

efectúan los ajustes después de un cambio en el valor de referencia o cambio en la carga usando la técnica de reconocimiento de patrón de respuesta. Igual que en el caso del controlador EXACT® se basan en el período y las razones de amortiguamiento y sobrepaso de la variable de proceso para hacer un ajuste más preciso de los parámetros de sintonización.

En la tabla siguiente se hace una comparación de las ventajas que presentan de los métodos de reconocimiento de patrón de respuesta y del relevador.

Tabla 3.2 Comparación entre los métodos de reconocimiento del patrón de respuesta y del relevador.

	Reconocimiento de patrón de respuesta	Relevador
Pre-sintonización	Si	No
Rapidez	Lento	Rápido
Precisión	Buena	Moderada
Tamaño de Programa	Grande	Pequeño
Inmunidad al Ruido	Pobre	Media
Perturbación del Proceso	No	Media

### 3.6.3 Minimización de la Integral del Error Absoluto (IAE)

Este método de autosintonización hace uso de uno de los procedimientos utilizados en la práctica para determinar si un lazo de control está sintonizado adecuadamente.

#### 3.6.3.1 Sistema de Control Distribuido LoopTune II del TDC 3000X de Honeywell®

Este procedimiento matemático es uno de los cuatro métodos opcionales que se tienen en el paquete LoopTune II del Sistema de Control Distribuido TDC 3000X de Honeywell®.

Este procedimiento consiste en realizar una minimización formal del criterio de Integración del Error Absoluto (IAE) haciendo cambios pequeños en los parámetros de sintonización y evaluando el IAE resultante. En la información de referencia no se tienen datos del criterio usado para determinar los cambios que se realizan en los parámetros de sintonización ni de la cantidad de veces que se realiza la evaluación o cuando se considera que la integral del error absoluto tiene el valor mínimo.

El procedimiento anterior es una técnica muy sofisticada pero probablemente no aplicable cuando los cambios en las características del proceso sean más rápidos que el tiempo que se requiere para efectuar la operación de minimización del IAE para una determinada condición de operación.

### 3.6.4 Modelos Matemáticos.

Los controladores con autosintonización basada en modelos matemáticos hacen uso de la gran capacidad de procesamiento de información de los procesadores actuales. Del modelo matemático obtenido se determinan los parámetros de sintonización del control PID.

#### 3.6.4.1 Controlador Electromax V de Leeds & Northrup®

En el controlador Electromax V de Leeds & Northrup® la autosintonización se basa en la estimación de los parámetros de un modelo discreto de segundo orden. El controlador realiza un muestreo de alta velocidad en la variable controlada por lo que prácticamente se puede considerar como un controlador analógico. Para la estimación de los parámetros del modelo se usa una rapidez de muestreo menor que depende del tiempo de respuesta especificado.

Para iniciar el proceso de autosintonización se requiere que el operador fije los siguientes parámetros:

- Los valores iniciales de las ganancias del controlador PID. Estos valores son necesarios porque el proceso de autosintonización se ejecuta con el lazo cerrado.
  - La magnitud de cambio admisible en el valor de referencia. Este dato determina la amplitud de los pulsos. Para fijar su valor se debe considerar una magnitud mayor que el 1% del *span* y menor que la mitad de la banda proporcional, pero no tan grande que lleve el sistema a saturación.
-

- El tiempo de respuesta de la variable de proceso (tiempo que se requiere para obtener el 90% de la respuesta a una entrada en escalón). Es un parámetro crítico. A partir de este valor se determina el período de la perturbación, el período de muestreo para la obtención del modelo, y la respuesta deseada del sistema de lazo cerrado.

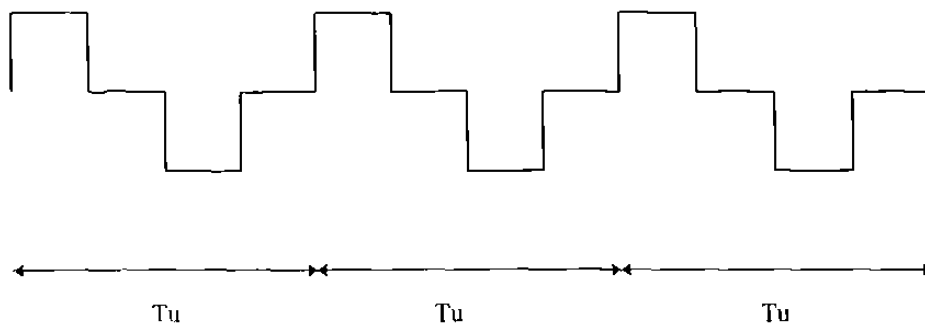


Fig. 3.12 Cambios en el valor de referencia para obtener un modelo matemático del sistema de control.

La estimación de los parámetros del controlador se hace a partir de una secuencia de cambios en el valor de referencia. Los cambios son ciclos de pulsos positivos y negativos como se muestra en la figura 3.12. Los parámetros  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  y  $b_2$  son estimados para el modelo discreto en el tiempo

$$y(t) + a_1y(t-h) + a_2y(t-2h) = b_1u(t-h) + b_2u(t-2h) \quad (3.20)$$

y se estiman recursivamente por el método de la variable instrumental.

Se usan las siguientes fórmulas:

$$\theta(t+1) = \theta(t) + \frac{P(t)}{1 + \psi^T(t)P(t)\varphi(t)} \psi(t)[y(t+1) - \theta^T(t)\varphi(t)] \quad (3.21)$$

$$P(t+1) = P(t) - P(t)\psi(t) \frac{1}{1 + \psi^T(t)P(t)\varphi(t)} \varphi^T(t)P(t) + D \quad (3.22)$$

donde  $D$  es una matriz positiva,  $\theta$  es un factor de estimación de parámetros

$$\theta = [a_1, a_2, b_1, b_2]^T \quad (3.23)$$

y  $\varphi$  es un vector de regresión

$$\varphi(t) = [-y(t) \quad y(t-1)u(t)u(t-1)]^T \quad (3.24)$$

Ademas,  $\psi$  denota al vector de variable instrumental

$$\psi(t) = [-y_m(t) \quad y_m(t-1)u(t)u(t-1)]^T \quad (3.25)$$

donde  $y_m$  es la salida del modelo calculado de

$$y_m(t) = \theta^T(t-1)\psi(t-1) \quad (3.26)$$

El período de muestreo usado para la estimación del modelo debe ser mayor que el tiempo de retardo del sistema. No se tienen detalles pero parece razonable relacionarlo con el tiempo de respuesta especificado

### 3.6.4.2 Controlador 6355 de Turnbull Control Systems®

El controlador 6355 de Turnbull Control Systems® utiliza para su autosintonización un modelo basado en la estimación de los parámetros de una función de transferencia discreta de segundo orden que tiene la forma

$$H(z) = \frac{(z+1)(b_0z+b_1)}{z^2+a_1z+a_2} z^{-d} \quad (3.27)$$

La razón para escoger este modelo es que el muestreo del controlador es muy rápido (0.04 s), así que su operación es esencialmente la de un controlador analógico. El período de muestreo para la estimación de los parámetros es crucial. Se selecciona de aproximadamente un décimo del valor de la constante de tiempo dominante de lazo cerrado. La estimación de los parámetros se hace por el método de mínimos cuadrados recursivos con un valor de olvido (*forgetting*) cercano a la unidad. La estimación se efectúa con el lazo cerrado. Las últimas versiones del controlador también contienen un predictor de Smith para compensar por los tiempos muertos.

El modelo discreto de segundo orden se convierte a una función de transferencia continua en el tiempo con la transformación de Tustin,

$$G(S) = H \left( \frac{1+sT/2}{1-sT/2} \right) \quad (3.28)$$

Los parámetros del controlador se seleccionan para obtener un margen de ganancia de 60° con un valor de *Mp* igual a 1.2. Alrededor de este punto se evalúa la pendiente de la curva de magnitud y fase para asegurarse que el tiempo muerto no produzca como resultado un margen de ganancia pobre.

Como la estimación de los parámetros se hace en lazo cerrado es necesario que se den ciertos valores iniciales a las ganancias del controlador PID y que éstas produzcan una respuesta aceptable. Para inicializar el PID se incluye en este controlador un procedimiento de pre-sintonización que es una modificación del método de reacción del proceso y muy parecido al usado en otros controladores como los modelos 2003 y el 2004 de LFE® y el 2000 de West Instruments® (ver sección 3.4.1)

El procedimiento de pre-sintonización es como sigue:

Inicialmente se especifica la amplitud para el cambio en escalón de la señal de control y la desviación máxima permisible de la variable controlada durante el proceso de pre-sintonización. El cambio especificado para la señal de control debe ser suficientemente grande para que produzca un cambio de por lo menos 50% del valor indicado como máximo permisible en la variable controlada. Al iniciarse la operación del controlador en el modo automático se inicia también el proceso de pre-sintonización aplicando el cambio en escalón a la salida del controlador. Cuando la variable controlada alcanza el 50% de su valor especificado, la salida del controlador se invierte y luego se invierte nuevamente como se muestra en la figura 3.10.

El proceso de autosintonización (ajuste fino) funciona continuamente cuando el controlador está en operación automática. Si los parámetros en uso difieren en un determinado porcentaje, fijado por el operador, de los parámetros determinados automáticamente y si el factor de confiabilidad es suficientemente alto (no se tiene información de como se determina), se enciende y apaga la carátula del controlador para llamar la atención del operador. La decisión de aceptar o no los nuevos parámetros siempre recae en el operador.

# CAPÍTULO 4

## IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE AUTOSINTONIZACIÓN

### 4.1 Introducción

En los capítulos anteriores se expusieron los principios básicos de control, la operación del controlador programable, su forma de programación y los métodos de sintonización y autosintonización usados en diferentes controladores disponibles comercialmente. En este capítulo se hará una descripción general de la planta y de su funcionamiento, se analizará la programación del PLC para lograr la autosintonización de la función de control PID, se describirán los experimentos realizados, se presentarán los resultados obtenidos y se hará un análisis de éstos.



## 4.2 Descripción de la planta

Las variables que más comúnmente se miden y controlan en los procesos industriales son la temperatura, la presión, el nivel y el flujo. En la planta física de que se dispone pueden ser controladas las cuatro variables anteriores. Sin embargo, se decidió desarrollar el proceso de autosintonización en un lazo de control de nivel porque una de sus ventajas es que éste puede ser directamente observable, a diferencia de las otras variables mencionadas

Los elementos que intervienen en el sistema de control de nivel son: una bomba centrífuga [1], dos tanques [2] y [3], un transmisor de nivel [4], el PLC [5], una válvula reguladora [6] y una válvula manual situada en la alimentación [7], una válvula reguladora en la descarga [8], una válvula de recirculación [9], una válvula manual a la descarga del tanque superior [10], un convertidor de corriente a presión [11] y uno de presión a corriente [12], así como un tanque de almacenamiento [13]. En la figura 4.1 se indican los elementos que forman parte del sistema de control.

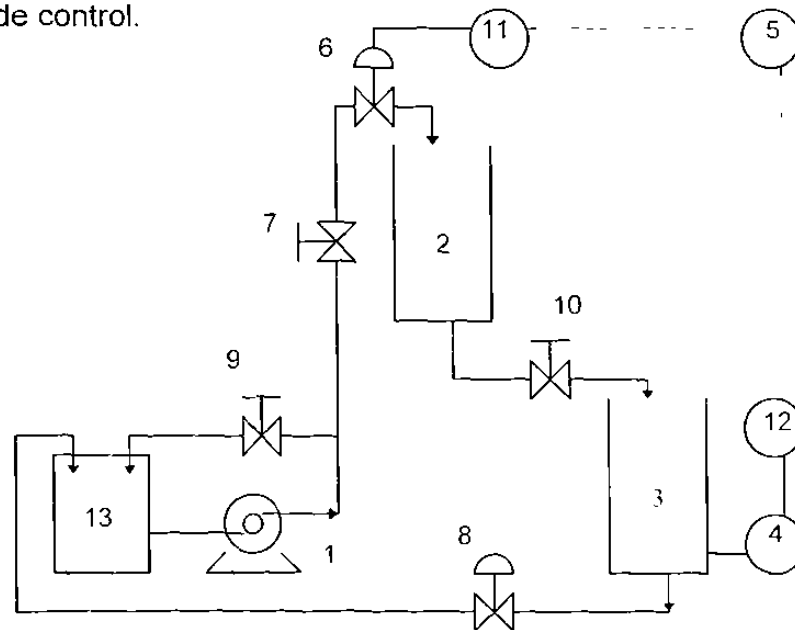


Fig. 4.1 Elementos que forman parte del sistema de control

### 4.3 Operación del proceso

El agua contenida en el tanque de almacenamiento se alimenta al tanque superior por medio de una bomba centrífuga. En la descarga de la bomba se tiene una tubería de recirculación con una válvula manual lo que permite ajustar la presión en la descarga. El flujo de agua al tanque superior se regula por una válvula de control para mantener el nivel en el valor deseado. Adicionalmente en la tubería de alimentación se tiene una válvula de operación manual que puede ser utilizada para introducir perturbaciones al sistema o regular el flujo máximo de alimentación de agua.

