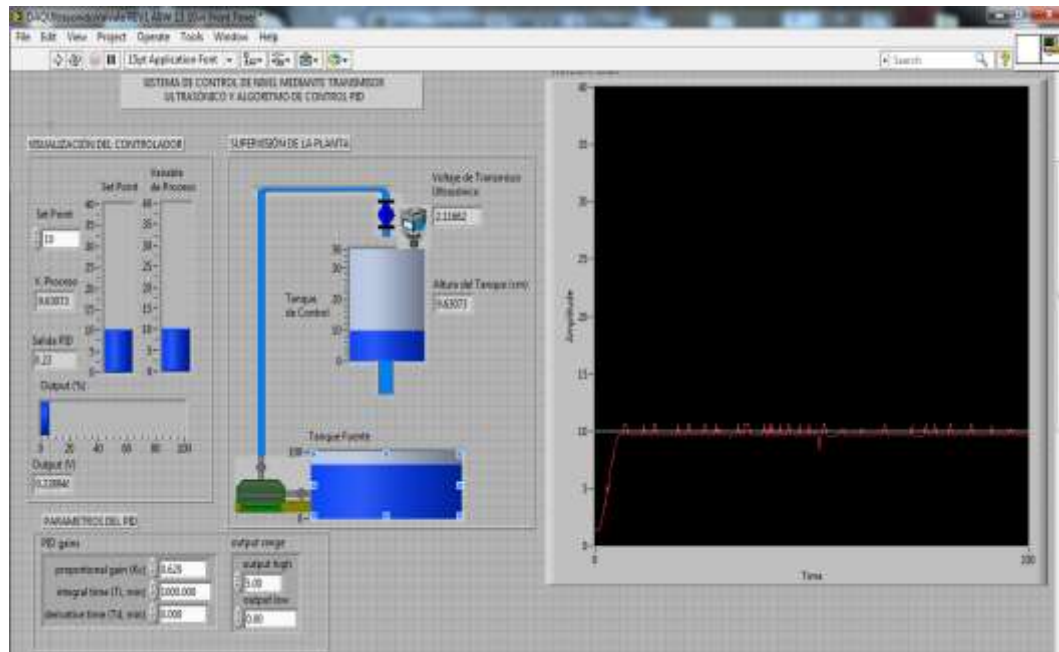


Figura 3.51: Prueba  $K_p=0.62$  - Método Tanteo.

Se vio que un  $K_p=0.62$  fue el más cercano para comenzar a ver oscilaciones, de esta forma se dejó sintonizado el “ $K_p$ ”.



Luego de haber sintonizado el valor de “Kp”, pasamos a disminuir el valor de “Ti” hasta que la medición se estabilice rápidamente y con pocos ciclos.

### **Prueba Ti = 10 min.**

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=10$  y  $T_d=0$  (Figura 3.52).

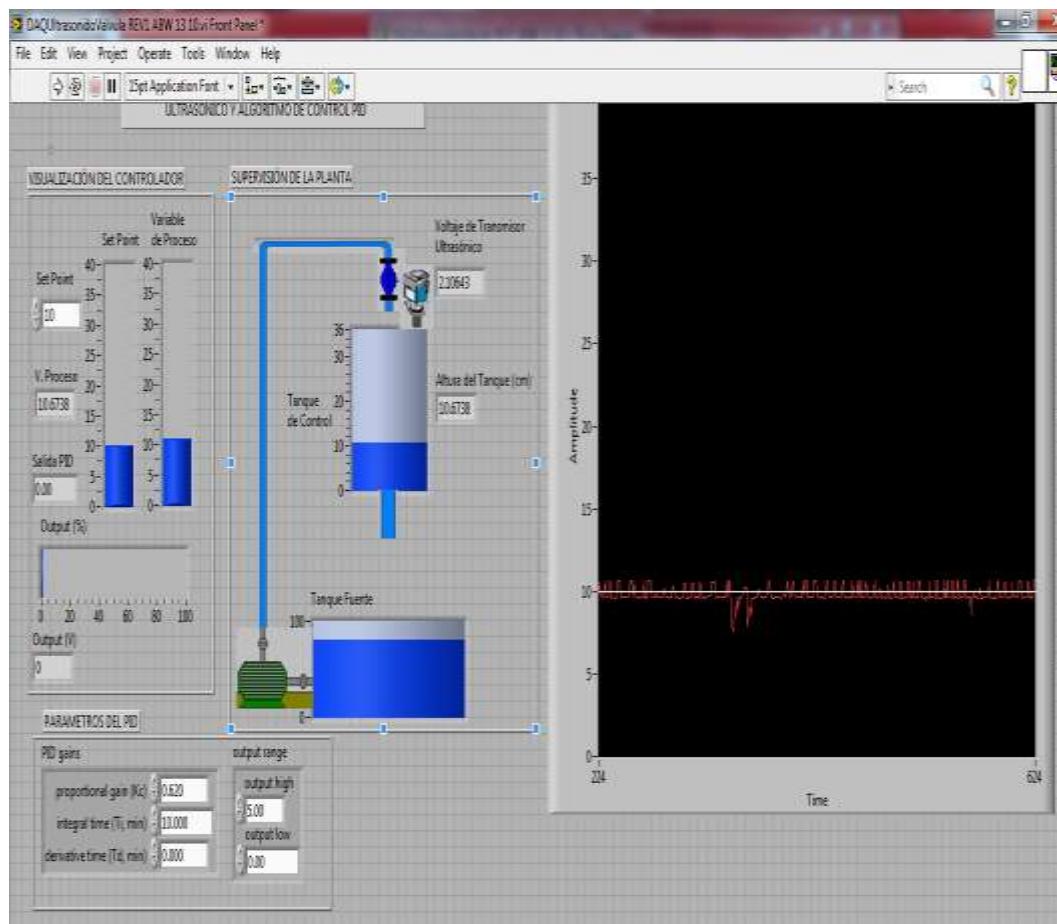


Figura 3.52: Prueba  $K_p=0.62$ ,  $T_i=10$  - Método Tanteo.

### Prueba $T_i = 5$ min.

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=5$  y  $T_d=0$  (Figura 3.53).

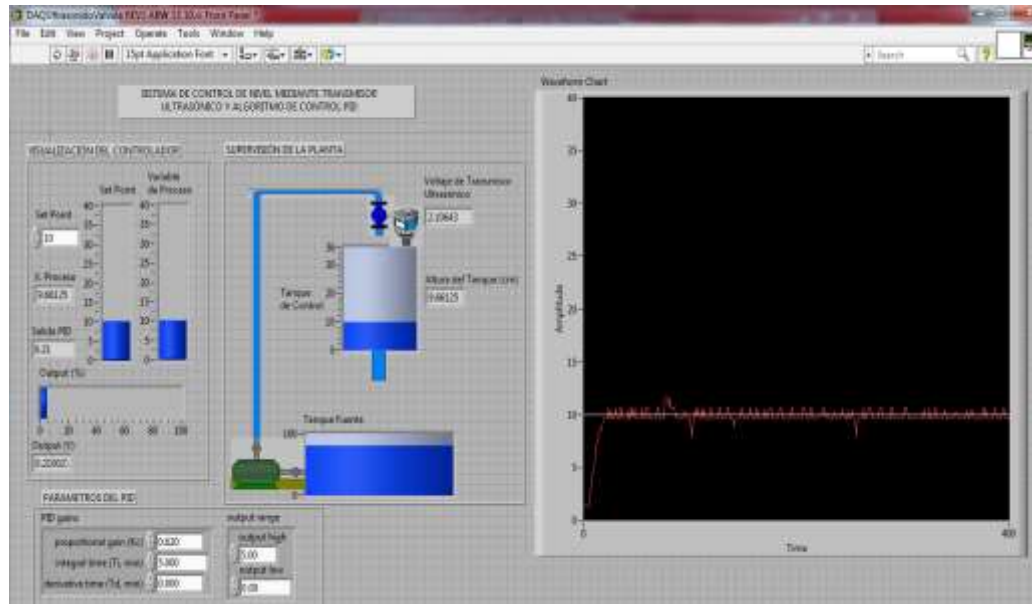


Figura 3.53: Prueba  $K_p=0.62$ ,  $T_i=5$  - Método Tanteo.

### Prueba $T_i = 2.5$ min.

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=2.5$  y  $T_d=0$  (Figura 3.54).

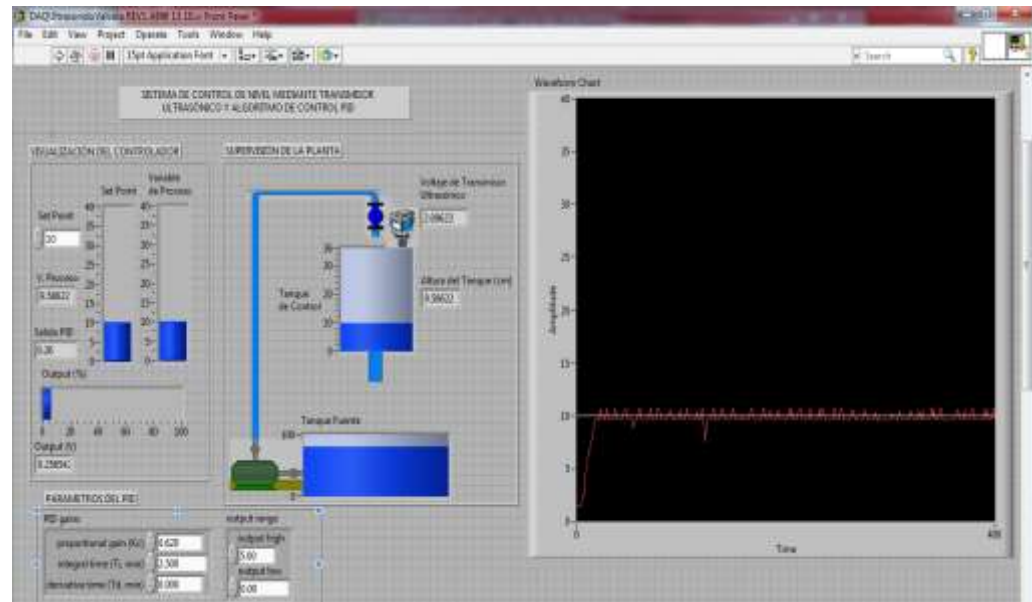


Figura 3.54: Prueba  $K_p=0.62$ ,  $T_i=2.5$  - Método Tanteo.

### Prueba $T_i = 1.25$ min.

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=1.25$  y  $T_d=0$  (Figura 3.55).

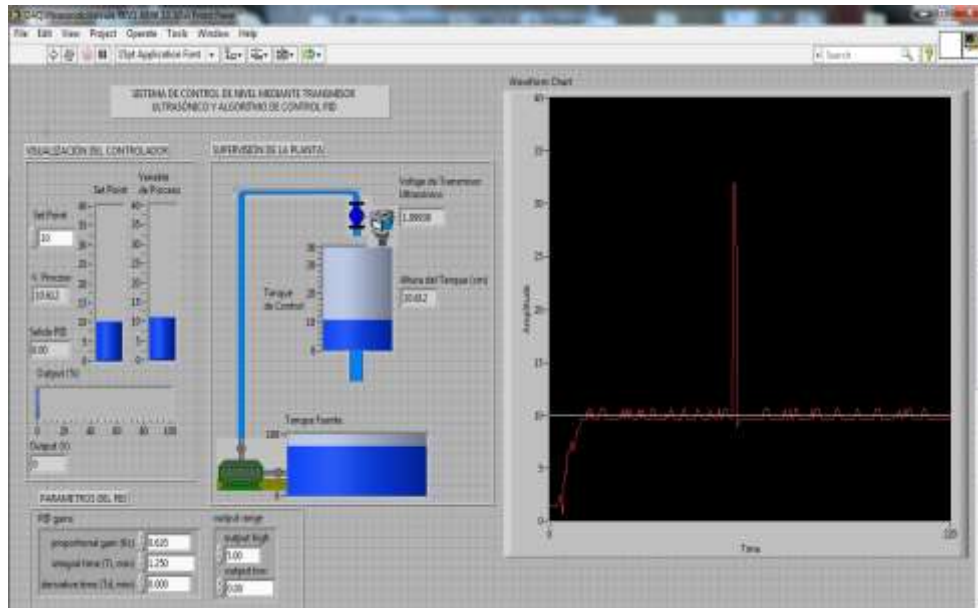


Figura 3.55: Prueba  $K_p=0.62$ ,  $T_i=1.25$  - Método Tanteo.

### Prueba $T_i = 0.62$ min.

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.62$  y  $T_d=0$  (Figura 3.56).

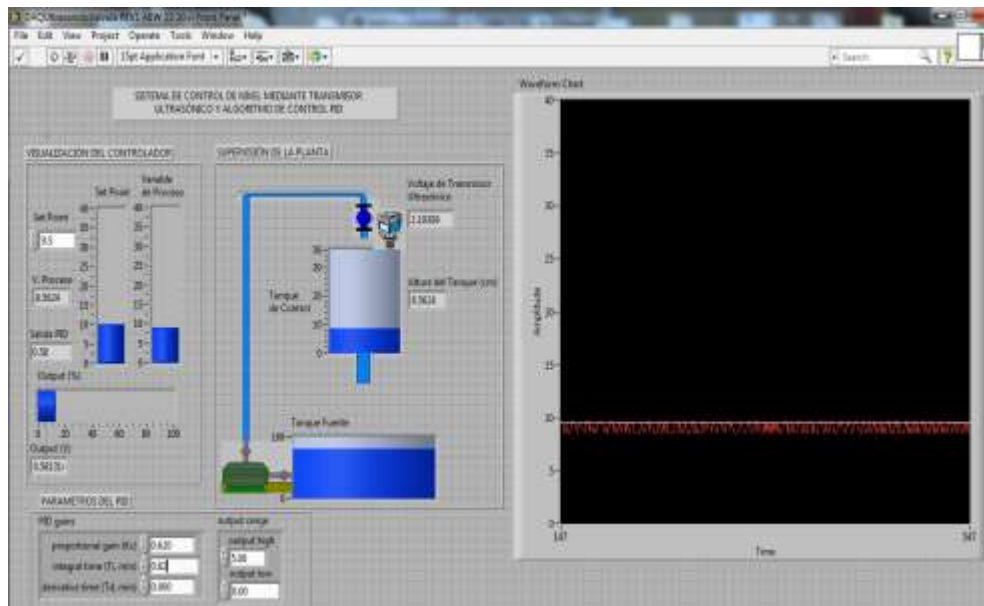


Figura 3.56: Prueba  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.62$  - Método Tanteo.

### Prueba $T_i = 0.31$ min.

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.31$  y  $T_d=0$  (Figura 3.57).

