

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE
CONTROL DE NIVEL EN TANQUES ACOPLADOS


TESIS PREVIA LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO EN ELECTRONICA Y CONTROL


Marco Vinicio Soria Mora

Quito, Junio, 2000

CERTIFICACION

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el señor Marco Vinicio Soria Mora


Dr. Luis Corrales P.
DIRECTOR


Ing. Marco Barragán B.
CO-DIRECTOR

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme concedido la vida para culminar mis metas.

A mi madre por ser el pilar de mi vida.

A mis profesores, que han sabido ser mis guías y consejeros.

A todas aquellas personas que de una u otra forma han colaborado para la culminación de este trabajo.

INDICE

	Página
CAPITULO 1	
INTRODUCCION	1
1.1 CONCEPTOS BASICOS SOBRE LIQUIDOS	3
1.2 MEDICION DE NIVEL DE LIQUIDOS	5
1.2.1 Detección de nivel por variación de capacidad	6
1.2.2 Detección de nivel por flotadores	9
1.3 ADQUISICION DE DATOS POR COMPUTADOR	12
1.3.1 Manejo de la adquisición de datos	13
1.3.2 Interfaz hombre-máquina (MMI)	17
1.4 TARJETA Y SOFTWARE DE ADQUISICION DE DATOS	19
1.4.1 Sistemas disponibles de adquisición de datos	19
1.4.2 LabVIEW 5.0	21
1.4.3 Tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200	23
1.5 CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS PROPUESTO	27
CAPITULO 2	
DISEÑO DEL MÓDULO DIDÁCTICO	29
2.1 TRANSDUCCION	32
2.1.1 Diseño del sensor capacitivo	32
2.1.2 Diseño del acondicionador para el sensor capacitivo	37
2.1.3 Diseño de los acondicionadores para los sensores de flotación	44
2.2 SISTEMA DE ALIMENTACION	45
2.2.1 Fuentes de voltaje para transducción	45
2.2.2 Fuentes de voltaje para actuación	47
2.3 SISTEMA DE CONTROL	48
2.3.1. Sistema de adquisición y manejo de datos	48
2.3.2. Diseño de la interfaz hombre-máquina (MMI)	50
2.3.2.1. Interfaz de inicio	52

2.3.2.2. Interfaz de selección	53
2.3.2.3. Interfaz de control de nivel en un tanque	55
2.3.2.4. Interfaz de control de nivel en tanques acoplados	61
2.3.2.5. Panel de conversión de voltaje a nivel	66
2.3.2.6. Calibración del sistema	70
2.3.2.7. Interfaz de animación	71
2.3.2.8. Interfaces de información	73
2.3.2.9 Características complementarias del programa	74
2.4 SISTEMA DE ACTUADORES	75
2.4.1 Bombeo de líquido	75
2.4.2 Extracción de líquido	77
2.5 DISEÑO DEL MODULO DE ACONDICIONAMIENTO	79
2.5.1 Esquema general del módulo	79
Diagrama del circuito de alimentación y actuación	80
Diagrama del circuito de transducción.	81
2.5.2 Diseño del circuito impreso y distribución física	82
2.6 ELEMENTOS ADICIONALES	83

CAPITULO 3

PRUEBAS Y FUNCIONAMIENTO DEL MODULO

DIDACTICO 85

3.1 PRUEBAS PREVIAS	85
3.1.1 Pruebas del sensor capacitivo	85
3.1.2 Pruebas con distintos niveles de acoplamiento entre tanques	87
3.1.3 Pruebas del generador de frecuencia	88
3.2 CALIBRACION DEL SISTEMA	89
3.2.1 Calibración del generador de ondas	90
3.2.2 Calibración del conversor de frecuencia a voltaje	91
3.2.3 Calibración del programa de control	92
3.3 MODOS DE FUNCIONAMIENTO DEL MODULO	97
3.3.1 Pruebas del control de nivel en un tanque	97
3.3.2 Pruebas del control de nivel en tanques acoplados	100
3.3.3 Consideraciones sobre el funcionamiento	102

CAPITULO 4.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 105

4.1 CONCLUSIONES 105

4.2 RECOMENDACIONES 108

APLICACIONES DIDACTICAS DEL MODULO 109

4.2.1 Control de nivel en un tanque 110

4.2.2 Control de nivel en tanques acolados 110

4.2.3 Adquisición de datos por computador 111

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

CAPITULO 1

INTRODUCCION

En el amplio campo de la instrumentación electrónica industrial, son innumerables las ocasiones en que el principal requerimiento de un sistema es encontrar el valor de una determinada variable física, que es parte integrante del mismo y de la cual se debe disponer la información necesaria para su manejo. Estas variables pueden ser peso, volumen, densidad, concentración, temperatura, presión, entre otras. El presente trabajo de tesis se enfocará en la detección y medición del nivel de un líquido dentro de un sistema físico de tanques acoplados.

En el proceso de aprendizaje dentro de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional se incluye el conocimiento de los sistemas de transducción, de los sistemas de medición industrial, de la adquisición de datos y el control industrial mediante los sistemas computacionales. El presente trabajo integra estos ámbitos en la construcción de un solo módulo que emplea las bases de dichos conocimientos para su funcionamiento. El objetivo fundamental es controlar la altura a la que se encuentra una cierta cantidad de líquido, que en el trabajo será el agua potable, y lograr visualizarla en la pantalla de un computador a través de una interfaz hombre-máquina (MMI), así como también proporcionar una herramienta útil para posteriores demostraciones en el proceso de aprendizaje dentro del pensum de estudios de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Se procederá entonces a diseñar y construir un módulo didáctico en base a una infraestructura ya existente, y que formará parte integral del laboratorio de Instrumentación Industrial. En este modelo se aplicarán los principios requeridos para

lograr un control sobre la variable ya descrita procurando dotar de herramientas de aprendizaje a los estudiantes de control e instrumentación.

Por requerimientos específicos en el laboratorio de instrumentación, los limitantes que se manejarán en el presente trabajo de tesis serán: la utilización de un sensor de tipo capacitivo para captar el nivel de líquido. Obtener una señal que deberá ser tomada a través de la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200 de la casa National Instruments conectada en un computador y manejada por el software de instrumentación virtual LabVIEW 5.0, del mismo fabricante. El control del nivel del líquido se hará en un par de tanques acoplados mediante diferentes aberturas dispuestas para el efecto.

La infraestructura ya disponible cuenta con sistema de bombeo, sistema de extracción de líquido, sensores capacitivos de nivel y sensores de nivel de seguridad. Todos los elementos indicados deberán resultar en una planta útil para las prácticas en las distintas áreas involucradas.

El presente trabajo escrito describe todos los conocimientos teóricos y prácticos involucrados, así como las experiencias encontradas, estructurados de la siguiente forma:

Capítulo 1: Aquí se exponen los conceptos fundamentales sobre el control del nivel de líquidos, se enfocan los criterios teóricos sobre los sensores capacitivos existentes en el mercado y los empleados; se describe la técnica de adquisición de datos por medio de una tarjeta especializada en esta tarea y el sistema que se propone como solución. En resumen, provee los fundamentos teóricos de los dispositivos incluidos en el módulo didáctico.

Capítulo 2: Se dedica al diseño y justificación de los dispositivos eléctricos y mecánicos que conforman el módulo. Se analiza cada etapa en torno a los criterios empleados en la construcción y las experiencias obtenidas en su desarrollo. Se describe la estructura del programa de control basado en LabVIEW y su funcionamiento. Aquí

se reseñan también las pruebas realizadas a los sensores, en sus etapas de diseño y construcción, hasta la obtención del módulo finalmente implementado.

Capítulo 3: Indica las pruebas y análisis realizados al conjunto finalmente estructurado. Se explican los modos de funcionamiento del módulo, así como del sistema de control y adquisición de datos.

Capítulo 4: Se destina a la presentación de las conclusiones obtenidas en el desarrollo del presente trabajo de tesis. Incluye el formato estructurado para la realización de las prácticas de laboratorio, de acuerdo a los programas educativos y requerimientos de enseñanza que se pueden satisfacer con el módulo de pruebas construido.

En los anexos del trabajo se pueden hallar los planos generales tanto eléctricos como mecánicos, listado de elementos y la información adicional considerada como aporte a la comprensión del proyecto.

1.1 CONCEPTOS BASICOS SOBRE LIQUIDOS.

De manera macroscópica se clasifica a la materia en sólidos y fluidos. Fluido es toda materia capaz de fluir, esta puede ser líquida o gaseosa, que se diferencian principalmente en sus coeficientes de compresibilidad.

Se define como líquido a un estado de la materia en el cual las moléculas de ésta se encuentran relativamente libres respecto a las del estado gaseoso, pero se hallan restringidas por la fuerza de cohesión que mantiene un volumen prácticamente fijo.

Los líquidos tienen la propiedad de tomar la forma del recipiente que los contiene; por tanto, no se puede considerar una forma geométrica definida para su masa, pues variará de acuerdo al recipiente en que se halle confinado. Esta verdad física es evidente en las observaciones cotidianas y se empleará para conocer el volumen de líquido requerido en el sistema de control implementado.

La *presión* de un líquido es la fuerza actuante en una unidad de área, es un esfuerzo multidireccional y uniforme sobre las paredes del recipiente que lo contiene. Debido a esto se puede lograr el paso de líquido desde un tanque a otro a través de aberturas, al emplear el principio de los vasos comunicantes, como se hace en este trabajo.

Flujo es el movimiento de un fluido; si se halla confinado a un camino determinado es susceptible a ser medido por distintos métodos, uno de los cuales es indicado en el presente trabajo de tesis como un aporte adicional.

En la teoría de la hidrostática existe el principio de los vasos comunicantes. Según este principio el nivel de un líquido llega a la misma altura, en todos los segmentos del recipiente que los contiene, independientemente del número de vasos o de la forma que estos tengan, siempre y cuando estos segmentos estén conectados.

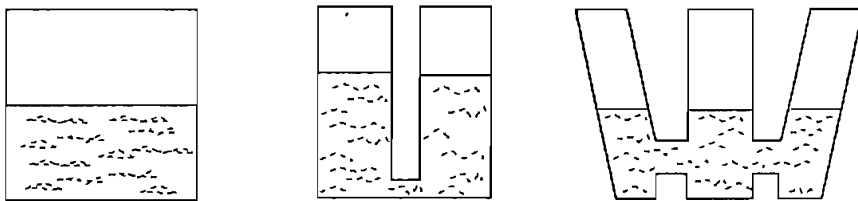


Figura 1.1 Principio de vasos comunicantes

Este es el principio fundamental empleado en el presente trabajo para llegar a controlar el nivel de uno de los tanques a partir de la cantidad de líquido que se lleva hacia el otro tanque.

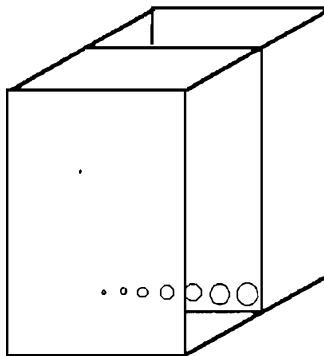


Figura 1.2 Módulo de tanques acoplados

Como se puede apreciar en la Figura 1.2, el conjunto se halla acoplado en la parte inferior de la pared lateral común; a través de cierto número de aberturas de distintos diámetros, que pueden permanecer abiertas o cerradas empleando sus respectivos tapones de caucho.

1.2. MEDICION DE NIVEL DE LIQUIDOS.

La variable nivel de líquido se considera como un factor determinante en refrigeración, disolución de mezclas, almacenamiento de combustibles y muchos procesos químicos.

Para poder determinar el valor de esta variable se debe recurrir a algún sistema de medición que provea la información necesaria para determinar el valor de la misma. Este sistema de medición puede recurrir a muchas técnicas, desde la simple apreciación visual hasta complejos sistemas de transducción dependiendo del ambiente y la aplicación que se esté desarrollando. Estas técnicas se basan en principios físicos, químicos o eléctricos y algunas emplean sensores o transductores que convierten la magnitud de la variable en una señal manejable por un sistema de medición o un sistema de control electrónico.

Los métodos más empleados en la medición del nivel de líquidos se pueden dividir principalmente por su modo de actuación: directa o indirecta. A continuación se nombran algunos de los métodos clasificados por su modo de actuación.

METODOS DIRECTOS

Medición directa con apreciación visual

Medición por flotadores

Medición por efecto fotoeléctrico

Medición por dispositivos sónicos

METODOS INDIRECTOS

Métodos hidrostáticos

Medición por transferencia calórica

Medición por variación de conductividad

Medición por nivel de radiación

Medición por variación de capacidad

Uno de los requisitos en la construcción del módulo didáctico es la utilización de sensores de tipo capacitivo; por tanto, a partir de este punto se enfoca más la teoría y las técnicas que incluye este tipo de transductor.

1.2 .1 DETECCION DE NIVEL POR VARIACION DE CAPACIDAD.

Conociendo que el funcionamiento de los transductores se basa en el cambio de ciertas magnitudes físicas, se describe a continuación el principio de transducción empleado en el módulo, el capacitivo. Este convierte un cambio del nivel del líquido en un cambio de capacidad. Puesto que un capacitor básicamente se compone de dos placas metálicas y un dieléctrico, se puede cambiar la capacidad por variación de uno de estos elementos o de ambos como se muestra en la Figura 1.3.

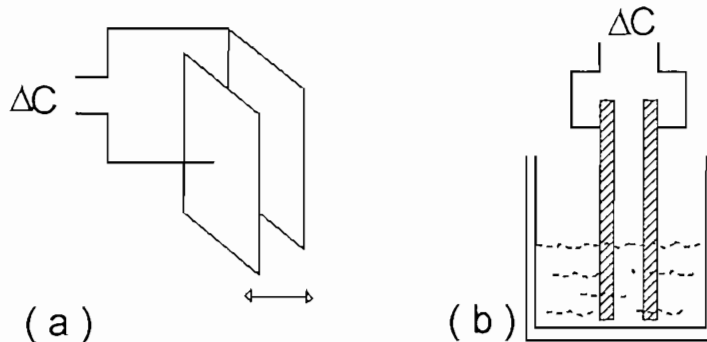


Figura 1.3 a) Armadura móvil b) Armaduras fijas

Para lograr una capacidad variable de acuerdo al nivel del líquido en un recipiente son muchas las técnicas que se emplean, se pueden emplear distintas configuraciones para obtener dicha variación de capacidad como son:

Sensor de armaduras planas

Para la construcción de este tipo de sensores se debe considerar que la capacidad entre dos placas paralelas se obtiene mediante la ecuación que se muestra en la Figura 1.4:

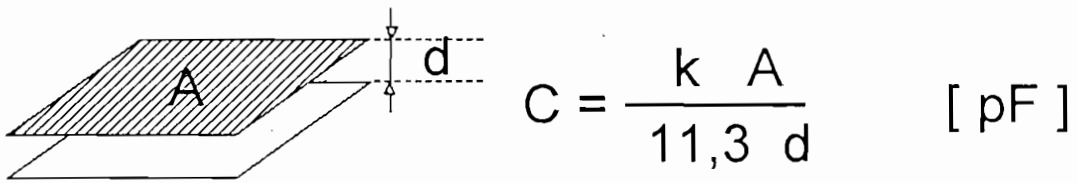


Figura 1.4 Capacitor de placas paralelas

Donde: A es la superficie de la placa en centímetros cuadrados (cm²),
 d es la distancia entre las placas, en centímetros (cm); y,
 K es una constante en picofaradios sobre centímetro (pF/cm).

En un sensor de este tipo se pueden tener dos variaciones: se permite el ingreso del líquido en el espacio entre las placas de acuerdo a la altura de éste (Figura 1.5.a), o se cambia la distancia entre las placas manteniendo el mismo dieléctrico (Figura 1.5.b).

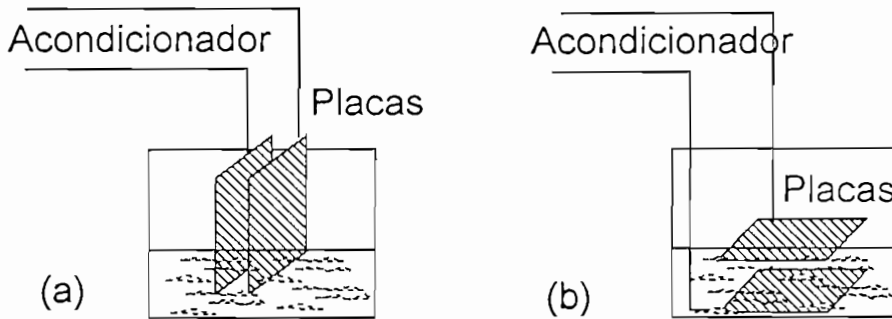


Figura 1.5 Sensores capacitivos de placas planas

Sensor de armaduras coaxiales

Este tipo de sensor consta de dos cilindros metálicos estructurados en un mismo eje y su capacitancia está dada por la expresión mostrada en la Figura 1.6.

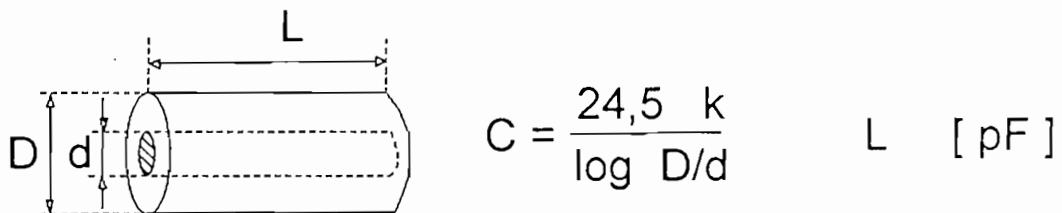


Figura 1.6 Capacitor cilíndrico

Donde los valores de los diámetros D y d están en centímetros (cm), la longitud L en metros (m) y la constante K en picofaradios sobre metros (pF/m).

Estos sensores pueden tener dos configuraciones: con dieléctrico variable y con distancia entre placas variable. En ambos casos la colocación del sensor es de forma vertical.

En la configuración de dieléctrico variable se permite el ingreso del fluido a ser sentido de manera que se crean dos fases de dieléctricos, la fase del aire y la del líquido, como se indica en la Figura 1.7.a. Así se obtiene una capacidad variable de acuerdo a la altura que se tenga en el tanque y la capacidad total es la suma de las capacidades que se forman con los distintos dieléctricos:

$$C = C_{\text{Dieléctrico 1}} + C_{\text{Dieléctrico 2}} + C_{\text{Dieléctrico 3}} + \dots$$

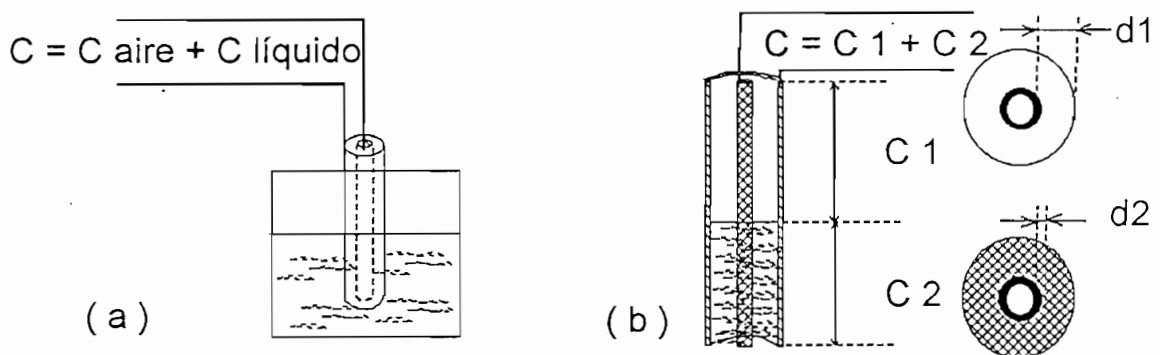


Figura 1.7 Sensores de armadura coaxial

También se tiene la configuración coaxial con cambio de distancia entre las placas. Esta se emplea cuando el líquido a ser medido es conductor, como es el caso del agua potable debido a las sales que tiene disueltas. En estos sensores, esquematizados en la Figura 1.7.b, se recubre una de las placas con un material dieléctrico fijo a la placa y que no permite el contacto con el fluido, dejando a la otra placa libre. Cuando el líquido ingresa al sensor envuelve a la placa libre creando una placa conductiva de mayor diámetro, lo que disminuye la distancia entre las placas en este espacio.

Sensor de electrodos capacitivos

Este tipo de sensor se emplea cuando se trabaja en líquidos que poseen una constante dieléctrica alta, se puede emplear un solo electrodo capacitivo si el líquido se halla contenido en un recipiente metálico.

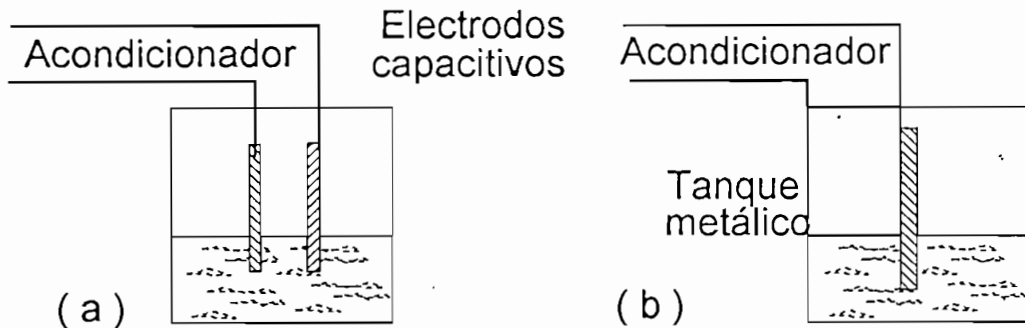


Figura 1.8 a) Sensor de doble electrodo b) Sensor de un solo electrodo

Hasta aquí se han descrito los principios de transducción capacitivos que se emplean en la construcción de sensores de este tipo.

Debido a que se emplearán un par de sensores de flotación para proveer la información sobre los puntos máximos que puede alcanzar el nivel de líquido en cada tanque, a continuación se detalla el principio de funcionamiento de los mismos.

1.2.2 DETECCION DE NIVEL POR FLOTADORES.

Estos dispositivos se basan en el uso de un cuerpo sólido y hueco con peso específico menor que el del líquido a ser medido. Se pueden clasificar en instrumentos de acoplamiento directo, cuando su movimiento se transmite a un indicador directamente, o acoplamiento indirecto, cuando el movimiento se convierte en otro tipo de señal: magnética, hidráulica o eléctrica, y luego se lleva al indicador respectivo.

Estos instrumentos se pueden aplicar tanto para mediciones continuas como para mediciones discretas como el caso del interruptor de flotación que se emplea en detectar el nivel máximo en el módulo didáctico. Un par de flotadores colocados en

cada tanque cierran sus contactos internos, mediante un campo magnético, cuando el líquido llega al nivel requerido y eleva el flotador móvil del que dispone el interruptor.

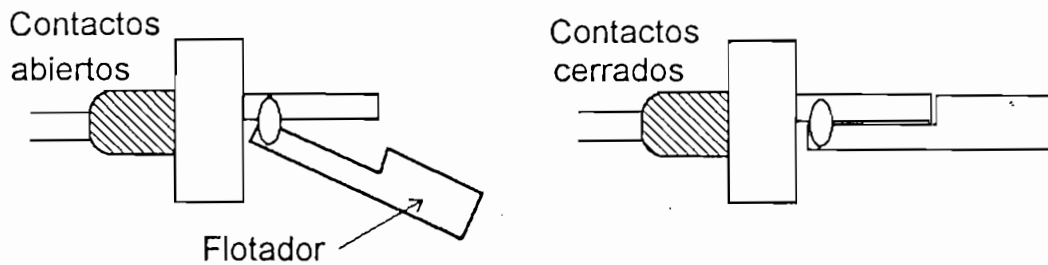


Figura 1.9 Sensor discreto de nivel con flotador

Como se observa en la Figura 1.9, en la posición normal el sensor mantiene sus contactos abiertos, al subir el nivel del líquido el flotador se eleva hasta llegar a la posición horizontal, donde actúa el campo magnético sobre los contactos cerrándolos. Este cierre de los contactos se emplea como una señal que recibe el resto del sistema de control para su utilización posterior.

El funcionamiento puede ser también manteniendo siempre los contactos cerrados y detectar el cambio cuando estos se abren.

Complementariamente a lo expuesto hasta aquí, para la implementación de un determinado método de medición de nivel de sustancias líquidas se deben tomar en cuenta otros aspectos como:

1. Características propias del líquido a ser sensado.
2. Factibilidad física y mecánica para la colocación de los sensores.
3. Costos y requerimientos particulares

Debido a la presencia de distintas sales disueltas en el agua potable esta se convierte en un líquido conductor, por tanto no se puede emplear al sensor capacitivo empleando la técnica de distintas capas de dieléctrico (Figura 1.7.a) sino que se debe optar por el método de variación de distancia entre placas (Figura 1.7.b) que se detallará en un numeral siguiente. Esta propiedad del líquido no influye en ningún aspecto sobre el

funcionamiento del sensor de flotación, por tanto no causa ningún impedimento en su utilización.