Desde el tanque superior el agua fluye, por gravedad, a través de una válvula de operación manual, al tanque inferior que es donde se desea controlar el nivel. La válvula manual permite ajustar el flujo de líquido entre el tanque superior e inferior lo que permite modificar el tiempo de retraso en la respuesta del sistema.

El tanque inferior tiene un transmisor neumático, del tipo presión diferencial de equilibrio de fuerzas, con salida de 3 a 15 lb/plg<sup>2</sup> calibrado de 0 a 90 cm medidos a partir del fondo del tanque. La señal de salida del transmisor se envía a un convertidor de presión a corriente que cambia la señal de 3 a 15 lb/plg<sup>2</sup> a una señal de 4 a 20 mA para que pueda ser recibida por el PLC.

El PLC tiene una interfase analógica que permite recibir hasta cuatro señales en el rango de 4 a 20 mA ó de -10 a + 10 VCD. La señal de 4 a 20 mA, que representa el nivel, se recibe en la interfase analógica de entrada donde se convierte a una señal digital en el rango de 0 a 32000. Esta señal, ya digitalizada, se compara con el valor deseado del nivel y la diferencia o error se utiliza en el algoritmo de control PID para calcular la señal de corrección. La señal de corrección calculada por el procesador se convierte de digital a

analógica de corriente en la tarjeta de interfase de salida del PLC. Dicha tarjeta maneja hasta dos salidas en el rango de 4 a 20 mA.

Antes de llegar a la válvula de control, que es de operación neumática, la señal de corrección pasa a través del convertidor de corriente a presión para sufrir una nueva conversión, ahora de 4 a 20 mA al rango de 3 a 15 lb/plg<sup>2</sup>. La válvula de control es normalmente cerrada por lo que abre proporcionalmente a la señal recibida regulando el flujo de agua al tanque superior, controlando así el nivel del líquido en el tanque inferior.

#### 4.4 El proceso de autosintonización

El proceso de autosintonización está basado en el bloque de función PID disponible para la programación del PLC. Por medio del programa desarrollado se logra el ajuste automático de las ganancias de cada una de las acciones proporcional, integral y derivativa, que dan como resultado un buen control de la variable de proceso.

Como lo indica el título de esta tesis, el procedimiento empleado para lograr la autosintonización se basa en el método del relevador propuesto por Aström y Hägglund. Este método es una combinación de un controlador de dos posiciones con banda diferencial (relevador) y las fórmulas propuestas por Ziegler y Nichols en el método del período último descrito en la sección 3.4.2.

Como ya se describió en el capítulo 3 el método del relevador se emplea en controladores industriales como método de autosintonización o de pre-sintonización. Sin embargo en los controladores PID de los PLC's no se dispone de una función de autosintonización. Aquí el reto es lograr establecer esta función a pesar de las limitaciones en las funciones de programación con

que cuentan los PLC's (ver anexo B), su relativamente limitada capacidad de memoria, su modo de programación (diagramas de escalera) y las funciones aritméticas limitadas a números enteros.

El programa está formado por los siguientes módulos

- Inicialización
- Función de relevador
- Función PID
- Cálculo del período último
- Cálculo de la ganancia última
- Cálculo de las ganancias de sintonización.

El programa de autosintonización se incluye en el anexo C.

El programa se inicializa poniendo en cero todos los registros usados por la función PID y el operador deberá cargar manualmente los valores de los parámetros utilizados en esta función. Es conveniente hacer notar que el asignar valores a todos los parámetros anteriores es necesario para el funcionamiento del controlador PID y los únicos parámetros adicionales que se requieren para el proceso de autosintonización son los valores de la banda diferencial y de la amplitud del relevador.

Después de inicializado el programa se calculan, automáticamente, los valores máximo y mínimo de la banda diferencial y de la amplitud que serán usados en el relevador

El operador decide el momento en que se inicia el proceso de autosintonización, al cerrar el interruptor de inicio de autosintonización y la variable de proceso es ahora controlada por la acción del relevador. Enseguida se detecta cuando el valor de la variable de proceso ha llegado al máximo. Se

mide el tiempo transcurrido en tres ciclos para determinar el periodo promedio de cada oscilación.

Con los valores de pico máximo del semiciclo positivo y del semiciclo negativo se calcula la amplitud de la oscilación de la variable controlada. A partir de estos valores y los de la amplitud de la oscilación y banda diferencial del relevador se aplican las fórmulas para determinar el valor de la ganancia última de acuerdo a la ecuación 3.17.

Entre las funciones del PLC no se incluye la extracción de raíz cuadrada, por lo que fue necesario generar esta función utilizando las funciones aritméticas y con datos enteros simples y de doble precisión.

Con el valor de la ganancia y período último se calculan los valores para cada una de las acciones del control PID.

El PLC no tiene integrado ningún sistema que nos permita visualizar las variaciones de la variable controlada por lo que se hace necesario crear en el programa un módulo de adquisición de los datos generados durante el proceso de autosintonización. Posteriormente se analizarán estos datos en algún dispositivo que nos permita obtener una gráfica del comportamiento de los mismos.

#### 4.5 Procedimiento para la autosintonización

Algunas acciones en el procedimiento de sintonización se realizan automáticamente y otras son controladas por el operador usando interruptores. No presenta gran dificultad automatizar totalmente el proceso pero se

consideró conveniente que el operador tuviese control sobre éste. Los interruptores usados para controlar el proceso de autosintonización son los siguientes:

SW1	Borrar registros
SW2	Habilitar PID
SW3	Controlador en manual
SW4	Incrementar salida manual
SW5	Reducir salida manual
SW6	Inicio de autosintonización
SW7	Adquisición de datos
SW8	Controlador P
SW9	Controlador PI
SW10	Controlador PID

El proceso de autosintonización se inicia poniendo en cero (SW1) todos los registros usados en la función PID y en el módulo de adquisición de datos (SW7). Posteriormente el operador deberá cargar manualmente los valores de los parámetros utilizados en la función PID. Los parámetros son: el número de lazo de control, el tiempo de muestreo del valor de la variable de proceso, las ganancias proporcional, integral y derivativa, el valor de ajuste manual, los valores límite superior e inferior de salida de la función PID, el tiempo mínimo para un cambio de 100% en salida de la función PID, los valores mínimo y máximo usados en el indicador de la variable de proceso y el valor deseado de la variable de proceso.

Además los valores anteriores, que son necesarios para el funcionamiento del control PID, los únicos que deben agregarse para el proceso de autosintonización son los valores de la banda diferencial y de la amplitud del relevador.

Después de inicializado el programa es conveniente habilitar la función PID (SW2), y abrir los interruptores de operación manual (SW4, SW4, SW5), aunque esto no es indispensable. Se inicia la operación del proceso poniendo en funcionamiento la bomba de alimentación de agua. A continuación se inicia la operación del relevador (SW6) y desde este momento el control de nivel se hace por medio éste. Se observa la variable de proceso hasta que se tenga una oscilación con amplitud constante lo que debe ocurrir en un tiempo relativamente corto.

El registro de valores de la variable controlada puede iniciarse o detenerse en el momento que se desee, pero es conveniente hacerlo durante el proceso de autosintonización para poder analizarlo posteriormente.

El operador decide el momento en que se inicia el proceso de autosintonización (SW11). Al cerrar el interruptor de inicio de autosintonización el programa determina el período y la amplitud de la oscilación, obteniendo el promedio de la cantidad de ciclos fijada por el operador en el programa.

Con los valores de amplitud de la oscilación y banda diferencial del relevador se resuelve la ecuación 3.17 para determinar el valor de la ganancia última.

Con el valor de la ganancia y periodo último se calculan los valores para el modo de control que el operador seleccione: proporcional (SW8), proporcional+integral (SW9), ó proporcional+integral+derivativo (SW10). Los valores de cada una de las ganancias se ajustarán automáticamente en la función PID y el operador podrá habilitar nuevamente esta función al cancelar la operación del relevador (SW5).

## 4.6 Experimentación

Para llevar a cabo el proceso de autosintonización del controlador PID se utilizó un lazo de control de nivel con los elementos descritos en la sección 4.2 y siguiendo el procedimiento de implementación indicado en la sección 4.5

Los experimentos se realizaron en dos partes: Inicialmente se probó la operación del relevador y posteriormente se realizaron las pruebas de autosintonización del controlador PID bajo diferentes condiciones.

### 4.6.1 Experimentos con el relevador

Las pruebas en el relevador se realizaron con la finalidad de determinar el efecto del oleaje (ruido en la medición), de la banda diferencial, de la amplitud y del rango de operación del relevador en la operación de éste. Los resultados obtenidos se muestran en los siguientes párrafos.

#### 4.6.1.1 Efecto del ruido

En los experimentos 1 y 2 se probó la operación del relevador para determinar el efecto del oleaje causado por el agua al caer. En el experimento 1 el agua caía libremente desde el tubo de alimentación colocado en la parte superior del tanque. En el experimento 2 se instaló un tubo dentro del tanque para reducir el oleaje. Todas las demás condiciones de operación se mantuvieron iguales.



Valor de referencia = 1000,  
 Banda diferencial del relevador = 800,  
 Amplitud del relevador = 0 a 32000.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

EXP.	AMP-OSC PV	PERI ODO	TIEMPO UP/DN	DIFER EN MAXIM	DIFER. EN MINIM	AMP-OSC POSITIVA	AMP-OSC NEGATIVA	A positiva/ A negativa
1	131.0	9.3	0.727	4.8%	9.5%	68.8	70.2	0.98
2	133.4	8.6	0.792	9.6%	15.9%	66.8	64.0	1.04

Como se puede observar en la tabla de resultados y en las gráficas siguientes (figuras 4.2 y 4.3) la diferencia más importantes que se encuentra es la mayor variación en la amplitud de la oscilación en el experimento 2, donde se colocó el tubo para reducir el oleaje.

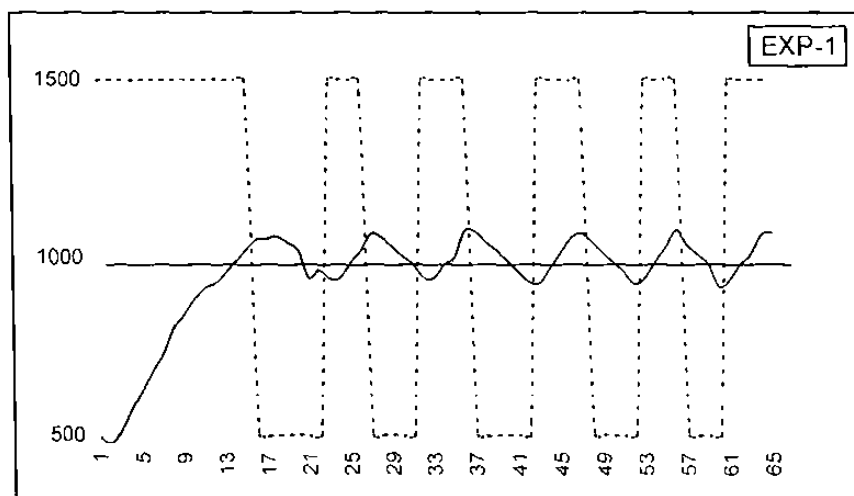


Fig. 4.2 Relevador con ruido en la medición.

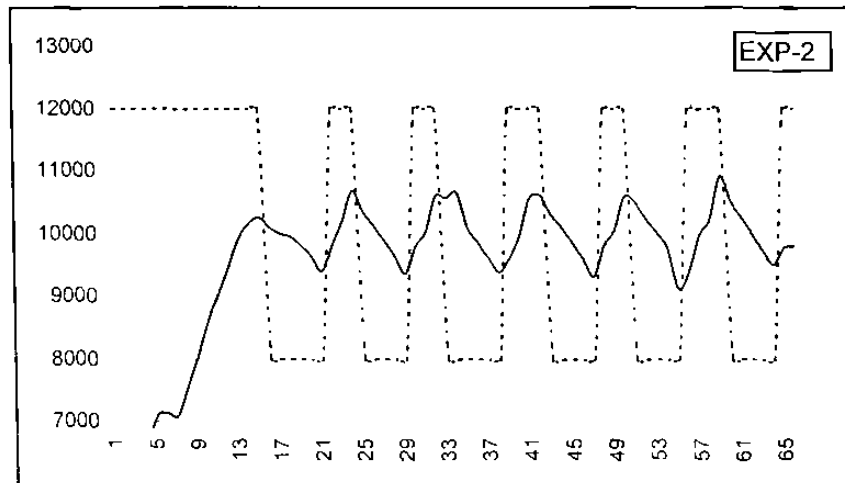


Fig. 4.3. Relevador con reductor de ruido

#### 4.6.1.2 Efecto del cambio de la banda diferencial

En los experimentos 3 al 6 se mantuvieron constantes el valor de referencia en 10000 y la amplitud en el relevador de 0 a 32000. Se modificaron los valores de la banda diferencial del relevador (400, 800, 1200, 2000) para determinar su efecto en la oscilación de la variable controlada.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y se resumen en la siguiente tabla:

EXP	BANDA DIFER.	AMP- OSC PV	PERI ODO	TIEMPO UP/DN	DIFER. EN. MAXIM	DIFER EN. MINIM	AMPO OSC POS	AMP OSC NEG.	A positiva / A negativa
4	400	90.5	5.8	1.070	14.1%	15.9%	38.0	52.0	1.37
3	800	135.2	8.7	1.160	10.2%	5.1%	58.5	77.0	1.32
5	1200	162.3	10.0	0.875	10.8%	5.6%	78.8	84.5	1.07
6	2000	223.0	15.3	1.420	9.5%	17.4%	98.3	125.0	1.27

Se puede observar que al incrementar la banda diferencial se incrementa la amplitud y el período de la oscilación. En los demás parámetros no se observa una tendencia determinada.