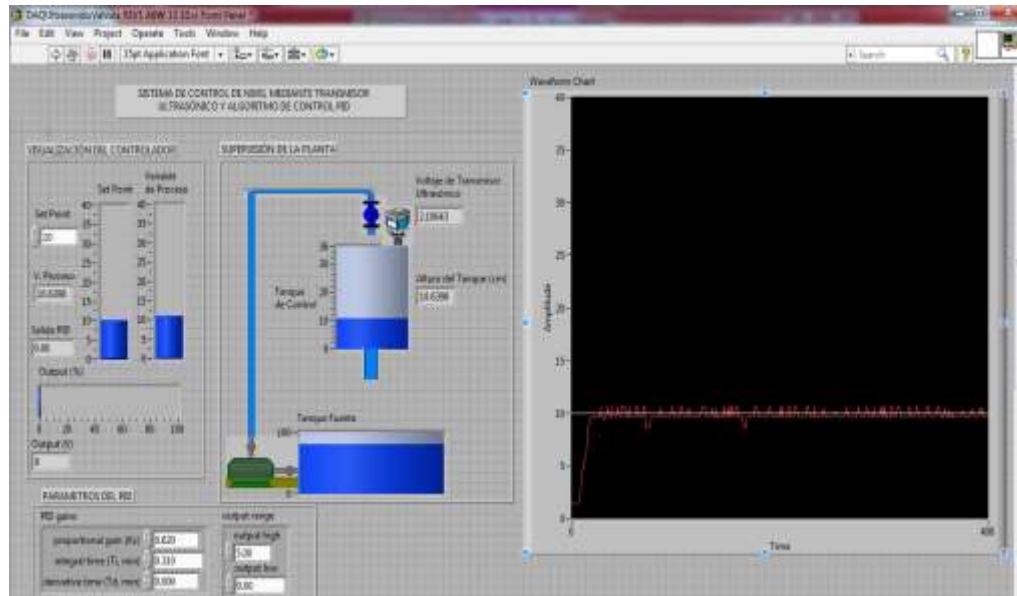


Figura 3.57: Prueba  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.31$  - Método Tanteo.

### Prueba $T_i = 0.15$ min.

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.15$  y  $T_d=0$  (Figura 3.58).

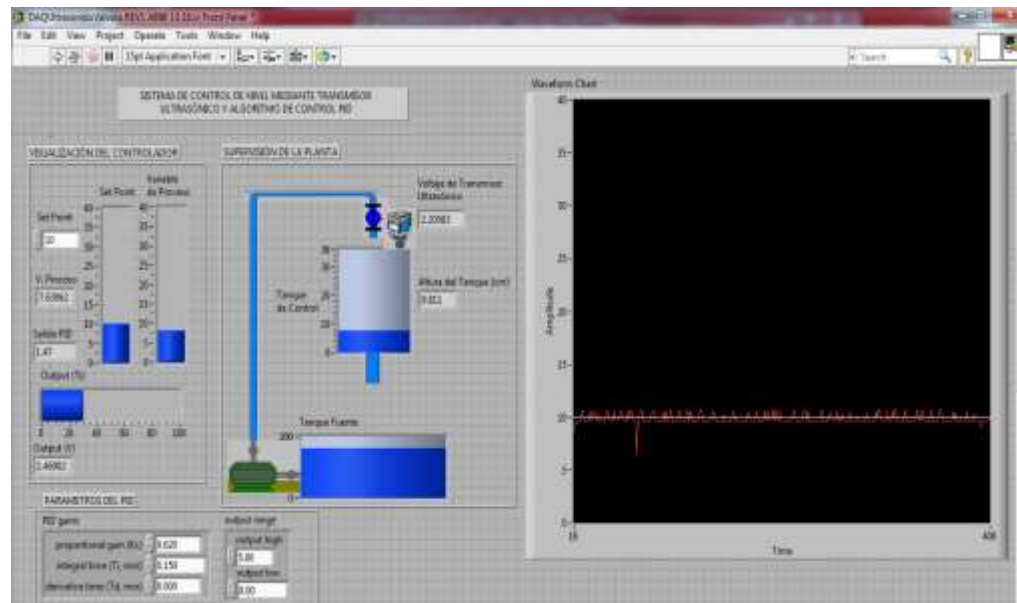


Figura 3.58: Prueba  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.15$  - Método Tanteo.

### Prueba $T_i = 0.075$ min.

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.075$  y  $T_d=0$  (Figura 3.59).

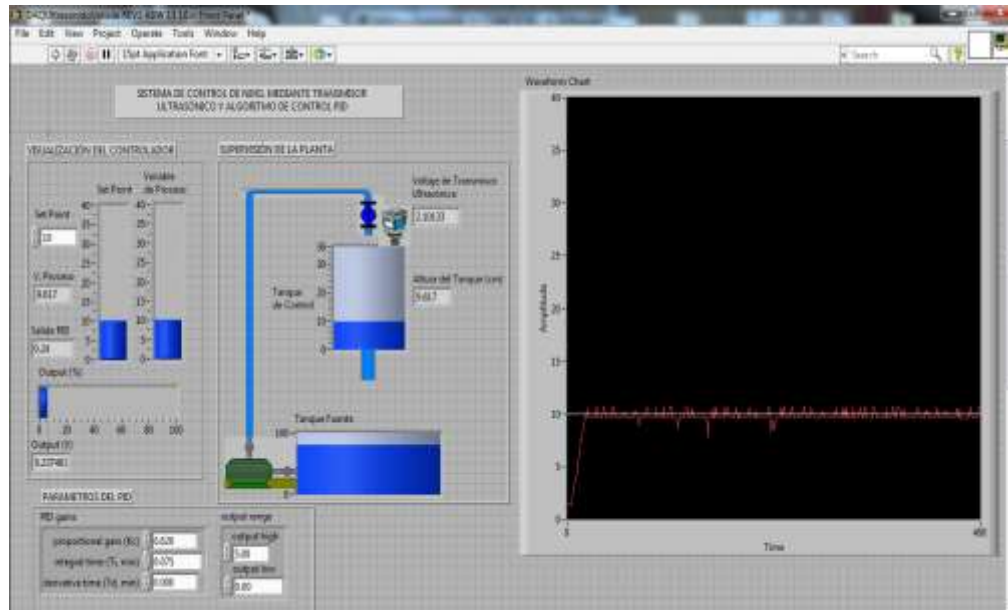


Figura 3.59: Prueba  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.075$  - Método Tanteo.

### Prueba $T_i = 0.038$ min.

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.038$  y  $T_d=0$  (Figura 3.60).

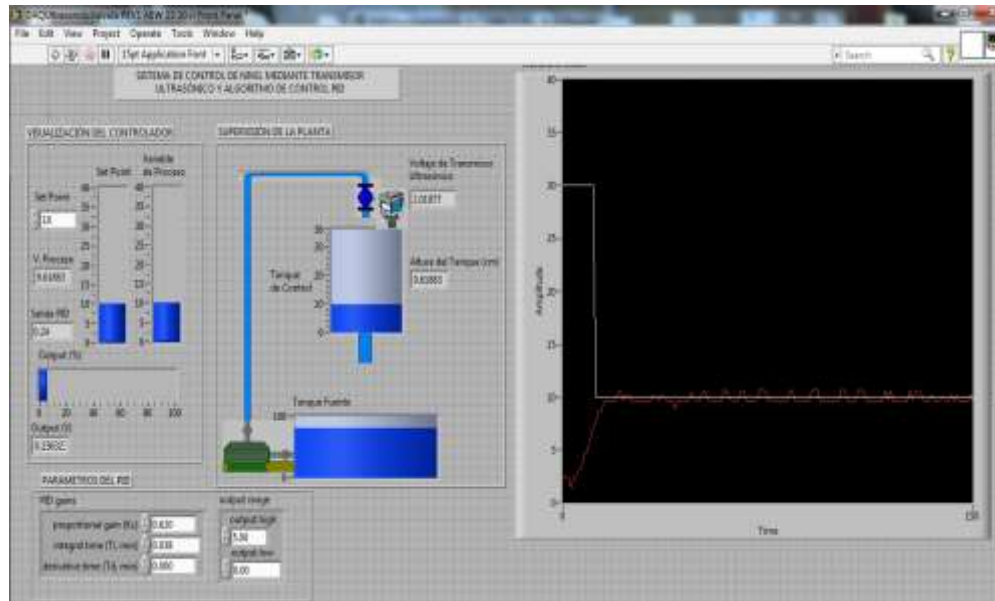


Figura 3.60: Prueba  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.038$  - Método Tanteo.

## Prueba $T_i = 0.019$ min.

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.019$  y  $T_d=0$  (Figura 3.61).

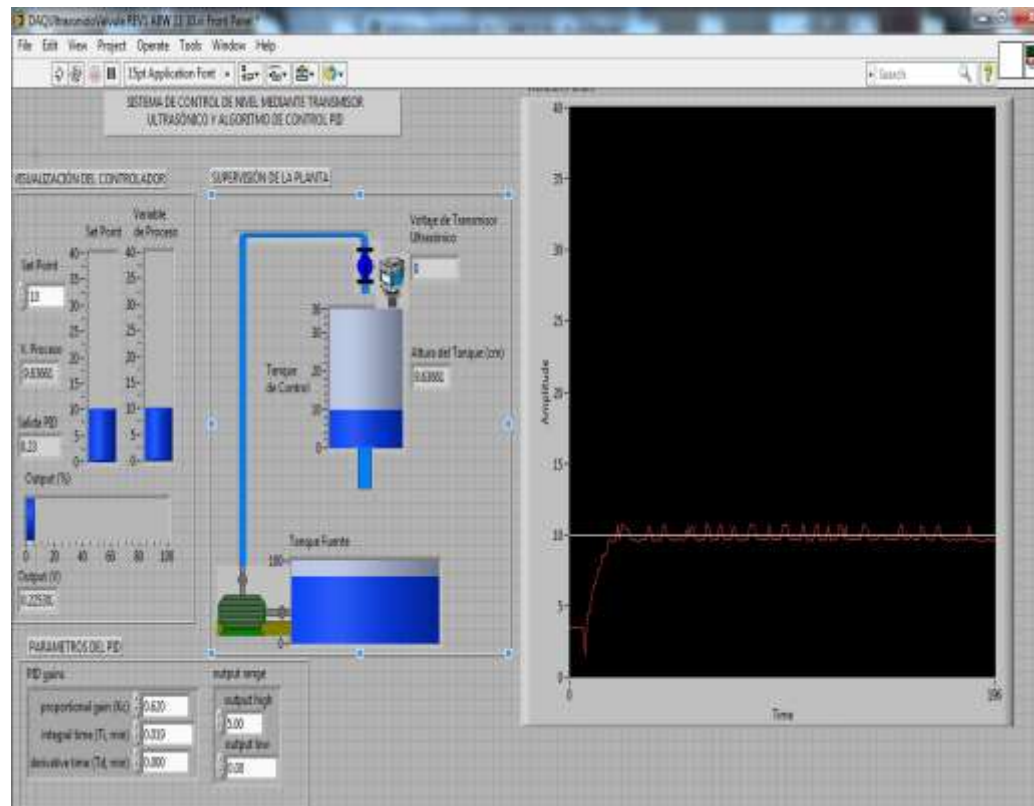


Figura 3.61: Prueba  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.019$  - Método Tanteo.

Para poder comprobar que la sintonía se encontraba correcta hasta la anterior prueba, se hizo una prueba cambiando el Set Point esperando que el sistema se estabilizara.

## Prueba Set Point = 30 cm

Se ajustó  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.019$  y  $T_d=0$  a  $SP=30$  cm (Figura 3.62).

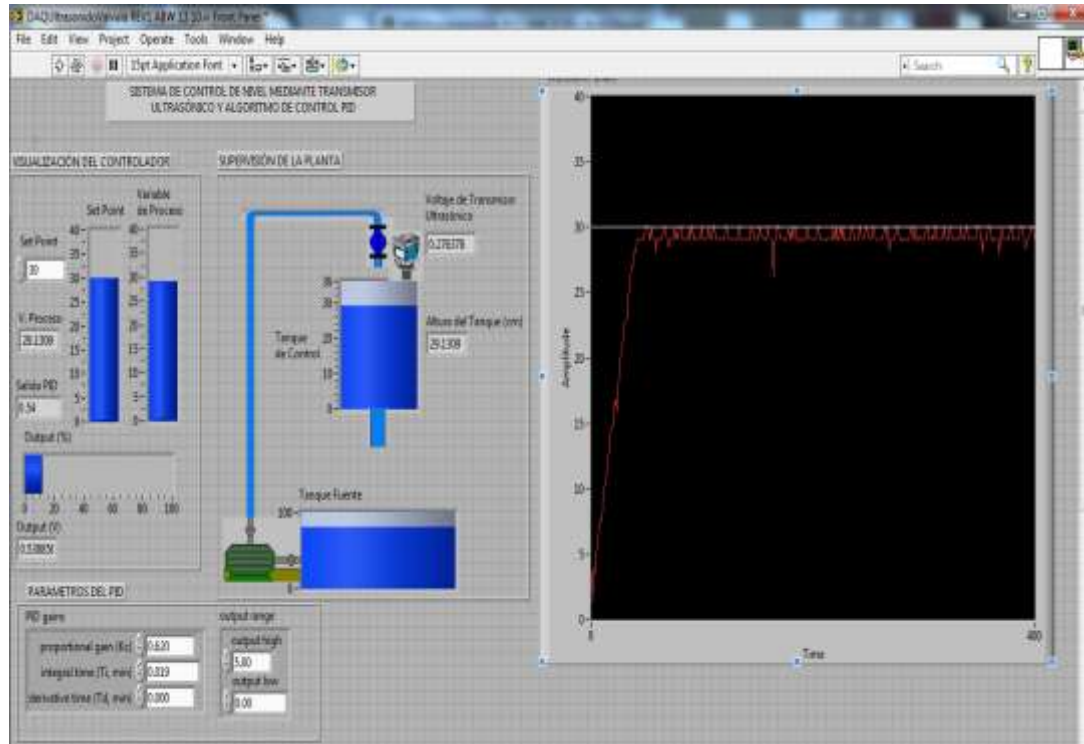


Figura 3.62: Prueba  $K_p=0.62$ ,  $T_i=0.019$  a  $SP=30$ cm - Método Tanteo.

Como no se observó establecimiento al cambio de Set Point, se decidió variar el valor de “ $K_p$ ” a 0.3; valor el cual fue inmediatamente menor con el que se escogió. Luego de esto, se volvió a hacer pruebas a dos diferentes Set Point, quedando como mejor “ $K_p$ ” el valor de 0.3.

### Prueba Set Point = 10 cm

Se ajustó  $K_p=0.3$ ,  $T_i=0.019$  y  $T_d=0$  a  $SP=10$  cm (Figura 3.63).

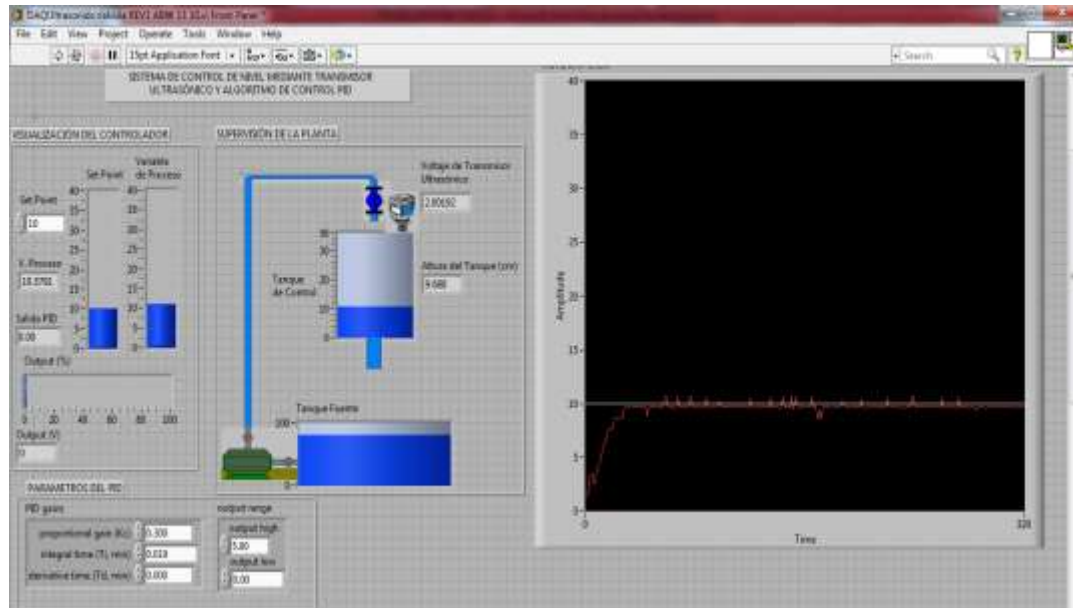


Figura 3.63: Prueba  $K_p=0.3$ ,  $T_i=0.019$  a  $SP=10$ cm - Método Tanteo.