Otra propiedad a considerar en los líquidos es la viscosidad, pues uno de sus efectos es que el fluido se adhiere a las paredes del elemento sumergido. Esto podría ocurrir al introducir verticalmente un sensor capacitivo como se muestra en la Figura 1.10.

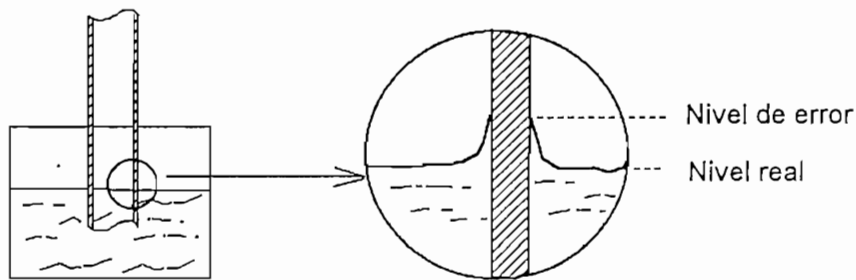


Figura 1.10 Efectos de la viscosidad

Al tener esta adhesión del líquido a las paredes del sensor, se pueden realizar lecturas erróneas del nivel del líquido, lo que afectaría el funcionamiento del resto del sistema. Es una ventaja, en el módulo, el uso de agua potable que tiene un coeficiente de viscosidad muy bajo, con lo que la adhesión a las paredes del sensor capacitivo es mínima y se puede despreciar.

Como segundo punto se debe considerar la facilidad de colocar un sensor en el sistema a ser medido y sus características físicas. Por razones didácticas, los sensores del módulo se ubicarán verticalmente dentro de los tanques, manteniendo a los sensores de flotación en posición horizontal.

En cuanto a características físicas de los sensores, estas dependen del fabricante del cual provengan. En el módulo didáctico, los sensores son construidos en base a las ecuaciones descritas anteriormente. Los sensores de flotación que se emplean son del tipo comercial, y disponen de una sola pieza móvil, el flotador.

Finalmente, se debe hacer un análisis del costo que implica la implementación de un sistema de detección. No siempre la solución que involucra mayor tecnología es la más

adecuada. En el módulo didáctico se emplean sensores de tipo capacitivos contruidos específicamente para este trabajo de tesis, que se los hizo a un costo bajo y con las características requeridas. En el caso de los sensores de flotación, se emplean los disponibles en el laboratorio.

Por otro lado, se usa una computadora para el control del nivel sobre todo con fines didácticos y de aprendizaje; pues, en la práctica, esto sería realmente un desperdicio de recursos.

Todo el análisis realizado se centra en el hecho de que el módulo didáctico debe construirse en base a requerimientos impuestos para el trabajo de tesis.

1.3 ADQUISICIÓN DE DATOS POR COMPUTADOR.

En la actualidad no se puede concebir el desarrollo de la investigación sin el enorme aporte de las computadoras, cada vez de mayor rendimiento. Los procesos en las industrias no han podido quedarse a un lado de este desarrollo; al contrario, han tomado las mejores características de estas máquinas no solo para el desarrollo de los sistemas industriales sino para que formen parte de los mismos.

Ahora no solo se depende de un grupo de operadores oprimiendo botones o tirando de palancas, sino también de complejos sistemas interconectados que actúan cada uno en función de otro y que se hallan comandados por centros donde se dispone de toda la información de la planta y de los requerimientos de la misma.

Toda esta evolución ha llevado a la industria a un desarrollo que ha dado como fruto los denominados sistemas de control y de supervisión, que pueden tener control sobre dispositivos conectados en sitios lejanos al centro de control y proveer información para satisfacer las necesidades de quien es el objetivo del desarrollo: el ser humano.

Los grandes complejos industriales actuales tienen su confianza depositada en los sistemas de control manejados por computador, miles o millones de "puntos" de

control son leídos, evaluados y manejados en unas décimas de segundo por computadores destinados para tal efecto.

El mayor escollo que se debió superar para este avance fue el lograr la comunicación entre el mundo físico real y la información lógica que puede manejarse dentro de los computadores. La utilización de los convertidores análogo-digitales y los filtros digitales dieron un gran paso en lo que con el tiempo se convertiría en la teoría de adquisición de datos por computador.

1.3.1 MANEJO DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS POR COMPUTADOR.

Muchas veces se identifica el término adquisición de datos solamente con el trabajo de un computador al tomar mediciones, esta es una de las múltiples formas de la adquisición de datos. No se deben perder de vista avances tecnológicos como los sistemas multimedia, donde tanto imágenes como sonidos son convertidos en datos manejables en un computador, estos incluyen su sistema de adquisición; de hecho, el muy común, útil y, en la actualidad, indispensable ratón no es sino un sistema de adquisición de datos de posición.

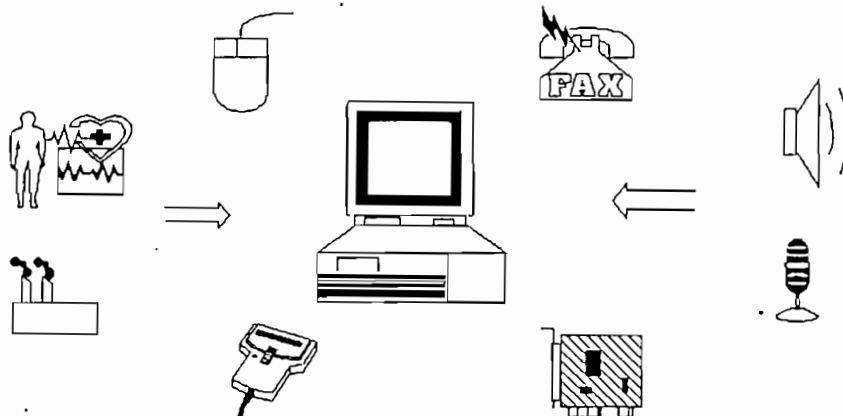


Figura 1.11 Sistemas de adquisición de datos al computador

En fin, se encuentran sistemas de adquisición de datos al computador en infinidad de usos. En el presente trabajo de tesis se empleará el término para definir la manera en

que se introduce la información sobre el nivel de líquido que se obtiene de los tanques, a través de una tarjeta específicamente construida para tomar mediciones de voltaje y aceptar señales lógicas de niveles TTL, con el fin de convertirlas en datos binarios ya manejables por el computador en que se halle conectada la tarjeta.

Son muchas las industrias que han optado por implementar un sistema computarizado de control y supervisión, considerando los muchos beneficios que se pueden obtener, desde la optimización de los recursos hasta la posibilidad de comunicación que en la actualidad tiene un desarrollo nunca antes visto.

Al optar por un sistema computacional de control es factible encontrar desde los sistemas sencillos de bajo costo hasta los complejos proyectos que involucran alta tecnología y por tanto su valor económico aumenta; desde el punto de vista del presente trabajo, para la selección de un sistema de control se deben considerar los siguientes parámetros:

1. Se requiere o no de un sistema de adquisición de datos; y,
2. Se puede escoger entre las distintas soluciones que se encuentran en el mercado o se debe optar por una solución propia.

En la selección de entre estas opciones es donde actúa el criterio de ingeniería; la decisión final para la solución de un problema industrial de control se la toma luego de un análisis no solo técnico sino también de la relación costo beneficio.

Si al continuar con el desarrollo del sistema se opta por un sistema que incluye la adquisición de datos para un proceso en el funcionamiento de una industria, se pueden considerar los siguientes pasos para su puesta en funcionamiento:

1. Identificar el tipo de señales de entrada y de salida (e/s).

Al elegir los componentes para el sistema de adquisición de datos se deben identificar en primer lugar los tipos de sensores y tipos de señales de entrada y

salida que se estarán empleando, considerando que pueden o no estar ya instalados en lo que se denomina planta.

Estas señales en un sistema basado en PC incluyen:

Entrada analógica: proveniente de sensores de temperatura, presión, tensión, voltaje, corriente, acústicos o de vibración, que en los formatos o estándares industriales pueden entregar señales de 5 a 20ma, de 0 a 10 V o de - 5 a +5V. En el trabajo se encontrarán dos señales analógicas en el rango de 0 a 10 V que representan el nivel de líquido y dos señales analógicas que indican el estado de los sensores de flotación.

Salida analógica: que se obtendrá desde el computador y se aplicará a la planta de alguna manera. Este tipo de señal puede ser voltaje o corriente de diferentes formas de onda, dependiendo de los requerimientos. El módulo didáctico emplea dos salidas analógicas como señales de control para los actuadores.

Entrada y salida digital: pueden ser de muchos tipos y niveles, generalmente se tendrán entradas y salidas (E/S) compatibles con TTL, comunicación serie, comunicación paralela, comunicación en redes, control de relés.

Temporización de entrada/salida: como entrada/salida de frecuencia, de conteo y temporización de eventos, medida de ancho de pulso, generación de tren de pulsos; todas estas, de ser requeridas en el proceso en que se halle funcionando el sistema de adquisición.

2. Seleccionar el método de acondicionamiento de señal.

La mayoría de los sensores y señales deben acondicionarse antes de conectarse a un equipo de adquisición de datos. El hardware de acondicionamiento de señal se usa para: amplificación, aislamiento, filtrado, excitación y multiplexación en el caso de que se tengan un gran número de canales.

Aquí se pueden optar por todos los recursos posibles, tomando en cuenta factores como bajo ruido, flexibilidad, robustez, rango de entrada y salida, velocidad de multiplexación y, evidentemente, los costos.

3. Seleccionar el sistema de adquisición de datos más apropiado.

En este paso se manejan criterios como la precisión, frecuencia de muestreo del hardware de adquisición, número de canales disponibles para el sistema, flexibilidad, fiabilidad, capacidad de expansión y tipo de plataforma de funcionamiento; para determinar cual es el dispositivo de adquisición de datos más adecuado.

Se encuentran en el mercado dispositivos con innumerables características y beneficios; es aquí donde juega un papel importante el criterio para seleccionar los mismos, de acuerdo a la utilización y fiabilidad sobre el valor económico del sistema. Para el módulo didáctico se empleará la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200 construida por National Instruments, que es la disponible para el trabajo y debe emplearse necesariamente.

4. Seleccionar los cables más apropiados para la tarjeta y los accesorios de acondicionamiento de señal.

Se debe hacer un análisis sobre el medio en que se desenvolverá el sistema, la cantidad de ruido que deberá soportar en un ambiente industrial; así se tienen las dos principales opciones con sus características.

Cables aislados: que brindan mejor aislamiento al ruido y conexión robusta. En el módulo se emplean estos para el acoplamiento de los sensores capacitivos.

Cables planos: cuyas características son bajo costo, más flexible pero menos robusto, se hallan inmersos dentro de las conexiones del acondicionador y hacia la tarjeta de adquisición de datos.

Estas consideraciones en un sistema industrial deben incluir la existencia de un tablero de control general, y que las acometidas y conexiones requeridas hacia el mismo deben considerarse como las más seguras y en lo posible libres de ruido.

5. Seleccionar su software de programación.

Es aquí donde se llega al usuario final del sistema, por tanto deben seleccionarse los más acertados sistemas de programación. Generalmente se requiere de dos tipos de software: el de control de la tarjeta y el de la aplicación en sí; pero no se debe dejar de lado el análisis de la plataforma en que se desenvuelve todo el sistema computacional, y del sistema de computación del cual se disponga. Los recursos de la computadora deben seleccionarse basándose en los requerimientos del software elegido y no a la inversa. En el desarrollo de la presente tesis se utiliza el software LabVIEW 5.0 de National Instruments, debido a que se dispone de la licencia para su utilización a nombre de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, instalado sobre una plataforma PC y bajo un entorno de Windows 95.

1.3.2 INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (MMI).

En un proceso industrial que involucra sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos, de control, de computación y demás, se debe llevar toda la información necesaria hacia quien finalmente es quien toma las decisiones: un ente humano.

Es verdad que algunos procesos se realizan sin la intervención de un operador, pero el resultado final del proceso llegará a satisfacer las necesidades inicialmente indicadas. Es menester entonces mostrar de alguna forma el desarrollo del proceso o los resultados del mismo ante quien es el objetivo.

Se crea entonces la necesidad de lograr una comunicación entre la máquina que desarrolla un proceso y el hombre. Esta fase de comunicación entre estos elementos se denomina interfaz hombre máquina o MMI por sus siglas en inglés Man Machine Interface.

Con esta premisa se desarrollaron muchas herramientas para presentar los datos resultantes de un proceso al hombre y mantener así su supervisión. Desde las iniciales luces indicadoras, las sirenas, los botones pulsantes, etc. se ha conseguido llegar a una representación gráfica mucho más comprensible para un operador; esto es, el monitor de un computador.

El desarrollo de las computadoras, así como de los lenguajes de programación, han permitido la evolución de los sistemas MMI de manera que no solo se limiten a la presentación de información, sino que también sean capaces de monitorear la adquisición de datos y conducir su utilización; es decir, se ha logrado integrar estos sistemas para lograr finalmente un sistema de control de datos, que incluye todos los requerimientos para manejar los valores de las variables que se desean controlar en una industria.

Además, con el avance de la tecnología en comunicación, no solo se mantiene la información en una computadora, se la puede llevar a través de una red a otras computadoras e incluso a cualquier parte del mundo.

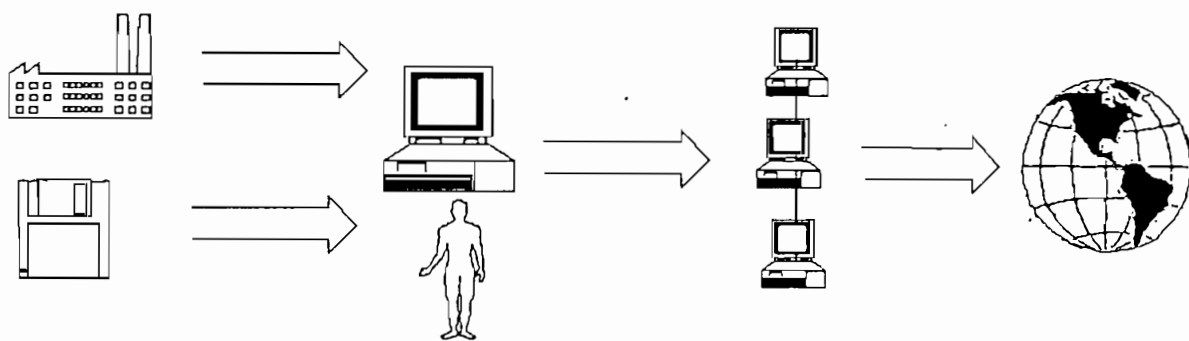


Figura 1.12 MMI y comunicación de computadores

Ya en la aplicación motivo de la presente tesis, se hallan interactuando con el operador los paneles desarrollados en el programa de control, que presentan en forma gráfica y dinámica los datos, el funcionamiento actual y las acciones a tomarse con los

dispositivos de actuación. Estos paneles se muestran en el monitor de un computador utilizando como herramienta de desarrollo el paquete LabVIEW 5.0.

1.4 TARJETA Y SOFTWARE DE ADQUISICION DE DATOS.

En la implementación del módulo didáctico de control del nivel de líquido en tanques acoplados se han considerado ciertos requerimientos ya mencionados, entre estos se tiene la utilización del software de instrumentación virtual LabVIEW versión 5.0 y la tarjeta Lab-PC-1200, ambos de la casa fabricante National Instruments, debido a que son las herramientas de las cuales dispone la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

Evidentemente, son muchos los dispositivos y el software que se puede encontrar para desarrollar una aplicación como la de la presente tesis, a continuación se analizarán aspectos de algunos de estos productos y se dará un enfoque directo a los elementos empleados en este trabajo.

1.4.1 SISTEMAS DISPONIBLES DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Se tienen disponibles en el mercado actual muchos sistemas encargados del manejo de datos, sistemas que permiten cambiar ciertos parámetros en base a las mediciones efectuadas en una planta, pero siempre se debe considerar en la elección de estos productos lo siguiente:

1. El hardware es la base y el limitante del rendimiento de cualquier sistema que se opere.
2. Los sistemas implementados deben ser lo más confiables posibles, aunque obviamente es imposible lograr un sistema absolutamente libre de fallas.
3. El tipo de señales que se puedan manejar en el sistema, así como la cantidad de las mismas.

4. La factibilidad de comunicación de que dispongan los sistemas.
5. La comparación entre costos de los diferentes sistemas disponibles.

Considerando todos estos parámetros se analizan a continuación los sistemas de monitoreo y control que se aplican actualmente en la industria:

1. Lookout

Creado por National Instruments, emplea la programación gráfica y el lenguaje G para aplicaciones en las que se requieren características de un sistema SCADA. Lookout emplea un sistema de programación por bloques, creando a partir de una tarea compleja un conjunto de tareas sencillas que interactúan entre ellas.

2. Factory Floor

Su fabricante es la empresa Opto22, el sistema de control se desarrolla alrededor de un conjunto de software enlazado entre sí; se tiene OptoControl, OptoDisplay y OptoServer. El sistema se basa en la comunicación entre la computadora y el dispositivo controlador, el cual almacena el programa y direcciona cada uno de los puntos de control mediante tarjetas conectadas entre sí denominadas Bricks de control.

3. InTouch

Se orienta estrictamente a los requerimientos de control y monitoreo industrial, empleado ampliamente en aplicaciones industriales.

4. LabVIEW

Desarrollado por National Instruments, posee la facilidad de manejar numerosas tarjetas de adquisición de datos, requiere una programación gráfica sencilla, emplea el lenguaje G, el uso de los controles ActiveX, dispone de una serie de manejadores para distintos dispositivos existentes en el mercado y posee la factibilidad de emplear los distintos tipos de comunicación.

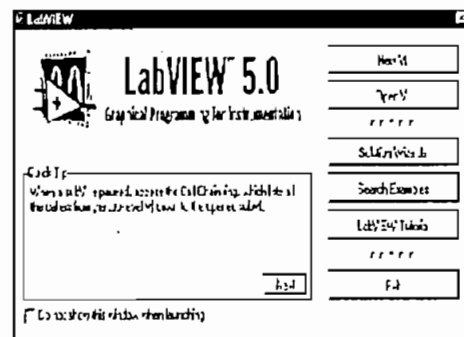
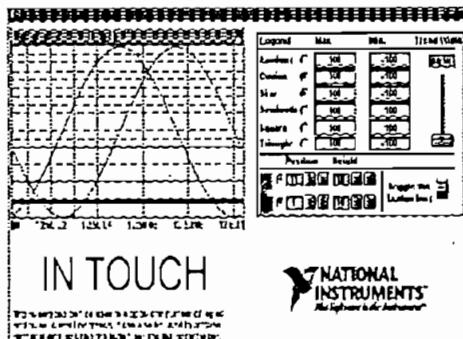


Figura 1.13 Presentación de distintos programas de control

1.4.2 LABVIEW 5.0

La versión 5.0 del software LabVIEW es la que se emplea en el presente trabajo de tesis para la adquisición de datos, el control de las variables y la presentación final en la interfaz hombre-máquina, MMI.

Para la utilización de LabVIEW 5.0 se requiere de la correspondiente licencia y un computador con características como:

- Procesador 386 a 25 MHz con coprocesador matemático 387 o mejor
- 75 Mb libres en el disco duro para la instalación completa
- Mínimo 8 Mb de memoria RAM
- Plataforma de trabajo Windows 3.1 o mejor.

En el desarrollo de este sistema de control se dispone de todas estos requerimientos de hardware; de hecho, se los supera, por tanto no se encontró ningún problema en este aspecto.

Se debe anotar que el mismo fabricante recomienda en aplicaciones de control más complejas usar un software de mayor alcance que el LabVIEW.

Es entonces necesario aclarar la diferencia entre un sistema de automatización o de control y supervisión y un sistema de instrumentación virtual. Los VI pueden ser una parte integrante de los primeros, que evidentemente serán de mayor alcance y complejidad.

LabVIEW es un ambiente de desarrollo de programas, como los lenguajes C o BASIC, pero difiere principalmente en que otros utilizan un sistema de programación basado en texto, es decir creando líneas de códigos, mientras que este software emplea un idioma de programación gráfico llamado G, para crear programas en diagrama de bloques.

Este software genera archivos con la extensión *.vi denominados instrumentos virtuales (VIs) porque su apariencia y funcionamiento pueden imitar instrumentos reales. Un programa VI desarrollado con esta programación de lenguaje G se encuentra estructurado de la siguiente forma:

- Una interfaz interactiva al usuario denominada Panel Frontal porque simula el tablero de un instrumento físico ya que puede contener perillas, pulsadores, interruptores, gráficos y otros mandos e indicadores.
- Un diagrama de bloques, que indica el flujo de datos, es el código fuente de donde se reciben las instrucciones construidas en lenguaje G. El diagrama de bloques es una solución pictórica al problema que se quiere resolver
- Un icono de conexiones, que permite tanto el ingreso como la salida de datos, haciendo funcionar al VI como un sub-VI, logrando un contenido modular o de

niveles de jerarquía; así, un VI puede llamar a otros que se encuentren en otro nivel jerárquico, introduciendo el concepto de subfunciones o subrutinas.

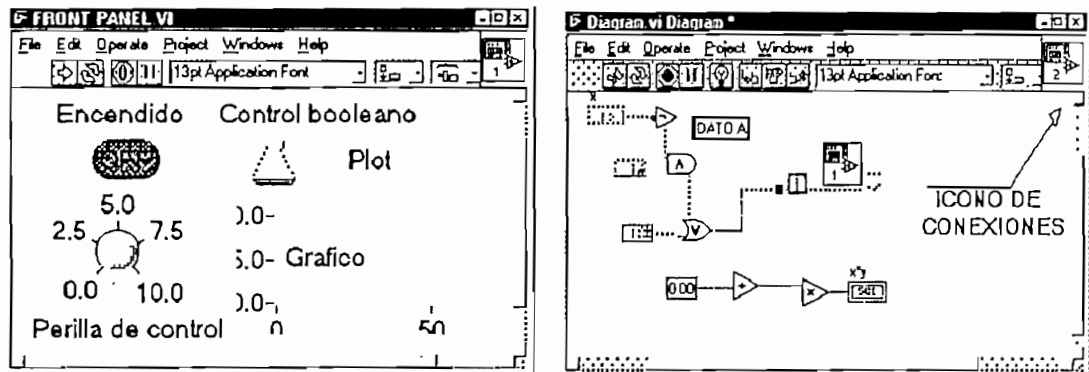


Figura 1.14 Paneles de LabVIEW

LabVIEW es entonces un entorno de programación que se utiliza principalmente para implementar sistemas de instrumentación virtual; pero, se puede emplear para procesos básicos de control sencillos, como en el presente trabajo de tesis.

1.4.3 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS LAB-PC-1200.

A continuación se indica con mayor detalle la tarjeta de adquisición de datos. Esta también es uno de los limitantes en el trabajo puesto que, como ya se ha mencionado, debe emplearse la tarjeta Lab-PC-1200 disponible en el laboratorio de Instrumentación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

La tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200 ofrece las siguientes características principales:

- Tasa de muestreo de 100 000 muestras por segundo
- Entradas analógicas de 12 bits, para usarse como 8 de terminal común o 4 diferenciales, en un rango de +/- 5 V o de 0 a 10v, que se puede determinar desde el software
- Dos salidas analógicas de 12 bits
- Tres contadores/temporizadores de 16 bits que funcionan hasta 7 MHz

- 24 líneas de entrada/salida digital compatibles con niveles TTL
- Terminal +5 V dc de alimentación, con capacidad de 1 amperio
- Ganancias programables de 1 hasta 100.
- Posibilidad de calibración por software, empleando la herramienta NI-DAQ
- Compatibilidad con el estándar industrial Intel / Microsoft Plug and Play
- Consumo de potencia: 185mA en modo +/- 5VDC
- Conector macho de 50 pines

La tarjeta de adquisición de datos está conectada directamente en una ranura de expansión ISA del computador empleado en el presente trabajo. La configuración de la tarjeta, tanto en sus niveles de voltaje de entrada como en ganancias, se la puede realizar desde el software de control de la tarjeta, proporcionado junto al programa LabVIEW, que se denomina NI-DAQ y proporciona las herramientas para la correcta conexión y funcionamiento de las distintas tarjetas que el programa de control puede manejar.

Como se indica anteriormente, la tarjeta dispone de entradas y salidas tanto analógicas como digitales, cada una de ellas con las siguientes especificaciones técnicas de funcionamiento:

Entradas analógicas

Dispone de ganancias programables de 1, 2, 5, 10, 20, 50 o 100 y además la facilidad de manejarse en modo unipolar de 0 a 10V o en modo bipolar de -5V a +5V, según su configuración en el software NI-DAQ.