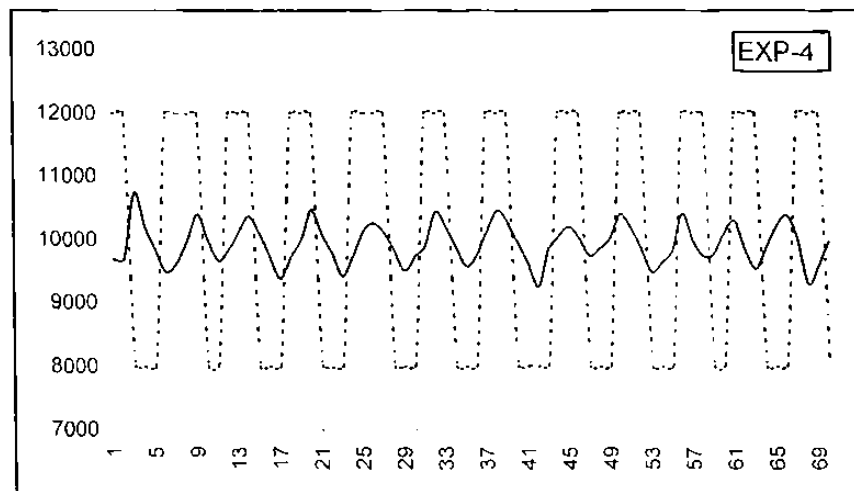


Fig. 4.4 Relevador con banda diferencial de 400

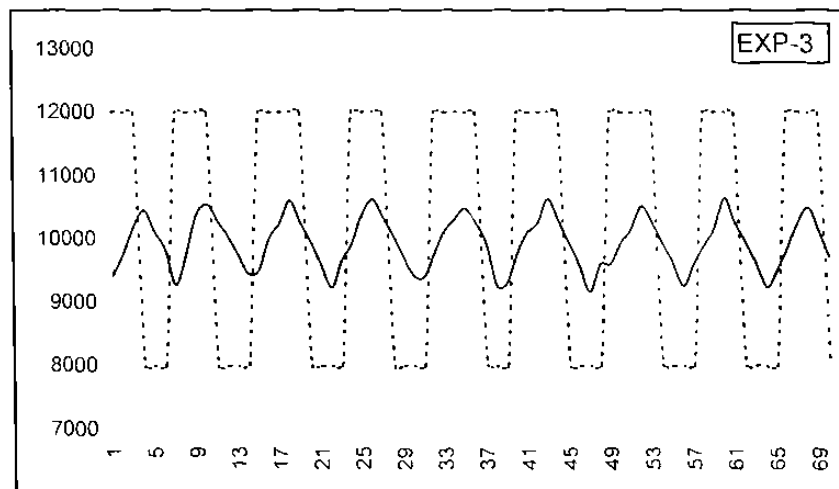


Fig.4.5 Relevador con banda diferencial de 800

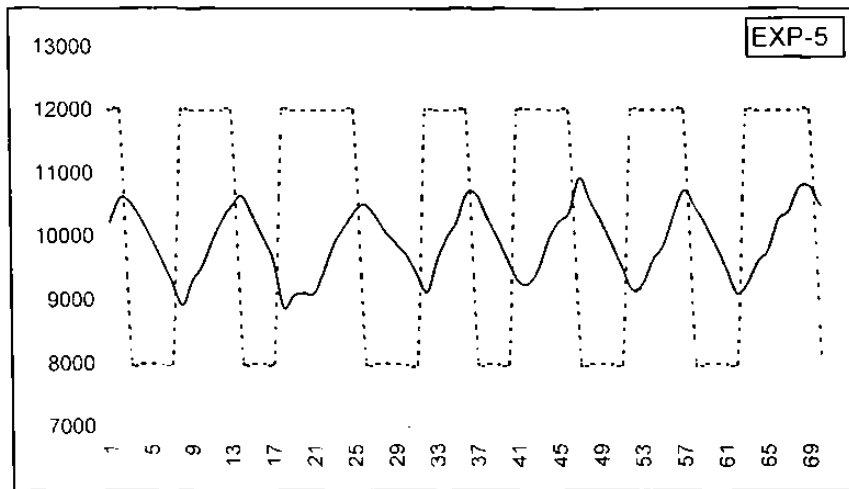


Fig. 4.6 Relevador con banda diferencial de 1200

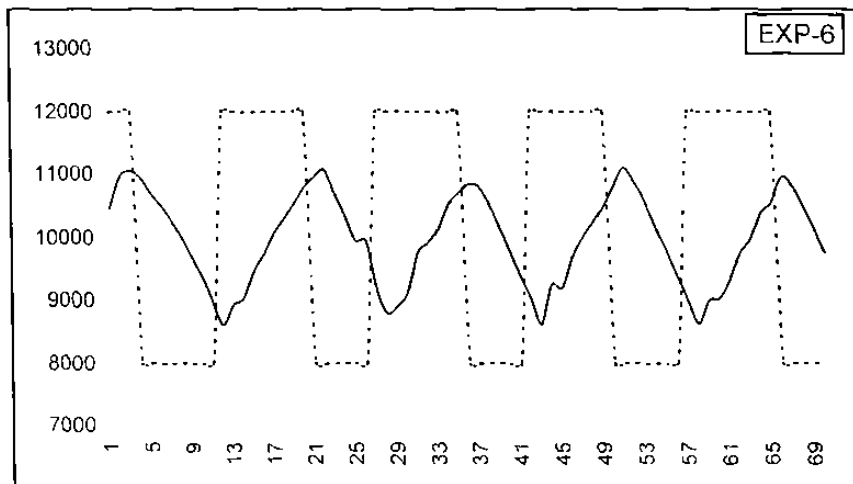


Fig. 4.7 Relevador con banda diferencial de 2000

### 4.6.1.3 Efecto del cambio de la amplitud

En los experimentos 7 al 11 se modifica la amplitud del relevador y el rango de valores de éste para determinar el efecto que producen en la oscilación de la variable controlada. Los rangos de valores de amplitud del relevador son: 8000 a 24000 [7], (12000 a 20000 [8], 0 a 16000 [9], 14000 a 18000 [10] y 16000 a 32000 [11]. El valor de referencia se mantiene en 10000 y la banda diferencial del relevador en 800.

Los resultados obtenidos se muestran concentrados en la siguiente tabla, donde no aparecen los experimentos 8, 10 y 11 porque no producen oscilación:

No.	AMP- OSC PV	PERIODO	TIEMPO UP/DN	DIFER EN. MAXIM	DIFER EN MINIM	AMP OSC POS	AMP OSC NEG	A positiva / A negativa
7	76.8	10.6	0.432	7.3%	18.0%	36.8	41.3	1.12
9	115.0	18.3	1.110	6.6%	5.2%	34.5	80.8	2.34

En los experimentos 7 y 8 se tiene el mismo valor central de 16000, variando la amplitud del relevador de 16000 para el primero y 8000 para el segundo. No se puede realizar la comparación porque en el experimento 8 no se obtuvo oscilación ya que el valor mínimo del rango balancea el flujo de entrada con el de salida manteniendo el nivel constante como se puede ver en la gráfica (Figura 4.9).

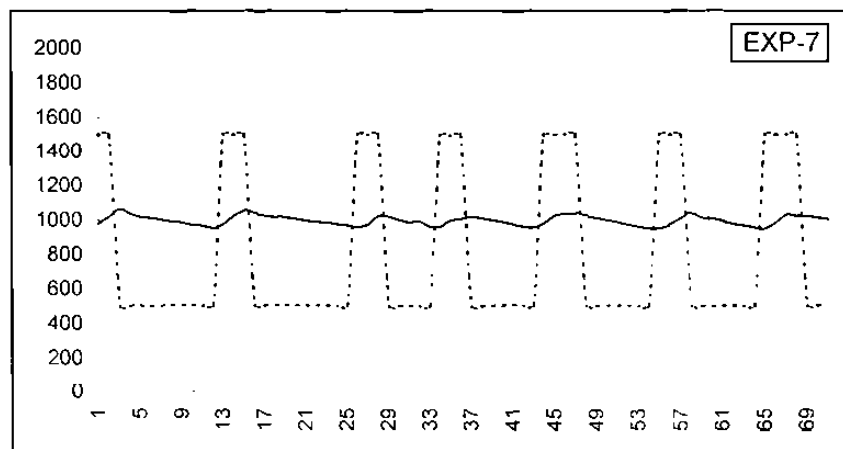


Fig.4.8 Relevador con amplitud de 8000 a 24000

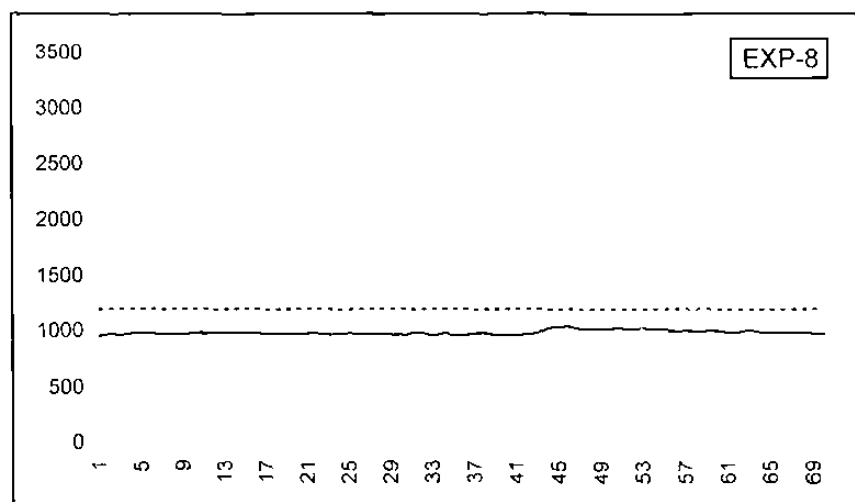


Fig. 4.9 Relevador con amplitud de 12000 a 20000

En los experimentos 9 y 11 el relevador tiene una amplitud de 16000. En el primero el rango es de 0 a 16000 y en el segundo de 16000 a 32000. Nuevamente no se puede establecer la comparación entre relevadores de la misma amplitud pero en los extremos de su rango de operación (0 a 32000),

misma amplitud pero en los extremos de su rango de operación (0 a 32000), porque en el experimento 11 el valor mínimo del relevador hace que el flujo de entrada sea mayor que el flujo de salida por lo que el nivel se incrementa continuamente como puede verse en la figura 4.12.

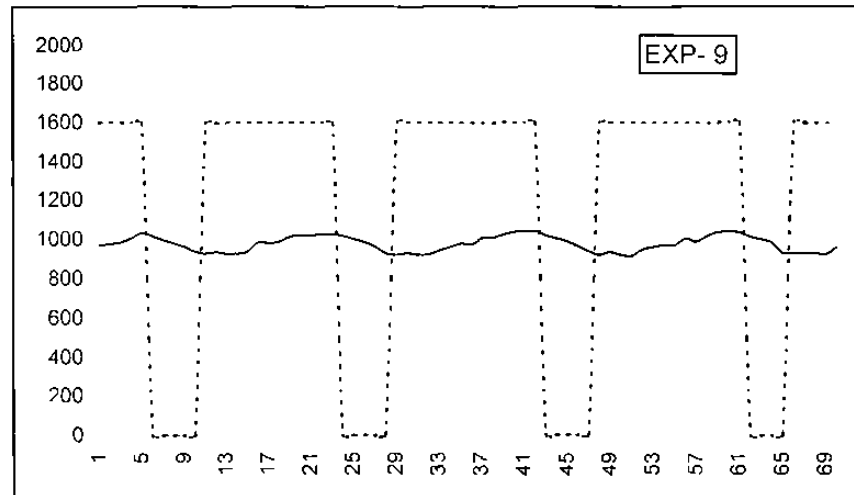


Fig. 4.10 Relevador con amplitud de 0 a 16000

En el experimento 10 se tiene un rango pequeño del relevador pero que mantiene el balance entre el flujo de entrada y salida por lo que no se presenta oscilación.