### Prueba Set Point = 30 cm

Se ajustó  $K_p=0.3$ ,  $T_i=0.019$  y  $T_d=0$  a  $SP=30$  cm (Figura 3.64).

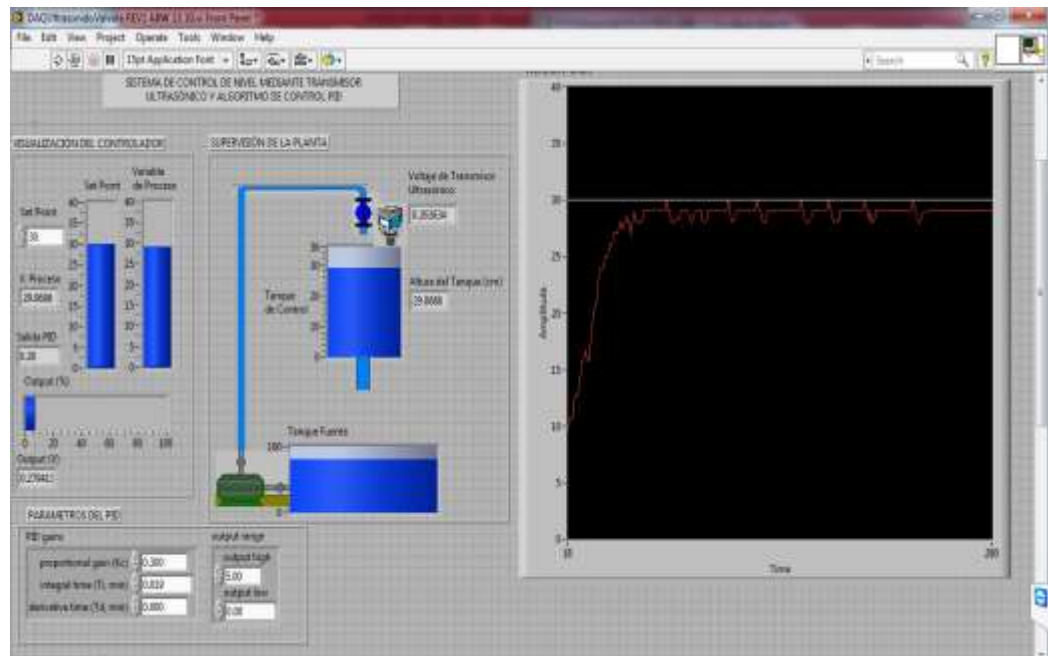


Figura 3.64: Prueba  $K_p=0.3$ ,  $T_i=0.019$  a  $SP=30$ cm - Método Tanteo.



Al tener un mejor “Kp” y un “Ti” final, que permitieron conseguir una señal estable; se fue aumentando el valor de “Td” hasta conseguir un mejor establecimiento de la señal. Para esto se escogió uno similar al que se consiguió por el método de Ganancia Limite. Finalmente le aumentamos “Td” a 0.01 minutos, hasta lograr conseguir el punto deseado sin fluctuaciones o ruidos.

**Prueba Td = 0.01 min.**

Se ajustó Kp=0.3, Ti=0.019 y Td=0.01 (Figura 3.65).

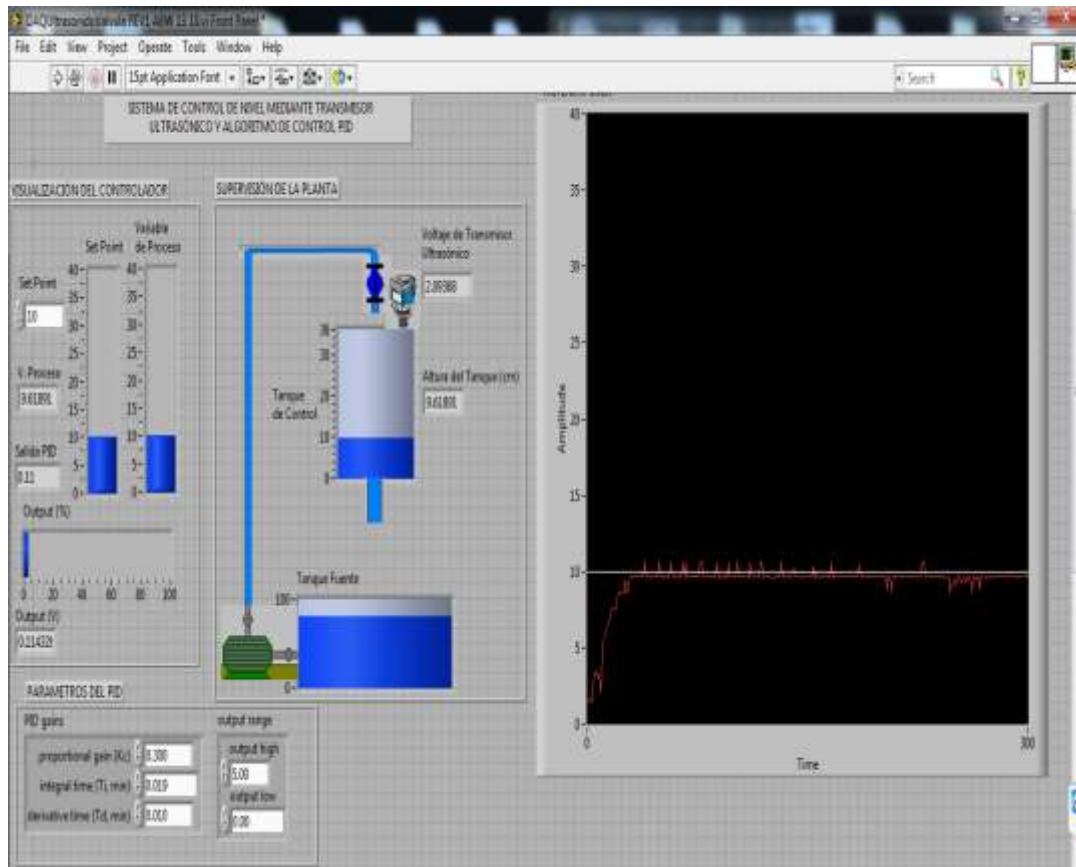


Figura 3.65: Prueba Kp=0.3, Ti=0.019 y Td=0.01 - Método Tanteo.

### 3.2.2.2.1 Prueba de Estabilidad de control del sistema

Al tener los valores del PID:  $K_p=0.3$ ,  $T_i=0.019$  min. y  $T_d=0.01$  min; se procedió a probar la estabilidad del sistema, ingresando los valores al controlador que se realizó en Labview y modificando los valores de Set Point (Punto de consigna) para ver la respuesta a diferentes niveles.

#### Prueba Set Point = 10 cm

Se tomó como Set Point el valor de 10 cm, y se esperó que el sistema llegara a la estabilidad (Figura 3.66). El cual llevó al sistema a ser estable ante perturbaciones que se presentan.

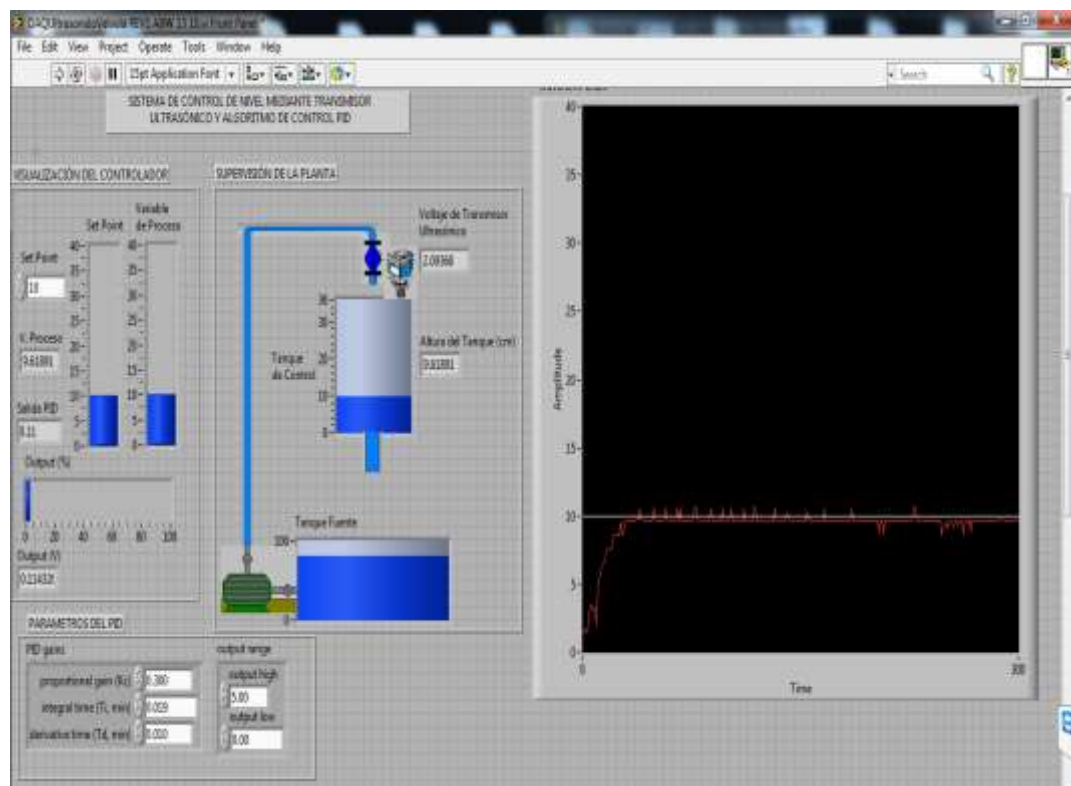


Figura 3.66: Prueba Set Point=10 cm,  $K_p=0.3$ ,  $T_i=0.019$  y  $T_d=0.01$ .

## Prueba Set Point = 30 cm

Se tomó como Set Point el valor de 30 cm, y se esperó que el sistema llega a la estabilidad (Figura 3.67).

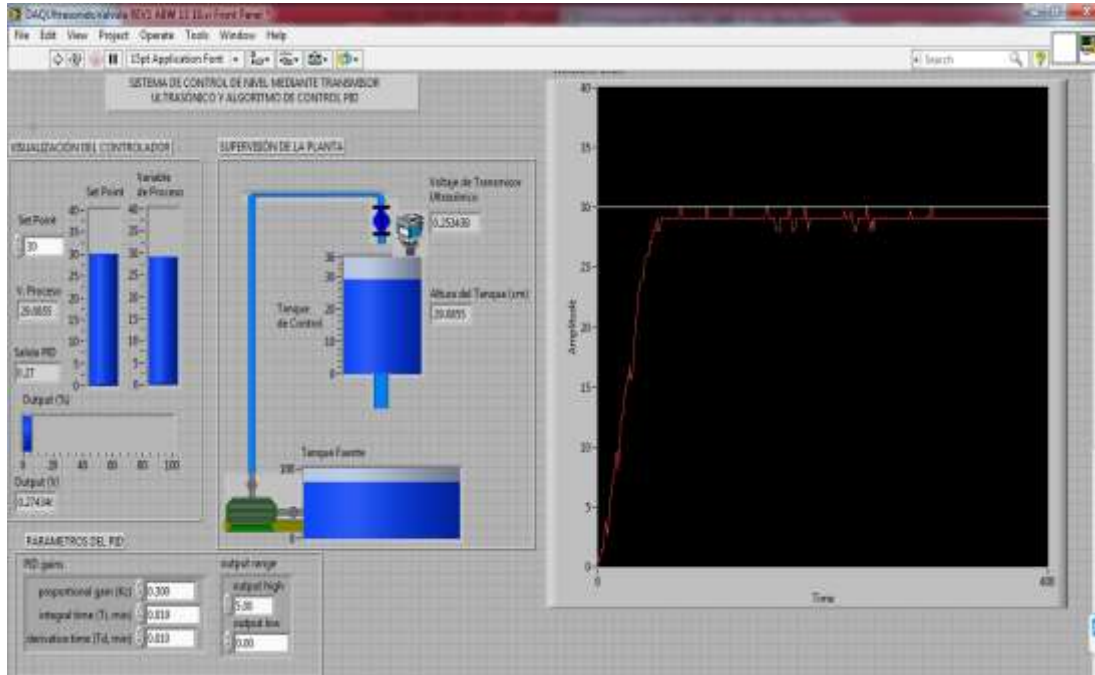


Figura 3.67: Prueba Set Point=30 cm,  $K_p=0.3$ ,  $T_i=0.019$  y  $T_d=0.01$ .

Finalmente se obtuvo la sintonía por ambos métodos, obteniendo los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , tal como se muestran en la tabla 2.2.

	Sintonía por Ganancia Límite	Sintonía por Tanteo
<b>Kp</b>	0.6	0.3
<b>Ti</b>	0.067 min	0.019 min
<b>Td</b>	0.017 min	0.01 min

Tabla 2.2: Resumen de parámetros de sintonía obtenidos por ambos métodos.

### **3.3 PRUEBAS DE CONTROL REMOTO, O A DISTANCIA, DE LA VARIABLE NIVEL**

Para las pruebas del control a distancia se hizo uso del software “Team Viewer” el cual permitió un control remoto del ordenador. Es decir, permitió enlazarse a una PC (la que controla el proceso) pudiendo visualizar y tomar control de otra estación (PC) en tiempo real.

Se instaló, en dos máquinas, el software “Team Viewer” en su modo de opción gratuita, lo que permitió poder conectarse a dos PCs en un mismo momento. Una de las PCs se encontraba conectada al proceso de medición y control de nivel, adquiriendo los datos y controlando el proceso; mientras que la otra, se encontraba visualizando el proceso y con la posibilidad de poder controlarlo.

Al tener instalado el software en ambas máquinas, se procedió a dar inicio al programa. Para esto, es necesario crear una red en la cual ambas maquinas se encuentren interactuando; por esta razón, se hizo uso de un celular como medio para la creación de la red.

Se activó el modo Wifi en el celular y se conectaron ambas máquinas a la red generada automáticamente por el equipo móvil (Figura 3.68).