Se dispone de ocho entradas analógicas, cada una en los pines del 1 al 8 y con su referencia en el terminal 11 denominado AGND (Analog ground). En el módulo didáctico se emplean dos de estas entradas analógicas para lograr la medición del nivel de líquido en cada tanque, con un valor de 0 a 10 V, y dos para mantener el monitoreo de la señal de los sensores de flotación.

Salidas analógicas

Con dos canales DAC0OUT y DAC1OUT, que se encuentran en los pines 10 y 12 respectivamente y con la misma referencia que las entradas analógicas; es decir, el pin 11 AGND.

De la misma manera puede seleccionarse el funcionamiento en modo unipolar o bipolar, pero en cualquiera de los casos se debe manejar una corriente de carga máxima de +/- 2 mA para mantener la linealidad en el conversor análogo digital de 12 bits del que se dispone internamente. El módulo emplea las dos salidas analógicas como señales de control para los actuadores de la planta.

Entradas y salidas digitales

Se dispone de 24 terminales que pueden funcionar como entradas o salidas compatibles con niveles TTL que están agrupadas en tres puertos distintos de ocho entradas o salidas: puerto A PA<0...7> en los pines 14 al 21, puerto B PB<0...7> en los pines 22 al 29 y puerto C PC<0...7> en los pines 30 al 37.

Todas las entradas o salidas digitales toman como referencia los pines 13 o 50 denominados DGND (Digital ground); y tienen las siguientes características:

Máximos valores soportados: -0.5 a +5.5 V

Reconocimiento de valor CERO lógico: -0.3V mínimo 0.8V máximo

Reconocimiento de valor UNO lógico: 2.2 V mínimo 5.3V máximo

Corriente de salida 2.5 mA

Terminal de alimentación

En el pin 49 del conector de entrada/salida se provee una señal de 5V DC proveniente de la fuente de alimentación de la computadora, protegida mediante un fusible de autoreseteo a la corriente de 1 amperio. Este terminal toma como referencia el pin DGND (13 o 50).

Se puede utilizar esta alimentación en algún circuito adicional a la tarjeta en la aplicación que se esté desarrollando.

En el sistema de control implementado se mantendrá un flujo constante de información entre la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200, el computador y la planta; por tanto, es necesario analizar si la misma es apta para manejar un proceso que tiene las siguientes características:

- La velocidad con la que el nivel del líquido en los tanques varía es relativamente baja, por tanto puede ser manejada perfectamente por la tarjeta, pues esta es capaz de responder hasta a 100.000 valores diferentes en un segundo.
- Se manejan señales de entrada/salida discretas en la planta que cumplen con los niveles TTL y que son aplicables directamente a los terminales de la tarjeta de adquisición.
- El sistema de transducción convierte la variación dada por los sensores capacitivos en valores de voltaje analógico aceptable como entrada hacia la tarjeta PC-Lab-1200.
- El número total de entradas y salidas son menores a las que se pueden manejar en la tarjeta.

En conclusión, por las características de la tarjeta Lab-PC-1200 y del software LabVIEW, descritas anteriormente, se pueden usar estos elementos en el sistema de control implementado sin ninguna restricción y la certeza de que responderán al funcionamiento requerido.

1.5 CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS PROPUESTO.

Como se ha indicado, el presente trabajo de tesis requiere de la construcción y puesta en funcionamiento de una planta de control de nivel de líquidos (agua) en tanques acoplados.

Se enfoca el presente trabajo en un sistema de control que se lo puede clasificar como un proceso continuo; es decir, la información se entregará al usuario, a través de la computadora, constantemente mientras se realiza el proceso.

Tanto en procesos continuos como discretos lo que se busca generalmente es mantener las variables físicas en:

- Un valor deseado fijo,
- Un valor variable con el tiempo de acuerdo a una relación predeterminada,
- Un valor que guarda relación con alguna otra variable.

El módulo didáctico implementado persigue básicamente satisfacer el primer objetivo, mediante la acción de una bomba para introducir mayor cantidad de agua en los tanques y una electroválvula para desfugarla.

Para esto, el presente trabajo de tesis debe incluir:

- Sensores de tipo capacitivo para la medición del nivel del líquido.
- Utilizar como enlace al computador la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200.
- El software de control a emplear debe ser el LabVIEW 5.0
- El líquido a utilizar en la planta es el agua potable

De todo lo expuesto hasta aquí se puede concluir que el sistema deberá operar de la siguiente manera:

El sensor capacitivo captará la variación de la altura del líquido, luego del acondicionamiento correspondiente, se enviará este valor al computador, mediante la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200. En el computador, una interfaz desarrollada bajo LabVIEW permitirá al usuario definir un nivel de referencia. Si el líquido está por debajo de esta referencia, el software de control ordenará a una bomba llenar el tanque. Si el líquido está por encima de la referencia, se ordenará la apertura de la electroválvula para desalojar el exceso de líquido.

CAPITULO 2

DISEÑO DEL MODULO DIDACTICO

Al módulo didáctico se lo puede considerar como un sistema interactuante de seis etapas, a continuación se presenta el diagrama y la respectiva descripción funcional de cada bloque:

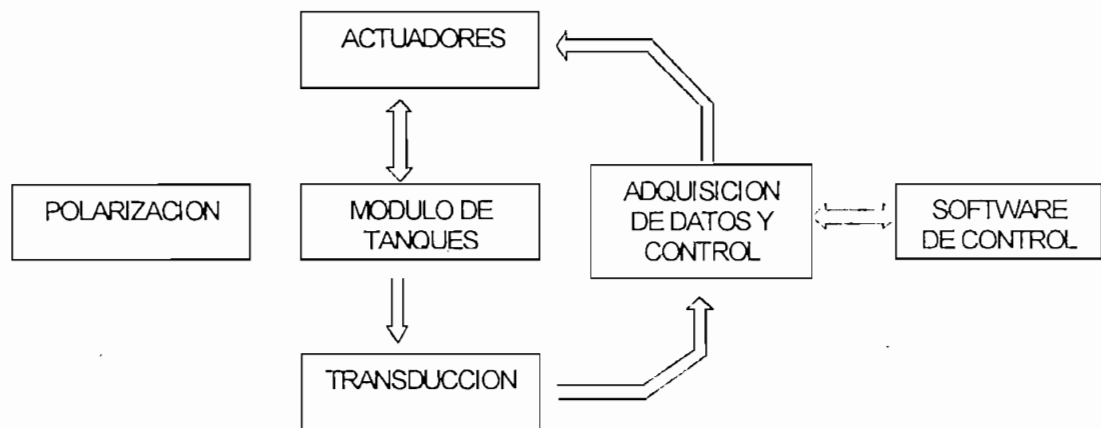


Figura 2.1 Diagrama en bloques del módulo

Módulo de tanques

Está constituido del tanque de almacenamiento del líquido, el par de tanques acoplados con sus respectivas conexiones para el flujo del agua y una base de soporte. Los elementos de este bloque serán el motivo de atención de todos los dispositivos que forman al sistema.

Polarización.

Este bloque entrega los voltajes DC requeridos para la polarización de los elementos electrónicos de transducción, de los sensores y de una bomba que proveerá la alimentación del líquido. En esta etapa se toma la derivación de la red eléctrica para el funcionamiento de la electroválvula.

sensores de flotación que proveen la señal de alerta cuando el nivel de agua supera el máximo que se puede manejar.

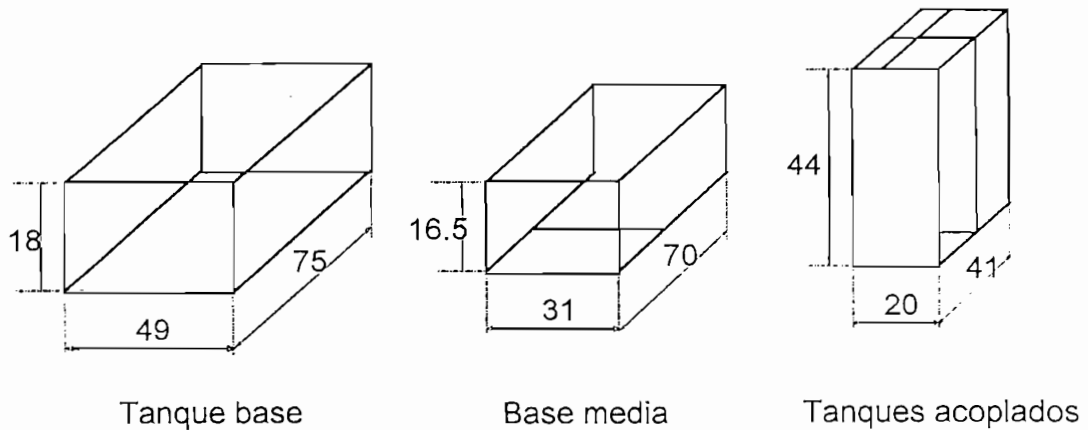


Figura 2.2 Módulo de tanques acoplados

2. Base media: construida de plástico transparente de dimensiones 70cm x 31 cm x 16.5cm, donde se encuentra montada la bomba inmersible para la provisión de agua con sus respectivas tuberías para conducir el flujo de agua; además, esta base provee la sustentación para los tanques acoplados. Adicionalmente existe un sistema de medición visual de flujo mediante la utilización de un sensor mecánico. Se anota que este sensor solo se coloca como aporte didáctico en el módulo, pues la variable flujo no se considera en el sistema de control.
3. Tanque base: hecho de plástico transparente, sus dimensiones son 75cm x 49cm x 18cm. Es aquí donde se coloca toda la provisión de agua del sistema, dispone de los respectivos indicadores visuales de niveles máximo y mínimo; sirve como base para todo el conjunto.

Todos estos elementos se encuentran disponibles en el laboratorio de Instrumentación Industrial para su empleo en las prácticas respectivas. En la Figura 2.2 se presenta un gráfico de los componentes como se los puede observar cuando se hallan separados.

Cada una de las otras etapas o bloques del sistema requirieron de ciertas consideraciones técnicas y constructivas. A continuación, cuando es necesario, se describe el proceso de diseño y construcción para cada etapa.

2.1 TRANSDUCCIÓN

La transducción se refiere aquí al empleo de los sensores capacitivos para convertir los cambios del nivel del líquido en señales aplicables a la tarjeta Lab-PC-1200. Se considera dentro de este sistema a los sensores de flotación que proveen la señal de nivel máximo en los tanques.

2.1.1 DISEÑO DEL SENSOR CAPACITIVO

Para convertir el cambio de nivel de líquido en un cambio de capacidad se aplica la teoría de los capacitores cilíndricos coaxiales. Como se indicó anteriormente, existen dos maneras de lograr el cambio en la capacidad: el cambio de dieléctrico entre las placas y el cambio de la distancia entre las placas. En un capacitor de forma cilíndrica la manera más práctica de variar la capacidad es cambiando el material dieléctrico que está entre las placas; pero, debido a las propiedades conductivas del agua, se aplica mas bien el principio de cambio de la distancia entre las placas.

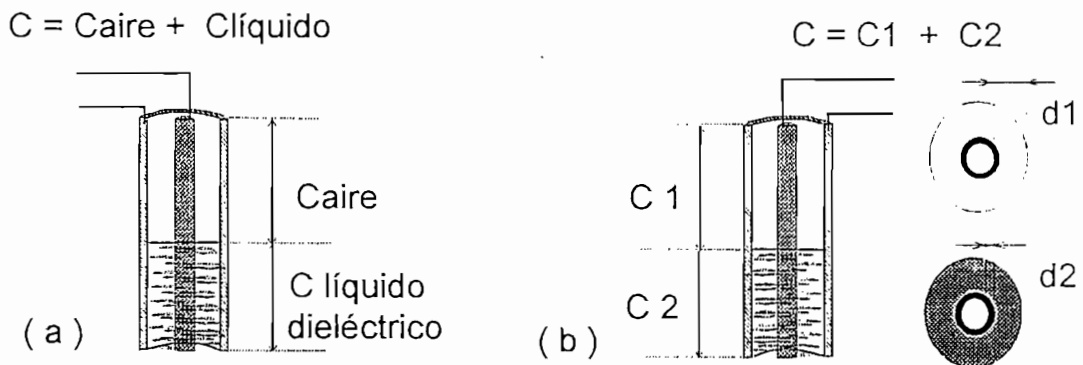


Figura 2.3 a) Dieléctrico variable b) Distancia entre placas variable

A partir de las dimensiones de un capacitor cilíndrico se obtiene la siguiente ecuación para obtener la capacidad en picofaradios [pF]

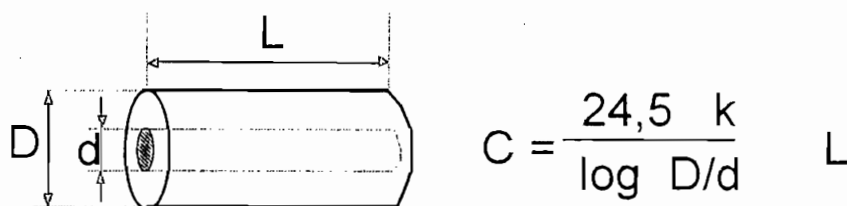


Figura 2.4 Capacitor cilíndrico

Donde:

- D: diámetro de la placa exterior en milímetros, tubería exterior de cobre.
- d: diámetro de la placa interior en milímetros, varilla interior de bronce.
- k : valor de la constante dieléctrica en picofaradios sobre metro.
- L: longitud del cuerpo del capacitor, en metros.

El valor de capacidad como se ve claramente se puede variar cambiando el tipo de dieléctrico al variar el valor de k . En la Tabla 2.1 se muestran los valores de k para distintos elementos que se emplean generalmente como dieléctrico.

Tabla 2.1 Constantes dieléctricas de algunos elementos

DIELECTRICO	Valor de k
Vacío	1
Aire	1,0006
Teflón	2
Tetracloruro de carbono	2,22
Estireno	2,43
Poliestireno	2,5
Vidrio	3,7
Papel, parafina	4
Mica	5
Cloruro de sodio	5,9
Caucho neopreno	6,6
Amoníaco	16,9
Glicerina	42,5
Agua pura	78,5
Cerámica (baja)	10
Cerámica(alta)	100 ~ 10 000

En el sistema de tanques se requiere la medición del nivel del líquido en los tanques para una altura de 0 a 40 centímetros. Para lograr esto se construyeron un par de sensores de tipo capacitivo siguiendo el esquema constructivo y las medidas en milímetros, que se detallan en la Figura 2.5

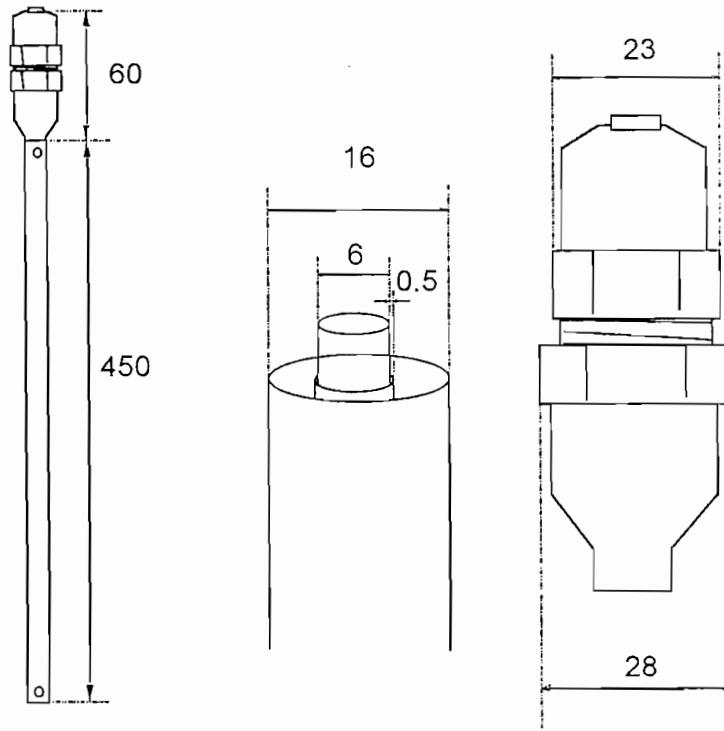


Figura 2.5 Esquema constructivo del sensor capacitivo. Medidas en milímetros.

Para la construcción de cada sensor capacitivo se emplearon los siguientes elementos:

- Tubería cilíndrica de cobre de 1 mm de espesor, 1.6 mm de diámetro y 45 cm de longitud
- Varilla de bronce de 6 mm de diámetro y 48 cm. de longitud, recubierta por una capa de poliestireno de 0,25 mm de espesor.
- Terminales para tubería de cobre.
- Dos jacks monofónicos tipo RCA.
- Dos plugs monofónicos tipo RCA.
- Dos segmentos de cable coaxial de 70 cm de longitud cada uno.
- Rodelas de sujeción internas.

La estructura del sensor es básicamente una varilla de bronce cubierta por una capa de poliestireno, dentro de una tubería de cobre y con los elementos que brindan el soporte mecánico necesario. Además, se encuentran montados en la parte superior de cada sensor plugs de tipo RCA, para la conexión del cable blindado que proporciona la conexión eléctrica desde el sensor hasta los acondicionadores.

Tabla 2.2 Capacidad del sensor en función de la altura del líquido.

Altura	$C_1(\text{aire})$	C_2 (Poliestireno)	C total
1	13,68	17,62	81,80
10	10,52	176,20	237,22
20	7,01	352,40	409,91
30	3,51	528,59	582,60
37	1,05	651,93	703,48

Se anota que en la medición de la capacidad total ya se incluye un valor de 50,5pF correspondientes a 70 centímetros de cable coaxial RG-59 que se acopla desde el sensor hasta el acondicionador. Este tipo de cable se emplea para reducir el ruido debido a que el sensor se encuentra relativamente alejado del módulo de acondicionamiento.

En base a las ecuaciones descritas para la capacidad del sensor y la capacidad del cable, se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 2.7.

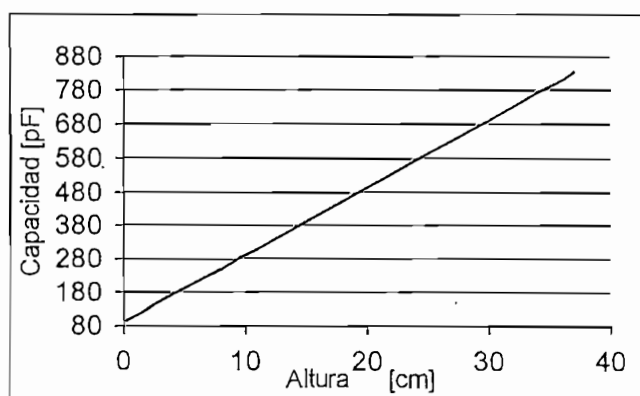


Figura 2.7 Respuesta teórica del sensor.

Al realizar las pruebas necesarias para el sensor capacitivo se obtuvo la siguiente curva de la capacidad en función del nivel de líquido (Figura 2.8), que deberá ser manejada por las siguientes etapas de acondicionamiento. Para las pruebas se utilizó un capacitómetro digital para encontrar las variaciones, en picofaradios, de la capacidad del sensor cuando se introduce en el tanque con distintos niveles de agua.

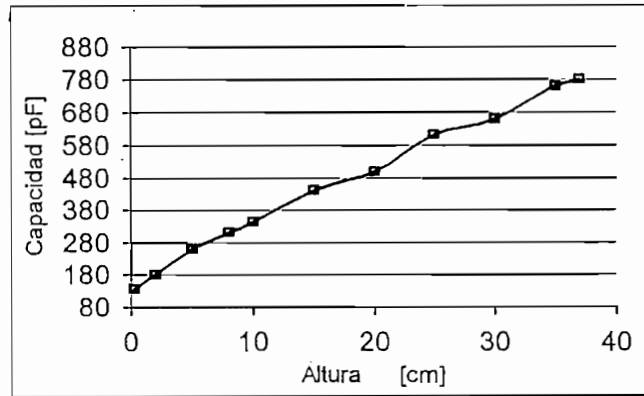


Figura 2.8 Respuesta real del sensor.

Como se puede observar la respuesta del sensor construido es aproximadamente lineal, lo cual es una ventaja para su utilización en la siguiente etapa de acondicionamiento.

2.1.2 DISEÑO DEL ACONDICIONADOR PARA EL SENSOR CAPACITIVO.

Partiendo de la variación de capacidad que se tiene en el sensor construido, se pueden tomar varios caminos para lograr la transducción a una señal eléctrica que pueda aplicarse a la tarjeta Lab-PC-1200, entre estas se tiene: medición del cambio en la amplitud de una señal de frecuencia constante, medición de una frecuencia variable, una combinación de ambas o algún otro camino alternativo que se pudiera hallar.

A continuación se muestra de manera básica las opciones que se probaron, considerando siempre que la señal que se obtiene debe ser aplicada a la tarjeta de adquisición de datos que maneja señales entre +/- 5 V o desde 0 a 10 V.

Inicialmente se implementó el diagrama de bloques de la Figura 2.9 para lograr un cambio en la amplitud de una señal de frecuencia constante. Esta señal es generada en el circuito oscilador y mediante un filtro analógico, cuya frecuencia de corte está dada por el valor de la capacidad del sensor, se consigue la variación de amplitud en función del nivel del agua en los tanques.

En este sistema se considera principalmente la forma de la onda generada, la frecuencia f_0 y el valor de la capacidad variable, pues de estas dependen las características de los demás elementos.

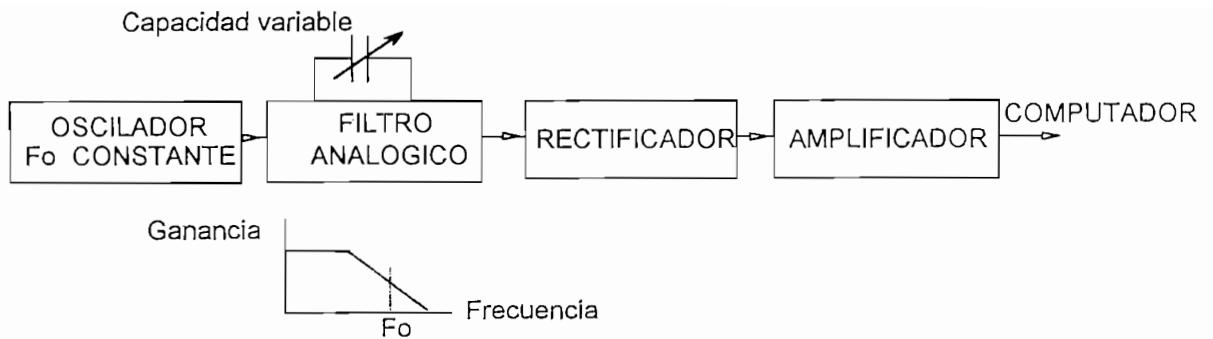


Figura 2.9 Cambio de amplitud de una señal de frecuencia constante

En primera instancia se halló cierta dificultad en la poca estabilidad que presenta un filtro analógico al emplear una capacidad tan pequeña como la del sensor; debido a esta capacidad tan baja la frecuencia manejada es relativamente alta. Al probar este sistema se concluyó que las formas de onda generadas deben ser triangulares o senoidales para lograr un mejor funcionamiento del filtro analógico.

Luego de obtener un funcionamiento aceptable dentro de los parámetros establecidos, se diseñó la etapa de rectificación considerando que la mejor manera de aplicar la señal a la tarjeta de adquisición de datos es en forma de un voltaje continuo. Se probaron distintos métodos, el recurso de rectificadores normales no es aplicable debido a que la frecuencia de respuesta de los elementos semiconductores es menor respecto a las frecuencias que se manejan en el circuito. Se probó la opción de rectificación mediante amplificadores operacionales que funcionó mucho mejor que la primera y además provee la corriente suficiente para aplicar la señal a una siguiente etapa.

Se apreció que el funcionamiento del conjunto no era del todo adecuado, pues se requirió de un sistema de calibración muy preciso e incluso una calibración cada vez que el equipo se encendía, lo cual no es funcional. Se descartó la opción tomada, aunque se reconoció que las mediciones de señales de voltaje son muy precisas por parte de la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200 y se pueden emplear como referencia para un nuevo esquema.

Otra opción fue la comparación entre una onda de frecuencia variable, generada en un oscilador controlado por la capacidad variable del sensor, y una onda de frecuencia constante obtenida de un circuito oscilador interno. Esta comparación se traduce en un nivel de voltaje que guarda una relación con el nivel del líquido en los tanques, a través

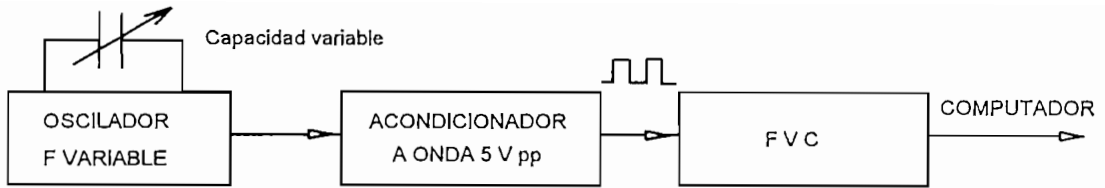


Figura 2.11 Sistema implementado

Este proceso de conversión de una capacidad variable en una señal de voltaje continuo, que es medido por la tarjeta de adquisición de datos, se realiza en las siguientes tres etapas:

- Oscilador de frecuencia variable
- Acondicionamiento de la señal a una onda cuadrada de 5 voltios pico-pico.
- Convertidor de frecuencia a voltaje FVC

Oscilador de frecuencia variable.