Los experimentos 7 y 9 pueden compararse porque en ambos el relevador tiene una amplitud de 16000, en el primero de 8000 a 24000 y en el segundo de 0 a 16000. Se observan grandes diferencias en su comportamiento: En el experimento 7 la amplitud de la oscilación, el período y la relación entre el tiempo de incremento y reducción del nivel son menores que en el experimento 9. La reducción en el período y que el tiempo en que el nivel

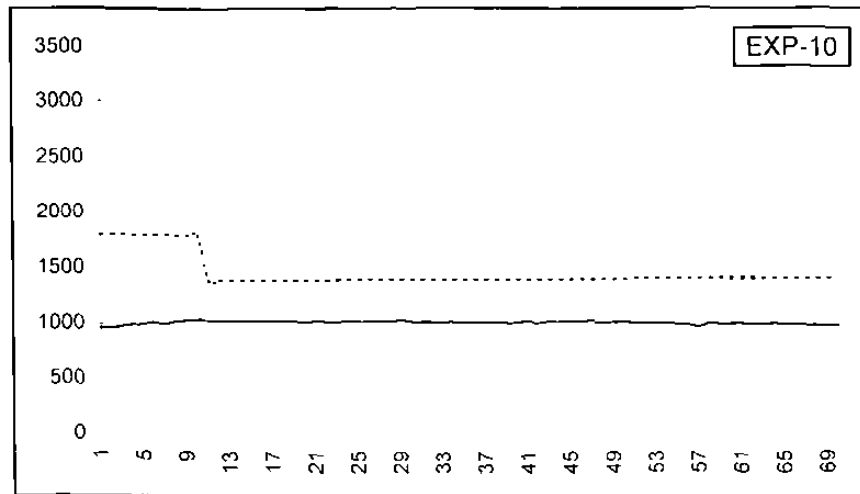


Fig. 4.11 Relevador con amplitud de 14000 a 18000

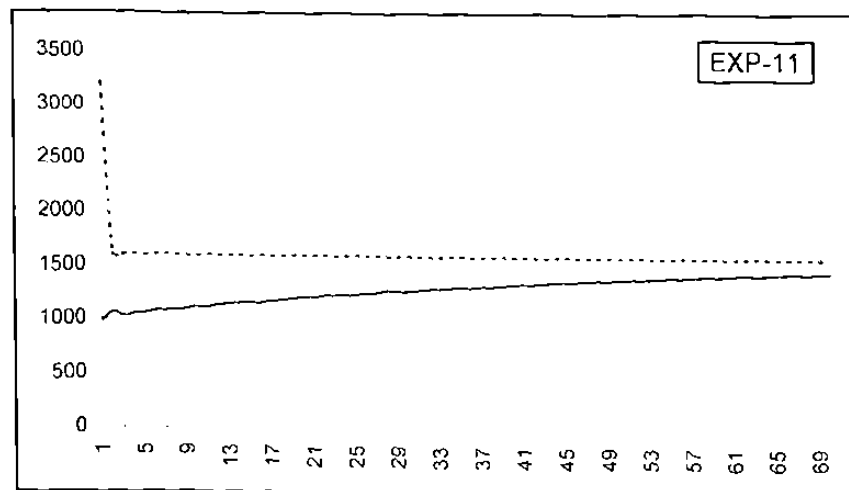


Fig.4.12 Relevador con amplitud de 16000 a 32000

En la gráfica correspondiente al experimento 9 se observa una oscilación con amplitud constante y con tiempos de incremento y reducción muy parecidos, sin embargo, en la operación del relevador no se aprecia lo mismo



porque actúa cuando se obtiene el primer valor mínimo y el último valor máximo de la oscilación. Se considera una respuesta adecuada porque, para el procedimiento de autosintonización, son importantes el período y la amplitud de la oscilación, sin considerar directamente la operación del relevador.

#### 4.6.2 Experimentos de autosintonización del controlador PID

En la autosintonización del controlador PID se realizaron diferentes pruebas. Se obtuvieron automáticamente los parámetros de sintonización de un controlador PID y se probaron para el PID IND (de términos independientes) y el PID ISA (ganancia integral y derivativa afectadas por el ajuste de la ganancia proporcional). Se comparó el comportamiento de controladores PI y PID autosintonizados. Se hicieron pruebas para determinar el efecto, en el desempeño de controladores PID, al cambiar la amplitud y la banda diferencial en el relevador usado para el proceso de autosintonización. Los resultados obtenidos en los diferentes experimentos se muestran en forma gráfica y se incluyen las observaciones. Finalmente se presenta una tabla con los datos obtenidos en los experimentos con el relevador y en la autosintonización del controlador PID.

#### 4.6.2.1 Controladores PID IND y PID ISA

En los experimentos 13 y 14 se prueba la respuesta de controladores PID de términos independientes y el PID ISA donde la ganancia proporcional afecta las ganancias integral y derivativa.

En las gráficas de respuesta en el tiempo de la variable controlada (figuras 4.13 y 4.14) se puede observar como la correspondiente al PID ISA es más adecuada; es una respuesta más rápida con mejor amortiguamiento y el mismo sobrepaso. Sin embargo, el comportamiento del controlador muestra más variaciones que en el controlador PID IND.

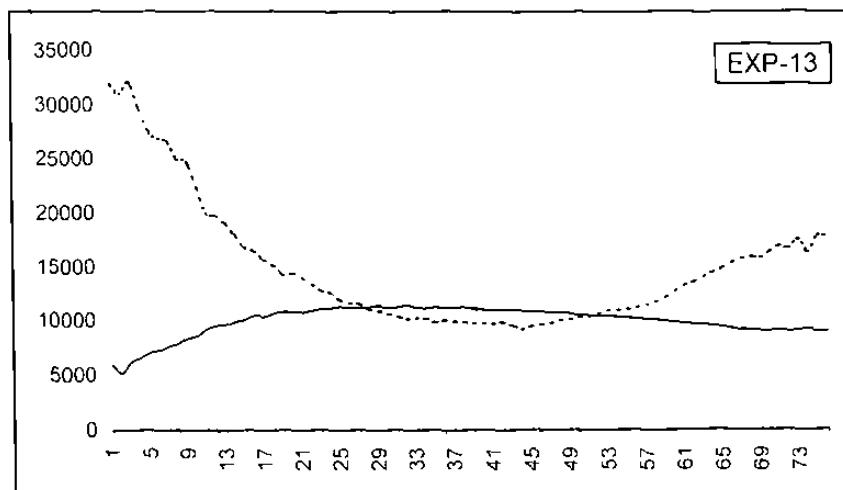


Fig. 4 13 Respuesta del controlador PID IND

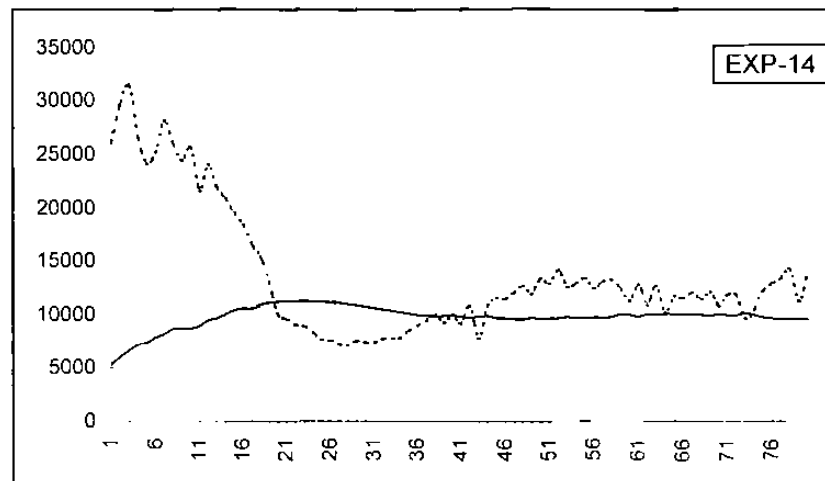


Fig. 4.14 Respuesta del controlador PID ISA

En el experimento 15 se prueba la autosintonización de un controlador PI ISA. La respuesta se muestra en la gráfica (ver figura 4.15). En ésta se puede observar que la respuesta es igual de rápida que en el PID ISA del experimento 14, con menor sobrepaso y sin oscilación en valores inferiores al de referencia.

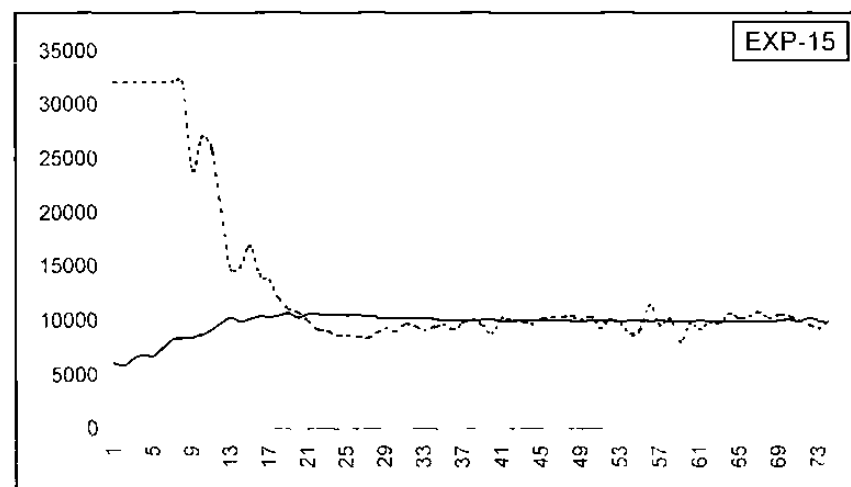


Fig. 4.15 Respuesta del controlador PI ISA

De los tres experimentos anteriores (13, 14 y 15) se puede observar que el que tiene una mejor respuesta en el tiempo es el controlador PI ISA, ya que su respuesta es más rápida y con menor oscilación.

#### 4.6.2.2 Controladores PID y PI

En los experimentos 17 y 18 se realizan con la finalidad de establecer una comparación de los controladores PID y PI.

En el controlador PI se presenta una oscilación con mayor sobrepaso que en el PID, aunque el sobrepaso no es muy grande (1.41%) . Por otra parte, son muy notorias las variaciones rápidas y frecuentes en el controlador PID a diferencia de la acción suave del controlador PI.

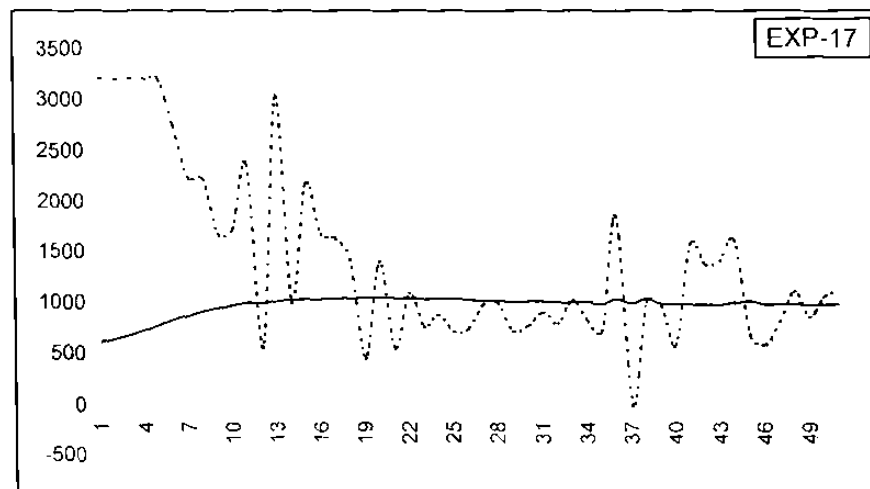


Fig. 4.16 Respuesta del controlador PID

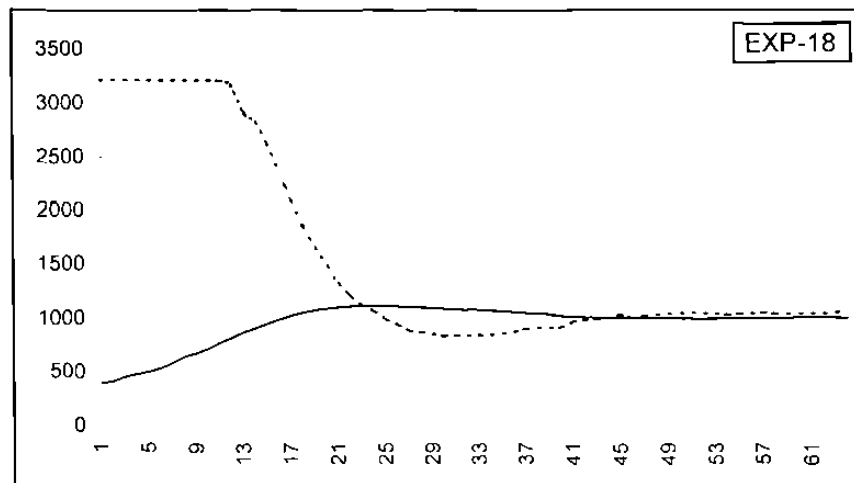


Fig. 4.17 Respuesta del controlador PI autosintonizado usando un relevador con amplitud de 8000 a 18000.