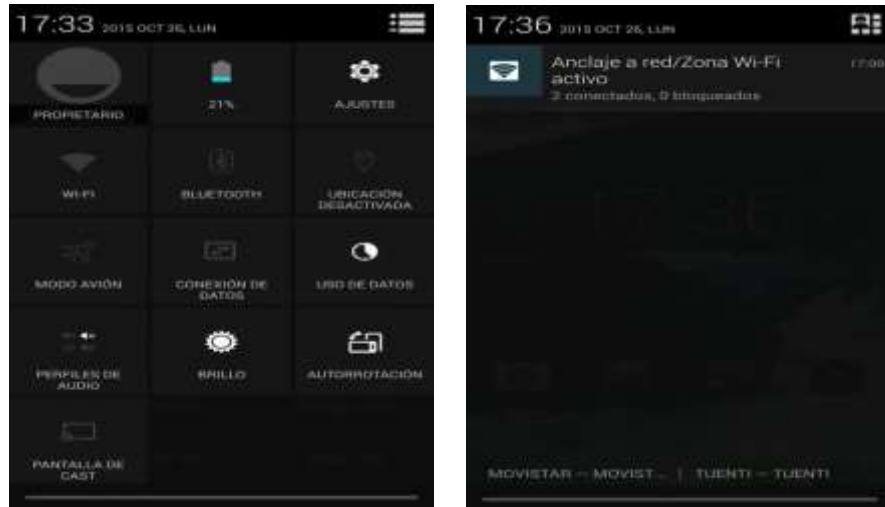


Figura 3.68: Menú de modo Wifi de celular y conexiones.

Luego de tener enlazadas ambas máquinas a una misma red, se ejecutó el software y se esperó que se asocie a cada máquina un ID y contraseña, esto haciendo uso del plan de datos (Figura 3.69).



Figura 3.69: Pantalla inicial de Software "Team Viewer". [21]

Para controlar el ordenador donde se tenía el control PID, se introdujo el ID que se generó. De esta forma pudimos tener control y supervisión de lo que acontecía en la estación de trabajo donde se encontraba el control PID para el control de la variable nivel. La figura 3.70 muestra ambas máquinas visualizando y controlando el proceso.

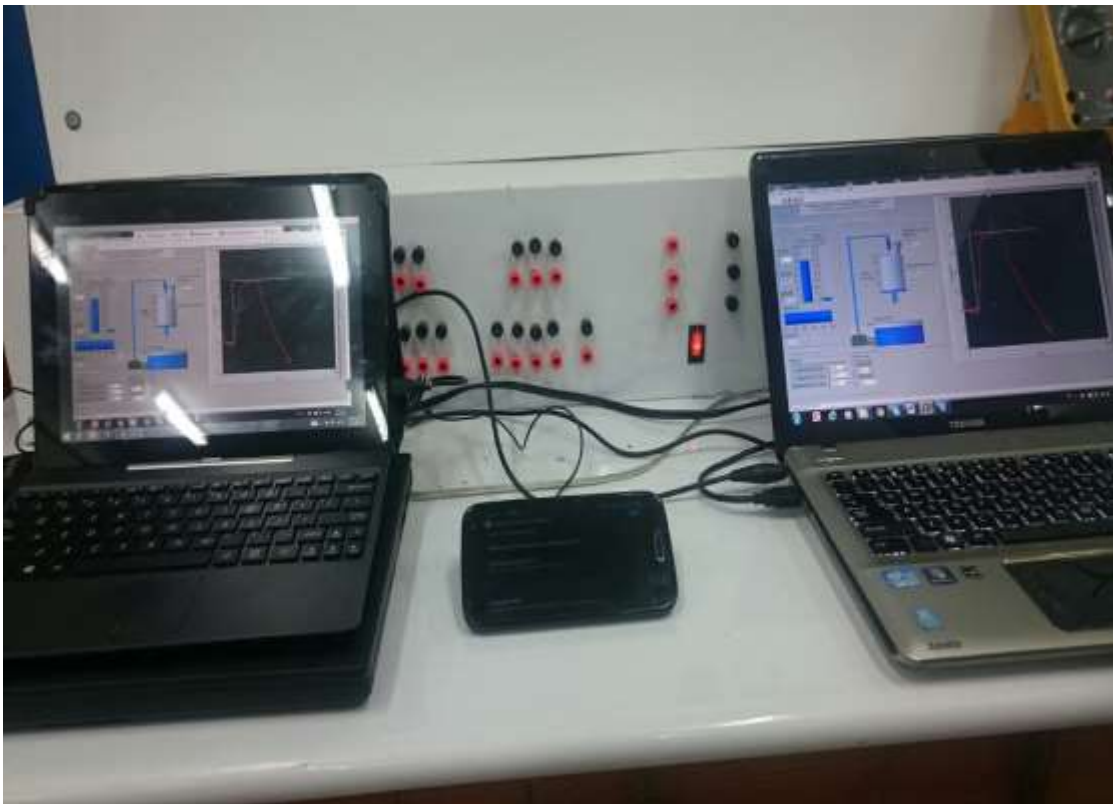


Figura 3.70: Control de proceso en dos máquinas, control remoto.

### **Prueba Set Point=30 – Máquina 1**

Se controló el sistema desde la máquina 1 (Máquina con el control PID), dándole un Set Point de 30 (Figura 3.71).

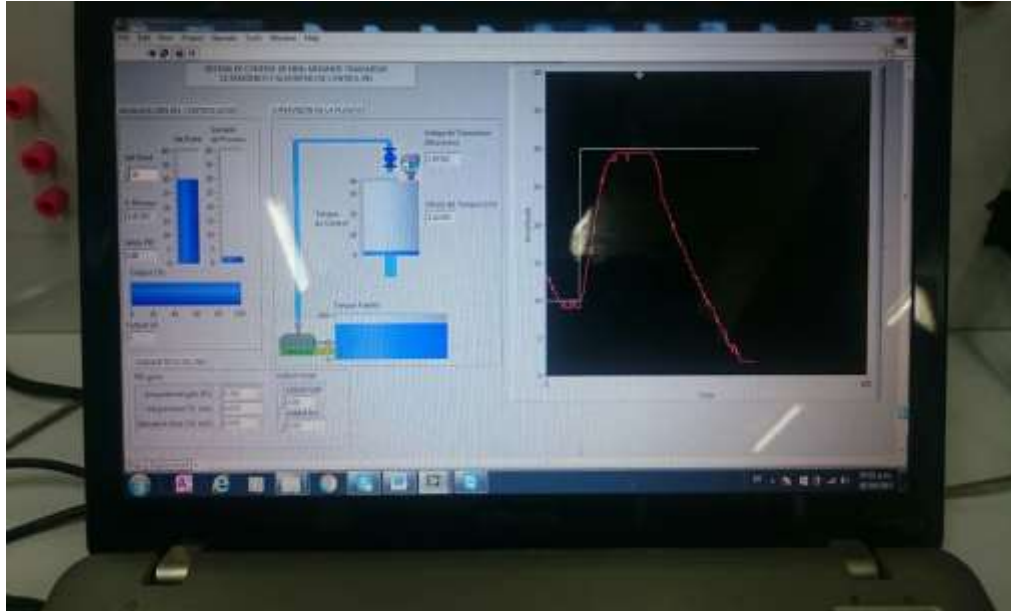


Figura 3.71: Máquina 1 con el control PID.

### **Prueba Set Point=30 – Máquina 2**

Se visualizó el control dado en la Máquina 1 (Figura 3.72).

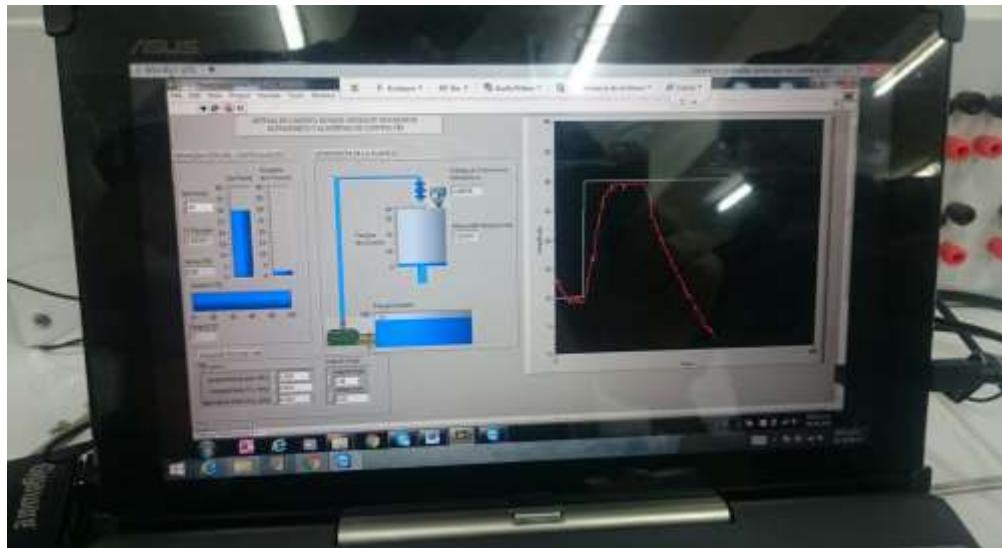


Figura 3.72: Máquina 2 – visualizando el control del proceso.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 RESULTADOS DE PRUEBA DE SINTONÍA DE PID POR MÉTODO DE GANANCIA LÍMITE (ZIEGLER-NICHOLS) Y ESTABILIDAD DEL SISTEMA.

Al realizar las pruebas de sintonía se consiguieron valores de  $K_p=0.6$ ,  $T_i= 0.067$  min. y  $T_d= 0.017$  min.

Después de probar con dos tipos de Set Point: 10 cm y 30 cm; el sistema tendió a la estabilidad ante cualquier perturbación, lo que generó las siguientes gráficas:

#### Resultado a Set Point = 10 cm

La figura 4.1 muestra la estabilidad del sistema.

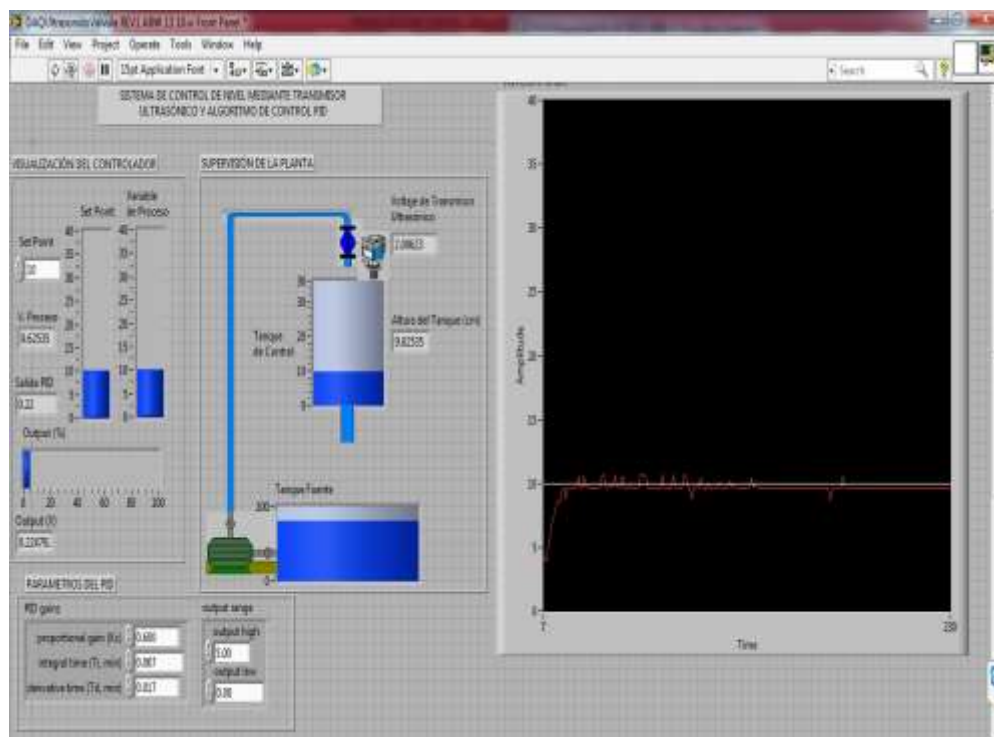


Figura 4.1: Estabilidad del Sistema al sintonizar PID por método de Ganancia Límite – SP=10 cm.



## **Resultado a Set Point = 30 cm**

La figura 4.2 muestra la estabilidad del sistema.

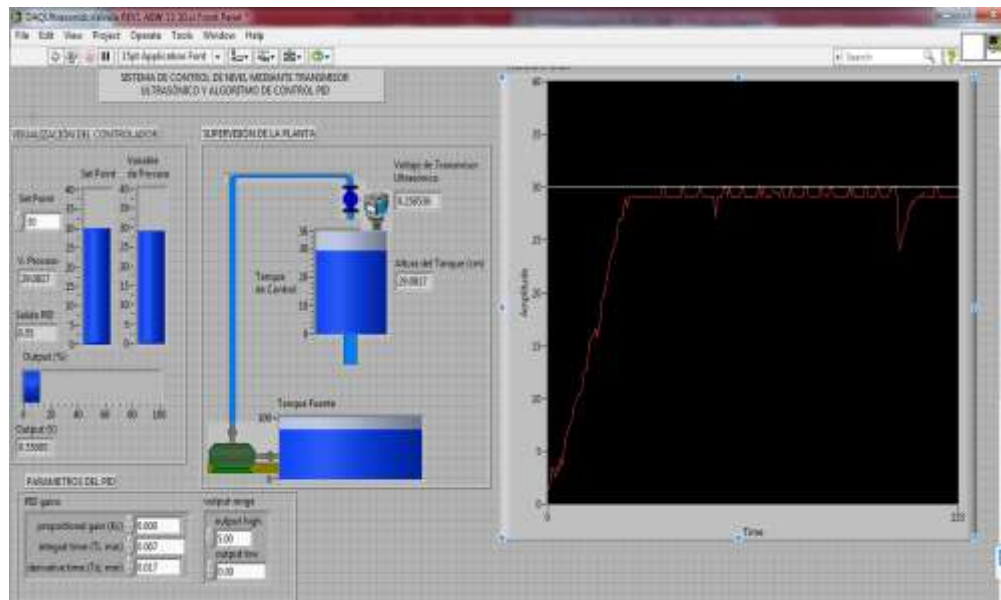


Figura 4.2: Estabilidad del Sistema al sintonizar PID por Ganancia Límite – SP=30 cm.

### **4.1.1. Análisis de las características de la Variable del Proceso – Sintonía por Ganancia Límite.**

Al tener estabilizada la Variable del Proceso, procedimos hacer el análisis de sus características (tiempo de subida “ $T_r$ ”, máximo sobre impulso “ $M_p$ ”, tiempo de estabilización “ $t_s$ ” y error en estado estacionario “ $E_p$ ”).

### **Análisis a Set Point = 10 cm**

Para el análisis de las características de la Variable de Proceso, se exportaron los valores de LabView a Excel de manera que se pudo hacer un mejor análisis y visualización de la señal. La Tabla 4.1 en el Anexo 2, muestra estos valores exportados.

La Figura 4.3 muestra la gráfica que se generó a partir de los valores exportados a Excel.