En base a la capacidad variable entregada por el sensor capacitivo se procedió a la generación de una onda cuadrada de frecuencia variable. Inicialmente se implementó esta etapa con el circuito integrado multifunción 555, pero se observó que la configuración no era tan estable debido a la capacidad pequeña del sensor.

Investigando aún más, se encontró una configuración que genera ondas cuadradas y triangulares, de mejor manera que la anterior solución. Esta configuración se basa en el circuito generador de funciones NE566 de la casa Signetics, y sigue el diagrama de la Figura 2.12.

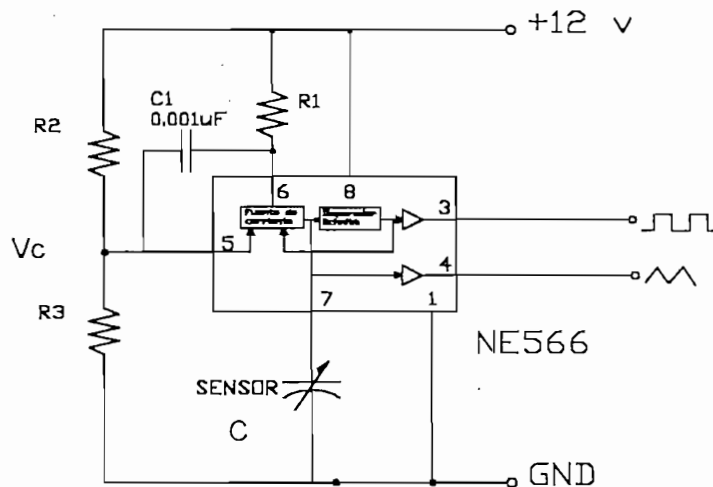


Figura 2.12 Oscilador con el generador de funciones NE566

La configuración del circuito es la de un oscilador controlado por voltaje (VCO), pero en este caso se mantiene un voltaje fijo de control V_c , dado por las resistencias R_2 y R_3 , y la frecuencia generada varía al cambiar la capacidad del sensor. La siguiente ecuación muestra la dependencia de la frecuencia con el valor de la capacidad.

$$F_o = \frac{2 (V_{cc} - V_c)}{R_1 C V_{cc}}$$

Para el funcionamiento del circuito se fijó un rango de frecuencias desde 0 hasta 10 KHz y un voltaje de control $V_c = 11V$; en base a esto y a la capacidad del sensor, que varía de 138 a 780 pF, se obtuvieron los siguientes valores, para los elementos del circuito:

$$R_1 = 150K \quad R_2 = 2K \quad R_3 = 22K \quad C_1 = 0.001 \mu F$$

Con estos elementos y empleando la ecuación indicada, los valores calculados para los límites de frecuencia son:

- En el nivel inferior de líquido, 0,2 cm, en que se dispone de una capacidad de 138 pF en el sensor, se calcula 8051,5 Hz
- Para una altura de 37 cm en el límite superior la capacidad es de 780 pF en el sensor y se obtiene una frecuencia de 1424,5 Hz.

En las pruebas definitivas se obtuvieron valores muy cercanos a los calculados: 8,29Khz en el nivel inferior y de 1,53 KHz para el nivel superior. Esto es justificable puesto que se deben considerar las tolerancias que presentan los elementos.

El oscilador, como se indicó, provee dos tipos de señales: una onda triangular y una onda cuadrada. Esta segunda señal se emplea en la siguiente etapa de conversión, pero tiene en su forma de onda una componente DC, como se puede observar en la Figura 2.13 y esta componente debe ser eliminada.

También se observa que la forma de onda no es perfectamente cuadrada, sino que existe un retardo en el cambio de estado, pero esta imprecisión es manejada sin problema en el convertidor de frecuencia a voltaje.

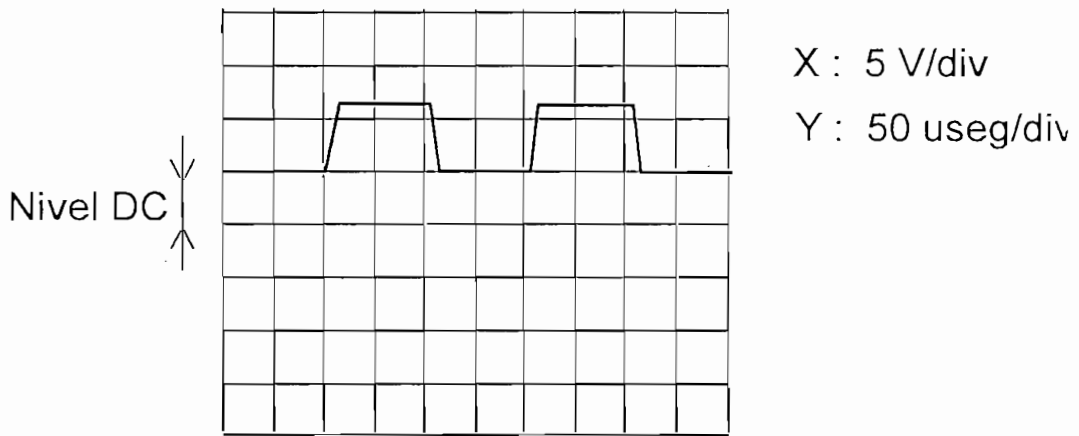


Figura 2.13 Forma de onda del generador de frecuencia.

Acondicionamiento de la señal a una onda cuadrada de 5 voltios pico-pico.

La señal obtenida a través del pin 3, del generador de ondas, tiene una componente de DC y un valor de 5,5 V pico-pico; pero los requerimientos para el FVC dicen que su onda de entrada debe ser cuadrada de 5 voltios pico-pico.

Para satisfacer estos requerimientos se emplea un circuito sumador inversor con los amplificadores operacionales LM 741, cuyas entradas son la onda del generador y un nivel de voltaje que permite obtener a la salida la forma de onda requerida.

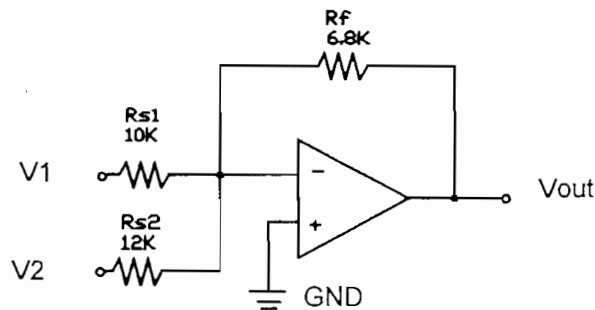


Figura 2.14 Acondicionador a 5 V pico-pico

La señal de salida se calcula por la siguiente ecuación:

$$V_{out} = - \left(V_1 \frac{R_f}{R_{s1}} + V_2 \frac{R_f}{R_{s2}} \right)$$

Donde la entrada V_1 es la señal del oscilador y la entrada V_2 es el voltaje de polarización negativa, -12 voltios, y los valores de las resistencias utilizadas son los que se indican en la Figura 2.14

El conjunto de oscilador y sumador proporciona una señal cuadrada de 5 voltios pico-pico que varía entre 8,59 KHz y 1,53KHz y esta señal es la que se emplea en la siguiente etapa de acondicionamiento.

Convertidor de frecuencia a voltaje FVC

Asimismo, luego de probar varias alternativas, se encontró un circuito de bajo costo, basado en el circuito integrado XR4151 de la casa fabricante Exar.

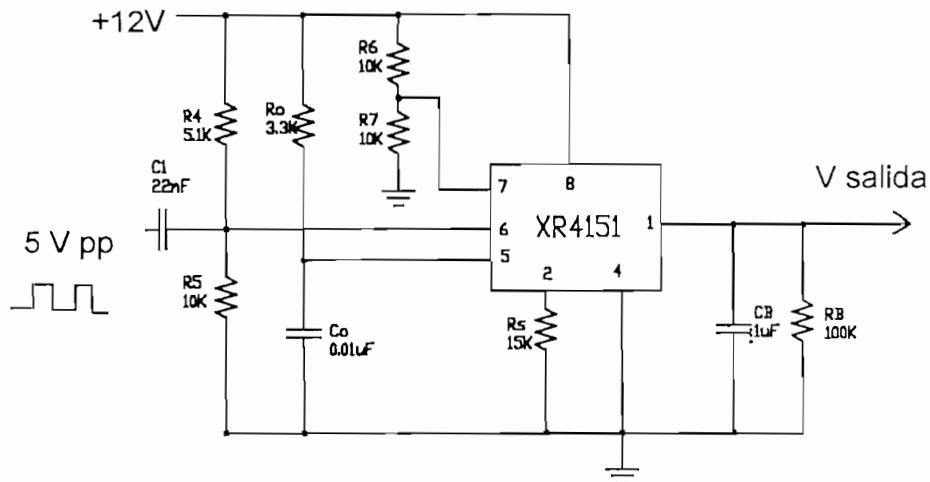


Figura 2.15 Convertidor de frecuencia a voltaje FVC

La casa fabricante indica que el esquema propuesto funciona linealmente, para una onda cuadrada de 5 voltios pico-pico y una frecuencia dentro del rango de 0 a 10KHz, ideal para la aplicación que se está desarrollando. La descripción de este circuito se encuentra al final del trabajo, en el anexo correspondiente al circuito integrado XR4151, donde se presenta como una aplicación general en el manual de fábrica.

La ecuación de diseño para este circuito indica la relación entre el voltaje de salida

respecto a la frecuencia de entrada y es:

$$V = \frac{R_B \cdot R_O \cdot C_O}{0.486 \times R_S} F_O$$

Se implementó el circuito y se obtuvieron valores dentro del rango de 0 a 10 voltios, para los valores de frecuencia generados.

Estos voltajes se aplicaron a la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200 que, luego de la conversión, proporcionó el dato de nivel de líquido en el tanque.

Cada tanque dispone de su propio sensor capacitivo así como de su sistema de acondicionamiento, es misión de la tarjeta de adquisición manejar estos datos de manera que la apreciación del usuario sea la de una medición simultánea.

2.1.3 DISEÑO DE LOS ACONDICIONADORES PARA LOS SENSORES DE FLOTACIÓN

En cada uno de los tanques se han dispuesto sensores de flotación, ya descritos, para determinar el momento en que se llegue al nivel máximo de líquido en los mismos, antes que se desborde; esto como precaución en caso de que se produzca algún error en el funcionamiento de la planta.

Se implementó un sistema de acondicionamiento que envíe a la tarjeta de adquisición solamente 0 o 5 voltios sobre las entradas analógicas, de acuerdo al cierre o la apertura de los sensores. Esto se logra con el circuito de la Figura 2.16.

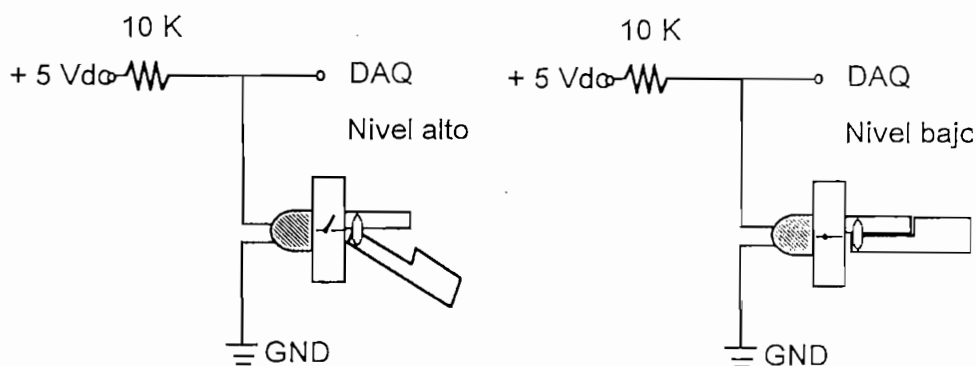


Figura 2.16 Acondicionamiento de los sensores discretos de flotación

En el esquema se emplea un sistema de lógica negativa. Cuando el sensor cierra sus contactos el valor hacia la tarjeta de adquisición de datos es bajo o 0 voltios y al abrirlos se tiene un nivel alto o 5 voltios.

Cada una de las señales logradas con estos sensores se aplica a distintas entradas de la tarjeta Lab-PC-1200 y se las maneja como alarmas de seguridad dentro del programa de control desarrollado en LabVIEW.

2.2 SISTEMA DE ALIMENTACION

Todos los circuitos electrónicos diseñados para el módulo requieren de una fuente de polarización adecuada para su correcto funcionamiento.

Se emplea una fuente de voltaje continuo DC para los circuitos electrónicos y fuentes independientes de alimentación para los elementos de actuación, como se describe en la Figura 2.17.

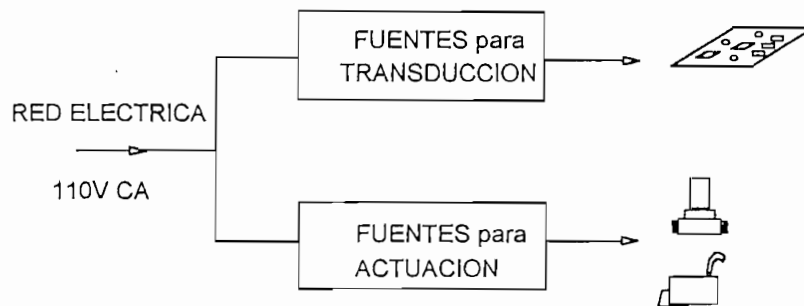


Figura 2.17 Esquema de las fuentes de alimentación

Como se puede apreciar, los elementos actuadores disponen de energización independiente de los sistemas de transducción, para evitar de esta manera que el ruido eléctrico producido en el arranque de los actuadores se introduzca en las etapas de transducción, y con este lineamiento se han diseñado las fuentes de alimentación para cada etapa.

2.2.1 FUENTES DE VOLTAJE PARA TRANSDUCCIÓN

Este voltaje de polarización DC se emplea en los circuitos acondicionadores de señal y en los circuitos empleados tanto para enviar como para recibir las señales de nivel TTL, desde y hacia la tarjeta de adquisición de datos instalada en el computador.

En el diagrama de bloques de la Figura 2.18 se puede apreciar que se dispone de tres niveles de voltaje DC: los voltajes +12V y -12 V empleados para el funcionamiento de los circuitos de acondicionamiento de señal y el voltaje +5V utilizado en las etapas que permiten el manejo de las señales de los sensores hacia el computador.

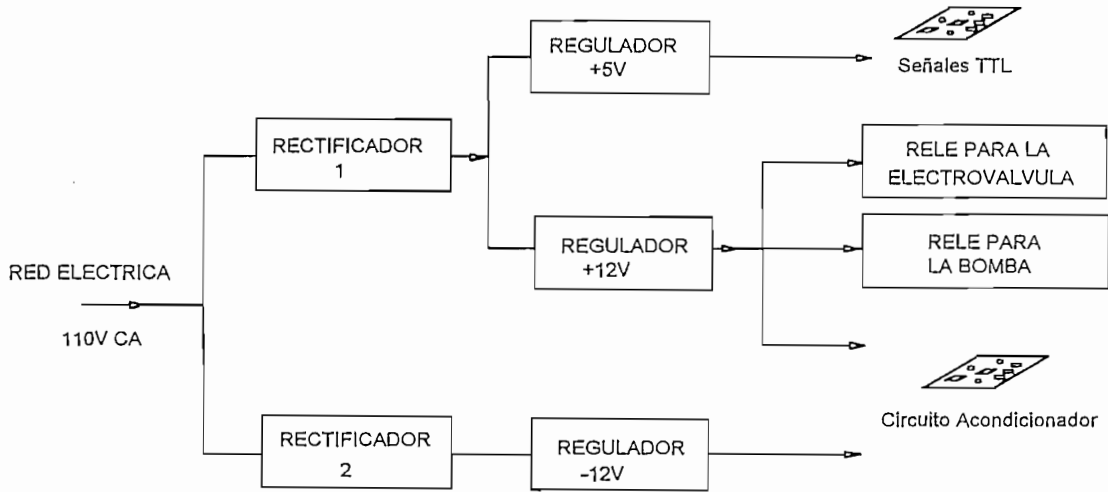


Figura 2.18 Fuentes de alimentación para transducción

El diagrama esquemático de la Figura 2.19 corresponde al circuito de polarización ya descrito. Se pueden apreciar tanto las etapas de rectificación y filtrado, como las de regulación que se realizan empleando los circuitos integrados que se encuentran disponibles en el mercado.

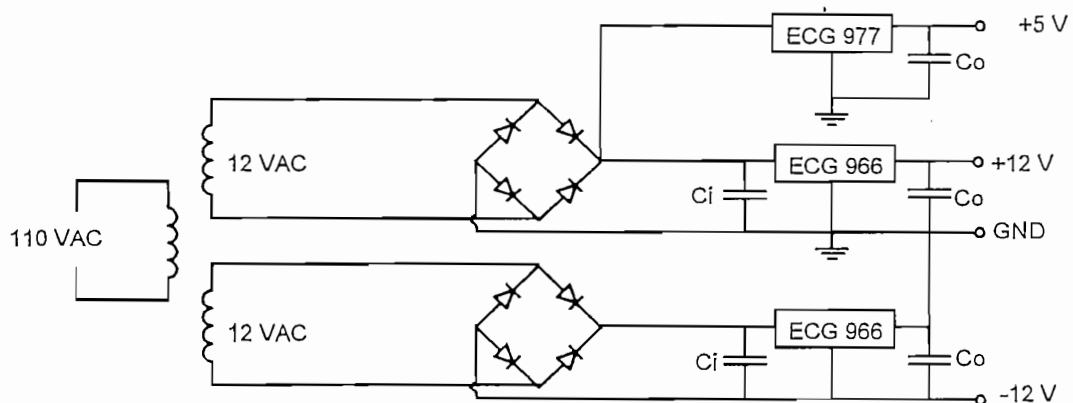


Figura 2.19 Esquema de las fuentes de alimentación para transducción

En todos los circuitos de rectificación se emplearon los siguientes elementos electrónicos, basándose en los correspondientes requerimientos de la carga:

- Transformador 110V AC a 24 V AC con toma central, 1A
- Puentes de rectificación RB155 ECG 5304 1,5 A 400 V pico inverso.
- Capacitores C_i 470 μ F 25V
- Reguladores de voltaje

LM340LAZ-5 ECG 977 +5V I_o 0,1 A de 7 a 30 V 0,7W

LM340T12 ECG 966 +12V I_o 1 A de 14 a 35V 15W

- Puente de rectificación KBP10 ECG170 2A Voltaje reverso pico 1000V a 25° C máximo.
- Capacitor de filtrado 2200 uF 25V
- Terminales de relé normalmente abiertos.

Con estos circuitos de alimentación se satisfacen todos los requerimientos de carga encontrados en el diseño de la transducción y actuación.

El siguiente paso en la construcción del módulo es el desarrollo del programa de control que debe hacerse en LabVIEW 5.0

2.3 SISTEMA DE CONTROL

Uno de los limitantes impuestos para el presente trabajo de tesis es la utilización del software LabVIEW 5.0 para el desarrollo del programa de control, así como de la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200. A continuación se describe el método empleado para el diseño del programa empleado en el control de nivel en tanques acoplados, con sus variaciones, y el manejo de la tarjeta de adquisición de datos indicada.

2.3.1 SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y MANEJO DE DATOS

Con el módulo de transducción y acondicionamiento construido se obtiene la información de la planta traducida a señales eléctricas, que se deben aplicar al computador a través de la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200 cuyas características se describen en la sección 1.4.3 del presente trabajo.

No solo se manejan señales de entrada puesto que se requieren de señales que controlen el proceso y deben ser enviadas desde el computador hacia los elementos de actuación en la planta.

Todo el proceso de comunicación lo realiza la tarjeta Lab-PC-1200, instalada en uno de las ranuras internas del computador y configurada adecuadamente, que convierte las señales eléctricas de entrada, en información binaria manejable por el computador y también realiza el proceso contrario.

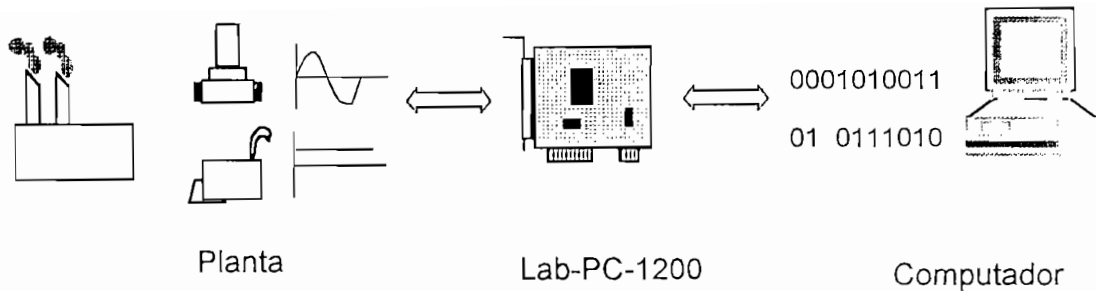


Figura 2.22 Tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200

Las señales que deben ser manejadas son las que se indican a continuación, y se conectan a la tarjeta de acuerdo al tipo al que pertenecen:

Señales hacia el computador

Dos señales analógicas que provienen de la conversión del nivel del líquido mediante sensores capacitivos, acondicionadas para mantenerse entre 0 y 10 Vdc y conectadas a los pines 1 y 2 de la tarjeta de adquisición de datos.

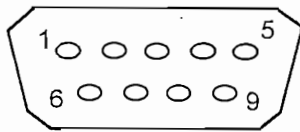
Dos señales discretas de 0 o 5 Vdc, obtenidas por el acondicionamiento de los sensores discretos de flotación que indican el nivel máximo de líquido en los tanques. Estas señales se aplican a las entradas analógicas ubicadas en los pines 3 y 4 de la tarjeta.

Señales desde el computador.

Dos señales discretas de niveles TTL, para controlar el estado de encendido o apagado de la bomba inmersible y de la electroválvula. Estas señales se las encuentra en los pines 10 y 12, que pertenecen a las salidas analógicas de la tarjeta DAC0OUT y DAC1OUT.

Obviamente, existe una referencia a la que se denomina tierra o AGND, que es común para todas y se la encuentra en el terminal 11 de la tarjeta.

Se dispone en el laboratorio de Instrumentación de un sistema de conectores hacia la tarjeta Lab-PC-1200, y las señales se acoplan hacia el circuito de control construido mediante un conector DB-9 y un cable de 4 pares trenzados, con la siguiente distribución:



1. Nivel del tanque 1
2. Nivel del tanque 2
3. Tierra
4. Sensor máximo nivel 1
5. Sensor máximo nivel 2
6. Control de la bomba
7. Control de la electroválvula
8. Tierra
9. Sin conexión

Figura 2.23 Distribución de conexiones

Con las conexiones descritas y la correcta configuración de la tarjeta de adquisición de datos, se obtuvo la información de la planta en los espacios de memoria asignados por el computador.

A partir de este punto el software creado con LabVIEW toma control del sistema.

2.3.2 DISEÑO DE LA INTERFAZ HOMBRE-MAQUINA

LabVIEW 5.0 se emplea para desarrollar aplicaciones para sistemas de instrumentación virtual, pero se analizó que se lo puede emplear en aplicaciones sencillas de control. Como se indicó en la sección 1.4.2, durante la programación se generan códigos fuente y paneles de usuario simultáneamente, pero son estos paneles los que muestran toda la información y finalmente son los únicos a los que debe tener acceso el operador.

Los paneles de usuario son entornos gráficos que deben diseñarse de tal forma que su uso sea muy intuitivo y que permitan al operador tomar decisiones, controlar acciones, visualizar información y seleccionar el modo de operación del sistema de control con mucha facilidad.

Con esta idea en mente, no se realiza todo en una sola presentación o panel, sino que se aplica el esquema de programación modular o de niveles jerárquicos, de manera que a un panel puede accederse si se pasa primero por uno de mayor jerarquía.

A continuación se esquematiza el sistema jerárquico empleado en la programación, luego se expone el funcionamiento de cada uno de los paneles incluyendo, donde era pertinente, la configuración que se realizó en cada uno de ellos.