#### 4.6.2.3 Efecto del cambio de la amplitud del relevador

En los experimentos 18, 19 y 20 se modifica la amplitud del relevador para determinar la influencia que esto tiene en los valores de sintonización. Se utilizan valores de 8000 a 18000, 0 a 32000 y 11000 a 15000. Los resultados obtenidos, como respuesta del sistema de control, se muestran en las gráficas (ver figuras 4.17, 4.18 y 4.19). Se puede observar, en dichas gráficas, que la respuesta en el tiempo de la variable controlada no se modifica de manera apreciable al utilizar diferentes valores de amplitud del relevador para la autosintonización.

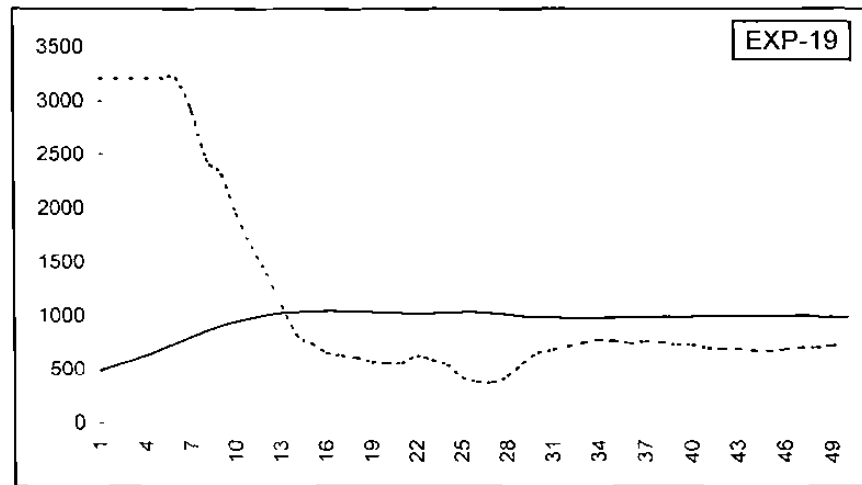


Fig. 4.18 Respuesta del controlador PI autosintonizado usando un relevador con amplitud de 0 a 32000.

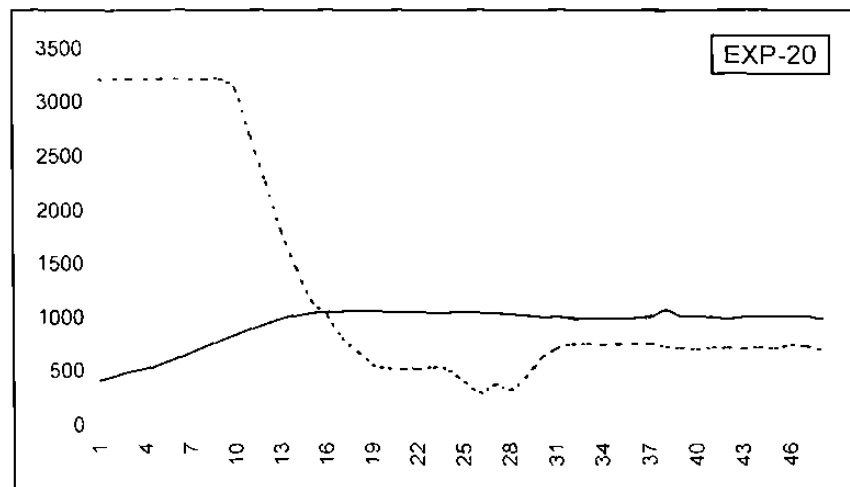


Fig. 4.19 Respuesta del controlador PI autosintonizado usando un relevador con amplitud de 11000 a 15000

#### 4.6.2.4 Efecto del cambio de la banda diferencial del relevador

Los experimentos 21 y 22 se realizaron con la finalidad de determinar el efecto que tiene el cambio de la banda diferencial del relevador en los valores de autosintonización y por lo tanto en la respuesta del sistema de control.

En este caso se observó que cuando se usa la banda diferencial menor los valores de sintonización del controlador PI son mayores ( $P=11.67$  e  $I=0.124$  contra  $P=7.55$  e  $I=0.69$ ) lo que resulta en una mejor respuesta de la variable controlada. Para los valores mayores de sintonización la respuesta fue más rápida y el sobrepaso menor. En ningún caso se presentó oscilación en valores menores al de referencia. La acción del controlador fue muy parecida en ambos casos.

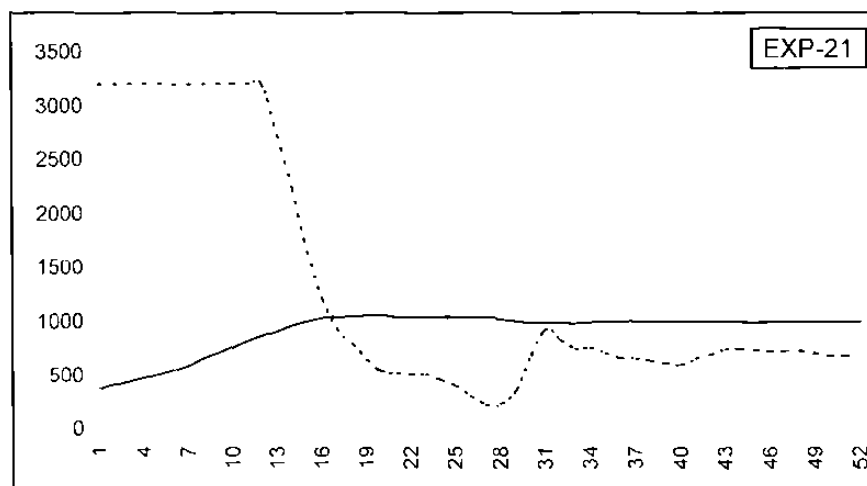


Fig. 4.20 Respuesta del controlador PI autosintonizado usando una banda diferencial de 400 en el relevador.

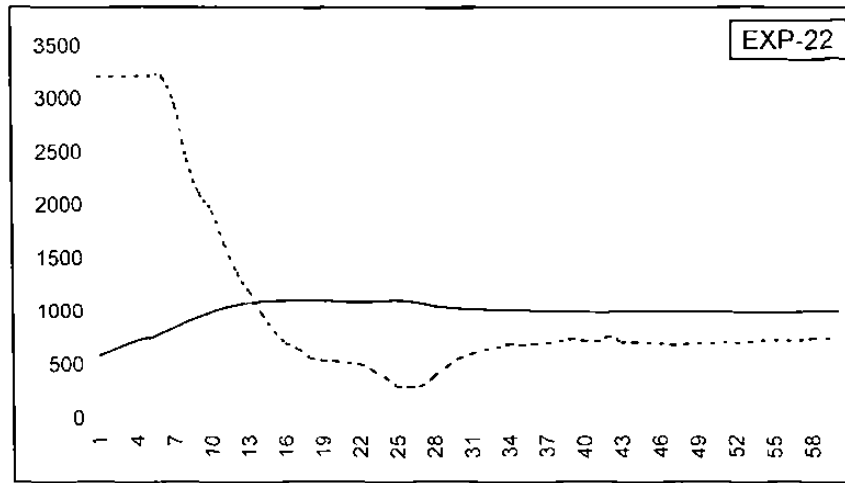


Fig. 4.21 Respuesta del controlador PI autosintonizado usando una banda diferencial de 1600 en el relevador

En la siguiente página se presentan concentrados en tablas los resultados obtenidos en los experimentos con el relevador y en la autosintonización del controlador PID.



Tabla 4.1 Resultados de los experimentos con el relevador

No.	SP	BM-REL	REL Max/Min	AMP- OSC PV	PERÍ ODO	TIEMPO UP/DN	DIFER EN. MAXIM	DIFER EN MINIM	AMP OSC POS	AMP OSC NEG	A positiva / A negativa
1	10000	800	0 / 32000	131.0	9.3	0.727	4.8%	9.5%	68.8	70.2	1.02
2	10000	800	0 / 32000	133.4	8.6	0.792	9.6%	15.9%	66.8	64.0	0.93
3	10000	800	0 / 32000	135.2	8.7	1.160	10.2%	5.1%	58.5	77.0	1.32
4	10000	400	0 / 32000	90.5	5.8	1.070	14.1%	15.9%	38.0	52.0	1.37
5	10000	1200	0 / 32000	162.3	10.0	0.875	10.8%	5.6%	78.8	84.5	1.07
6	10000	2000	0 / 32000	223.0	15.3	1.420	9.5%	17.4%	98.3	125.0	1.27
7	10000	800	8000 / 24000	76.8	10.6	0.432	7.3%	18.0%	36.8	41.3	1.12
8	10000	800	12000 / 24000	-	-	-	-	-	-	-	-
9	10000	800	0 / 16000	115.0	18.3	1.110	6.6%	5.2%	34.5	80.8	2.34
10	10000	800	14000 / 18000	-	-	-	-	-	-	-	-
11	10000	800	16000 / 32000	-	-	-	-	-	-	-	-
12	10000	800	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: En los renglones donde no aparecen datos no se presenta oscilación.

Tabla 4.2 Resultados de los experimentos de autosintonización del controlador PID

EXP.	AMP- REL	BM REL	TM UP	DN	T	Tu	Ku	AMP OSC	RC	ADJ P	ADJ I	ADJ D	TIPO PID	%S POS	TIME POS	%S NEG	TIME NEG
12	08-18	800	110	144	254	8466	-	232	-	377	141	-	IND	-	-	-	-
13	08-18	800	110	144	254	8466	-	232	-	377	141	116	IND	11.47	18	9.6	61
14	08-18	800	110	144	254	8466	-	232	-	377	141	116	ISA	13.28	9	4.32	35
15	08-18	800	185	257	442	14733	18237	720	349	828	81	0	ISA	6.72	9	0	0
16	08-18	800	185	257	442	14733	18237	720	349	828	81	0	IND	-	-	-	-
17	08-18	800	207	248	453	15166	19525	864	326	1148	131	189	ISA	0.46	9	0	0
18	08-18	800	191	227	418	13933	14541	912	438	660	86	0	ISA	1.12	7	0	0
19	00-32	800	128	246	374	12500	19968	1226	907	9.09	96	0	ISA	0.46	4	0	0
20	11-15	800	134	241	375	1456	16736	-	1217	-	-	-	ISA	-	-	-	-
20 <sup>a</sup>	11-15	800	118	252	370	12333	22506	1208	905	1023	97	0	ISA	0.70	5	0	0
21	00-32	400	123	211	334	-	-	1232	-	-	-	-	ISA	-	-	-	-
21 <sup>a</sup>	00-32	400	98	191	289	9633	25684	888	793	1167	124	0	ISA	0.57	4	0	0
22	00-32	1600	171	356	527	17600	14154	2152	1439	-	-	-	ISA	-	-	-	-
22 <sup>a</sup>	00-32	1600	170	349	519	17300	16613	2016	1226	755	69	0	ISA	1.18	8	0	0

Nota Se dejaron espacios en blanco por falta de información

## CONCLUSIONES

### Experimentos con el relevador.

En los experimentos 1 y 2 no se observa una diferencia significativa al colocar el tubo para reducir el oleaje. La banda diferencial del relevador ayuda a eliminar los efectos negativos del ruido en la medición, por lo que no es necesario colocar un dispositivo para eliminarlo, si éste no es muy grande.

En los experimentos 3 al 6 se puede observar que al incrementar la banda diferencial en el relevador se incrementa la amplitud de oscilación de la variable controlada y el período de la oscilación. Este hecho es muy importante porque permite controlar la amplitud de oscilación modificando la banda diferencial del relevador.

De los experimentos 7 al 11 se concluye que la amplitud del relevador influye en el tiempo de incremento de la variable controlada porque determina la apertura de la válvula. Además de la amplitud del relevador es importante el rango de valores en que opera, es decir su valor máximo y mínimo, porque de esto depende el rango de apertura en que funciona la válvula.

### Experimentos con el controlador PID

Inicialmente se describen algunas observaciones y conclusiones obtenidas en cada uno de los experimentos y finalmente se expresan las conclusiones generales de las pruebas de autosintonización realizadas.

Todos los experimentos se realizaron con el VALOR DE REFERENCIA = 10000.

#### Experimento 12

El valor de la amplitud del relevador no podía ser contenido en el registro correspondiente por lo que no se pudo obtener  $K_u$  y por lo tanto tampoco los valores de sintonización. Fue necesario modificar el registro a uno de doble precisión.

#### Experimento 13

Se usan mismos valores de sintonización que anterior  $P = 3.77\%$   $I = 0.141\text{rps}$   $D = 1.16\text{ s}$  con un controlador IND. La respuesta del sistema oscila suavemente con un sobrepaso máximo de 14.72% que ocurre a los 18 seg. y regresa al valor de referencia 28 s después. El controlador no tiene cambios rápidos.