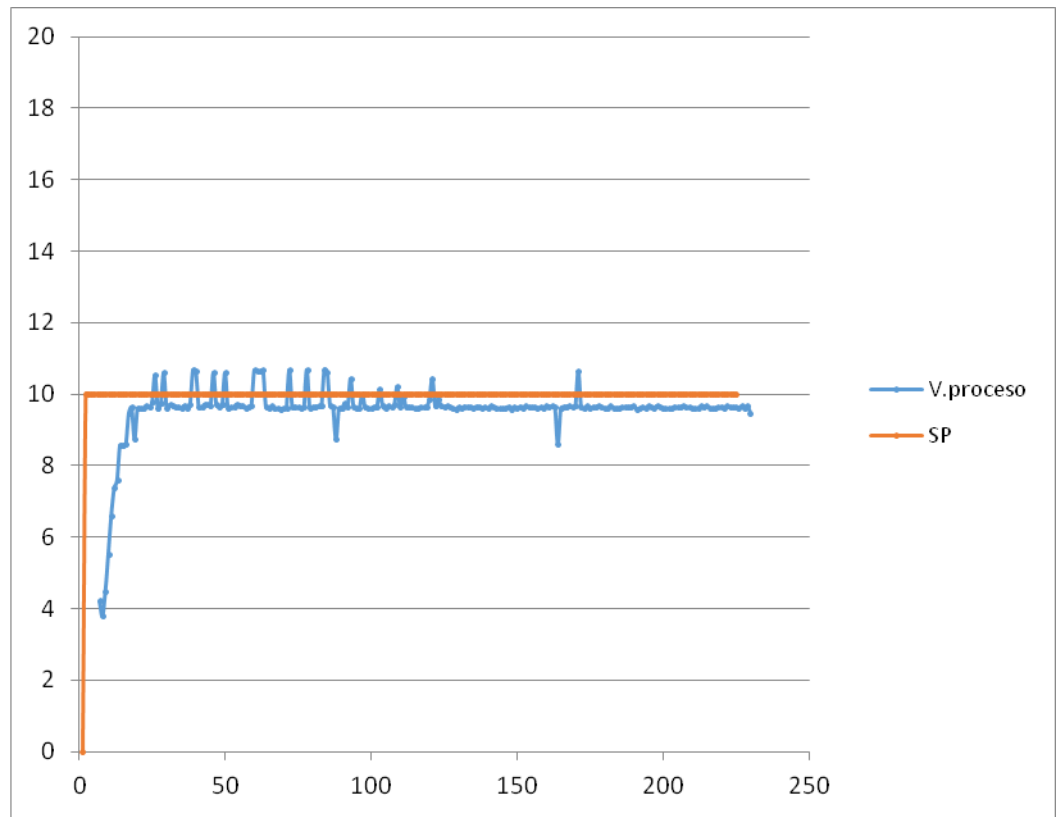


Figura 4.3: Gráfica de estabilidad del sistema al sintonizar PID por Ganancia Límite – SP = 10 cm.

De esta grafica se sacaron los valores de característica de la Variable de proceso (Tabla 3.1).

<b>Tiempo de subida</b>	26 s
<b>Máximo sobre impulso %</b>	5.505
<b>Tiempo de estabilización</b>	30 s
<b>Error en estado estacionario % (respecto al SP)</b>	3.41 (0.34104)

Tabla 3.1: Características de Variable de Proceso a Set Point = 10 cm – Sintonía por Ganancia Límite.

### Análisis a Set Point = 30 cm

Para el análisis de las características de la Variable de Proceso, se exportaron los valores de LabView a Excel de manera que se pudo hacer un mejor análisis y visualización de la señal. La Tabla 4.2 en el Anexo 3, muestra estos valores exportados.

La Figura 4.4 muestra la gráfica que se generó a partir de los valores exportados a Excel.

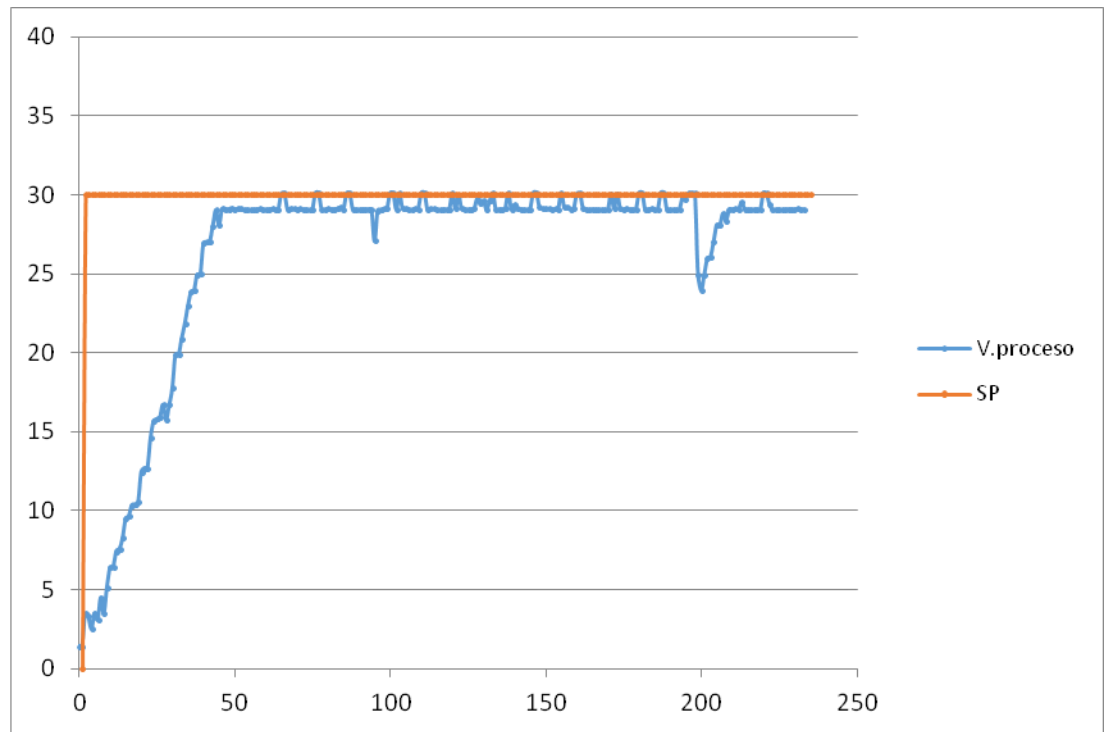


Figura 4.4: Gráfica de estabilidad del sistema al sintonizar PID por Ganancia Límite – SP = 30 cm.

De esta gráfica se sacaron los valores de característica de la Variable de proceso (Tabla 3.2).

<b>Tiempo de subida</b>	66 s
<b>Máximo sobre impulso %</b>	0.381
<b>Tiempo de estabilización</b>	67 s
<b>Error en estado estacionario % (respecto al SP)</b>	3.03 (0.9096)

Tabla 3.2: Características de Variable de Proceso a Set Point = 30 cm – Sintonía por Ganancia Límite.

## 4.2 RESULTADOS DE PRUEBA DE SINTONÍA DE PID POR MÉTODO DE TANTEO Y ESTABILIDAD DEL SISTEMA.

Al realizar las pruebas de sintonía se consiguieron valores de  $K_p=0.3$ ,  $T_i= 0.019$  min. y  $T_d= 0.01$  min.

Después de probar con dos tipos de Set Point: 10 cm y 30 cm; el sistema tendió a la estabilidad ante cualquier perturbación, lo que generó las siguientes gráficas:

### Resultado a Set Point = 10 cm

La figura 4.5 muestra la estabilidad del sistema.

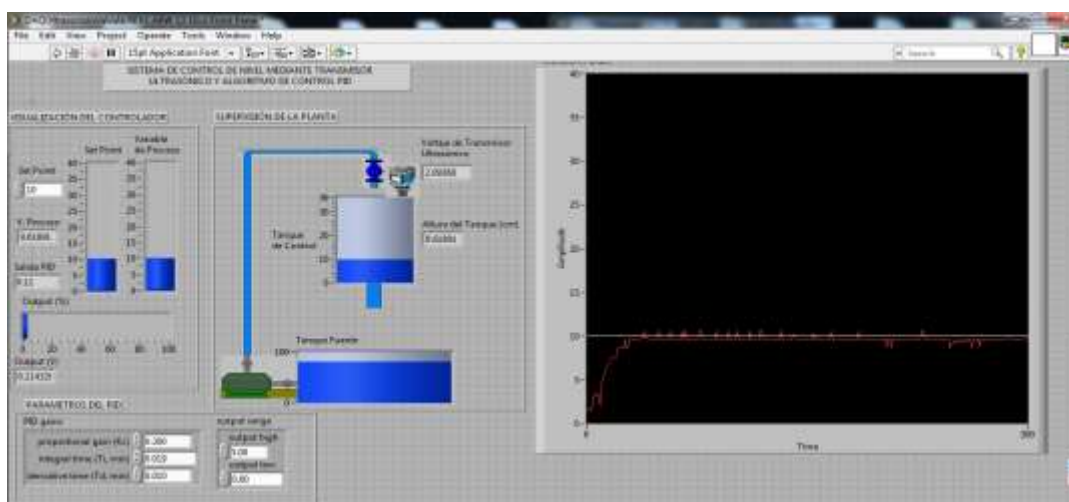


Figura 4.5: Estabilidad del Sistema al sintonizar PID por método de Tanteo – SP=10 cm.

## **Resultado a Set Point = 30 cm**

La figura 4.6 muestra la estabilidad del sistema.

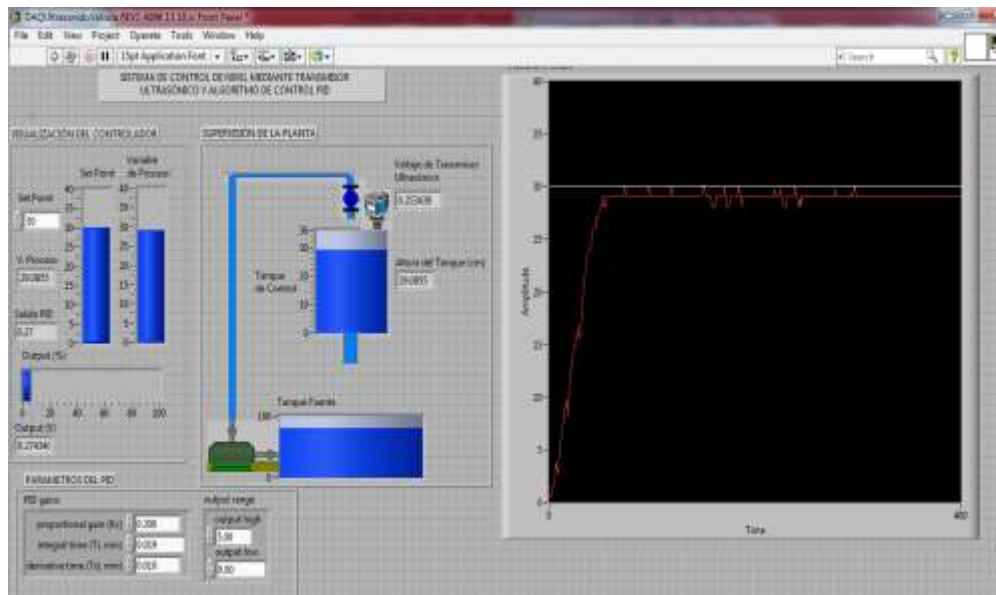


Figura 4.6: Estabilidad del Sistema al sintonizar PID por método de Tanteo – SP=30 cm.

### **4.2.1. Análisis de las características de la Variable del Proceso – Sintonía por Tanteo.**

Al tener estabilizada la Variable del Proceso, procedimos hacer el análisis de sus características (tiempo de subida “Tr”, máximo sobre impulso “Mp”, tiempo de estabilización “ts” y error en estado estacionario “Ep”).

### **Análisis a Set Point = 10 cm**

Para el análisis de las características de la Variable de Proceso, se exportaron los valores de LabView a Excel de manera que se pudo hacer un mejor análisis y visualización de la señal. La Tabla 4.3 en el Anexo 4, muestra estos valores exportados.

La Figura 4.7 muestra la gráfica que se generó a partir de los valores exportados a Excel.

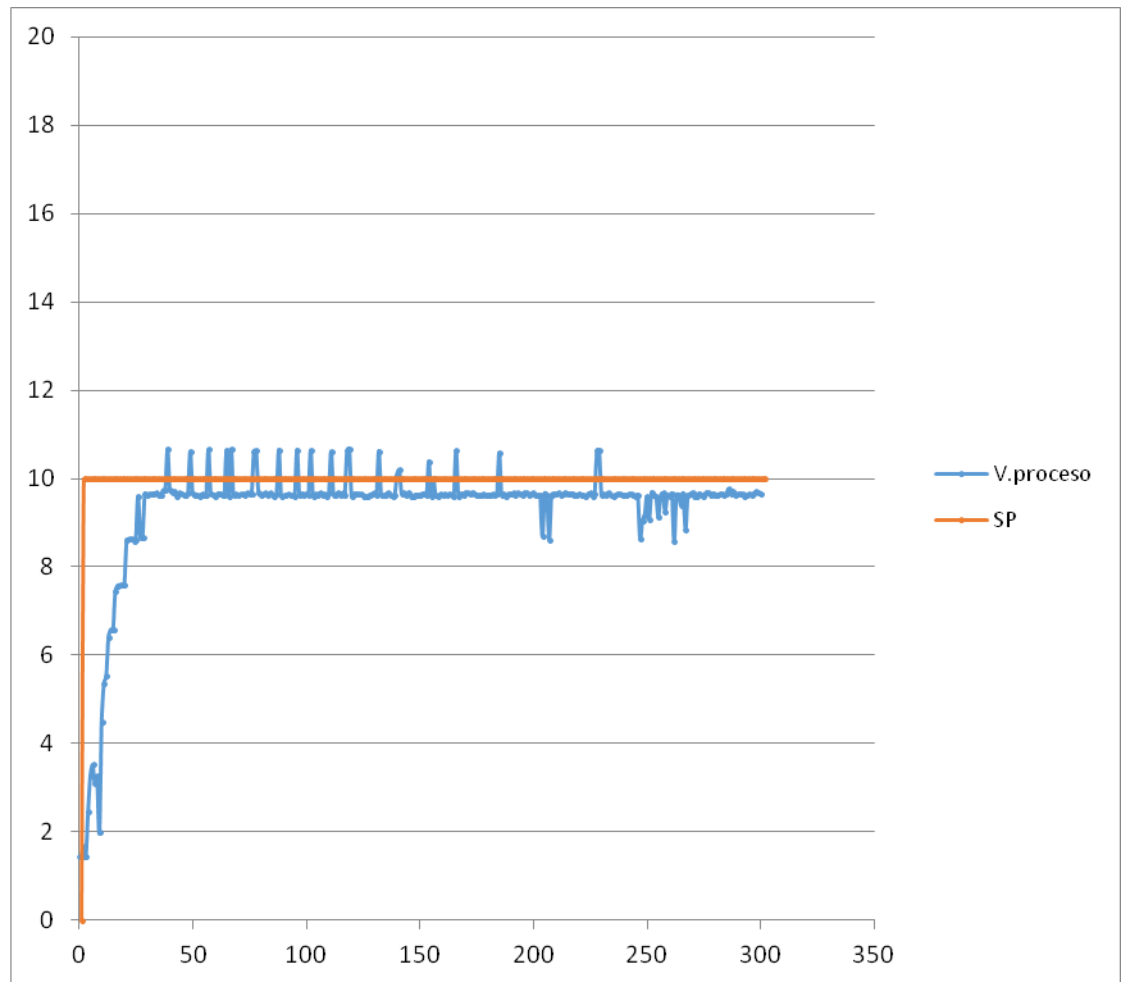


Figura 4.7: Gráfica de estabilidad del sistema al sintonizar PID por Tanteo – SP = 10 cm.

De esta grafica se sacaron los valores de característica de la Variable de proceso (Tabla 3.3).

<b>Tiempo de subida</b>	39 s
<b>Máximo sobre impulso %</b>	6.697
<b>Tiempo de estabilización</b>	40 s
<b>Error en estado estacionario % (respecto al SP)</b>	2.99 (0.299)

Tabla 3.3: Características de Variable de Proceso a Set Point = 10 cm – Sintonía por Tanteo.