Central nuclear.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra la animación de un proceso normal • Muestra la animación de un proceso anormal
Actuadores.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Recibe y envía el valor de la variable global <i>Bomba</i> • Recibe y envía el valor de la variable global <i>Electroválvula</i>
Mi informacion.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra información general del programa
Mas informacion1.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra información sobre el control de nivel en un tanque
Mas informacion2.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra información sobre el control de nivel en tanques acoplados

2.3.2.1 INTERFAZ DE INICIO

Es el primer panel que se muestra al usuario con información básica sobre el presente trabajo de tesis y la posibilidad de elegir entre continuar con el programa o terminar con él y volver al modo de edición del LabVIEW 5.0. Este panel se muestra como en la Figura 2.25.

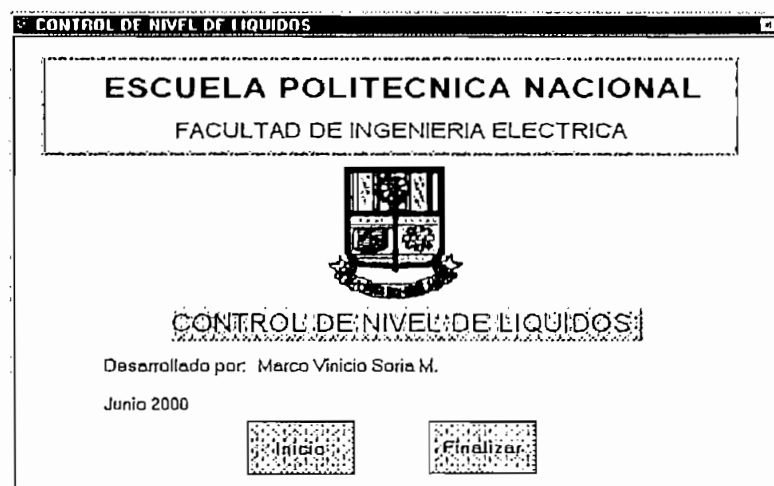


Figura 2.25 Interfaz de inicio

A partir de este panel se aplica el sistema modular de programación, pues es factible ejecutar cualquiera de los módulos independientemente, pero el correcto funcionamiento requiere el inicio y terminación del programa con este panel, puesto que debe seguir la estructura lógica detallada en la Figura 2.26.

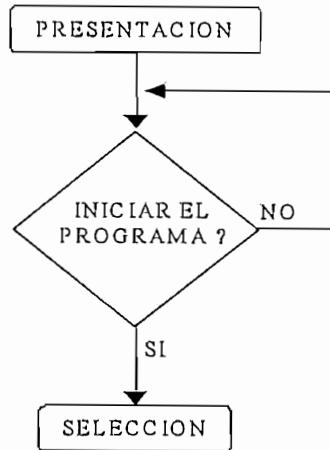


Figura 2.26 Lógica de la interfaz de inicio.

Los botones, INICIO y FINALIZAR, mantienen la acción mecánica denominada *Latch when pressed*, que permite mantener el estado presionado mientras se ejecutan los siguientes módulos. De esta manera se consigue el funcionamiento continuo del programa.

2.3.2.2 INTERFAZ DE SELECCIÓN

Al seleccionar el inicio del programa se accede al panel de selección donde se solicita al usuario elegir entre uno de los modos de funcionamiento del sistema de control. La interfaz descrita se presenta como se indica en la Figura 2.27:

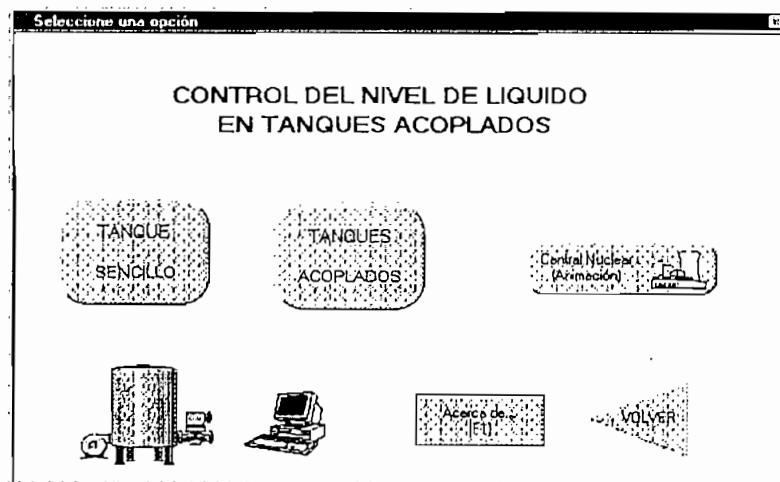


Figura 2.27 Interfaz de selección

En este panel se emplean botones de selección para la ejecución de los modos de funcionamiento del sistema, que son:

- Control en un solo tanque
- Control en tanques acoplados
- Simulación de un proceso

Además, de este se puede acceder a la información general sobre el programa y tiene una opción de salida hacia el panel de jerarquía superior.

En la programación modular cada panel guarda en una sección de su archivo la información sobre su nivel jerárquico. Cada vez que se ejecuta un módulo, éste chequea la presencia de todos los submódulos que requiere, dentro del directorio de ejecución. En caso de faltar alguno de los archivos requeridos, interrumpe su acción para dar acceso al usuario de buscar manualmente el archivo necesario.

El sistema de programación genera detrás de la interfaz de selección el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 2.28.

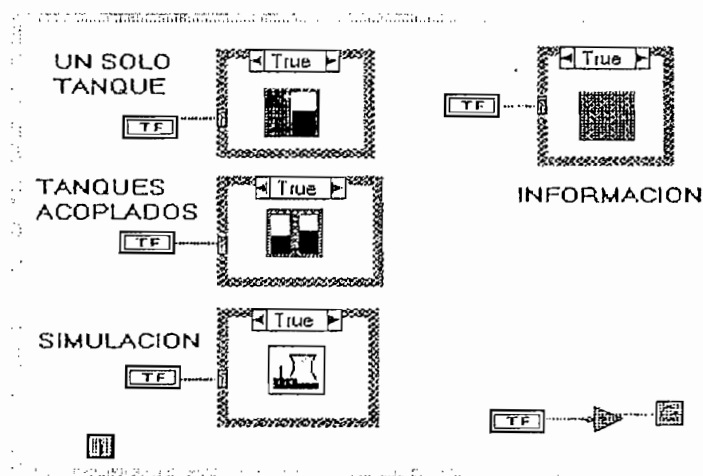


Figura 2.28 Diagrama de bloques de la interfaz de selección

Cuando se ejecuta este módulo del programa se chequean los valores de cada uno de los botones, cuya acción mecánica también es *Latch when pressed*, que comandan las estructuras de caso.

Estas estructuras, denominadas *Boolean case structure*, permiten la ejecución de los comandos que se encuentran dentro de la ventana correspondiente al estado de su controlador, en este caso el botón.

En este trabajo se permite la ejecución del submódulo que se encuentra dentro de la ventana *True*, siempre que el botón tenga un valor lógico de verdad, mientras no se cumpla esta condición el programa no ejecuta ninguna acción.

2.3.2.3 INTERFAZ DE CONTROL DE NIVEL EN UN TANQUE.

La selección de la opción tanque sencillo inicia el programa de control de nivel en uno de los tanques. La interfaz resultante se muestra en la Figura 2.29.

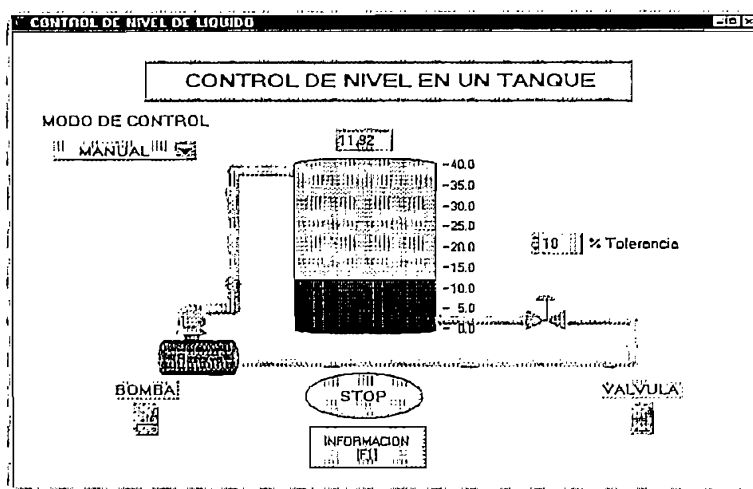


Figura 2.29 Interfaz de control de nivel en un tanque

Básicamente lo que se hace en este control es chequear el nivel del agua mediante el sensor capacitivo y el programa analiza el valor de nivel resultante, lo compara con la referencia fijada por el usuario y en base al resultado actúa sobre la bomba o la electroválvula, para mantener el nivel en dicho valor fijado.

Para el funcionamiento se debe realizar primero la configuración del módulo en base a lo siguiente:

- El tanque empleado debe ser el número 1
- Tanto la electroválvula como la manguera de llenado de líquido deben colocarse en los espacios destinados para ellos en el tanque 1

- Los 7 tapones de acoplamiento deben estar correctamente colocados de manera que el líquido se confine al tanque 1.

Este modo de funcionamiento permite al usuario mantener un determinado nivel de manera manual, actuando directamente sobre la bomba o la electroválvula; o también seleccionar el control del nivel en modo automático cuyo funcionamiento se basa en:

1. La evaluación del nivel actual existente en el tanque
2. La comparación entre el nivel deseado de líquido y el disponible, de acuerdo a la tolerancia seleccionada.
3. La selección de la acción correspondiente entre: aumentar el volumen de líquido mediante la bomba inmersible, disminuirlo al accionar la electroválvula de escape o mantener al sistema en espera si el nivel de líquido cumple con el valor predeterminado por el usuario.

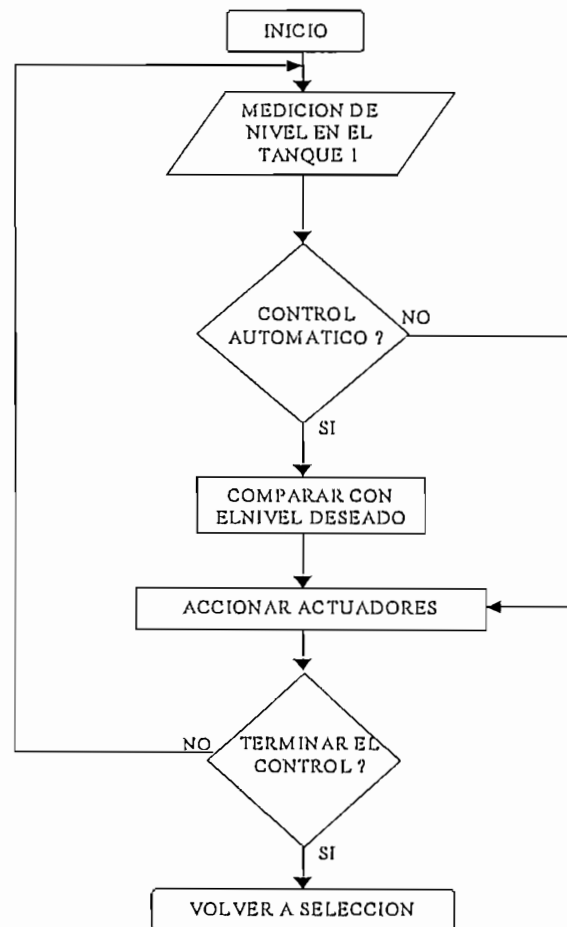


Figura 2.30 Diagrama de flujo del control de nivel en un solo tanque

La lógica mostrada en la Figura 2.30 es la que rige el funcionamiento de este control en un solo tanque y es la que se ha instrumentado en la programación.

El diagrama de bloques implementado para la programación es el que se muestra en la Figura 2.31.

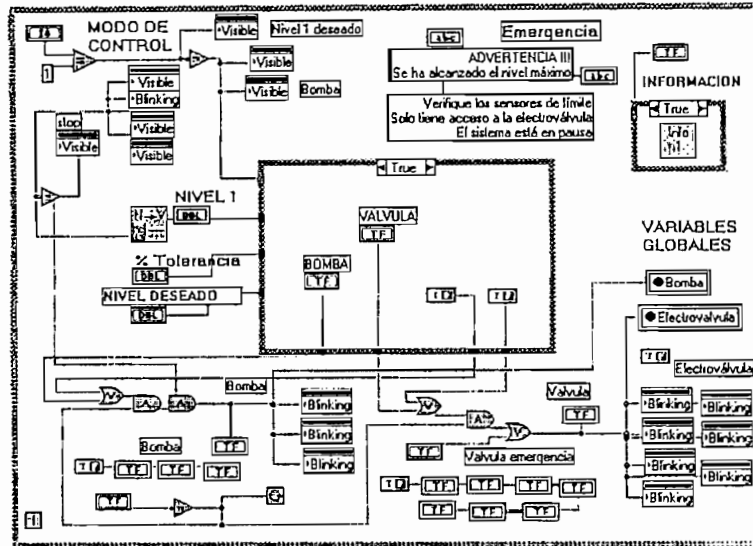


Figura 2.31 Diagrama de bloques del control de nivel en un solo tanque

Tanto el funcionamiento en modo manual como automático se inicia con la lectura del módulo *Dos niveles voltaje.vi*, que brinda el valor del nivel del líquido en el tanque 1 y el estado de los sensores de flotación.

Se ha predefinido inicialmente que se tenga el control en modo manual, de manera que ninguno de los actuadores se halle en funcionamiento, sino que solo se disponga del valor del nivel del líquido existente. De esta manera, el usuario decide el momento en que acciona alguno de los elementos de actuación a libre voluntad o selecciona el modo de control automático.

La selección del modo de control se realiza mediante un control numérico etiquetado MANUAL o AUTOMATICO, que genera un número de 8 bits, de valores 0 o 1 respectivamente. Este número es comparado con una constante de valor 1 de manera que se transforma en un dato lógico de verdadero o falso, que es el que comanda el resto del funcionamiento.

Si el usuario mantiene el control manual puede accionar los actuadores mediante los botones de control, obteniendo el nivel de líquido que desee sin otra restricción que la de no exceder el nivel máximo.

Cuando alguno de los actuadores es activado se envía hacia la variable global correspondiente un valor de verdad y se inicia una animación gráfica que permite al usuario visualizar claramente el funcionamiento del proceso. Esta animación se la realiza empleando el nodo de atributo, de los controles gráficos, denominado *Blinking* o parpadeo; que permite encender y apagar los segmentos de tubería empleados dando como resultado la impresión de que existe un flujo de líquido, congruente con la acción realizada en la planta.

En el modo de control automático se solicita al usuario un valor de nivel requerido y desaparecen los controles directos de los actuadores, empleando otro atributo de nodo denominado *Visible*, con lo cual solo se muestra un control numérico que solicita el valor requerido de nivel y el nivel actual en el tanque1.

Este valor de nivel es comparado con el valor deseado mediante un *nodo de fórmula* dentro de una *estructura de caso*, para definir las acciones a tomarse. Esta fórmula incluye una variable denominada *%Tolerancia*, la misma que permite aceptar una cierta desviación entre el valor deseado y el valor de nivel obtenido con el sistema de control. El proceso se detalla en la Figura 2.32.

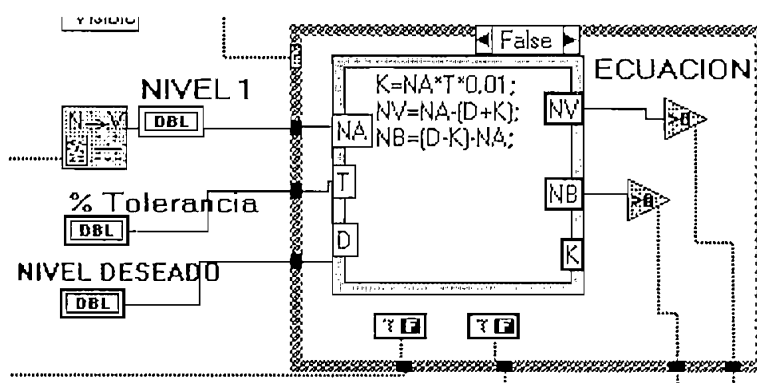


Figura 2.32 Ecuación de evaluación del error de nivel

Se aprecia en este detalle que se requieren de tres variables de entrada para encontrar la acción correcta a tomar, estas variables son:

- Nivel del tanque 1 (NA)
- Valor de la tolerancia aceptada en la medición (T)
- Nivel deseado en el tanque 1 (D)

La estructura de caso encierra un nodo de fórmula, que evalúa si debe accionarse la electroválvula o si debe encenderse la bomba para llegar al nivel deseado del líquido, en base a los siguientes cálculos:

$$K = NA \times T \times 0,01 \quad \text{Donde K es el valor de error que se puede tolerar.}$$

$$NV = NA - (D + K) \quad \text{Donde NV es el valor que comandará la electroválvula.}$$

$$NB = (D - K) - NA \quad \text{Donde NB es el valor que comandará la bomba.}$$

Los valores de NV y NB activan los actuadores solamente si su valor es positivo. De esta manera, cuando el valor de NA está por debajo del valor deseado, la variable NB es mayor que cero y por tanto activa la bomba que provee de más líquido.

En cambio, si el valor NA supera el nivel deseado, es la variable NV la que se vuelve positiva y por tanto activa la electroválvula permitiendo la salida del líquido.

Para estas acciones se emplean los controles *Greater than 0*, que entregan un valor lógico de verdad cuando la variable de entrada es mayor a cero.

La evaluación de este error en conjunto con el estado de los sensores de flotación produce el accionamiento de los actuadores mediante la utilización de un conjunto de *Variables Globales*.

Estas variables se encuentran definidas en el archivo *Actuadores.vi*, que es un módulo donde se pueden almacenar o leer valores a ser requeridos en cualquier momento; y se denominan *Bomba* y *Electroválvula*. De esta forma, los valores lógicos de actuación ingresan como el nuevo dato en las variables globales que serán manejadas después por el módulo *Dos niveles voltaje.vi*.

La programación hace que se ejecuten secuencialmente los módulos *Control 1 tanque.vi* y *Dos niveles voltaje.vi*; por tanto, el estado de los actuadores, de los sensores

Al superar esta dificultad, se regresa nuevamente al panel de selección y ambos actuadores regresan al estado en que se encontraban antes de la contingencia.

Son transparentes para el operador los pasos que el programa desarrolla, lo que él visualiza es una interfaz gráfica donde encuentra el nivel en un tanque virtual y el estado de funcionamiento de cada actuador.

2.3.2.4 INTERFAZ DE CONTROL DE NIVEL EN TANQUES ACOPLADOS

A partir del panel de selección se puede acceder al modo de control del nivel del líquido en el par de tanques acoplados. El funcionamiento de este panel se basa en el de un solo tanque; es decir, compara el valor de nivel enviado por el sensor capacitivo con el valor de consigna prefijado y actúa de acuerdo al resultado de la comparación.

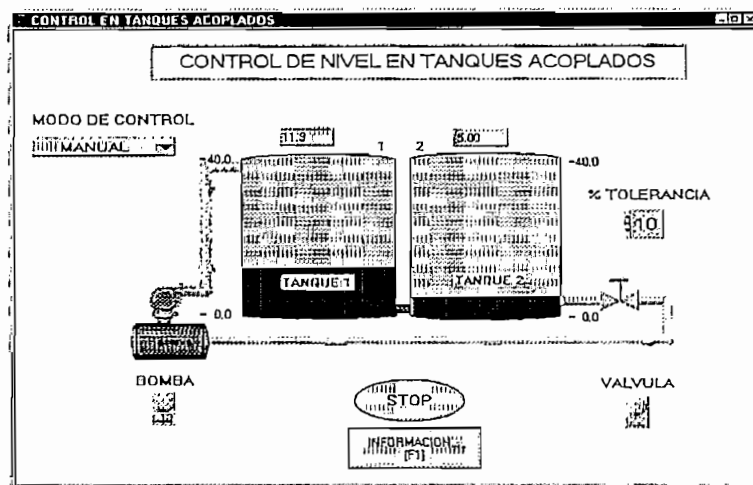


Figura 2.34 Interfaz de control de nivel en tanques acoplados

De igual forma que en el control sobre un solo tanque, se requiere de cierta configuración previa. Cabe aclarar que el módulo proporciona todos los elementos necesarios para cualquiera de las configuraciones. La configuración requerida por este modo debe cumplir lo siguiente:

1. Se emplean tanto el tanque 1 como el tanque 2
2. La manguera de llenado debe colocarse en el espacio destinado para esta en el tanque 1 y la electroválvula en el tanque 2.
3. Uno de los 7 tapones de acoplamiento o una combinación de los mismos deben ser retirados.

Luego de esta pre-configuración se debe proceder a conectar adecuadamente el módulo de control a la tarjeta Lab-PC-1200 y después iniciar el funcionamiento del sistema. Debe cumplirse este orden de manera que en ningún momento el programa de control trabaje sin información aplicada a la tarjeta, pues esto generaría información totalmente errónea.

Para entender el funcionamiento del control en los tanques acoplados se debe comprender todo lo que ocurre cuando pasa el líquido desde un tanque hacia el otro.

Acoplamiento de los tanques

Como se describió al inicio de este capítulo, el módulo de tanques acoplados dispone de 7 orificios circulares de acoplamiento en la parte inferior con sus respectivos tapones, estos se liberan de acuerdo a la velocidad de paso del agua que se desee lograr. La selección del acoplamiento se realiza manualmente sea antes de ejecutar el programa o mientras se halle en funcionamiento.

Se indicó que dos tanques conteniendo un fluido y unidos por una abertura llegarán a tener el mismo nivel de líquido, independientemente de su forma.

Empleando este concepto se puede obtener un determinado nivel de líquido en cualquiera de los tanques al introducir agua en uno de ellos o al desfogar el líquido a través de la electroválvula acoplada en el otro tanque. Luego de un cierto tiempo el nivel en los dos tanques se igualará, pero este tiempo dependerá del nivel de acoplamiento que se tenga.

Se realizaron pruebas en los tanques para determinar la velocidad con que el líquido fluye según el nivel de acoplamiento. Estas se hicieron bajo el siguiente lineamiento:

1. Las pruebas se realizan colocando un nivel de 30cm de agua en el tanque 1 y un nivel de 0cm en el tanque 2.
2. Cada centímetro lineal de nivel de agua equivale a un volumen de 390 cm^3 de líquido.

3. Se realizó la medición del tiempo que transcurre hasta que los tanques tienen el mismo nivel en centímetros, es decir 15 cm.
4. La velocidad de transferencia de líquido se calcula en base al volumen que se traspasó y el tiempo transcurrido.

$$Flujo = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

5. Se tomaron las mediciones para cada abertura (7 mediciones) y luego para un conjunto progresivo; es decir, las dos primeras aberturas, las tres primeras, etc. La primera abertura es la más pequeña, con 5mm de diámetro y un área de 0.196cm² y la máxima tiene 30 mm de diámetro y un área de 7,06 cm²

Debe entenderse que los valores obtenidos, que se detallan en el Capítulo 3, son considerados promedios, puesto que la velocidad con que el líquido pasa desde un recipiente al otro no solo depende de la abertura de acoplamiento, sino también de la diferencia de nivel entre cada tanque que ejerce una determinada presión que hace variar la velocidad de transferencia del líquido.

En el funcionamiento en modo manual el operador tiene acceso directo a los actuadores y mantiene un nivel del líquido de acuerdo a su apreciación visual en los tanques virtuales; cuando se encuentra en modo automático, el programa se rige por la lógica mostrada en la Figura 2.35.

Se puede analizar que en modo automático se ejecutan continuamente las siguientes acciones:

1. La evaluación del nivel actual en cada uno de los tanques.
2. La selección entre cual tanque se deberá mantener a un nivel determinado. Si se permite transcurrir un cierto tiempo el nivel en ambos tanques será el mismo, pero, dependiendo del acoplamiento, un tanque mantendrá un nivel distinto al otro por un período de tiempo, por tanto debe seleccionarse en cual de los tanques se tendrá el valor de referencia.
3. La comparación entre el nivel deseado de líquido y el disponible, de acuerdo a la tolerancia seleccionada.
4. La selección de la acción correspondiente entre: aumentar el volumen de líquido mediante la bomba inmersible, disminuirlo al accionar la

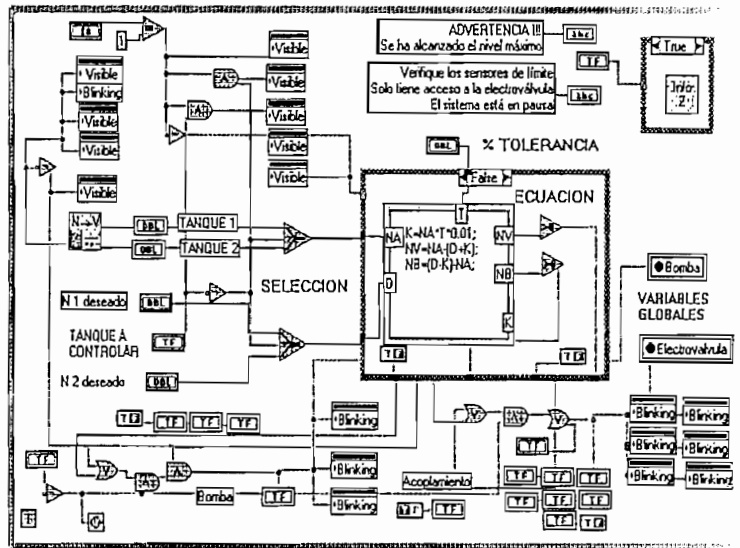


Figura 2.36 Diagrama de bloques del control en tanques acoplados

Como se indicó, se puede controlar el nivel del líquido solamente en un tanque a la vez. Pero debido a que la medición de niveles se realiza para los dos tanques se debe seleccionar cual de los dos valores de nivel será aplicado al nodo de fórmula. Para lograr esto se emplea el arreglo mostrado en la Figura 2.37.