#### Experimento 14

No se autosintonizó con relevador. Se usaron valores de sintonización del experimento anterior ( $P = 3.77\%$   $I = 0.141\text{rps}$   $D = 1.16\text{ s}$ ) pero con controlador PID ISA, para poder comparar su respuesta con el controlador PID IND.

La respuesta es más rápida y el sobrepaso es menor con el controlador ISA. A los 9 s se presenta el máximo sobrepaso de 13.28% y a los 23 seg ha

vuelto al valor de referencia. El sobrepaso negativo es de 4.32% a los 35 seg. En el controlador PID IND el sobrepaso negativo se alcanza a los 61 seg. y tiene un valor de 9.60%.

### Experimento 15

Se realiza la autosintonización de un controlador PI ISA. El valor de ganancia proporcional resulta mayor que en controladores PID (8.28) y la integral resulta menor (0.081 rps). Las variaciones del controlador son más rápidas. La variable controlada se corrige rápido, tiene menor sobrepaso que los controladores PID anteriores (6.72%) y se amortigua en poco tiempo, ya que solo se tienen valores ligeramente menores al valor de referencia.

### Experimento 16

Mismos valores de sintonización que experimento 15, pero con PI IND. Se hizo cambio de tipo de controlador en línea y éste no funcionó; el nivel se fue al máximo. No se determinó la razón de la falla, en un experimento anterior esto había funcionado.

### Experimento 17

Se autosintonizó un controlador PID ISA. Las ganancias calculadas fueron:  $P = 11.48$ ,  $I = 0.131$  rps y  $D = 1.89$  s. La variable responde rápidamente y con muy poco sobrepaso (0.46 %) a los 9 seg. después de pasar por el valor de referencia. El sobrepaso máximo abajo del valor de referencia es de 0.08% a los 20 seg. El controlador tiene variaciones muy

rápidas, ocurren gran cantidad de picos de amplitud considerable (hasta de 80% aproximadamente).

### Experimento 18

En las mismas condiciones que el experimento anterior se autosintonizó un controlador PI. Las ganancias de ajuste fueron:  $P = 6.6$  e  $I = 0.086$  rps. La respuesta de la variable controlada fue rápida, con muy poco sobrepaso (1.12%) y se amortigua rápidamente ya que no presenta oscilación abajo del valor de referencia. La operación del controlador se hace mucho más suave sin presentar ninguna variación rápida.

### Experimento 19

Se autosintoniza un controlador PI modificando la amplitud del relevador de 0 a 32000. Las ganancias de resultaron ligeramente mayores que en el experimento anterior: La proporcional = 9.09 y la integral = 0.096 rps. La respuesta del lazo de control es rápida con una muy pequeña, casi despreciable, oscilación arriba del valor de referencia. La acción del controlador un poco menos suave que en experimento 18, por los valores de ganancias mayores, pero sin cambios demasiado rápidos.

### Experimento 20

Se realiza la autosintonización igual que en el experimento 19 pero modificando la amplitud del relevador al rango de 11000-15000 para determinar el efecto que esto causa. Se obtienen valores de sintonización casi iguales que

con la banda diferencial de 0 a 32000 y la respuesta del lazo de control , como es lógico, parecida a la anterior: sobrepaso máximo de solo 0.70% a los 5 seg. A los 19 seg. llega nuevamente al valor de referencia y no presenta oscilaciones abajo de este valor. El controlador actúa muy parecido al del experimento 19, con una acción ligeramente más marcada.

#### Experimento 21

Se modifica la banda diferencial del relevador a 400. Las ganancias calculadas son:  $P = 11.67$ ,  $I = 0.124$ . Se tienen más variaciones del controlador que en los experimentos 19 y 20, aunque parecido el comportamiento. Tiene sobrepaso de 0.57% a los 4 seg. y llega de nuevo en el valor de referencia a los 14, prácticamente sin oscilación abajo de este valor.

#### Experimento 22

Banda diferencial del relevador de 1600. Respuesta rápida con poco más sobrepaso que anteriores. El sobrepaso es 11.13% a los 8 seg. La variable controlada se mantiene arriba del valor de referencia hasta los 29 seg. presentando en este tiempo una oscilación que es despreciable. Acción suave del controlador.

## Conclusiones del proceso de autosintonización

Los resultados obtenidos en los experimentos de autosintonización son bastante alentadores. Al cambiar la banda muerta o amplitud del relevador se obtuvieron variaciones pequeñas en los valores de sintonización obtenidos automáticamente por el programa en el PLC. Sin embargo, la respuesta de la variable controlada fue bastante buena y muy consistente, como puede observarse en las figuras 4.13 a la 4.22.

A la buena respuesta del lazo de control se agrega la ventaja de que el proceso de autosintonización es bastante rápido y seguro.

El tiempo necesario para la autosintonización del controlador depende del comportamiento dinámico del proceso; es decir, del tiempo que se requiere para que el nivel se incremente hasta un valor máximo cuando la válvula de alimentación está totalmente abierta, más el tiempo que le toma reducir el nivel a un mínimo cuando dicha válvula se encuentre totalmente cerrada.

La seguridad durante la autosintonización la brinda el hecho de que el relevador hace oscilar la variable controlada alrededor del valor de referencia y la amplitud de la oscilación (sus valores máximo y mínimo) dependen de la banda diferencial del relevador y del valor de referencia, y éstos se pueden ajustar fácilmente.

En los experimentos de autosintonización realizados se consideraron solo tres oscilaciones para obtener los valores del período y ganancia últimos, pero esta cantidad se puede modificar sin mayor dificultad a la cantidad de oscilaciones que se desee.



El programa para autosintonización utiliza solo el 10 % de la memoria disponible en el PLC. Y se ejecuta bastante rápido. En las pruebas realizadas solo tomó 13 milisegundos la solución de la lógica del programa.

De acuerdo a los resultados obtenidos se considera éste un procedimiento para autosintonización de lazos de control PID en PLC's con que puede ser utilizado para aplicación práctica. Sin embargo, es conveniente probarlo en variables diferentes al nivel y en sistemas diferentes retrasos de tiempo en su respuesta.

## Bibliografía:

### Textos

Aström Karl Johan y Tore Hägglund,  
*Automatic Tuning of PID Controllers*,  
Ed. ISA.  
(1988)

Hang Chang C. , Tong H. Lee y Weng K. Ho,  
*Adaptive Control*,  
Ed. ISA.  
(1993)

Kuo Benjamín C. ,  
*Sistemas de Control Automático*,  
Ed. Prentice Hall.  
(1996)

Murray Paul L.,  
*Application concepts of process control*,  
Ed. ISA.  
(1988)

Wade Harold L. ,  
*Regulatory and advanced regulatory control: System Development*,  
Ed. ISA.  
(1993)

### Manuales

*Logicmaster™ 90 Series™ 90-30 and 90-20 Programming Software  
Reference Manual*,  
G.E. Fanuc.  
(1990)

*Series 90-30™ Programmable Controllers,  
User's Manual*,  
G.E. Fanuc.  
(1991)

*Logicmaster™ 90 Series™ 90-30 and 90-20 Programming Software  
User's Manual,  
G.E. Fanuc.  
(1990)*

## Articulos

Astrom, Hagglund, Hang y Ho,  
*Automating tuning adaptation for PID Controllers - a Survey*

Persson y Aström,  
*Dominant Pole Design a unified view of PID controller tuning*

Voda y Landau,  
*A method for the autocalibration of PID controllers.*

Wang,Chalaye, Thomas y Gilles,  
*Multivariable adaptive predictive control of a glass forehead.*

Vance j. Vandoren  
Revista Control Engineering  
Agosto de 1993

## Anexo A

### Especificaciones del PLC

#### Unidad Central de Procesamiento (CPU):

Modelo	311
Procesador	80818
Rapidez	8 Mhz
Capacidad de entradas discretas	512
Capacidad de salidas discretas	512
Memoria para programación	16 K palabras
Tiempo para solución de lógica	21 mS / K palabras

#### Condiciones de operación:

Temperatura de almacenamiento	40 a 85 °C
Temperatura de operación	0 a 60 °C (sin ventilación)
Humedad	5 a 95 % (sin condensación)
Vibración	0.2" de 5 a 10 Hz, 1G de 10 a 200 Hz

#### Fuente de poder:

Suministro de energía	90 a 132 VCA ó 180 a 264 VCA.
Frecuencia	47 a 63 HZ
Potencia de salida	30 Watts (Total)
5V	15 Watts
12 V	15 Watts
24 V	15 Watts

### Batería de respaldo:

Tipo	Litio de larga duración
Vida útil con carga (típica)	6 meses aproximadamente
Vida útil sin carga	8 a 10 años

### Dimensiones de la base:

Modelo 311 de 5 ranuras	130mm x 245 mm x 142 mm
-------------------------	-------------------------

### Interfaces de entrada / salida:

Entradas discretas	16 puntos 120 VCA
Salidas discretas	16 puntos de relevador
Entradas analógicas	4 puntos de 4 a 20 mA o -10 a +10 VCD
Salidas analógicas	2 salidas de 4 a 20 mA

## Anexo B

### Funciones para programación del PLC

#### Funciones de relevadores

-   -	Contacto normalmente abierto
- / -	Contacto normalmente cerrado
-( )-	Bobina
-(SM)-	Energizar bobina retentiva (falla de energía)
-(RM)-	Desenergizar bobina retentiva (falla de energía)
	Conexión vertical
----	Conexión horizontal
-(/M)-	Bobina negada retentiva (falla de energía)
-(/)-	Bobina negada
-(M)-	Bobina retentiva (falla de energía)
-(S)-	Energizar bobina retentiva
-(R)-	Desenergizar bobina retentiva
-(↑)-	Bobina de transición positiva
-(↓)-	Bobina de transición negativa

#### Temporizadores y contadores

ondtr	Temporizador retentivo con retraso al energizar
tmr	Temporizador con retraso al energizar
upctr	Contador ascendente
dnctr	Contador descendente

## Funciones matemáticas

add	Suma
sub	Resta
mul	Multiplicación
div	División
mod	División módulo

## Funciones de relación

eq	Igual que
ne	Diferente a
gt	Mayor que
ge	Mayor o igual que
lt	Menor que
le	Menor o igual que

## Operaciones con bits

and	"Y" lógico
or	"O" lógico
xor	"O" lógico exclusivo
not	"NO" lógico
shl	Corrimiento hacia la izquierda
shr	Corrimiento hacia la derecha
rol	Rotación hacia la izquierda
ror	Rotación hacia la derecha
bitst	Prueba de un bit en una cadena
bitset	Colocar un bit 1 en una cadena
bitclr	Colocar un bit 0 en una cadena
bitpos	Localizar un bit 1 en una cadena

## Movimiento de datos

move	Mover
blkmove	Mover un bloque (constantes)
blkclr	Borrar un bloque
shftreg	Corrimiento de registros
bitseq	Secuenciador de bits
comreq	Solicitud de comunicación
bitclr	Colocar un bit 0 en una cadena
bitpos	Localizar un bit 1 en una cadena

## Tipos de datos

WORD	Palabra de 16 bits
BCD-4	BCD de cuatro dígitos
INT	Entero con signo
DINT	Entero de doble precisión

## Funciones de conversión

→BCD-4	Convertir a BCD-4
→INT	Convertir a número entero

## Funciones de control

end	Fin temporal del programa
do io	Actualizar entradas/salidas
pidisa	Algoritmo PID de la ISA
pidind	Algoritmo PID de términos independientes
commnt	Comentarios
svcreq	Solicitud de servicio



mcrn	Control maestro de relevador anidado
endmcrn	Fin de control maestro de relevador anidado
jumpn	Salto anidado a una etiqueta
labeln	Etiqueta anidada
mcr	Control maestro de relevador
endmcr	Fin de control maestro de relevador
jump	Salto a una etiqueta
label	Etiqueta

## Anexo C

### Programa para autosintonización

```

GGGG EEEEE     FFFFF AAA N N U U CCCC
G   E         F   A  A NN N U U C
G GGG EEEEE     FFF  AAAAA N N N U U C
G   G E       F   A  A N NN U U C
GGG  EEEEE     F   A  A N  N UUU  CCCC
    
```

```

AAA U  U TTTTT  OOO M  M AAA TTTTT IIIII OOO N  N
A  A U  U T    O  O MM MM A  A T    I  O  O NN  N
AAAAA U  U T    O  O M M M AAAAA T    I  O  O N N N
A  A U  U T    O  O M  M A  A T    I  O  O N  NN
A  A  UUU  T    OOO M  M A  A T    IIIII OOO N  N
    
```

\*\*\*\*\*)