### Análisis a Set Point = 30 cm

Para el análisis de las características de la Variable de Proceso, se exportaron los valores de LabView a Excel de manera que se pudo hacer un mejor análisis y visualización de la señal. La Tabla 4.4 en el Anexo 5, muestra estos valores exportados.

La Figura 4.8 muestra la gráfica que se generó a partir de los valores exportados a Excel.

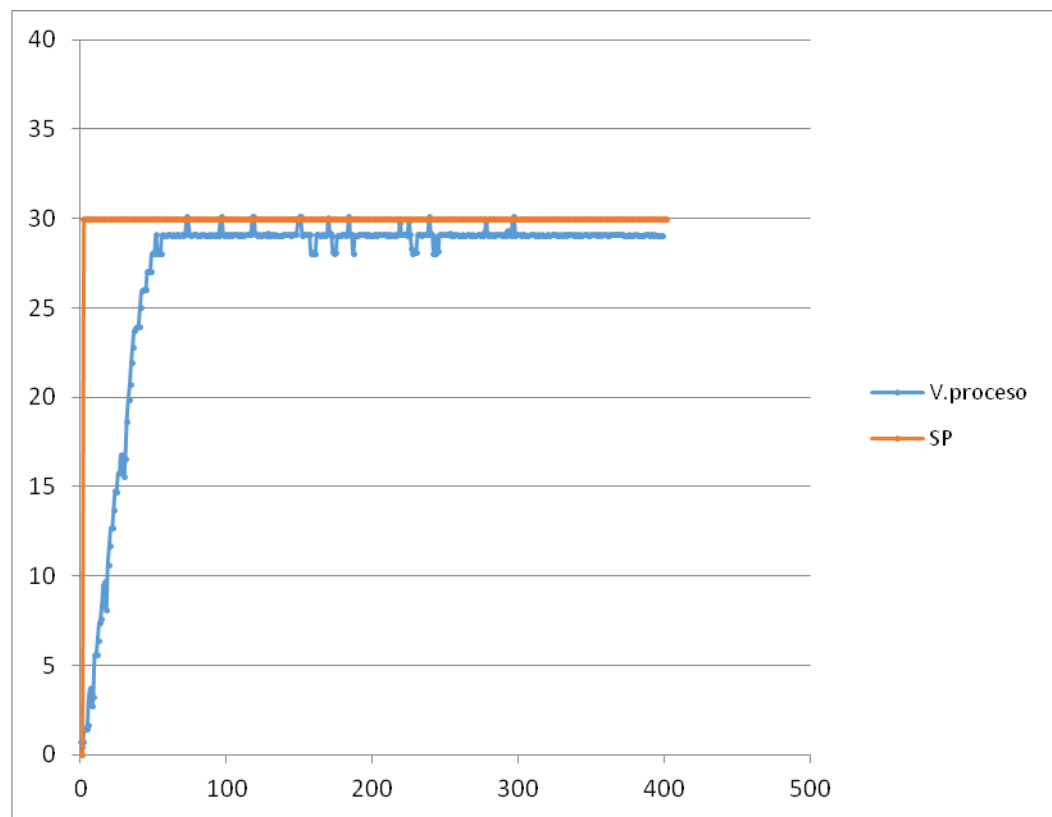


Figura 4.8: Gráfica de estabilidad del sistema al sintonizar PID por Tanteo – SP = 30 cm.

De esta gráfica se sacaron los valores de característica de la Variable de proceso (Tabla 3.4).

<b>Tiempo de subida</b>	73 s
<b>Máximo sobre impulso %</b>	0.398
<b>Tiempo de estabilización</b>	75 s
<b>Error en estado estacionario % (respecto al SP)</b>	1.87 (0.56)

Tabla 3.4: Características de Variable de Proceso a Set Point = 30 cm - Sintonía por tanteo.

### **4.3 COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA VARIABLE DEL PROCESO AL SINTONIZAR EL PID POR MÉTODO DE GANANCIA LÍMITE Y TANTEO.**

Comparamos las características de la Variable del Proceso que se consiguieron de sintonizar el controlador PID por el método de Ganancia Limite y Tanteo. Estas fueron conseguidas al aplicar dos diferentes Set Point: 10 cm y 30 cm.

#### **SET POINT = 10 cm**

El controlador Sintonizado por el método de Ganancia Límite a un Set Point de 10 cm, nos dio una Variable de Proceso estabilizada con las características mostradas en la Tabla 3.1. A diferencia, de la obtenida por método de Tanteo, que se mostraron en la Tabla 3.3, se pudo ver que la conseguida por el método de Tanteo tiene un Tiempo de estabilización mayor (en 10 segundos) que el conseguido por Ganancia Límite; pero, el Error en estado estacionario es mucho menor (en 0.042) acercándose al Punto de Set Point buscado.



### **SET POINT = 30 cm**

El controlador Sintonizado por el método de Ganancia Límite a un Set Point de 30 cm, nos dio una Variable de Proceso estabilizada con las características mostradas en la Tabla 3.2. A diferencia, de la obtenida por método de Tanteo, que se mostraron en la Tabla 3.4, se pudo ver que la conseguida por el método de Tanteo tiene un Tiempo de estabilización mayor (en 15 segundos) que el conseguido por Ganancia Límite; pero, el Error en estado estacionario es mucho menor (en 0.41) acercándose al Punto de Set Point buscado.

En base a este análisis se pudo dar a notar que la sintonía por el método de Tanteo resultó mejor que por el método de Ganancia Límite, al tener una señal más cerca al Punto de Set Point , pese a tener una demora en el tiempo de estabilización.

## CONCLUSIONES

1. Se sintonizó el controlador PID utilizando el método de Ganancia Límite (Ziegler-Nichols) obteniendo una ganancia proporcional “Kp” igual a 0.6, Tiempo integral “Ti” de 0.067 minutos y Tiempo derivativo “Td” de 0.017 minutos; tal como se observó en el Capítulo 3 página 76. Además, se sintonizó el controlador PID utilizando el método por Tanteo obteniendo una ganancia proporcional “Kp” igual a 0.3, Tiempo integral “Ti” de 0.019 minutos y Tiempo derivativo “Td” de 0.01 minutos; lo cual se observó en el Capítulo 3 página 84.
2. Al sintonizar por el método de Ganancia Límite se realizaron las pruebas con el set point de 10 centímetros, obteniendo Error en estado estacionario de 3.41 %(Respecto al SP) o 0.341, Tiempo de estabilización de 30 segundos, Máximo sobre impulso de 5.505 % y Tiempo de subida de 26 segundos. Así mismo con el set point de 30 centímetros se obtuvo un Error estacionario de 3.03 %(Respecto al SP) o 0.91, Tiempo de estabilización de 67 segundos, Máximo sobre impulso de 0.381 % y Tiempo de subida de 66 segundos.

Por otro lado, al sintonizar por el método de Tanteo se realizaron las pruebas con el set point de 10 centímetros obteniendo un Error en estado estacionario de 2.99 %(Respecto al SP) o 0.299, Tiempo de estabilización de 40 segundos, Máximo sobre impulso de 6.69% y Tiempo de subida de 39 segundos. Además, con el set point de 30 centímetros se obtuvo un

Error estacionario de 1.87 % (Respecto al SP) o 0.56, Tiempo de estabilización de 75 segundos, Máximo sobre impulso de 0.398 % y Tiempo de subida de 73 segundos. Finalmente, se comparó y analizó las características de variable de proceso obtenida por ambas sintonías, dando a notar que la conseguida por el método de Tanteo es mucho mejor debido a su poco valor de Error en estado estacionario, pese a tener mayor Tiempo de estabilización.

3. Se mejoró el módulo de medición nivel, existente en el laboratorio de control de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la URP, desarrollado por alumnos en el curso de Taller 4.
4. Se usó la librería de PID.VI de LabView que se encontró en la opción de librerías "Control Design & Simulation" para mostrar la sintonía del controlador PID y controlar la variable nivel.
5. Se usó el software "Team Viewer" para el control remoto de la variable nivel; haciendo uso de una red generada por celular y comunicando ambas máquinas al control del proceso.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda hacer pruebas a los equipos e instrumentos, para la verificación de los valores de los parámetros indicados en la placa, puesto que los manuales pueden contener errores.
2. Cuando se quiere controlar una planta, es indispensable realizar pruebas de la magnitud de los efectos que acarrearán los cambios en las entradas del sistema.
3. Los procesos reales contienen factores de perturbaciones que normalmente en el ámbito estudiantil no se toman mucho en cuenta; es por esta razón, que se recomienda al momento de hacer un diseño de un módulo el informarse de posibles complicaciones dentro de un proceso, a manera de simular un proceso más real.
4. Se recomienda al empezar a trabajar con software y equipos; revisar la documentación técnica, manuales y demás documentos de información de equipos. A manera de evitar posibles problemas al momento de instalación y pruebas.
5. Se recomienda probar sintonizando el controlador por método de Ganancia Límite y luego continuar aplicando ajuste o Tanteo. Debido a que no forma parte de los objetivos del proyecto de tesis, no se ha mostrado esa prueba; pero de realizarse se visualizaría una sintonía más rápida del controlador.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mario Hidalgo. “Desarrollo e implementación de un sistema retroalimentado de control de nivel de líquidos con alimentación continua y variable”. Trabajo de tesis. Univ. Central del Ecuador, Facultad de Ing. Química. 2012
- [2] Diego Benítez. “Diseño y construcción de un sistema de control de líquidos”. Trabajo de tesis. Escuela Politécnica Nacional. Quito. 1994
- [3] Richard Gudiño. “Control de nivel implementado en la estación de entrenamiento GUNT RT 450 del laboratorio de instrumentación industrial”. Trabajo de tesis. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil - Ecuador. 2009
- [4] Rogger Andrade. “Diseño y construcción de un módulo didáctico para medir y controlar caudal y nivel”. Trabajo de tesis. Escuela Politécnica Nacional. Quito. 2010
- [5] Cesar García, Juan Estupiñan. “Modulo virtual de control para nivel y flujo de agua”. Trabajo de tesis. Univ. Pontificia Bolivariana. 2011
- [6] Rogger Andrade. “Diseño y construcción de un módulo didáctico para medir y controlar caudal y nivel”. Trabajo de tesis. Escuela Politécnica Nacional. Quito.2010. Pág. 6
- [7] W.Bolton.“Instrumentación y control industrial”. Editorial Paraninfo. pág. 239 – 243.
- [8]J. Acedo Sánchez. “Instrumentación y control básico de procesos”. Ediciones Díaz de Santos. pág. 440

- [9] J. Acedo Sánchez. “Instrumentación y control básico de procesos”. Ediciones Díaz de Santos. pág. 443 – 444.
- [10] Alfredo Roca. “Control automático de procesos industriales”. Ediciones Díaz de Santos. pág. 136 – 143.
- [11] Alfredo Roca. “Control automático de procesos industriales”. Ediciones Díaz de Santos. pág. 147 – 148.
- [12] Alfredo Roca. “Control automático de procesos industriales”. Ediciones Díaz de Santos. pág. 150 – 153.
- [13] Katsuhiko Ogata. “Ingeniería de control moderna”. Editorial Pearson. pág. 569 – 571.
- [14] José Amable Gonzales López. “Ajuste por tanteo de un controlador PID”. Tiempo Real S.A. 2006.
- [15] Victor M. Alfaro Ruiz. “Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores”. Ingeniería 12 (1.2): 21-36 ,2002 San José, Costa Rica.
- [16] William José López. “Monitoreo remoto de la variable de nivel en el modelo de una planta de procesos industriales mediante un asistente personal digital (PDA) a través de comunicación inalámbrica WIFI”. Trabajo de tesis. Univ. Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería y administración. 2018.
- [17] Ziegler & Nichols. “Optimum Settings for Automatic Controllers”. Paper de desarrollo de Teoría de Ganancia Límite. Nueva York. Noviembre 1942.
- [18] [http://www.igme.es/igme/publica/libros2\\_TH/lib106/pdf/lib106/in\\_4d.pdf](http://www.igme.es/igme/publica/libros2_TH/lib106/pdf/lib106/in_4d.pdf)
- [19] <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>

[20][http://www.physics.ucc.ie/fpetersweb/FrankWeb/courses/PY3108/USB6008\\_Manual.pdf](http://www.physics.ucc.ie/fpetersweb/FrankWeb/courses/PY3108/USB6008_Manual.pdf)

[21] Team Viewer Manual. <http://www.teamviewer.com>

## ANEXOS

### ANEXO 1: CUADRO DE COSTO DE PROYECTO DE TESIS.

Concepto de equipo	Marca	Modelo	Costo Real	Costo para proyecto
<i>Válvula Proporcional de control. Voltaje: 0 -10 VDC</i>	Danfoss	EV260B	S/. 700.00	S/. 700.00
<i>Bomba para impulsión de agua. 0.55 HP</i>	Power Machine	QB60	S/. 180.00	S/. 40.00
<i>Sensor de nivel HC-SR04 y acondicionamiento</i>	-	-	S/. 50.00	S/. 0.00
<i>Tanque para medición de nivel</i>	-	-	S/. 30.00	S/. 30.00
<i>Tanque para alimentación de agua</i>	-	-	S/. 30.00	S/. 0.00
<i>Válvula Check Tipo Y para filtro</i>	-	-	S/. 10.00	S/. 10.00
<i>Tuberías para conexiones en módulo</i>	-	-	S/. 100.00	S/. 20.00
<i>Llaves manuales</i>	-	-	S/. 30.00	S/. 30.00
<i>Maqueta de módulo</i>	-	-	S/. 300.00	S/. 0.00
<i>Marco de fierro para módulo</i>	-	-	S/. 200.00	S/. 0.00
<i>Tarjeta de adquisición de datos – DAQ</i>	Ninstruments	NI-USB 6008	S/. 700.00	S/. 0.00
<i>Software LabView . Sector Académico</i>	Ninstruments	2011	S/. 2,200.00	S/. 0.00
		<b>TOTAL</b>	<b>S/. 4,530.00</b>	<b>S/. 830.00</b>



**ANEXO 2: TABLA DE DATOS EXPORTADOS A EXCEL – SINTONÍA POR MÉTODO DE GANANCIA LÍMITE, SP=10 cm**

Tabla 4.1: Tabla de datos exportados SP=10 cm – Ganancia Límite

<b>Time - Plot 0</b>	<b>Amplitude - Plot 0</b>	<b>Time - Plot 1</b>	<b>Amplitude - Plot 1</b>
7	10	7	4.22003
8	10	8	3.81232
9	10	9	4.49634
10	10	10	5.53717
11	10	11	6.59231
12	10	12	7.37333
13	10	13	7.58996
14	10	14	8.58161
15	10	15	8.58641
16	10	16	8.60395
17	10	17	9.46368
18	10	18	9.63544
19	10	19	8.76535
20	10	20	9.61813
21	10	21	9.60919
22	10	22	9.59393
23	10	23	9.68447
24	10	24	9.62911
25	10	25	9.77714
26	10	26	10.5505
27	10	27	9.59573
28	10	28	9.7657
29	10	29	10.6022
30	10	30	9.61605
31	10	31	9.71123
32	10	32	9.66442
33	10	33	9.6287
34	10	34	9.65896
35	10	35	9.59991
36	10	36	9.69058
37	10	37	9.61439
38	10	38	9.71669
39	10	39	10.681
40	10	40	10.6635