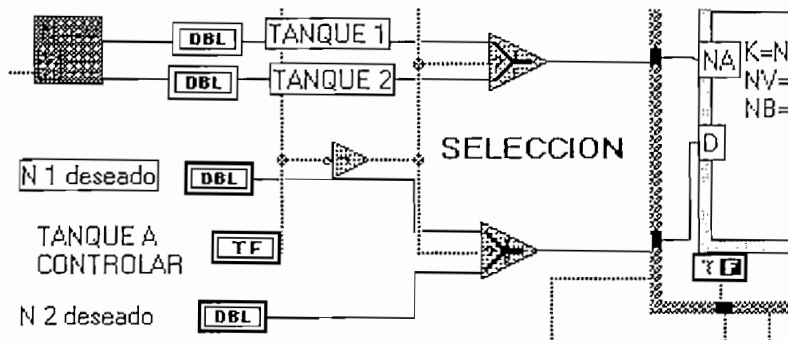


Figura 2.37 Selección del tanque a controlar

Este arreglo emplea la función *Select*, donde la variable lógica de entrada TANQUE A CONTROLAR selecciona el paso de los valores conectados a las entradas True o False de acuerdo al estado de la variable "?". De esta manera, las variables de entrada al nodo de fórmula solo pueden ser el nivel existente y el nivel deseado de uno de los tanques a la vez.

Igual que en el sistema anterior, se puede detener el proceso en cualquier momento empleando el botón STOP que detiene la ejecución del módulo y regresa al panel de selección y el estado de los actuadores al de apagado; excepto cuando se tiene una

indicación de peligro por parte de los sensores de nivel máximo, en cuyo caso solo se tiene acceso a la electroválvula para el desfogue correspondiente.

2.3.2.5 PANEL DE CONVERSIÓN DE VOLTAJE A NIVEL

Tanto para el control de nivel en un tanque como en los dos tanques acoplados, el dato que entrega el circuito acondicionador de los sensores capacitivos es un valor de voltaje; por tanto, éste debe procesarse de manera que describa correctamente el nivel de líquido existente en cada tanque. Además, se requiere monitorear constantemente el estado de los sensores de flotación así como enviar las señales de actuación.

Este proceso se realiza en base a cálculos y conversiones que se realizan en forma transparente para el usuario y cuyos resultados se pueden emplear tanto en el control en un tanque como en el control en los tanques acoplados.

A pesar de que el funcionamiento es transparente al usuario, la programación en LabVIEW crea automáticamente una interfaz de presentación que se muestra en la Figura 2.38 y que se ha empleado para crear el sistema de calibración del software que se describirá más adelante.

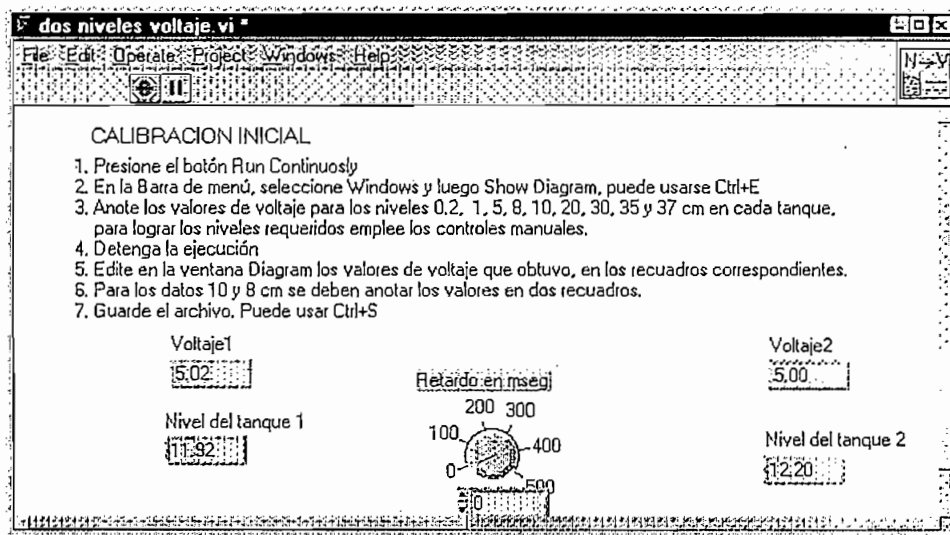


Figura 2.38 Interfaz de conversión de voltaje a nivel

Este módulo está constantemente en comunicación con la tarjeta Lab-PC-1200, tomando la magnitud del voltaje del acondicionador para convertirlo en un valor de

nivel equivalente, verificando los sensores de máximo nivel y enviando las señales de control de los actuadores, siguiendo la estructura lógica de la Figura 2.39

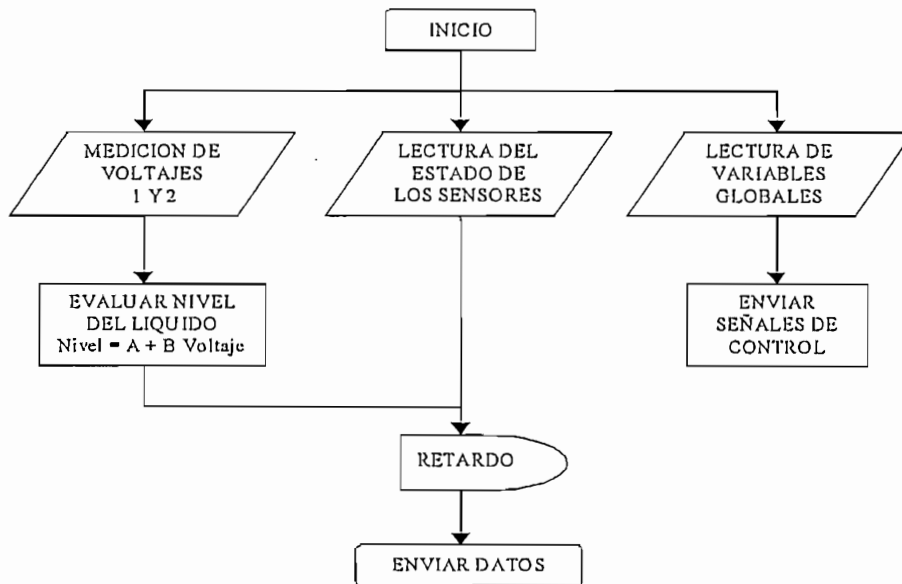


Figura 2.39 Lógica de la conversión de voltaje a nivel

Este módulo maneja dos señales de salidas analógicas y cuatro entradas también analógicas. De esta manera se evita la necesidad de configurar dos puntos de tierra independientes, uno para señales digitales y otro para analógicas, como se recomienda para la tarjeta Lab-PC-1200 cuando maneja estos dos tipos de señales.

Las salidas se emplean para enviar las señales de control a los actuadores y se manejan mediante la conversión del valor lógico, que se toma de las variables globales, en valores numéricos 0 o 1 correspondientes. Estos números se multiplican por la constante 5 y ese valor se aplica a las salidas analógicas en los canales 0 y 1 manejados por las subrutinas *AOUpdateChannel.vi*; los terminales de estas señales son los pines 10 y 12 de la tarjeta. Se puede observar el diagrama de programación en la Figura 2.40

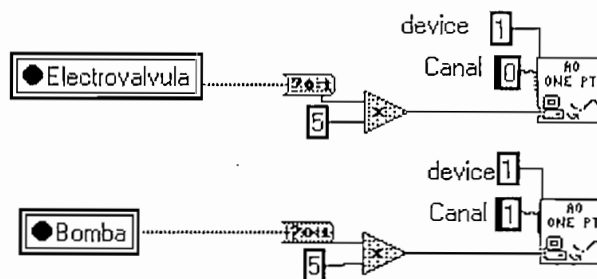


Figura 2.40 Manejo de las señales de actuación

En el caso de los sensores de nivel máximo, estos envían una señal TTL hacia la tarjeta, es decir 0 o 5Vdc a través de las entradas analógicas 3 y 4 que se manejan mediante las subrutinas *AI Sample Channel.vi* y cuyos terminales se ubican en los pines 4 y 5; estos valores se comparan con una constante numérica igual a 4 para producir una variable lógica True o False que verifica la condición *Greater?* (Mayor que), luego se emplea un arreglo booleano de tal forma que cualquiera de los dos sensores puede producir una señal de error de límite en la planta. Este proceso se describe gráficamente en la Figura 2.41.

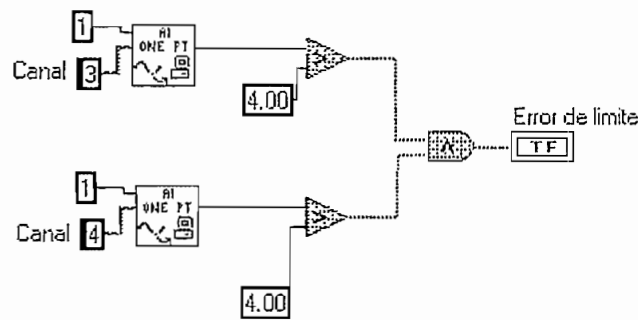


Figura 2.41 Monitoreo de los sensores de nivel máximo

Las restantes dos señales de entrada se emplean para recibir el valor de voltaje enviado por el acondicionador de los sensores, que está entre 0 y 10V y que debe ser convertido a su equivalencia de altura de nivel de líquido correspondiente. Para conseguir esto la programación implementada es básicamente la que se muestra en la Figura 2.42.

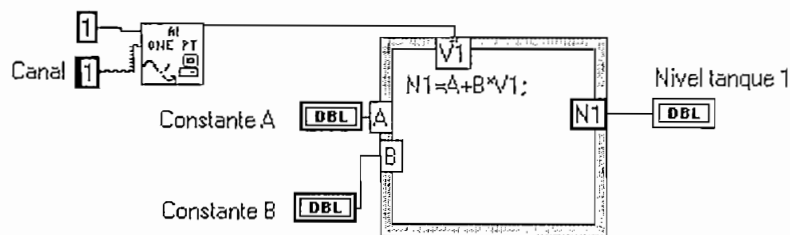


Figura 2.42 Conversión de voltaje a nivel

Para la conversión se debió determinar la relación existente entre el voltaje obtenido de los acondicionadores y el nivel que representan, tomando como referencia las ecuaciones de los circuitos empleados en la transducción y el acondicionamiento, que son las siguientes:

Capacidad en picofaradios, del cable coaxial y el sensor, en función del nivel h en metros:

$$C = \frac{24,5 \cdot 1,0006}{\log \frac{30}{6}} (0,40 - h) + \frac{24,5 \cdot 2,5}{\log \frac{6,5}{6}} h + 50,5$$

$$C = 35,26 (0,40 - h) + 1761,97 h + 50,5$$

$$C = 14,1 - 35,26 h + 1761,97 h + 50,5$$

$$C = 64,6 + 1726,71 h$$

Frecuencia en función de la capacidad:

$$F_o = \frac{2(V_{cc} - V_c)}{R_1 C V_{cc}} = \frac{2(12 - 11)}{150000 C \cdot 12} = \frac{2}{1800000 C} = \frac{10^{-5}}{9 C}$$

Voltaje en función de la frecuencia, de acuerdo a la ecuación de diseño del circuito de la Figura 2.15:

$$V = \frac{R_B \cdot R_O \cdot C_O}{0,486 \times R_S} F_o = \frac{120K \times 5,6K \times 0,01\mu F}{0,486 \times 15K} F_o = 0,000921 F_o$$

Con estas ecuaciones se obtiene el voltaje generado en función de la altura del líquido en metros:

$$V = 0,000921 \frac{10^{-5}}{9 * (64,6 + 1726,71 h) * 10^{-12}} = \frac{9,21 \times 10^3}{581,4 + 15540,44h}$$

Ya que el módulo de conversión realiza el proceso inverso; es decir, obtiene la altura en función del voltaje, en el nodo de fórmula se introduce la siguiente ecuación:

$$h = \frac{0,592}{V} - 0,0374$$

La ecuación obtenida e implementada en el módulo de conversión logra el cambio entre el voltaje leído por la tarjeta y el nivel de altura de líquido, con un error que luego se determinó es muy grande, ante lo cual se hicieron las correcciones que se mostrarán en el Capítulo 3. Se debe anotar que existe una evaluación independiente para cada uno de los tanques, lo que implica un nodo de fórmula para cada conversión.

Al terminar la conversión se tiene en la memoria del computador los valores de altura de líquido en cada uno de los tanques, y por tanto pueden ser manejados por todos los demás módulos que requieran de esta información.

Este panel no se encuentra accesible desde el programa de control, pues su manejo está restringido a quien disponga de los conocimientos de programación, debido a que un cambio en los valores de las constantes puede llevar a una conversión errónea o a una desviación muy grande de los valores reales.

2.3.2.6 CALIBRACION DEL SISTEMA

Como se indicó, se emplea el mismo archivo *Dos niveles voltaje.vi* para lograr la calibración del sistema por software, que es requerida para iniciar el funcionamiento.

Este sistema de calibración basa su funcionamiento en la generación de las constantes que se requieren dentro del nodo de fórmula que realiza la conversión de voltaje a nivel.

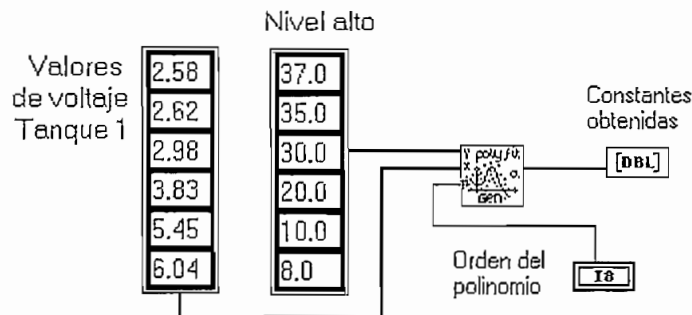


Figura 2.43 Generación de constantes de calibración

La obtención de las constantes se logra mediante el uso de la subrutina *GeneralPolynomialFit.vi* que requiere como entradas los datos de voltaje en función de la altura de ciertos puntos para proveer las constantes de acuerdo al grado del polinomio que se desee.

Estos datos de voltaje deben ser provistos inicialmente de manera que el sistema se aproxime más al valor real del líquido dentro de los tanques. Factores como el cambio en la composición del agua o deterioro de los elementos pueden desviar el punto de trabajo óptimo del circuito acondicionador.

Las constantes que se obtienen pasan a ser parte del nodo de fórmula descrito anteriormente y que provee de la conversión requerida. Cabe anotar que se necesitan los rangos de datos para cada uno de los tanques.

El uso del sistema de calibración, así como también los resultados de la conversión se detallan en el siguiente capítulo.

2.3.2.7 INTERFAZ DE ANIMACIÓN

En el módulo de selección se encuentra un botón etiquetado Central nuclear (animación), mediante el cual se accede a un panel donde se encuentra la simulación del funcionamiento básico del sistema de enfriamiento de una central de energía nuclear en funcionamiento normal y con la inclusión de una falla en el sistema de medición del nivel del líquido refrigerante que desencadena un proceso destructivo para la planta.

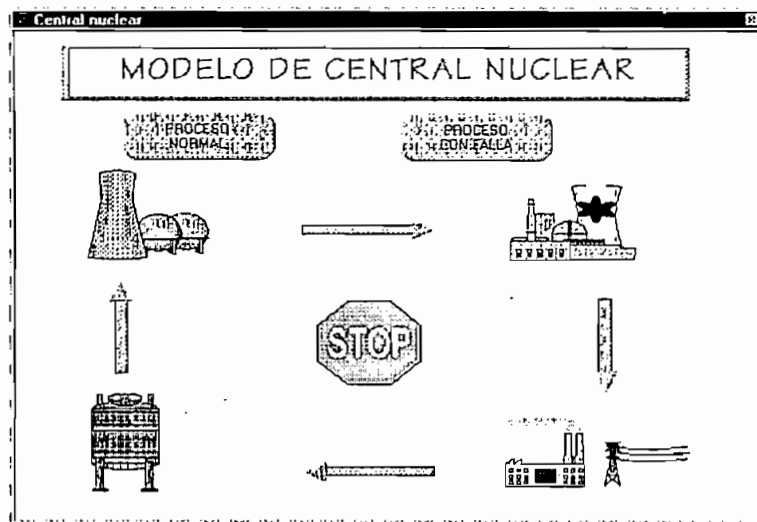


Figura 2.44 Interfaz de simulación

Este panel demuestra en forma sencilla la capacidad de programación de LabVIEW 5.0, que puede lograr una secuencia de animación en base al manejo de objetos gráficos y permite el manejo de otras bibliotecas que incluyen los archivos de desarrollo multimedia de los computadores. Por supuesto, proporciona un ejemplo de un proceso en el cual el correcto funcionamiento depende de la determinación del nivel del líquido en un tanque.

Para lograr esta animación se implementó el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 2.45

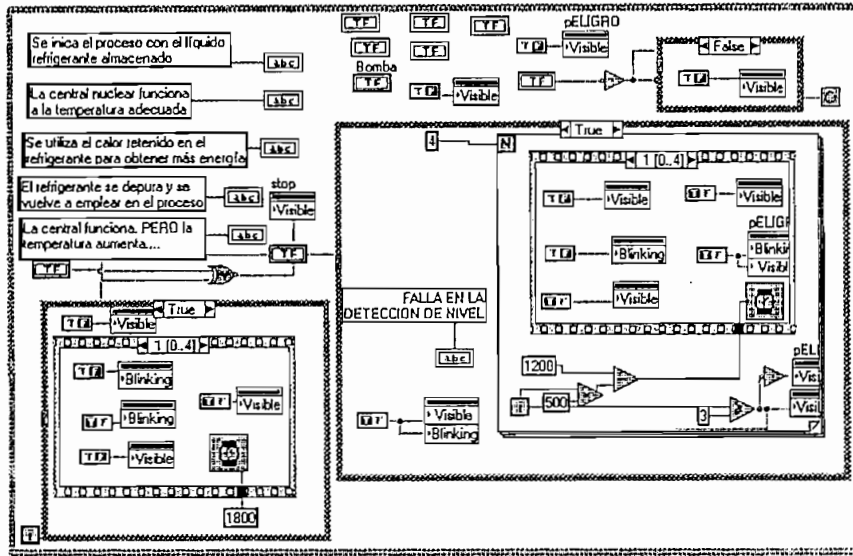


Figura 2.45 Diagrama de bloques

La animación se logró básicamente con el manejo de los atributos de nodo para cada elemento gráfico. Los atributos empleados son:

- La posibilidad de ocultar y mostrar el elemento; y,
- El parpadeo que se puede aplicar sobre un elemento gráfico.

Las estructuras de secuencia de LabVIEW provocan en el usuario la idea de que existe un movimiento de los gráficos, cuando en realidad lo que ocurre es que estos van apareciendo y desapareciendo con un determinado retardo de tiempo.

Para la animación del sistema sin falla, se emplea una estructura de caso (*Boolean Case Structure*) donde se ejecuta una secuencia que hace aparecer y desaparecer cuadros de texto en intervalos de tiempo suficientes como para leer la información que estos contienen y entender el funcionamiento básico del sistema de enfriamiento.

En la estructura de secuencia que corresponde a la operación con falla, no solo se aplica un retardo fijo sino que, empleando una estructura *For loop*; es decir, de lazo, se aplican distintos retardos conforme se van repitiendo los pasos del proceso; por lo tanto,

el usuario puede observar que los gráficos realizan cada vez la secuencia a mayor velocidad.

Se puede terminar el funcionamiento del panel de información presionando la tecla Escape *Esc* o haciendo un clic en el botón marcado STOP, para volver al panel de selección.

2.3.2.8 INTERFACES DE INFORMACIÓN.

En los principales paneles del sistema se encuentran botones de información, que muestran al usuario datos básicos sobre el módulo desde el cual se requirió la información correspondiente.

Durante la ejecución del panel respectivo, se puede presionar el botón *Información* o la tecla *F1* y entonces se despliega un panel como el que se muestra en la Figura 2.46

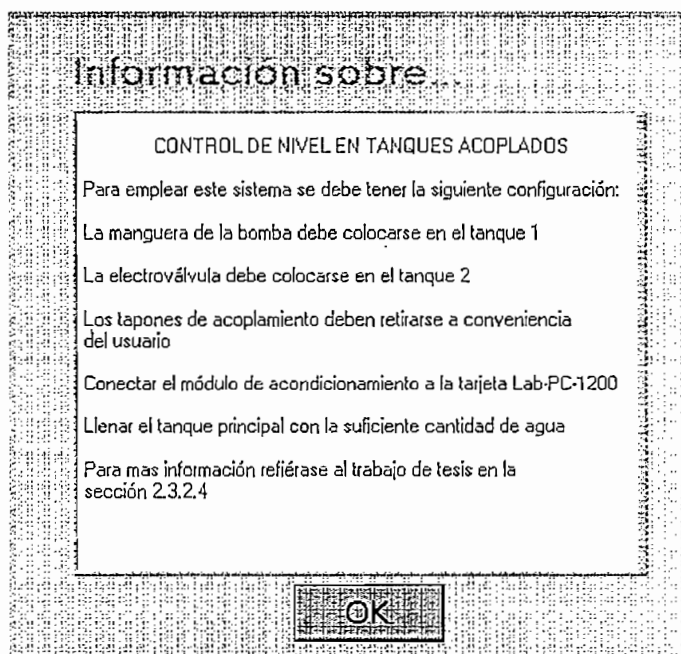


Figura 2.46 Interfaz de información

La información mostrada describe principalmente la configuración que se requiere para lograr el correcto funcionamiento del esquema de control al que pertenece.

Para su implementación se emplea el mismo esquema que en el panel de selección; es decir, el manejo de una estructura de caso a través de un botón cuya etiqueta es INFORMACION y que conduce a la ejecución del sub-módulo de información correspondiente.

Los paneles de información cumplen con el esquema modular de la programación, manteniendo el sistema de control en funcionamiento mientras ellos son desplegados y analizados.

El conjunto de los módulos descritos forman lo que se denomina en LabVIEW un proyecto, y encierra todo el sistema jerárquico creado durante el desarrollo del sistema (Figura 2.24), por tanto es necesario disponer de todos los archivos que a continuación se detallan para el funcionamiento normal del programa:

Inicio.vi	Interfaz de inicio
Selección.vi	Interfaz de selección
Control 1 tanque.vi	Interfaz de control de nivel en un solo tanque
Control 2 tanques.vi	Interfaz de control de nivel en tanques acoplados
Dos niveles voltaje.vi	Panel de conversión de voltaje a nivel.
Central nuclear.vi	Interfaz de simulación.
Mi informacion.vi	Interfaz de información general.
Mas informacion1.vi	Interfaz de información sobre el control en un solo tanque.
Mas informacion2.vi	Interfaz de información sobre el control en tanques acoplados.

La programación en LabVIEW brinda la facilidad de ejecutar el programa sin la presencia de los archivos en un mismo directorio, pero ya que estos se encuentran en el nivel jerárquico del proyecto, se requerirá la determinación de su ubicación al inicio de la ejecución.

2.3.2.9 CARACTERISTICAS COMPLEMENTARIAS DEL PROGRAMA

- Para facilitar el manejo del programa, se ha asociado a los botones que se emplean para detener el panel de control, la tecla <Escape>, mediante la opción *Key navigation* y la tecla *F1* para los botones de información.