Program: TESIS4

PLC PROGRAM ENVIRONMENT

HIGHEST REFERENCE USED

```

-----
INPUT (%I) :      512
OUTPUT (%Q) :      512
INTERNAL (%M) :   1024
GLOBAL DATA (%G) : 1280
TEMPORARY (%T) :   256
REGISTER (%R) :   2048
ANALOG INPUT (%AI) : 128
ANALOG OUTPUT (%AQ) : 64
    
```

```

-----
INPUT:      %I0016
OUTPUT:     %Q0001
INTERNAL:   %M0336
GLOBAL DATA:  NONE
TEMPORARY:  NONE
REGISTER:   %R0512
ANALOG INPUT: %AI0002
ANALOG OUTPUT: %AQ002
    
```

PROGRAM SIZE (BYTES) : 1408

\*\*\*\*\*)

```

*****
BLOCK:  _MAIN
BLOCK SIZE (BYTES):  1404
DECLARATIONS (ENTRIES):  1
HIGHEST REFERENCE USED
-----
        INPUT (%I):  %I0016
        OUTPUT (%Q): %Q0001
INTERNAL (%M):  %M0336
GLOBAL DATA (%G):  NONE
TEMPORARY (%T):  NONE
REGISTER (%R):  %R0512
ANALOG INPUT (%AI): %AI0002
ANALOG OUTPUT (%AQ): %AQ002
*****

```

```
[ START OF LD PROGRAM TESIS4 ] (* *)
[ 1000 VARIABLE DECLARATIONS ]
[ BLOCK DECLARATIONS ]
[ START OF PROGRAM LOGIC ]
```

<< RUNG 4 STEP #0001 >>

```
%I0005 %M0038
--] [----- (v) --
```

<< RUNG 5 STEP #0003 >>

```
%M0038 %M0037
--] [----- (SM) --
```

<< RUNG 6 STEP #0005 >>

```
%M0039 %M0037
--] [----- (RM) --
```

\* COMMENT \*

<< RUNG 8 STEP #0008 >>

```
%M0038 +-----+ +-----+
--] [---+ BLK_+-----+ BLK_+---
      | CLR_ |         | CLR_ |
      | WORD |         | WORD |
R0206 -+IN   %R0322 -+IN
      | LEN   |         | LEN   |
      | 00090 |         | 00001 |
      +-----+ +-----+
```

<< RUNG 9 STEP #0011 >>

```
%I0005 +-----+ +-----+
--] [---+ ADD_+-----+ SUB_+---
      | INT  |         | INT  |
R0041 -+I1  Q+-%R0050 %R0041 -+I1  Q+-%R0052
      |     |         |     |
R0200 -+I2  |         | -+I2  |
      +-----+ +-----+
```

<< RUNG 10 STEP #0014 >>

```

I0005 +-----+
-] [-----+ MUL_+
      |      | DINT |
      |      |      |
R0200 -+I1  Q+-%R0202
      |      |      |
CONST -+I2
+0000000002 +-----+

```

(\* COMMENT \*)

(\* COMMENT \*)

<< RUNG 13 STEP #0018 >>

```

I0005 +-----+ %M0002
-] [---+ GE_+----- ( )---
      | INT |
R0042 -+I1  Q++
      |      |
R0050 -+I2
      +-----+

```

<< RUNG 14 STEP #0021 >>

```

M0002 %M0005
-] [---+----- (SM)---
      |
R0003 +----- (RM)---

```

<< RUNG 15 STEP #0024 >>

```

I0005 +-----+ %M0003
-] [---+ LE_+----- ( )---
      | INT |
R0042 -+I1  Q++
      |      |
R0052 -+I2
      +-----+

```

<< RUNG 16 STEP #0027 >>

```

M0003 %M0004
-] [---+----- (SM)---
      |
      +----- (RM)---

```

<< RUNG 17 STEP #0030 >>

```

%I0005  %M0004  +-----+
-] [-----] [-----+MOVE_+-----+-----+-----+
                | INT |
                |-----|
%R0320  -+IN  Q+-%R0043  %R0320  -+I1  Q+-%R0512  %R0512  -+I1  Q+-%R0204
                | LEN |
                |00001|
                +-----+
                %R0511  -+I2
                +-----+
                +-----+
                | DIV_ |
                | INT |
                |-----|
                +-----+
                CONST -+I2
                +00002 +-----+
  
```

<< RUNG 18 STEP #0035 >>

```

%I0005  %M0005  +-----+
-] [-----] [-----+MOVE_+-----+
                | INT |
                |-----|
%R0511  -+IN  Q+-%R0043
                | LEN |
                |00001|
                +-----+
  
```

\* COMMENT \*)

<< RUNG 20 STEP #0039 >>

```

%I0009  +-----+
-] [-----+ BLK_ +-----+-----+-----+-----+
                | CLR_ |
                | WORD |
                |-----|
%R0001  -+IN  %R0101  -+IN  Q+-%R0001  %R0103  -+IN  Q+-%R0003
                | LEN |
                |00035|
                +-----+
                | INT |
                |-----|
                | INT |
                |-----|
                +-----+
                +-----+
                | LEN |
                |00001|
                +-----+
                | INT |
                |-----|
                +-----+
  
```

<< RUNG 21 STEP #0043 >>

```

%I0009  +-----+
-] [-----+MOVE_+-----+-----+-----+
                | INT |
                |-----|
%R0104  -+IN  Q+-%R0004  %R0105  -+IN  Q+-%R0005  %R0106  -+IN  Q+-%R0006
                | LEN |
                |00001|
                +-----+
                | INT |
                |-----|
                | INT |
                |-----|
                | INT |
                |-----|
                +-----+
                +-----+
                | LEN |
                |00001|
                +-----+
                | INT |
                |-----|
                +-----+
  
```

<< RUNG 22 STEP #0047 >>

```

%I0009 +-----+
--] [---+MOVE_+-----+MOVE_+-----+MOVE_+---
      | INT |          | INT |          | INT |
%R0107 -+IN Q+-%R0007  %R0108 -+IN Q+-%R0008  %R0109 -+IN Q+-%R0009
      | LEN |          | LEN |          | LEN |
      |00001|          |00001|          |00001|
      +-----+          +-----+          +-----+

```

<< RUNG 23 STEP #0051 >>

```

%I0009 +-----+
--] [---+MOVE_+-----+MOVE_+-----+MOVE_+---
      | INT |          | INT |          | INT |
%R0110 -+IN Q+-%R0010  %R0111 -+IN Q+-%R0011  %R0112 -+IN Q+-%R0012
      | LEN |          | LEN |          | LEN |
      |00001|          |00001|          |00001|
      +-----+          +-----+          +-----+

```

<< RUNG 24 STEP #0055 >>

```

%I0009 +-----+
--] [---+MOVE_+-----+MOVE_+-----+MOVE_+---
      | INT |          | INT |          | INT |
%R0113 -+IN Q+-%R0013  %R0114 -+IN Q+-%R0014  %R0128 -+IN Q+-%R0028
      | LEN |          | LEN |          | LEN |
      |00001|          |00001|          |00001|
      +-----+          +-----+          +-----+

```

<< RUNG 25 STEP #0059 >>

```

%I0009 +-----+
--] [---+MOVE_+---
      | INT |
%R0129 -+IN Q+-%R0029
      | LEN |
      |00001|
      +-----+

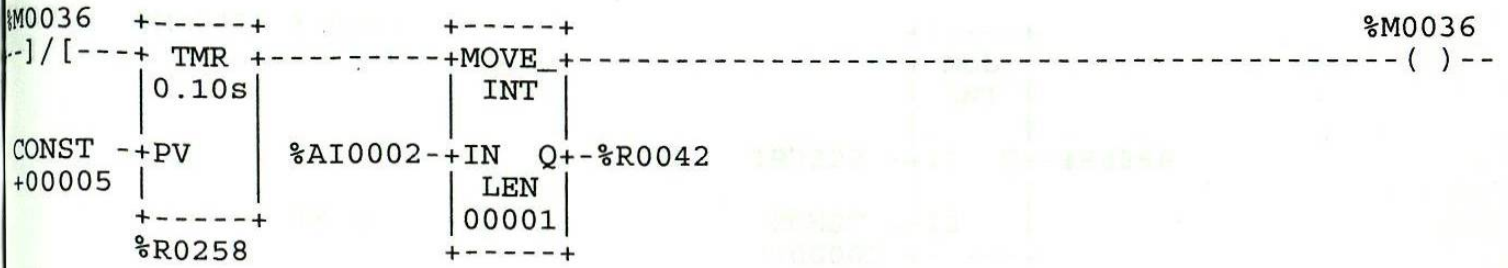
```

(\* COMMENT \*)

(\* COMMENT \*)



<< RUNG 28 STEP #0063 >>



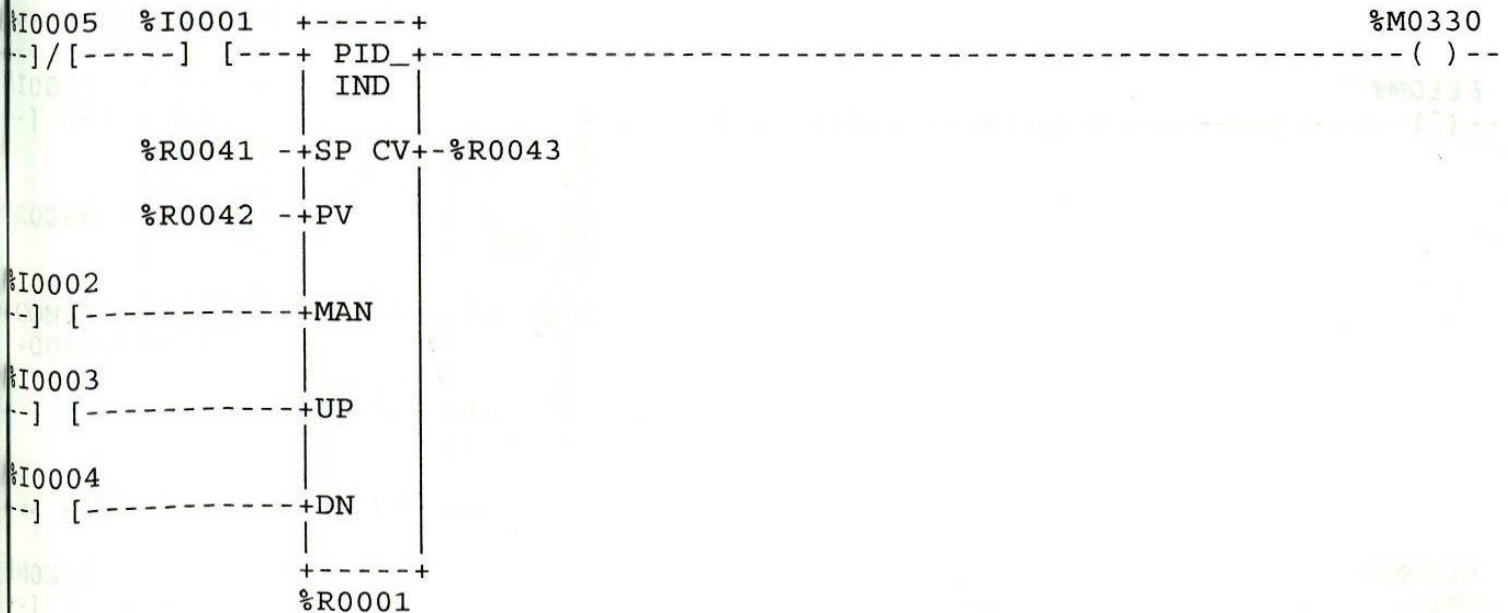
<< RUNG 29 STEP #0067 >>



<< RUNG 30 STEP #0070 >>



<< RUNG 31 STEP #0073 >>







<< RUNG 52 STEP #0140 >>

```

%M0012 +-----+                                +-----+                                +-----+                                %M0044
--] [---+ ADD_+-----+                        +MOVE_+-----+                        + SUB_+-----+----- ( )--
      | INT |                                | INT |                                | INT |
%R0292 -+I1  Q+-%R0212  %R0212 -+IN  Q+-%R0284  %R0215 -+I1  Q+-%R0310
      |   |                                | LEN |                                |   |
%R0295 -+I2  |                                | 00001 |                                |   |
      +-----+                                +-----+                                +-----+
                                         CONST -+I2
                                         +00001 +-----+
    
```

<< RUNG 53 STEP #0145 >>

```

%M0044 +-----+                                +-----+                                %M0013
--] [-----+ MUL_+-----+                        + DIV_+-----+----- ( )--
      | DINT |                                | DINT |
      %R0284 -+I1  Q+-%R0286
      |   |                                |   |
      CONST -+I2
      +0000000100 +-----+
      %R0286 -+I1  Q+-%R0262
      |   |                                |   |
      %R0310 -+I2
      +-----+
    
```

(\* COMMENT \*)

<< RUNG 55 STEP #0150 >>

```

%M0001 +-----+
--] [---+MOVE_+-
      | INT |
%R0042 -+IN  Q+-%R0264
      | LEN |
      | 00001 |
      +-----+
    
```