41	10	41	9.6339
42	10	42	9.63207
43	10	43	9.72308
44	10	44	9.72145
45	10	45	9.67511
46	10	46	10.6078
47	10	47	9.70983
48	10	48	9.65344
49	10	49	9.70349
50	10	50	10.601
51	10	51	9.60062
52	10	52	9.64015
53	10	53	9.65438
54	10	54	9.72822
55	10	55	9.68578
56	10	56	9.69181
57	10	57	9.62774
58	10	58	9.66353
59	10	59	9.68996
60	10	60	10.6778
61	10	61	10.6451
62	10	62	10.6418
63	10	63	10.6716
64	10	64	9.64764
65	10	65	9.61839
66	10	66	9.6668
67	10	67	9.59952
68	10	68	9.61404
69	10	69	9.59231
70	10	70	9.60471
71	10	71	9.60668
72	10	72	10.6853
73	10	73	9.65668
74	10	74	9.66191
75	10	75	9.6407
76	10	76	9.60008
77	10	77	9.63499
78	10	78	10.6922
79	10	79	9.62835
80	10	80	9.63709
81	10	81	9.66365

82	10	82	9.67072
83	10	83	9.66604
84	10	84	10.6982
85	10	85	10.6311
86	10	86	9.67901
87	10	87	9.64351
88	10	88	8.73799
89	10	89	9.61355
90	10	90	9.61812
91	10	91	9.75274
92	10	92	9.6585
93	10	93	10.4494
94	10	94	9.65676
95	10	95	9.6126
96	10	96	9.6073
97	10	97	9.99894
98	10	98	9.62982
99	10	99	9.60244
100	10	100	9.59797
101	10	101	9.66098
102	10	102	9.63774
103	10	103	10.1419
104	10	104	9.66948
105	10	105	9.61093
106	10	106	9.68198
107	10	107	9.63247
108	10	108	9.71973
109	10	109	10.2229
110	10	110	9.63707
111	10	111	9.94008
112	10	112	9.65849
113	10	113	9.66353
114	10	114	9.63211
115	10	115	9.596
116	10	116	9.62053
117	10	117	9.62964
118	10	118	9.63777
119	10	119	9.65581
120	10	120	9.85991
121	10	121	10.4511
122	10	122	9.67313

123	10	123	9.87195
124	10	124	9.66981
125	10	125	9.65496
126	10	126	9.6747
127	10	127	9.64733
128	10	128	9.60919
129	10	129	9.59237
130	10	130	9.64513
131	10	131	9.60903
132	10	132	9.66425
133	10	133	9.6556
134	10	134	9.64943
135	10	135	9.62283
136	10	136	9.66361
137	10	137	9.65528
138	10	138	9.6187
139	10	139	9.6353
140	10	140	9.61036
141	10	141	9.67487
142	10	142	9.64413
143	10	143	9.62479
144	10	144	9.60416
145	10	145	9.61198
146	10	146	9.61082
147	10	147	9.66003
148	10	148	9.58958
149	10	149	9.64286
150	10	150	9.61093
151	10	151	9.66107
152	10	152	9.61404
153	10	153	9.67649
154	10	154	9.63431
155	10	155	9.63239
156	10	156	9.64386
157	10	157	9.60416
158	10	158	9.63709
159	10	159	9.59812
160	10	160	9.66724
161	10	161	9.66353
162	10	162	9.6703
163	10	163	9.63709

164	10	164	8.61786
165	10	165	9.60919
166	10	166	9.65695
167	10	167	9.66259
168	10	168	9.67722
169	10	169	9.6428
170	10	170	9.68861
171	10	171	10.6529
172	10	172	9.63176
173	10	173	9.6031
174	10	174	9.67084
175	10	175	9.6273
176	10	176	9.65169
177	10	177	9.64169
178	10	178	9.67327
179	10	179	9.64896
180	10	180	9.61605
181	10	181	9.61623
182	10	182	9.66792
183	10	183	9.62503
184	10	184	9.61623
185	10	185	9.62283
186	10	186	9.63774
187	10	187	9.65262
188	10	188	9.65715
189	10	189	9.65505
190	10	190	9.66527
191	10	191	9.58801
192	10	192	9.60996
193	10	193	9.62857
194	10	194	9.62305
195	10	195	9.67722
196	10	196	9.64145
197	10	197	9.6178
198	10	198	9.68561
199	10	199	9.65423
200	10	200	9.61861
201	10	201	9.61153
202	10	202	9.60919
203	10	203	9.60165
204	10	204	9.65639

205	10	205	9.64453
206	10	206	9.64652
207	10	207	9.66972
208	10	208	9.64083
209	10	209	9.64299
210	10	210	9.6055
211	10	211	9.61261
212	10	212	9.62059
213	10	213	9.6684
214	10	214	9.62911
215	10	215	9.66761
216	10	216	9.62767
217	10	217	9.60225
218	10	218	9.62346
219	10	219	9.62934
220	10	220	9.65676
221	10	221	9.60344
222	10	222	9.68063
223	10	223	9.62917
224	10	224	9.64553
225	10	225	9.63607
226	10	226	9.61461
227	10	227	9.67622
228	10	228	9.60919
229	10	229	9.68449
230	10	230	9.47345

**ANEXO 3: TABLA DE DATOS EXPORTADOS A EXCEL – SINTONÍA POR MÉTODO DE GANANCIA LÍMITE, SP=30 cm**

Tabla 4.2: Tabla de datos exportados SP=30 cm – Ganancia Límite

Time - Plot 0	Amplitude - Plot 0	Time - Plot 1	Amplitude - Plot 1
0	30	0	1.42813
1	30	1	1.43361
2	30	2	3.47954
3	30	3	3.30575
4	30	4	2.52716
5	30	5	3.51323
6	30	6	3.09797
7	30	7	4.49805
8	30	8	3.50086
9	30	9	5.16664
10	30	10	6.40179
11	30	11	6.45243
12	30	12	7.44177
13	30	13	7.57844
14	30	14	8.26205
15	30	15	9.48397
16	30	16	9.65582
17	30	17	10.3517
18	30	18	10.3988
19	30	19	10.5495
20	30	20	12.4446
21	30	21	12.7002
22	30	22	12.7105
23	30	23	14.5885
24	30	24	15.6661
25	30	25	15.7982
26	30	26	15.9088
27	30	27	16.7215
28	30	28	15.7786
29	30	29	16.6919
30	30	30	17.7482
31	30	31	19.8712
32	30	32	19.8606
33	30	33	20.888

34	30	34	21.8177
35	30	35	22.946
36	30	36	23.8469
37	30	37	23.9771
38	30	38	24.9598
39	30	39	24.9751
40	30	40	26.929
41	30	41	27.0327
42	30	42	27.0227
43	30	43	28.031
44	30	44	29.0227
45	30	45	28.0692
46	30	46	29.1077
47	30	47	29.096
48	30	48	29.0836
49	30	49	29.1629
50	30	50	29.0701
51	30	51	29.1286
52	30	52	29.1286
53	30	53	29.0243
54	30	54	29.0788
55	30	55	29.0552
56	30	56	29.0736
57	30	57	29.0772
58	30	58	29.1004
59	30	59	29.0971
60	30	60	29.0698
61	30	61	29.0833
62	30	62	29.1081
63	30	63	29.0729
64	30	64	29.0435
65	30	65	30.0535
66	30	66	30.1143
67	30	67	29.0904
68	30	68	29.1193
69	30	69	29.1202
70	30	70	29.0632
71	30	71	29.1161
72	30	72	29.0625
73	30	73	29.0904
74	30	74	29.0477



75	30	75	29.0488
76	30	76	30.1131
77	30	77	30.1118
78	30	78	29.0965
79	30	79	29.0736
80	30	80	29.1004
81	30	81	29.0921
82	30	82	29.0931
83	30	83	29.1239
84	30	84	29.2092
85	30	85	29.081
86	30	86	30.0775
87	30	87	30.09
88	30	88	29.0897
89	30	89	29.0845
90	30	90	29.0619
91	30	91	29.093
92	30	92	29.0955
93	30	93	29.0841
94	30	94	29.0841
95	30	95	27.0756
96	30	96	29.0162
97	30	97	29.0689
98	30	98	29.1049
99	30	99	29.1218
100	30	100	30.1021
101	30	101	30.0917
102	30	102	29.0806
103	30	103	30.0838
104	30	104	29.125
105	30	105	29.1067
106	30	106	29.0876
107	30	107	29.0485
108	30	108	29.1167
109	30	109	29.0978
110	30	110	30.1025
111	30	111	30.1381
112	30	112	29.0773
113	30	113	29.1182
114	30	114	29.1157
115	30	115	29.0954

116	30	116	29.0395
117	30	117	29.0782
118	30	118	29.08
119	30	119	29.059
120	30	120	30.0753
121	30	121	29.1261
122	30	122	29.9759
123	30	123	29.1031
124	30	124	29.0767
125	30	125	29.066
126	30	126	29.0984
127	30	127	29.1109
128	30	128	29.7392
129	30	129	29.4899
130	30	130	29.6432
131	30	131	29.0766
132	30	132	29.5984
133	30	133	30.1074
134	30	134	29.0707
135	30	135	29.0788
136	30	136	29.0813
137	30	137	29.1243
138	30	138	30.1229
139	30	139	29.0891
140	30	140	29.3724
141	30	141	29.1036
142	30	142	29.0914
143	30	143	29.065
144	30	144	29.0586
145	30	145	29.0946
146	30	146	30.1225
147	30	147	30.1297
148	30	148	29.2419
149	30	149	29.1042
150	30	150	29.1035
151	30	151	29.1058
152	30	152	29.0642
153	30	153	29.102
154	30	154	29.0844
155	30	155	30.1188
156	30	156	29.1899

157	30	157	29.2141
158	30	158	29.0899
159	30	159	29.1119
160	30	160	30.0303
161	30	161	30.0958
162	30	162	29.1708
163	30	163	29.0904
164	30	164	29.0408
165	30	165	29.0908
166	30	166	29.0631
167	30	167	29.0795
168	30	168	29.0719
169	30	169	29.0728
170	30	170	29.0538
171	30	171	30.0578
172	30	172	29.1338
173	30	173	30.051
174	30	174	29.103
175	30	175	29.0718
176	30	176	29.1307
177	30	177	29.0715
178	30	178	29.087
179	30	179	29.0787
180	30	180	30.0907
181	30	181	30.1414
182	30	182	29.0775
183	30	183	29.0754
184	30	184	29.1283
185	30	185	29.0829
186	30	186	29.0642
187	30	187	30.1184
188	30	188	30.1311
189	30	189	29.0868
190	30	190	29.057
191	30	191	29.0727
192	30	192	29.0684
193	30	193	29.0796
194	30	194	29.8042
195	30	195	29.7199
196	30	196	30.113
197	30	197	30.0837

198	30	198	30.0837
199	30	199	24.9291
200	30	200	23.9466
201	30	201	24.9598
202	30	202	25.9954
203	30	203	26.0772
204	30	204	27.027
205	30	205	28.0987
206	30	206	28.0684
207	30	207	28.8264
208	30	208	28.3594
209	30	209	29.073
210	30	210	29.0855
211	30	211	29.1099
212	30	212	29.0752
213	30	213	29.5188
214	30	214	29.0967
215	30	215	29.0658
216	30	216	29.0679
217	30	217	29.0714
218	30	218	29.0922
219	30	219	29.0588
220	30	220	30.1179
221	30	221	30.0785
222	30	222	29.365
223	30	223	29.0789
224	30	224	29.0661
225	30	225	29.0884
226	30	226	29.06
227	30	227	29.0786
228	30	228	29.0822
229	30	229	29.0999
230	30	230	29.0648
231	30	231	29.129
232	30	232	29.0794
233	30	233	29.0951

**ANEXO 4: TABLA DE DATOS EXPORTADOS A EXCEL – SINTONÍA POR MÉTODO TANTEO, SP=10 cm**

Tabla 4.3: Tabla de datos exportados SP=10 cm – Tanteo

Time - Plot 0	Amplitude - Plot 0	Time - Plot 1	Amplitude - Plot 1
0	10	0	1.44466
1	10	1	1.43468
2	10	2	1.68315
3	10	3	1.44285
4	10	4	2.44764
5	10	5	3.27707
6	10	6	3.52153
7	10	7	3.105
8	10	8	3.26286
9	10	9	1.98569
10	10	10	4.50083
11	10	11	5.37348
12	10	12	5.52402
13	10	13	6.41966
14	10	14	6.58418
15	10	15	6.58933
16	10	16	7.44863
17	10	17	7.57654
18	10	18	7.58533
19	10	19	7.58844
20	10	20	7.60854
21	10	21	8.61261
22	10	22	8.62778
23	10	23	8.62635
24	10	24	8.59196
25	10	25	8.6092
26	10	26	9.60165
27	10	27	8.67332
28	10	28	8.67652
29	10	29	9.6612
30	10	30	9.63342
31	10	31	9.65823
32	10	32	9.6407
33	10	33	9.6645

34	10	34	9.66735
35	10	35	9.61157
36	10	36	9.61198
37	10	37	9.73499
38	10	38	9.73364
39	10	39	10.6697
40	10	40	9.73334
41	10	41	9.67454
42	10	42	9.71706
43	10	43	9.60243
44	10	44	9.67197
45	10	45	9.65676
46	10	46	9.62746
47	10	47	9.6165
48	10	48	9.66923
49	10	49	10.6163
50	10	50	9.65695
51	10	51	9.62727
52	10	52	9.62383
53	10	53	9.59366
54	10	54	9.64605
55	10	55	9.61093
56	10	56	9.61685
57	10	57	10.6564
58	10	58	9.65499
59	10	59	9.63561
60	10	60	9.58304
61	10	61	9.65722
62	10	62	9.66594
63	10	63	9.63707
64	10	64	9.63298
65	10	65	10.6475
66	10	66	9.58366
67	10	67	10.6679
68	10	68	9.62139
69	10	69	9.64921
70	10	70	9.63512
71	10	71	9.64324
72	10	72	9.63888
73	10	73	9.61404
74	10	74	9.66895

75	10	75	9.64124
76	10	76	9.64166
77	10	77	10.618
78	10	78	10.6249
79	10	79	9.66793
80	10	80	9.61372
81	10	81	9.63913
82	10	82	9.6681
83	10	83	9.61439
84	10	84	9.66864
85	10	85	9.63374
86	10	86	9.5898
87	10	87	9.66602
88	10	88	10.652
89	10	89	9.60035
90	10	90	9.60996
91	10	91	9.61431
92	10	92	9.64177
93	10	93	9.62679
94	10	94	9.61946
95	10	95	9.60919
96	10	96	10.6499
97	10	97	9.63387
98	10	98	9.66295
99	10	99	9.61723
100	10	100	9.65921
101	10	101	9.63108
102	10	102	10.6392
103	10	103	9.60739
104	10	104	9.63886
105	10	105	9.63682
106	10	106	9.67331
107	10	107	9.63774
108	10	108	9.6497
109	10	109	9.60137
110	10	110	9.67375
111	10	111	10.614
112	10	112	9.62757
113	10	113	9.62803
114	10	114	9.6813
115	10	115	9.62839