- LabVIEW permite al usuario emplear la tecla de tabulación para seleccionar los controles en el panel activo, en caso de que no se desee usar el mouse como medio de interacción con el programa.
- Los controles e indicadores numéricos pueden variar su presentación tanto en formato como en precisión, con el uso de la opción *Format & Precision*, este cambio afecta a la visualización del valor, ya que las operaciones que se realizan solo consideran la forma de representación del número. Esta representación puede encontrarse dentro de la clasificación mostrada en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Representación numérica de LabVIEW

Representación	Descripción
Single SGL	Número de simple precisión 8 bits
Double DBL	Número de doble precisión de 16 bits
Extended EXT	Número de punto flotante de 32 bits
I8, I16, I32	Número entero con signo de 8, 16 o 32 bits
U8, U16, U32	Número entero sin signo de 8, 16 o 32 bits

2.4 SISTEMA DE ACTUADORES

Se han descrito los elementos que permiten la detección del nivel del líquido en la planta y el programa desarrollado para generar las señales de control; finalmente se describen los elementos que toman las señales provenientes del programa de control a través de la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200 y las convierten en acciones para aumentar o disminuir el volumen de agua en los tanques, lo que puede lograrse mediante una bomba para el ingreso de líquido a los tanques y una electroválvula para el desfogue del mismo.

2.4.1 BOMBEO DE LÍQUIDO

Como se indicó anteriormente para enviar agua dentro de los tanques se emplea una bomba inmersible colocada en la parte inferior de la base media.

Este actuador es controlado por la correspondiente señal enviada por el computador a través de la tarjeta Lab-PC-1200 en la salida DAC0OUT en el pin 10, y que debe pasar por un circuito incluido en el módulo de transducción para comandar el funcionamiento de la bomba.

La bomba inmersible disponible en el laboratorio de Instrumentación tiene las siguientes características eléctricas:

- Voltaje de funcionamiento 12 VDC
- Corriente de funcionamiento 1.93 A.
- Casa fabricante PROVEN PUMPS CORP.

La señal que se recibe del computador es una señal de 5 o 0 Vdc, pero esta no es suficiente para accionar al actuador por tanto se ha implementado el circuito de la Figura 2.47 para lograr el objetivo deseado.

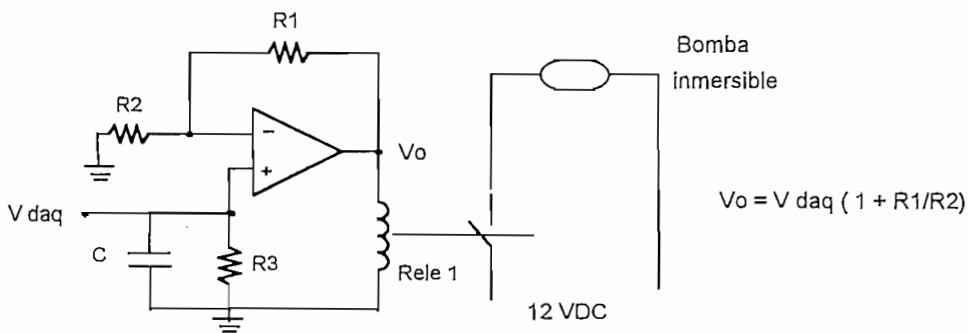


Figura 2.47 Circuito de actuación para la bomba inmersible

El circuito es regido por la ecuación $V_o = V_{in} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$, para este caso el valor V_{in} es el voltaje dado por la tarjeta de adquisición de datos y el voltaje V_o es el que aplica sobre la bobina del relé de comando de la bomba.

Ya que la señal de control es de 5 voltios DC y el voltaje de trabajo de la bobina del relé es 12 V, se requiere llevar al amplificador operacional a la saturación positiva, de manera que todo el voltaje de polarización se aplica a la bobina para que cierre los contactos que permiten la alimentación de la bomba inmersible, desde su fuente de alimentación independiente.

Para lograr esta saturación se requiere cumplir lo siguiente: $\frac{R_1}{R_2} > 1.4$ Para esto se seleccionaron los valores de $R_1=10K$ y $R_2=3.3K$ que aseguran la saturación ante la presencia de la señal de control.

La resistencia R_3 es la carga dada a la tarjeta de adquisición de datos y permite el paso de una corriente dada por $I = \frac{V}{R} = \frac{5}{10000} = 0.0005A$ que es menor que la que soporta la salida empleada.

Se puede notar la presencia del capacitor C en paralelo con la resistencia R_3 , este se incluyó debido a que ciertos procesos en el manejo de la información en el computador hacen que la señal enviada no sea siempre continua, sino que se presenta como pulsos. Con la presencia de este condensador de $10 \mu F$ se mantiene siempre la señal aplicada al amplificador como continua, evitando esta molestia.

Con estas justificaciones, los elementos requeridos para este circuito son:

- Amplificador operacional LM741
- $R_1=10 K$, $R_2=3.3 K$, $R_3=10K$. Resistencias de $0,25W$
- Capacitor C de $10\mu F$ y $10V$
- Mini Relé con bobina para $12Vdc$, contacto tripolar para $10A$ a $120 Vac$.

Con la implementación de este circuito se asegura el encendido y apagado de la bomba inmersible para proveer la cantidad de agua requerida, siempre y cuando el nivel existente del líquido en el tanque principal lo permita.

2.4.2 EXTRACCIÓN DE LÍQUIDO

La acción complementaria al llenado del líquido es el desfogue del mismo a través del funcionamiento de una electroválvula acoplada a los tanques.

Este actuador funciona como elemento on/off; es decir, solamente puede estar totalmente abierto y permitir el paso del líquido o estar cerrado y bloquear todo desfogue del mismo, sin considerar posiciones intermedias.

Las características principales de este elemento de actuación son las siguientes:

- Voltaje de alimentación de la bobina 110 VAC.
- Potencia de consumo 6W
- Tubería terminal 0,5 pulgadas
- Presión de trabajo: agua y aceite de 5 a 135 psi, aire y gases inertes de 5 a 200 psi
- Casa fabricante ASCO

Tanto la bomba inmersible como la electroválvula son controladas por señales discretas, desde el computador; por tanto, los circuitos requeridos para el control de ambos dispositivos son los mismos, distinguiéndose solamente en la naturaleza de la alimentación de cada actuador.

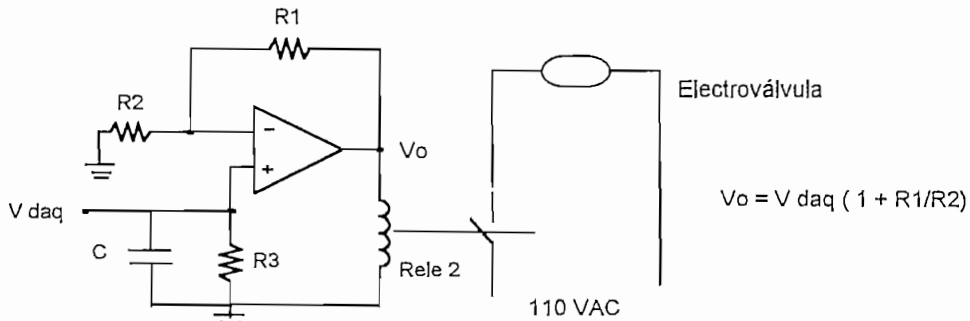


Figura 2.48 Circuito de actuación para la electroválvula

Como se indicó el circuito es el mismo que para la bomba inmersible, por tanto los elementos requeridos tendrán los mismos valores y justificaciones, por tanto serán:

- Amplificador operacional LM741
- $R_1=10\text{ K}$, $R_2=3.3\text{ K}$, $R_3=10\text{K}$. Resistencias de 0,25W
- Capacitor C de 10uF y 10V
- Mini Relé con bobina para 12Vdc, contacto tripolar para 10A a 120 Vac.

Debido a que la electroválvula sólo dispone de dos estados, abierto o cerrado, la velocidad del desfogue del líquido dependerá de la altura a la que se encuentre el líquido en el tanque en el cual se halle acoplada la electroválvula.

2.5 DISEÑO DEL MÓDULO DE ACONDICIONAMIENTO

Se han indicado cada uno de los circuitos implementados para la transducción, el acondicionamiento y el manejo de las señales que se producen en la planta, así como sus respectivas fuentes de alimentación y elementos de conexión, satisfaciendo uno de los requerimientos del sistema en cuanto a su total independencia eléctrica.

Este conjunto de elementos se halla integrado en un solo módulo, al que se denomina de acondicionamiento, estructurado sobre una base metálica y provisto de todas las conexiones necesarias para cumplir con los requerimientos de la planta.

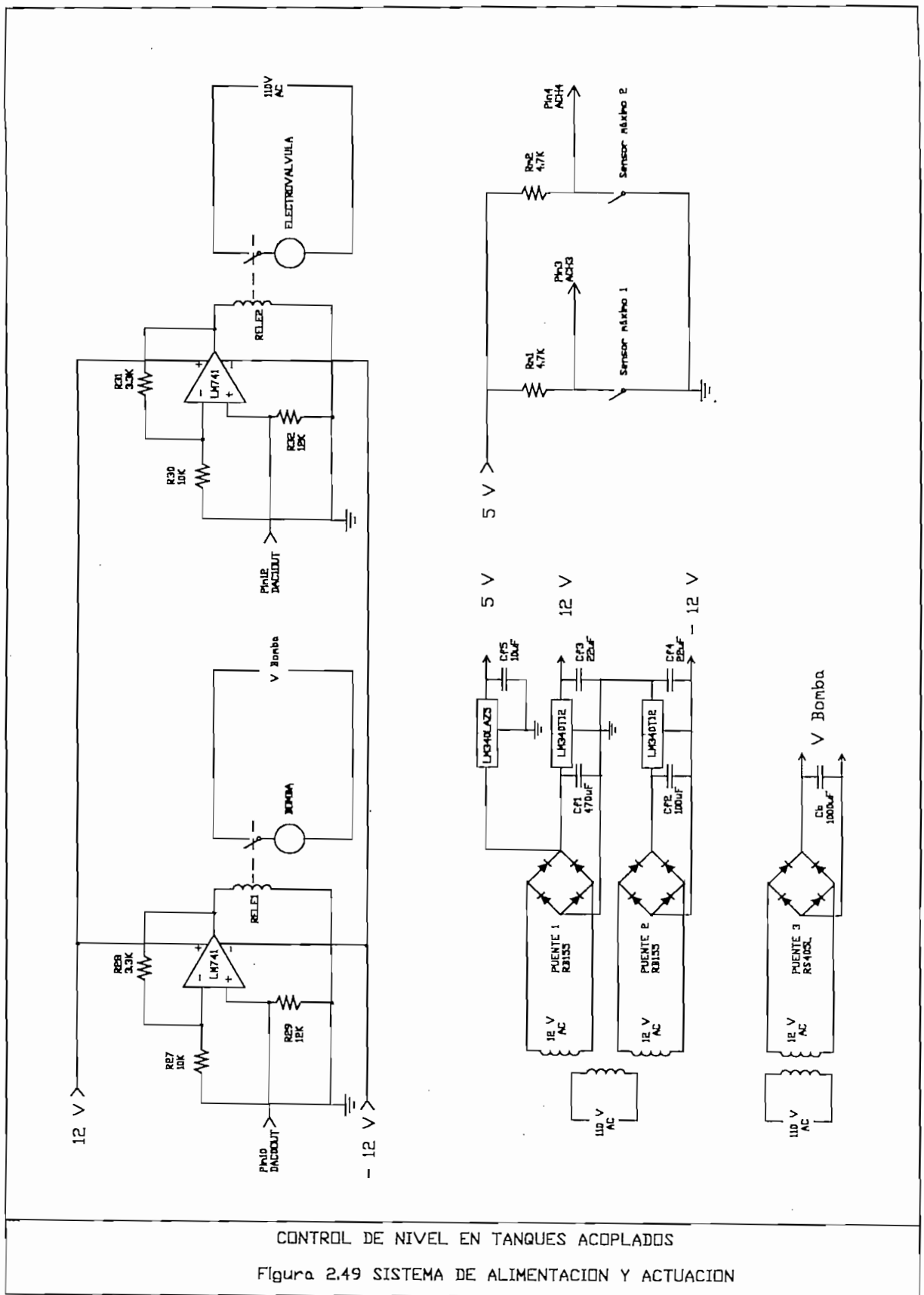
2.5.1 ESQUEMA GENERAL DEL MÓDULO

A continuación se esquematizan los elementos que se encuentran dentro del módulo de acondicionamiento, y aunque se encuentran dentro de un mismo soporte, se ha dado el aislamiento eléctrico requerido en los diferentes casos. Se tienen entonces las siguientes etapas integradas:

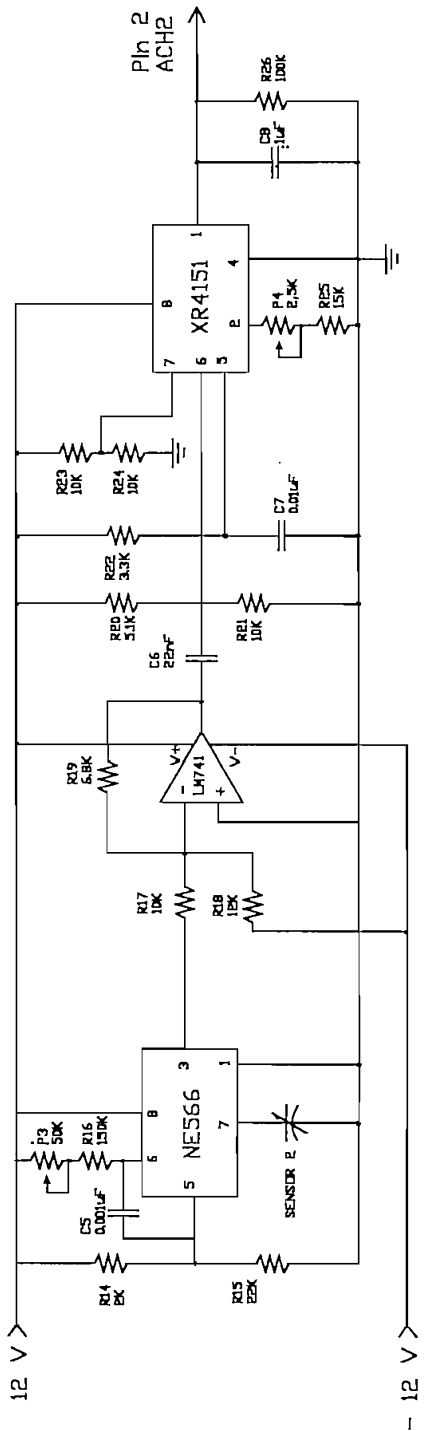
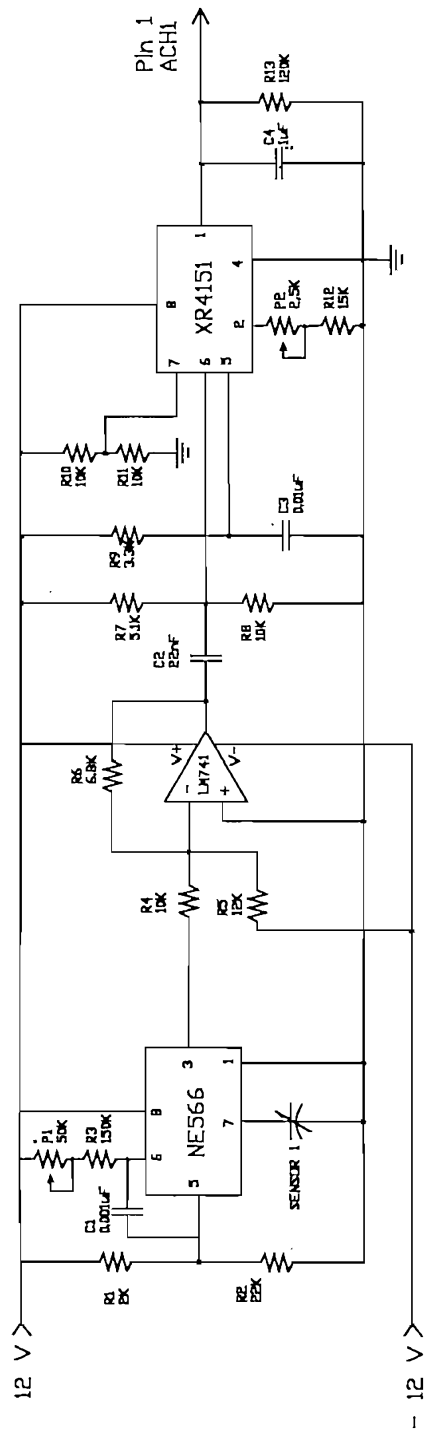
- Circuitos de transducción para los sensores capacitivos.
- Circuitos de acondicionamiento de las señales de los sensores capacitivos y de flotación.
- Circuitos de manejo de señales para actuación.
- Fuentes de polarización para transducción y actuación.
- Transformadores para polarización
- Elementos de conexión externa.
- Dispositivos de seguridad

De estas etapas, las cuatro primeras se hallan montadas sobre una misma placa de circuito impreso, las demás se encuentran distribuidas dentro del soporte metálico de manera que sean accesibles en caso de requerir algún tipo de manipulación.

A continuación en el Plano General se muestra el circuito electrónico completo, empleado para el acondicionamiento de los sensores, las fuentes de alimentación y demás etapas antes indicadas.



CONTROL DE NIVEL EN TANQUES ACOPLADOS
 Figura 2.49 SISTEMA DE ALIMENTACION Y ACTUACION



CONTROL DE NIVEL EN TANQUES ACOPLADOS

Figura 2.50 SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO

2.6 ELEMENTOS ADICIONALES

Todos los elementos descritos son básicos para el funcionamiento correcto del sistema; pero, además de estos se encuentran en la planta ciertos elementos accesorios.

Debido a que en el presente trabajo se emplean tanques que pertenecen a un proyecto anterior, se mantiene un dispositivo de medición de caudal de tipo mecánico, acoplado a la salida de la bomba inmersible. Este elemento se encuentra solo como elemento demostrativo, puesto que no interviene en ningún momento en el funcionamiento del sistema.

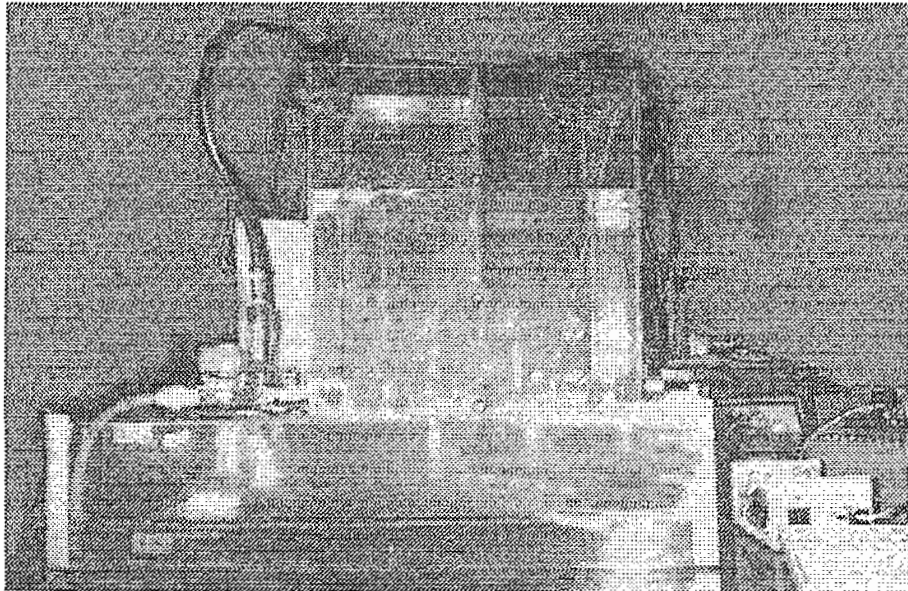


Figura 2.52 Fotografía del conjunto de tanques acoplados

Para todas las instalaciones por donde fluirá el agua se han tomado como normas los siguientes criterios:

- Las tuberías, mangueras y conectores deben especificarse para una medida de 0,5 pulgadas de radio.
- Debe mantenerse la posibilidad de intercambiar fácilmente las posiciones de los elementos.
- Las tuberías y mangueras deben ser flexibles en lo posible.

De esta manera, el módulo del sistema dispone de los siguientes elementos adicionales:

- Manguera de conexión para la bomba inmersible, acoplada al medidor de caudal.
- Tuberías de soporte y acoplamiento para la electroválvula, montadas en la parte inferior de cada tanque.
- Válvulas de desfogue manuales, situadas en la parte inferior de cada tanque.
- Tuberías de conexión para las mangueras de desfogue de líquido.
- Conectores plásticos para mangueras de desfogue

Finalmente, el conjunto de los tanques acoplados puede ser observado físicamente, como se indica en la fotografía de la Figura 2.52 y el sistema en funcionamiento como se ve en la Figura 2.53.

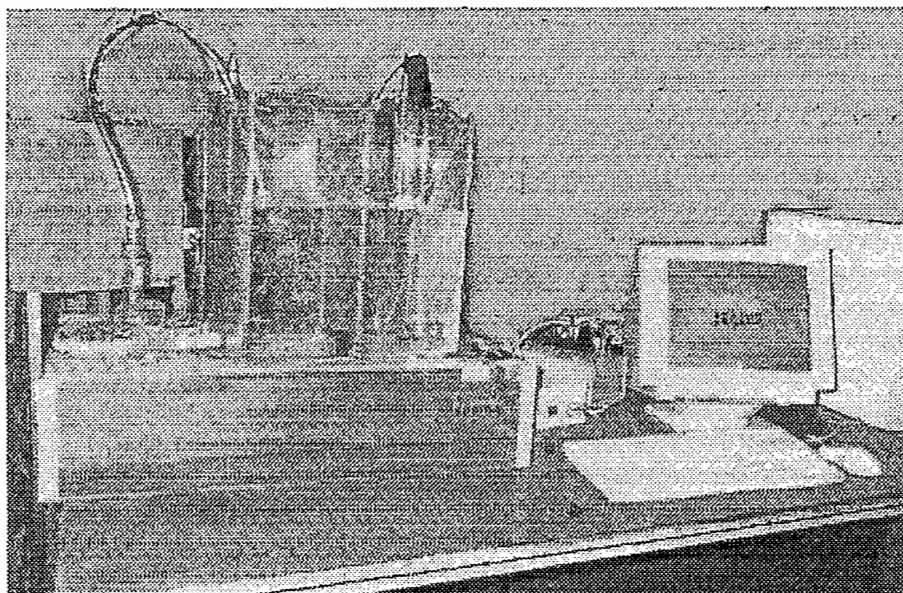


Figura 2.53 Fotografía del sistema en funcionamiento

Con estos elementos y las configuraciones descritas se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento y puesta a punto del sistema, cuyos resultados se detallan en el siguiente capítulo.

Tabla 3.1 Capacidad del sensor en función de la altura

Altura cm	C medida pF	C teórica pF
37	780	833,04
35	760	792,89
30	660	692,53
25	612	592,17
20	500	491,81
15	442	391,44
10	345	291,08
8	312	250,94
5	262	190,72
2	179	130,50
0,2	138	94,37

Se debe recordar que estos valores incluyen la capacidad del cable blindado que con la medición se determinó es de 75,7 picofaradios. Con estos datos se obtuvo la curva característica del sensor capacitivo mostrada en la Figura 3.1. Cabe anotar que prácticamente se alcanzó igual resultado para los dos sensores. Las diferencias que se encontraron fueron mínimas, lo cual es comprensible puesto que ambos fueron contruidos con materiales de una misma estructura y que sus dimensiones son las mismas.

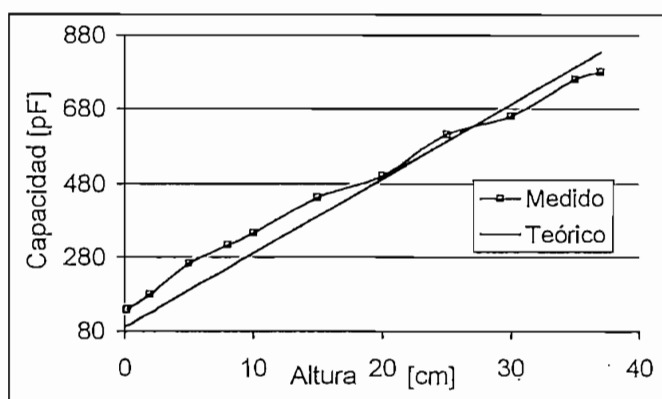


Figura 3.1 Curva de respuesta del sensor capacitivo.

Como se puede observar, la curva característica del sensor ante la variación del nivel del líquido es similar a la curva teórica y los valores límites para una altura de agua entre 0,2 y 37 centímetros, son respectivamente, 138 y 780 picofaradios.

De estos valores se obtiene la sensibilidad del sensor capacitivo empleado, cuyo valor es:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{salida}}{\text{entrada}} = \frac{780 \text{ pF} - 138 \text{ pF}}{37 \text{ cm} - 0.2 \text{ cm}} = 17.44 \text{ pF/cm}$$

3.1.2 PRUEBAS CON DISTINTOS NIVELES DE ACOPLAMIENTO ENTRE TANQUES.

Cuando el módulo funciona empleando ambos tanques, el agua que ingresa a uno de ellos es transferida hacia el tanque adyacente mediante las aberturas que se encuentran en la parte inferior de la pared común. Como se mencionó, se disponen de siete aberturas de distintos diámetros, con sus respectivos tapones, que pueden ser cerradas o abiertas de acuerdo al criterio del operador. La velocidad de transferencia del líquido estará dada por el número de aberturas que se encuentren destapadas.