<< RUNG 56 STEP #0152 >>

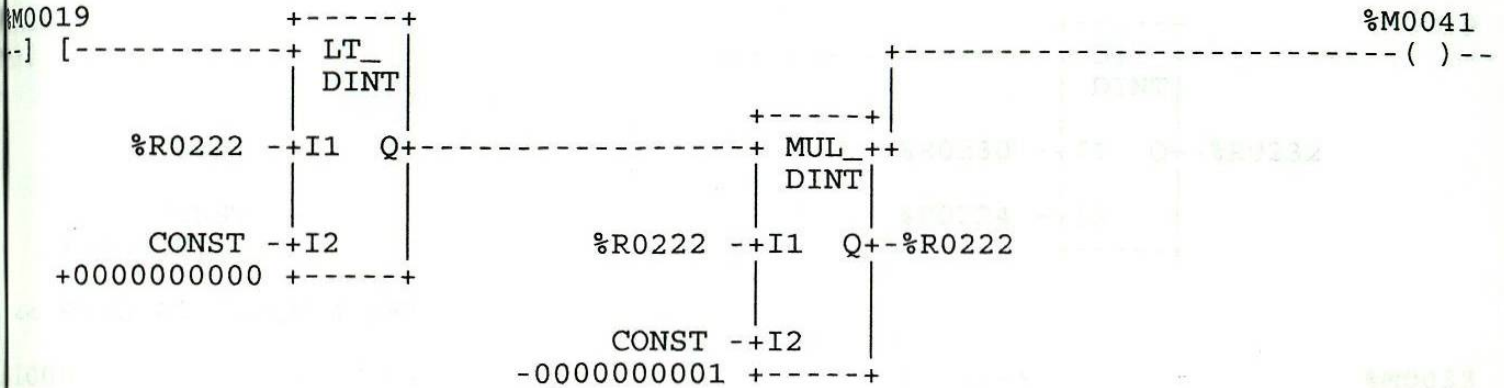
```

%I0005 %M0012 +-----+                                +-----+                                %M0043
--] [-----] [---+ MUL_+-----+                        + MUL_+-----+----- ( )--
      | DINT |                                | DINT |
      %R0206 -+I1  Q+-%R0218
      |   |                                |   |
      %R0206 -+I2
      +-----+
      %R0202 -+I1  Q+-%R0220
      |   |                                |   |
      %R0202 -+I2
      +-----+
    
```

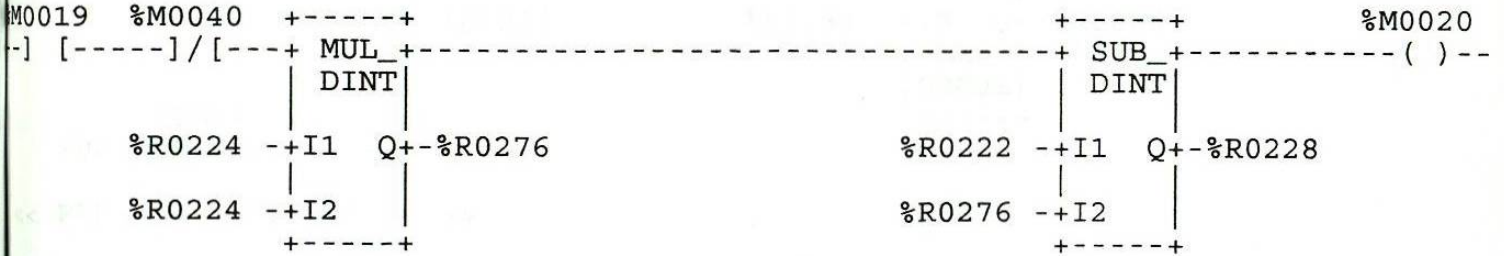
<< RUNG 57 STEP #0157 >>



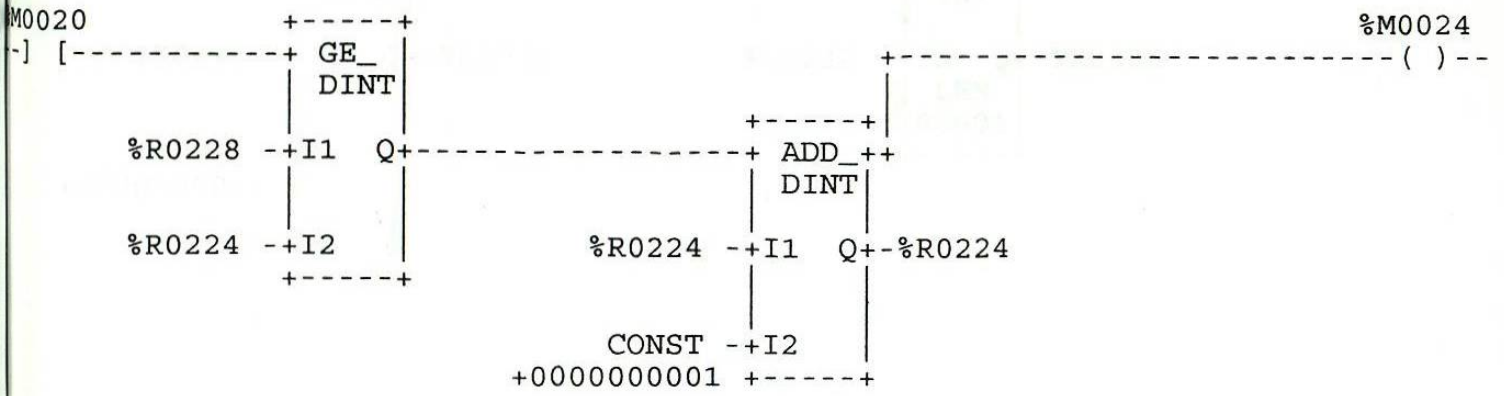
<< RUNG 58 STEP #0160 >>



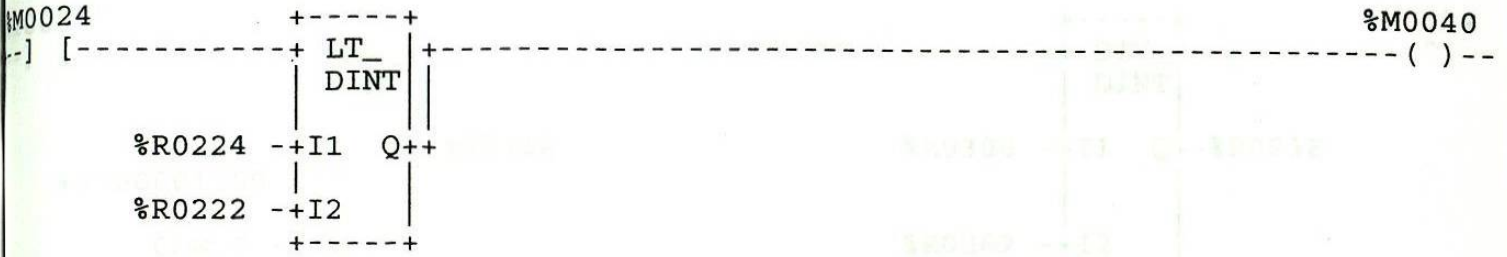
<< RUNG 59 STEP #0164 >>



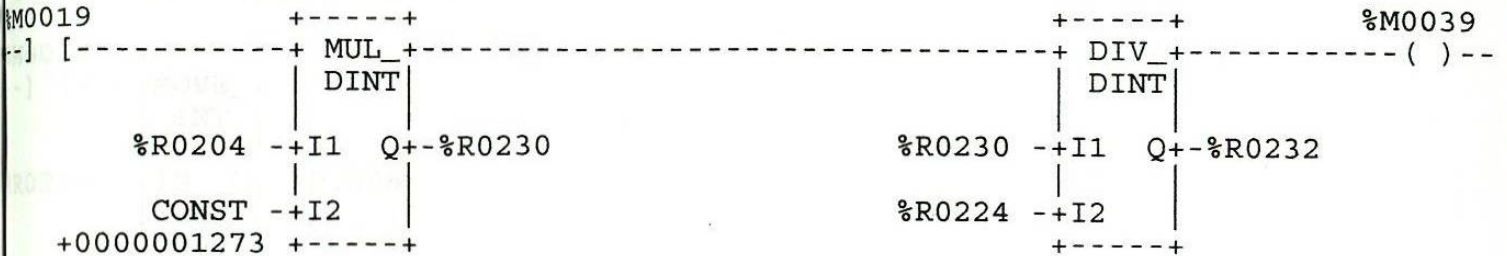
<< RUNG 60 STEP #0169 >>



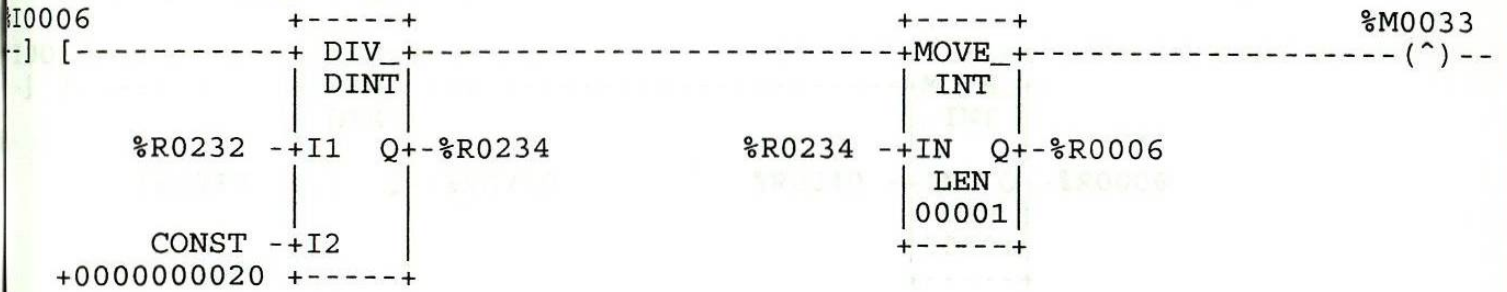
<< RUNG 61 STEP #0173 >>



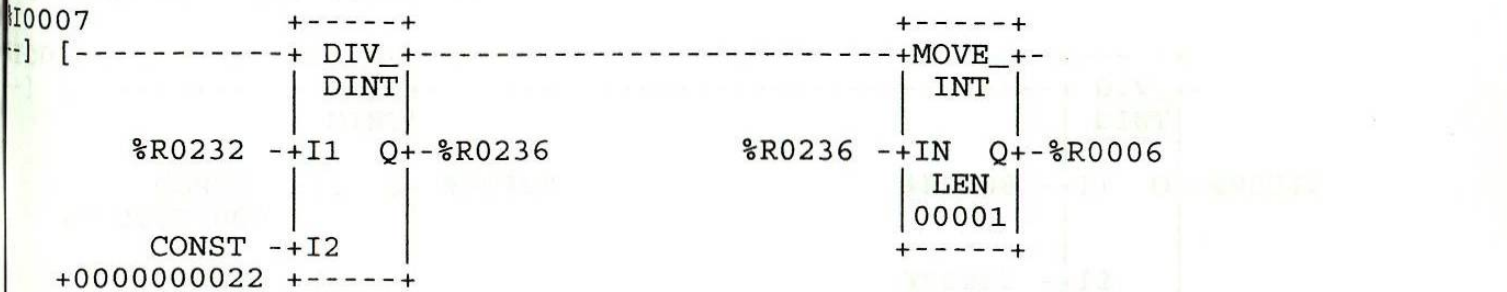
<< RUNG 62 STEP #0176 >>



<< RUNG 63 STEP #0180 >>



<< RUNG 64 STEP #0184 >>





<< RUNG 69 STEP #0199 >>

```

%I0012 +-----+
--] [---+MOVE_+-
      | INT |
%R0242 -+IN  Q+-%R0008
      | LEN |
      |00001|
      +-----+

```

<< RUNG 70 STEP #0201 >>

```

%I0012 +-----+ +-----+ %M0035
--] [-----+ DIV_+-----+MOVE_+-----+ (^)
      | DINT| | INT |
%R0262 -+I1  Q+-%R0244 %R0244 -+IN  Q+-%R0007
      |   | | LEN |
      |   | |00001|
CONST -+I2 |
+0000000080 +-----+

```

<< RUNG 71 STEP #0205 >>

```

%I0005 %M0329 +-----+ %M0329
--] [---+---]/[---+ TMR +-----+ (^)
      |   | | 0.10s |
%I0015 |   |
--] [---+ CONST -+PV
      |   |
      |   |
+00020 |
      |   |
      +-----+
      %R0288

```

<< RUNG 72 STEP #0210 >>

```

%M0329 +-----+
--] [---+SHFR_+-
      | WORD |
%I0014 |   |
--] [---+R  Q+-%M0297
      | LEN |
      |00080|
%R0043 -+IN
%R0351 -+ST
      +-----+

```



<< RUNG 73 STEP #0213 >>

```
%M0329 +-----+
--] [----+SHFR_+-
      |      |
      |      | WORD
      |      |
%I0014 |      |
--] [----+R   Q+-%M0313
      |      |
      |      | LEN
      |      | 00080
%AI0002-+IN
      |
%R0431 -+ST
      +-----+
```

[ END OF PROGRAM LOGIC ]