116	10	116	9.67891
117	10	117	9.61673
118	10	118	10.6249
119	10	119	10.6717
120	10	120	9.59164
121	10	121	9.64351
122	10	122	9.66326
123	10	123	9.65151
124	10	124	9.64123
125	10	125	9.60378
126	10	126	9.60254
127	10	127	9.59556
128	10	128	9.6353
129	10	129	9.64989
130	10	130	9.67197
131	10	131	9.63068
132	10	132	10.6229
133	10	133	9.62422
134	10	134	9.61847
135	10	135	9.63175
136	10	136	9.68252
137	10	137	9.63342
138	10	138	9.60395
139	10	139	9.63499
140	10	140	10.0865
141	10	141	10.1895
142	10	142	9.6602
143	10	143	9.67533
144	10	144	9.60947
145	10	145	9.68561
146	10	146	9.60544
147	10	147	9.596
148	10	148	9.63374
149	10	149	9.6284
150	10	150	9.63127
151	10	151	9.65419
152	10	152	9.65097
153	10	153	9.61188
154	10	154	10.3907
155	10	155	9.596
156	10	156	9.99934



157	10	157	9.60981
158	10	158	9.60395
159	10	159	9.64481
160	10	160	9.63463
161	10	161	9.64351
162	10	162	9.62632
163	10	163	9.65576
164	10	164	9.61691
165	10	165	9.60471
166	10	166	10.6347
167	10	167	9.60806
168	10	168	9.65533
169	10	169	9.62383
170	10	170	9.67224
171	10	171	9.66923
172	10	172	9.64508
173	10	173	9.68722
174	10	174	9.65284
175	10	175	9.62941
176	10	176	9.62277
177	10	177	9.6213
178	10	178	9.64365
179	10	179	9.62013
180	10	180	9.63152
181	10	181	9.62917
182	10	182	9.65011
183	10	183	9.6178
184	10	184	9.64136
185	10	185	10.5846
186	10	186	9.62897
187	10	187	9.6507
188	10	188	9.60892
189	10	189	9.6503
190	10	190	9.63934
191	10	191	9.66783
192	10	192	9.62938
193	10	193	9.66895
194	10	194	9.65667
195	10	195	9.62454
196	10	196	9.67085
197	10	197	9.67067

198	10	198	9.6353
199	10	199	9.65585
200	10	200	9.67403
201	10	201	9.63642
202	10	202	9.61973
203	10	203	9.61282
204	10	204	8.69221
205	10	205	9.66604
206	10	206	9.62992
207	10	207	8.61948
208	10	208	9.63249
209	10	209	9.66012
210	10	210	9.65406
211	10	211	9.67538
212	10	212	9.62378
213	10	213	9.64378
214	10	214	9.68567
215	10	215	9.65855
216	10	216	9.6556
217	10	217	9.66447
218	10	218	9.63759
219	10	219	9.62383
220	10	220	9.65306
221	10	221	9.6323
222	10	222	9.63152
223	10	223	9.5911
224	10	224	9.63983
225	10	225	9.6717
226	10	226	9.59789
227	10	227	9.66096
228	10	228	10.6363
229	10	229	10.6371
230	10	230	9.61225
231	10	231	9.64217
232	10	232	9.63804
233	10	233	9.67832
234	10	234	9.61812
235	10	235	9.59539
236	10	236	9.62081
237	10	237	9.6545
238	10	238	9.64643

239	10	239	9.6358
240	10	240	9.61775
241	10	241	9.62163
242	10	242	9.64239
243	10	243	9.64854
244	10	244	9.60996
245	10	245	9.60008
246	10	246	9.63553
247	10	247	8.62957
248	10	248	9.04769
249	10	249	9.15766
250	10	250	9.59573
251	10	251	9.08198
252	10	252	9.68533
253	10	253	9.61867
254	10	254	9.60919
255	10	255	9.13152
256	10	256	9.60097
257	10	257	9.66767
258	10	258	9.24852
259	10	259	9.627
260	10	260	9.58828
261	10	261	9.66523
262	10	262	8.5734
263	10	263	9.63179
264	10	264	9.63661
265	10	265	9.39242
266	10	266	9.65953
267	10	267	8.84454
268	10	268	9.62911
269	10	269	9.63988
270	10	270	9.6856
271	10	271	9.60668
272	10	272	9.6083
273	10	273	9.66492
274	10	274	9.60942
275	10	275	9.59767
276	10	276	9.66923
277	10	277	9.6813
278	10	278	9.61874
279	10	279	9.66356

280	10	280	9.6336
281	10	281	9.62938
282	10	282	9.64993
283	10	283	9.65379
284	10	284	9.62031
285	10	285	9.66237
286	10	286	9.7661
287	10	287	9.64145
288	10	288	9.71383
289	10	289	9.61588
290	10	290	9.65695
291	10	291	9.65541
292	10	292	9.65122
293	10	293	9.58689
294	10	294	9.6178
295	10	295	9.65852
296	10	296	9.62803
297	10	297	9.66326
298	10	298	9.70052
299	10	299	9.67331
300	10	300	9.65874

**ANEXO 5: TABLA DE DATOS EXPORTADOS A EXCEL – SINTONÍA POR MÉTODO TANTEO, SP=30 cm**

Tabla 4.4: Tabla de datos exportados SP=30 cm – Tanteo

Time - Plot 0	Amplitude - Plot 0	Time - Plot 1	Amplitude - Plot 1
0	30	0	0.700196
1	30	1	0.438737
2	30	2	0.700955
3	30	3	1.46179
4	30	4	1.44447
5	30	5	1.69192
6	30	6	3.21621
7	30	7	3.73856
8	30	8	2.73602
9	30	9	3.21762
10	30	10	5.57545
11	30	11	5.58495
12	30	12	6.4092
13	30	13	7.36206
14	30	14	7.61082
15	30	15	8.42025
16	30	16	9.50748
17	30	17	9.65649
18	30	18	8.12952
19	30	19	10.6396
20	30	20	11.6812
21	30	21	12.6873
22	30	22	12.687
23	30	23	13.7277
24	30	24	14.7432
25	30	25	14.7356
26	30	26	15.7657
27	30	27	15.7665
28	30	28	16.8056
29	30	29	15.7814
30	30	30	15.5893
31	30	31	16.6021
32	30	32	18.6792
33	30	33	19.8841

34	30	34	20.7334
35	30	35	21.9341
36	30	36	22.8309
37	30	37	23.7376
38	30	38	23.8664
39	30	39	23.9673
40	30	40	23.9699
41	30	41	24.9956
42	30	42	25.9305
43	30	43	26.0053
44	30	44	26.022
45	30	45	26.0199
46	30	46	27.0553
47	30	47	27.0303
48	30	48	27.0566
49	30	49	28.0311
50	30	50	28.0928
51	30	51	28.0417
52	30	52	29.1072
53	30	53	28.0492
54	30	54	28.0496
55	30	55	28.0403
56	30	56	29.1061
57	30	57	29.0554
58	30	58	29.0689
59	30	59	29.0659
60	30	60	29.1003
61	30	61	29.1018
62	30	62	29.0695
63	30	63	29.1006
64	30	64	29.0461
65	30	65	29.0527
66	30	66	29.1079
67	30	67	29.099
68	30	68	29.0721
69	30	69	29.0782
70	30	70	29.0642
71	30	71	29.1247
72	30	72	29.0816
73	30	73	30.1195
74	30	74	29.948

75	30	75	29.0943
76	30	76	29.0766
77	30	77	29.0779
78	30	78	29.1222
79	30	79	29.079
80	30	80	29.0406
81	30	81	29.0736
82	30	82	29.0651
83	30	83	29.103
84	30	84	29.1068
85	30	85	29.0738
86	30	86	29.0727
87	30	87	29.0679
88	30	88	29.1054
89	30	89	29.0418
90	30	90	29.1134
91	30	91	29.0727
92	30	92	29.0891
93	30	93	29.0447
94	30	94	29.0943
95	30	95	29.0553
96	30	96	29.9443
97	30	97	30.1239
98	30	98	29.077
99	30	99	29.0886
100	30	100	29.1091
101	30	101	29.0571
102	30	102	29.0777
103	30	103	29.1048
104	30	104	29.0749
105	30	105	29.0811
106	30	106	29.1213
107	30	107	29.0951
108	30	108	29.039
109	30	109	29.0896
110	30	110	29.0389
111	30	111	29.0918
112	30	112	29.0447
113	30	113	29.0848
114	30	114	29.1008
115	30	115	29.1024

116	30	116	29.0879
117	30	117	29.1347
118	30	118	30.1008
119	30	119	30.0941
120	30	120	29.0895
121	30	121	29.069
122	30	122	29.0879
123	30	123	29.0761
124	30	124	29.0606
125	30	125	29.0824
126	30	126	29.1045
127	30	127	29.0688
128	30	128	29.154
129	30	129	29.0586
130	30	130	29.0684
131	30	131	29.1036
132	30	132	29.0848
133	30	133	29.0717
134	30	134	29.1172
135	30	135	29.0737
136	30	136	29.0533
137	30	137	29.0451
138	30	138	29.049
139	30	139	29.0788
140	30	140	29.0904
141	30	141	29.0859
142	30	142	29.0913
143	30	143	29.0788
144	30	144	29.0724
145	30	145	29.0882
146	30	146	29.137
147	30	147	29.0945
148	30	148	29.0826
149	30	149	29.7238
150	30	150	30.1004
151	30	151	30.1359
152	30	152	29.0729
153	30	153	29.1112
154	30	154	29.0992
155	30	155	29.0999
156	30	156	29.0794



157	30	157	29.0811
158	30	158	28.0623
159	30	159	28.0867
160	30	160	28.0525
161	30	161	28.0682
162	30	162	29.1079
163	30	163	29.1076
164	30	164	29.0515
165	30	165	29.0979
166	30	166	29.0896
167	30	167	29.0683
168	30	168	29.0597
169	30	169	29.1172
170	30	170	30.0472
171	30	171	29.1563
172	30	172	29.0766
173	30	173	28.0789
174	30	174	28.0264
175	30	175	28.0766
176	30	176	29.0328
177	30	177	29.0485
178	30	178	29.0611
179	30	179	29.1397
180	30	180	29.1066
181	30	181	29.1263
182	30	182	29.0672
183	30	183	29.1124
184	30	184	30.1308
185	30	185	29.0685
186	30	186	29.1283
187	30	187	28.0351
188	30	188	29.0589
189	30	189	29.0155
190	30	190	29.0701
191	30	191	29.1215
192	30	192	29.1026
193	30	193	29.0821
194	30	194	29.092
195	30	195	29.1227
196	30	196	29.0504
197	30	197	29.09

198	30	198	29.1066
199	30	199	29.0497
200	30	200	29.0363
201	30	201	29.1149
202	30	202	29.0869
203	30	203	29.0618
204	30	204	29.1131
205	30	205	29.105
206	30	206	29.096
207	30	207	29.0911
208	30	208	29.0949
209	30	209	29.1041
210	30	210	29.0728
211	30	211	29.0884
212	30	212	29.0716
213	30	213	29.0953
214	30	214	29.0685
215	30	215	29.1033
216	30	216	29.0235
217	30	217	29.0921
218	30	218	29.0844
219	30	219	29.7623
220	30	220	29.0953
221	30	221	29.0852
222	30	222	29.0912
223	30	223	29.1065
224	30	224	29.0751
225	30	225	29.8097
226	30	226	29.095
227	30	227	28.3467
228	30	228	28.0583
229	30	229	28.0975
230	30	230	28.0827
231	30	231	29.1045
232	30	232	29.0796
233	30	233	29.0858
234	30	234	29.0722
235	30	235	29.0886
236	30	236	29.1131
237	30	237	29.095
238	30	238	29.0847

239	30	239	30.1109
240	30	240	29.2197
241	30	241	29.0862
242	30	242	28.0606
243	30	243	28.0592
244	30	244	29.0035
245	30	245	28.1536
246	30	246	29.0869
247	30	247	29.0792
248	30	248	29.0804
249	30	249	29.1031
250	30	250	29.1022
251	30	251	29.1196
252	30	252	29.0806
253	30	253	29.1663
254	30	254	29.0607
255	30	255	29.0952
256	30	256	29.053
257	30	257	29.0919
258	30	258	29.0898
259	30	259	29.0738
260	30	260	29.0382
261	30	261	29.0602
262	30	262	29.1172
263	30	263	29.0629
264	30	264	29.0563
265	30	265	29.0837
266	30	266	29.096
267	30	267	29.0688
268	30	268	29.0358
269	30	269	29.0809
270	30	270	29.0719
271	30	271	29.0388
272	30	272	29.1206
273	30	273	29.1231
274	30	274	29.0754
275	30	275	29.0979
276	30	276	29.06
277	30	277	29.2354
278	30	278	29.8149
279	30	279	29.0355

280	30	280	29.0977
281	30	281	29.0788
282	30	282	29.0458
283	30	283	29.0868
284	30	284	29.0717
285	30	285	29.0883
286	30	286	29.0906
287	30	287	29.1174
288	30	288	29.1156
289	30	289	29.0238
290	30	290	29.1215
291	30	291	29.1227
292	30	292	29.0752
293	30	293	29.3483
294	30	294	29.0944
295	30	295	29.0604
296	30	296	29.8541
297	30	297	30.1254
298	30	298	29.0415
299	30	299	29.1024
300	30	300	29.0799
301	30	301	29.0784
302	30	302	29.0628
303	30	303	29.1046
304	30	304	29.0965
305	30	305	29.0461
306	30	306	29.072
307	30	307	29.0374
308	30	308	29.1125
309	30	309	29.1118
310	30	310	29.098
311	30	311	29.1113
312	30	312	29.0642
313	30	313	29.0554
314	30	314	29.0937
315	30	315	29.0655
316	30	316	29.1072
317	30	317	29.0605
318	30	318	29.0673
319	30	319	29.067
320	30	320	29.1081

321	30	321	29.111
322	30	322	29.0388
323	30	323	29.0969
324	30	324	29.1006
325	30	325	29.0931
326	30	326	29.1031
327	30	327	29.0623
328	30	328	29.0629
329	30	329	29.0781
330	30	330	29.0701
331	30	331	29.1213
332	30	332	29.0868
333	30	333	29.0733
334	30	334	29.1075
335	30	335	29.0919
336	30	336	29.0999
337	30	337	29.0799
338	30	338	29.0531
339	30	339	29.0845
340	30	340	29.0674
341	30	341	29.0836
342	30	342	29.058
343	30	343	29.1049
344	30	344	29.0716
345	30	345	29.0812
346	30	346	29.1172
347	30	347	29.0923
348	30	348	29.071
349	30	349	29.0507
350	30	350	29.119
351	30	351	29.0827
352	30	352	29.0952
353	30	353	29.0792
354	30	354	29.0752
355	30	355	29.1076
356	30	356	29.0951
357	30	357	29.0751
358	30	358	29.0923
359	30	359	29.1015
360	30	360	29.1001
361	30	361	29.0736

362	30	362	29.0644
363	30	363	29.0961
364	30	364	29.0982
365	30	365	29.0823
366	30	366	29.1196
367	30	367	29.119
368	30	368	29.0899
369	30	369	29.0923
370	30	370	29.1142
371	30	371	29.111
372	30	372	29.0929
373	30	373	29.0775
374	30	374	29.058
375	30	375	29.0751
376	30	376	29.0966
377	30	377	29.0765
378	30	378	29.0608
379	30	379	29.0288
380	30	380	29.0869
381	30	381	29.1081
382	30	382	29.0761
383	30	383	29.0577
384	30	384	29.0664
385	30	385	29.0444
386	30	386	29.0768
387	30	387	29.0794
388	30	388	29.0993
389	30	389	29.0999
390	30	390	29.0706
391	30	391	29.0964
392	30	392	29.0967
393	30	393	29.0727
394	30	394	29.0921
395	30	395	29.0461
396	30	396	29.0545
397	30	397	29.0712
398	30	398	29.062
399	30	399	29.0712
400	30	400	29.0798