Sobre esta base se realizaron pruebas para conocer la velocidad con que el agua pasa desde un tanque hacia el otro, siguiendo el siguiente proceso:

1. Colocar un nivel de 30cm de agua en el tanque 1 y un nivel 0cm en el tanque 2.
2. Retirar el tapón del orificio de prueba, a la vez que se inicia el conteo del tiempo.
3. Anotar el tiempo que transcurre hasta que los tanques tienen el mismo nivel de agua, es decir 15 cm.
4. Tomar las mediciones de tiempo para cada abertura independiente; es decir, siete mediciones.
5. Luego realizar ensayos para un conjunto progresivo de aberturas; es decir, las dos primeras aberturas, las tres primeras, etc. La primera abertura es la más pequeña, con 5mm de diámetro y un área de 0.196 cm^2 . La más grande tiene un radio de 30 milímetros y un área de $7,07 \text{ cm}^2$.

El flujo de transferencia de líquido se calcula mediante el uso de la relación

$$\text{Flujo} = \frac{\text{Volumen transferido}}{\text{Tiempo de transferencia}}$$

Como se explicó en el Capítulo 2, inicialmente se implementó un circuito basado en el CI 555 para la generación de onda cuadrada, pero su funcionamiento resultó deficiente puesto que la señal producida era muy inestable e incluía demasiado ruido.

Ante esto se construyó un generador en base al CI LM566 que resultó ser lo suficientemente estable y libre de ruido como para la aplicación requerida.

La característica aproximadamente lineal del sensor capacitivo se vio reflejada en la generación de frecuencia, como puede observarse en los valores que se obtuvieron de acuerdo al nivel del líquido y que se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Frecuencia generada en función del nivel de agua

Altura cm	Frecuencia Hz
0	9091
2	8333
5	6667
8	5882
10	5000
15	4167
20	3571
25	3125
30	2778
35	2500
38	2381

Con esto se terminan las pruebas realizadas previamente, y que son la base para el diseño de los sensores y sus circuitos de acondicionamiento.

3.2 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

Obviamente, en el diseño se ha procurado que los circuitos sean lo más estables posibles, pero aún así, pueden ocurrir corrimientos del punto de trabajo

Evidentemente, las condiciones de funcionamiento del módulo no podrán ser exactamente las mismas siempre. Debido a esto, se ha previsto en la construcción del módulo la facilidad de variar, en ciertas etapas del proceso, algunos parámetros para lograr el funcionamiento normal del mismo ante distintas condiciones de utilización.

La variación de las condiciones de trabajo ocurre generalmente por envejecimiento de los componentes, variaciones de la temperatura ambiente, etc. Sin embargo, hay cambios que puede introducir el usuario como por ejemplo, cambio en la calidad del líquido que se emplee en el módulo.

El diseño es para agua potable, pero se puede usar cualquier otro fluido no corrosivo, o bien el agua potable puede cambiar en su composición por variaciones en las cantidades de cloro y otras sustancias que contiene, cambiando de esta manera las condiciones para las que inicialmente se construyó el módulo. Esto hace necesario algún sistema de calibración.

3.2.1 CALIBRACION DEL GENERADOR DE ONDAS.

A pesar de que en la construcción de los sensores capacitivos se siguieron los mismos pasos, existen ciertos parámetros que no se pueden controlar y que hacen que el funcionamiento de ambos no sea exactamente el mismo. Esto implica que la capacidad en cada sensor sea aproximadamente la misma, pero no igual.

Ya que esta capacidad influye directamente sobre el funcionamiento del generador de señales, se incluye un sistema de calibración en el circuito de manera que la frecuencia generada para el nivel inferior del líquido sea siempre la misma y se asume un valor de 9 KHz. Con esto se brinda un margen de seguridad para el funcionamiento de la siguiente etapa que fue calculada para un máximo de 10 KHz.

Para lograr esta calibración y con referencia a la Figura 3.2, se requiere de un osciloscopio que verifique la forma de onda en el pin 3 del LM566 y permita la medición de su frecuencia a 9090 Hz que se obtiene cuando el período de la onda es de 110 microsegundos, para ello se ajusta el potenciómetro P_1 hasta que se observe en el osciloscopio la onda con la frecuencia requerida.

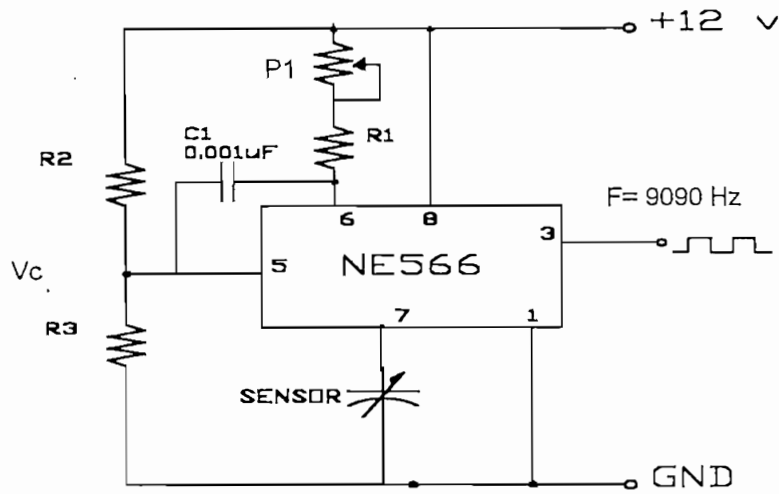


Figura 3.2 Circuito generador de ondas

3.2.2 CALIBRACION DEL CONVERSION DE FRECUENCIA A VOLTAJE.

En el circuito de acondicionamiento de señal se puede obtener un funcionamiento óptimo al calibrar la última etapa que es la conversión de frecuencia a voltaje.

Se ha previsto en el diseño la posibilidad de variar la respuesta de la etapa de conversión de frecuencia a voltaje, mediante el empleo del potenciómetro P_2 de la Figura 3.3, que permite modificar la respuesta de frecuencia del circuito.

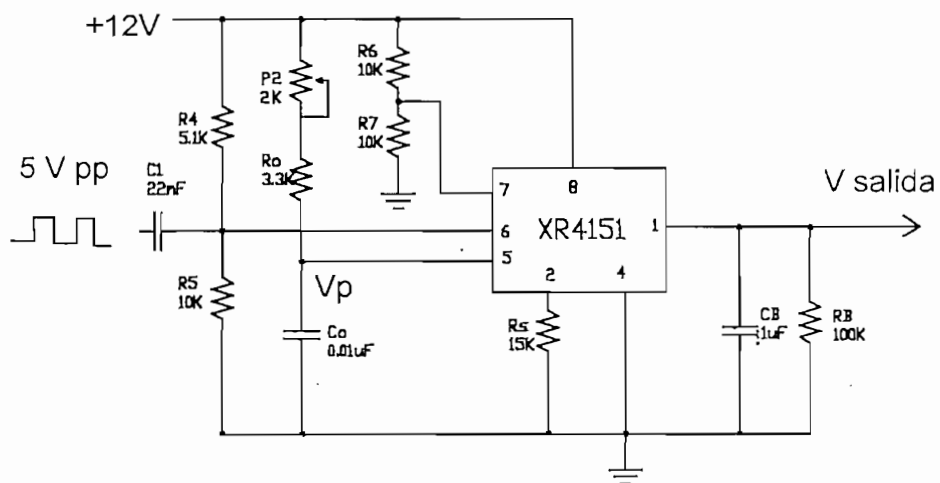


Figura 3.3 Circuito del convertor de frecuencia a voltaje.

Al variar el valor de P_2 se debe verificar en el punto denominado V_p , la forma de onda del voltaje de carga del capacitor C_o . Las formas de onda de la Figura 3.4 fueron tomadas con un osciloscopio y empleando un generador de onda cuadrada de frecuencia fija de 10 KHZ y amplitud 5 Vpp.

Al ingresar la señal del generador se debe variar P_2 hasta que en el punto V_p se obtenga la forma de onda que se muestra en la Figura 3.4.a. En la Figura 3.4.b se muestra como referencia la forma de onda que se obtiene en este punto cuando el circuito está fuera de su punto de operación.

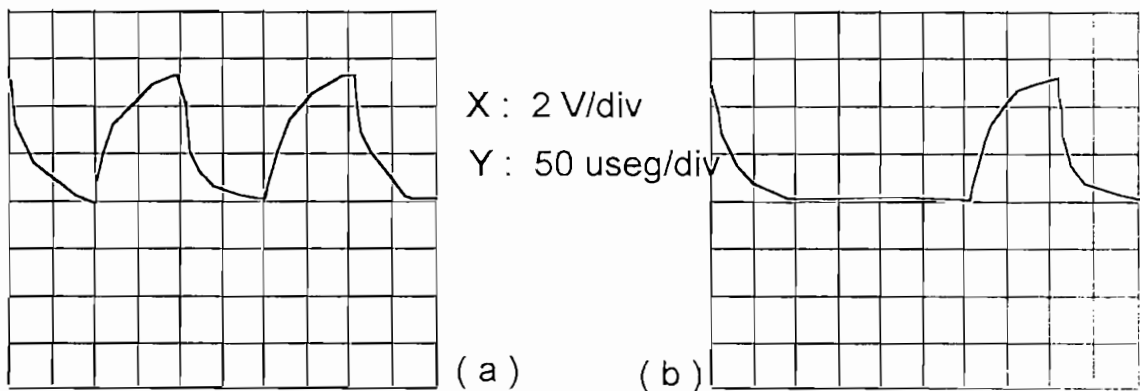


Figura 3.4 Formas de onda para calibración del FVC

Se debe entonces verificar estas formas de onda en el conversor de voltaje a frecuencia, cada vez que el líquido que se emplee sea distinto al agua potable, o al realizar algún cambio en el circuito cuando se realiza alguna reparación.

3.2.3 CALIBRACION DEL PROGRAMA DE CONTROL

Como se indicó, el módulo de transducción proporciona un voltaje con relación al nivel del líquido existente en los tanques. Este voltaje es enviado a la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200 que lo convierte en un valor numérico que puede manejarse dentro del computador.

Se indicó también que para lograr esto se emplea un algoritmo matemático que procura representar fielmente la altura real del líquido.

En la Tabla 3.4 se muestran los valores reales obtenidos en los acondicionadores, en función de los distintos niveles de líquido en los tanques y que son los que se deben obtener mediante el algoritmo implementado.

Tabla 3.4 Voltajes obtenidos en función del nivel del agua

Altura	V Tanque 1	V Tanque 2
37	2,58	2,35
35	2,62	2,45
30	2,98	2,75
25	3,33	3,16
20	3,83	3,68
15	4,48	4,43
10	5,45	5,49
8	6,04	6,12
5	7,20	7,17
3	8,02	8,18
1	9,18	9,01
0,2	9,52	9,37

Son estos valores de voltaje los que se deben manejar de manera que reflejen los niveles de líquido en cada tanque. Al aplicarlos sobre la ecuación teórica encontrada para la altura en función del voltaje $h = \frac{0,592}{V} - 0,0374$ y graficar estos datos, para el tanque 1, se obtiene la Figura 3.5

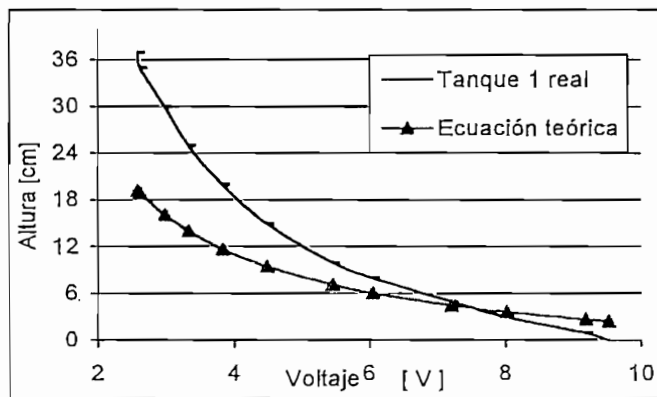


Figura 3.5 Nivel de líquido en el tanque 1 en función del voltaje de entrada.

Se puede observar que el error obtenido con la aplicación de la ecuación teórica es demasiado grande y lo es también para el tanque 2; por lo tanto, se deben modificar las constantes A y B de la ecuación $h = \frac{A}{V} - B$, para que la respuesta sea lo más cercana posible al valor real del nivel.

Luego de la realización de pruebas empíricas se llegaron a obtener los siguientes valores para las constantes indicadas:

Tabla 3.5 Constantes empíricas empleadas

	A	B
Tanque 1	1,185	0,115
Tanque 2	1,059	0,095

El uso de estas constantes reduce considerablemente el error de la conversión, teniendo la máxima desviación en el nivel 37cm donde se miden 34,4cm y como mínima en el nivel 15cm donde la medición es también de 15cm. Se puede analizar la respuesta de la conversión en la Figura 3.6

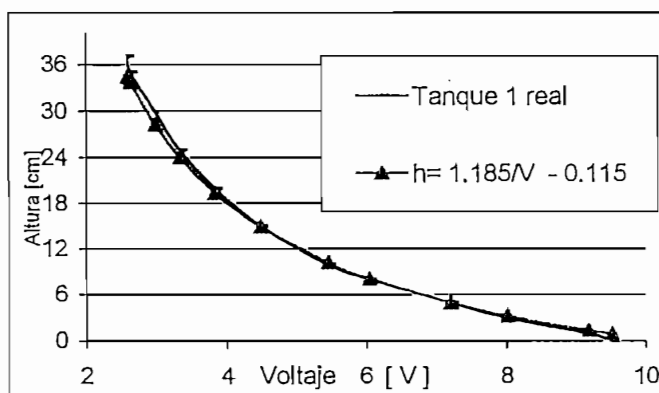


Figura 3.6 Nivel de líquido en el tanque 1, usando constantes empíricas.

Para la calibración del sistema en lo que corresponde a la conversión entre los valores de voltaje y el nivel en cada tanque, se emplea el módulo *Dos niveles voltaje.vi* funcionando independientemente del programa de control.

A pesar de que este archivo es parte integral del sistema de control, no se puede acceder al mismo desde los paneles principales; por tanto, no es posible calibrar el sistema

mientras está en ejecución sino que se lo debe detener y acceder al modo de edición de LabVIEW.

Las pruebas de calibración se realizan bajo el siguiente esquema:

- Configurar los tanques según la estructura de funcionamiento en tanques acoplados.
- Conectar el módulo de acondicionamiento a la tarjeta de adquisición de datos.
- Ejecutar el archivo, en modo de ejecución continua.
- Emplear los controles manuales del módulo de acondicionamiento, para llenar los tanques.
- Anotar los valores de voltaje correspondientes a los siguientes niveles, para cada tanque: 0.2, 1, 2, 5, 8, 10, 15, 20, 30, 35, 37
- Detener la ejecución y en el modo de edición anotar los voltajes obtenidos según corresponda en los recuadros que se indican en la Figura 3.7.
- Grabar el archivo con el mismo nombre *Dos niveles voltaje.vi* o emplear las teclas Ctrl+S.

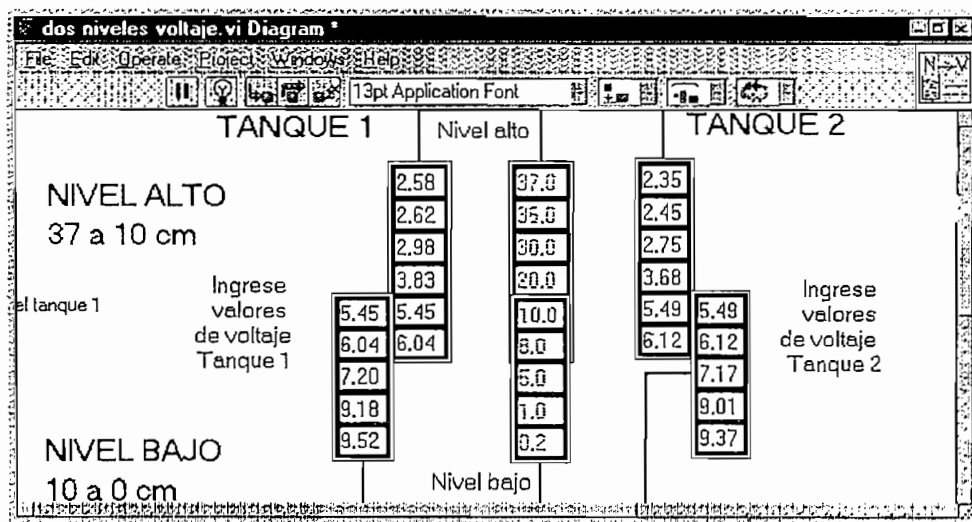


Figura 3.7 Diagrama de Calibración

Este módulo genera las nuevas constantes que mejoran la conversión, pero que aún incluyen un cierto error, el cual se puede analizar en la Tabla 3.6, donde también se aprecian los datos de una ecuación de grado mayor que se implementó para minimizar el error en la conversión.

Tabla 3.6 Conversión de voltaje a nivel

Altura real	Tanque 1		Tanque 2	
	A ₁ , B ₁	Ec. Óptima	A ₂ , B ₂	Ec. óptima
37	34,4	37,2	35,6	37,1
35	33,7	35,0	33,7	35,0
30	28,3	30,1	29,0	30,0
25	24,1	25,0	24,0	25,0
20	19,4	19,9	19,3	19,9
15	15,0	15,0	14,4	15,0
10	10,2	10,0	9,8	10,0
8	8,1	8,0	7,8	8,0
5	5,0	5,1	5,3	5,1
3	3,3	3,0	3,4	3,1
1	1,4	1,0	2,3	1,0
0	0,9	0,0	1,8	0,1

Al emplear la ecuación se puede apreciar que el error obtenido es mínimo, lo cual se puede observar en la Figura 3.8 donde se utilizan los datos para el tanque 2.

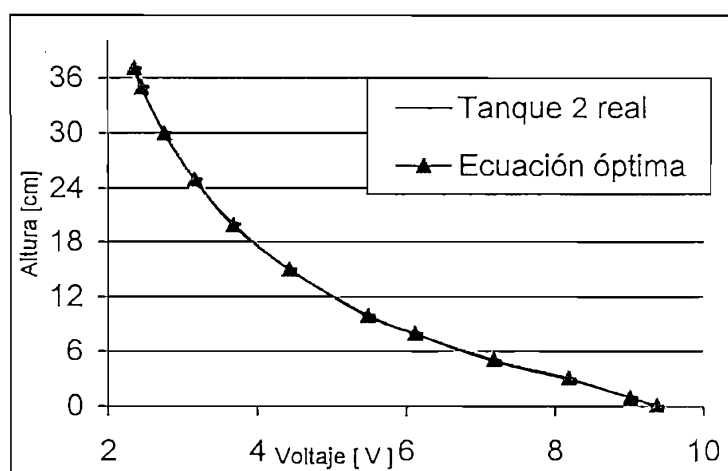


Figura 3.8 Nivel de líquido en el tanque 2, usando la ecuación óptima.

De esta manera se logra la calibración del sistema, para poder usarse en los objetivos que se requieran.

3.3 MODOS DE FUNCIONAMIENTO DEL MODULO.

El sistema puede operar en dos formas diferentes: control en un tanque y control en tanques acoplados.

En el capítulo anterior se describió de manera funcional el desempeño de cada uno de estos modos. En esta sección se hace un análisis más detallado con el propósito de introducir el potencial didáctico del trabajo presente.

3.3.1 PRUEBAS DEL CONTROL DE NIVEL EN UN TANQUE.

Para trabajar en este modo se deben colocar los elementos del módulo de acuerdo a la Figura 3.9, donde se muestra esquemáticamente la estructura de los tanques y demás componentes.

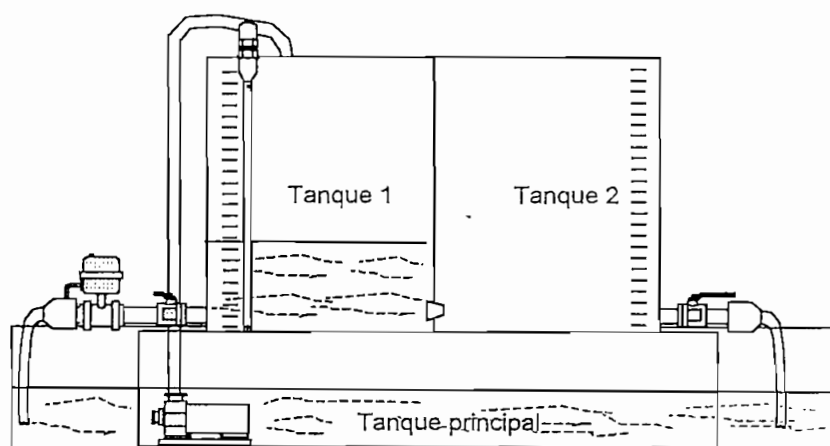


Figura 3.9 Módulo de control en un solo tanque

Con esta configuración se procede a la ejecución del programa de control de manera que se pueden realizar las siguientes acciones:

- Controlar el nivel del agua accionando directamente la electroválvula o la bomba virtuales.
- Permitir el control del nivel automáticamente, luego de proporcionar un valor de referencia.

Se procedió a verificar el funcionamiento de los sensores de flotación, para lo cual se llenó el tanque hasta su nivel máximo. De esta manera se comprobó que los sensores cierran sus contactos cuando el flotador forma un ángulo de aproximadamente 30 grados con el eje fijo. Esta prueba permitió fijar como valor máximo permisible en el tanque un nivel de 37 cm.

Luego, se procedió a medir el tiempo que le toma a la bomba introducir agua en el tanque, para lo cual se empleó el sistema de control manual.

Se determinó que el tiempo que requiere la bomba para introducir una altura de 5 cm. en el tanque; es decir, un volumen de 1950 cm^3 , es de 14 segundos. Además se realizó una medición para el tiempo que se demora en llenar el tanque del nivel mínimo al máximo, que es de 37 cm de altura, equivalentes a $14\,430 \text{ cm}^3$ de agua y fue de 102 segundos.

Se anota que a partir de un nivel de agua desde los 20 cm la presión que esta ejerce sobre los tapones provoca una ligera fuga del líquido hacia el tanque 2, que debe ser controlada manteniendo abierta la válvula manual de dicho tanque.

También se realizó un ensayo para determinar la capacidad de desfogue que tiene la electroválvula, para lo cual se procedió de la siguiente manera:

- Se llenó el tanque 1 hasta su nivel máximo, empleando el modo de control manual.
- En este mismo modo se procede a vaciar el líquido primero hasta 35 cm y luego en intervalos de 5 cm de altura, hasta llegar al nivel mínimo.

Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 3.7. En los valores de las mediciones se puede apreciar que la rapidez con que la electroválvula desfoga el líquido depende directamente de la altura inicial del mismo.

Tabla 3.7 Pruebas en un solo tanque

Variación de nivel cm	Tiempo Seg
37 ~ 35	5
35 ~ 30	7
30 ~ 25	8
25 ~ 20	9
20 ~ 15	11
15 ~ 10	14
10 ~ 5	17
5 ~ 0	22

Al realizar las mediciones, luego de la calibración, se comparan los valores reales de la planta con los valores mostrados en el computador y se puede indicar que el sistema mantiene un error de medición que depende del nivel en que se encuentra, como se indica:

Tabla 3.8 Error de medición en el tanque 1

Nivel en el tanque 1 cm	Error máximo mm
0 ~ 10	2
10 ~ 30	3
30 ~ 37	2

Con estas pruebas se consiguió determinar el funcionamiento real de la planta en cuanto se refiere al control manual, ya que el sistema de control automático simplemente empleará los mismos tiempos tanto para el llenado como para el desfogue del agua.

En el modo de funcionamiento automático se tiene una variable adicional que es la tolerancia de medición, que puede tomar valores de 1%, 2%, 5% y 10 %, la cual permite tener un cierto margen de proximidad al valor deseado. Se comprobó también que se llega más cercanamente al nivel deseado con la tolerancia mínima, aunque esto produce que el tiempo de funcionamiento de los actuadores se alargue debido a que estos se encienden y apagan continuamente a fin de conseguir el valor de nivel deseado. Esta opción en realidad se introdujo para dar un carácter más didáctico al sistema, permitiendo que el usuario manipule este parámetro.

3.3.2 PRUEBAS DEL CONTROL DE NIVEL EN TANQUES ACOPLADOS

Es el modo de funcionamiento principal de este trabajo de tesis. Para esto se requiere la utilización total del conjunto como se indica a continuación:

- Se emplean tanto el tanque 1 como el tanque 2.
- La manguera de llenado debe colocarse en el espacio destinado para ésta en el tanque 1 y la electroválvula en el tanque 2.
- Uno de los 7 tapones de acoplamiento o una combinación de los mismos deben ser retirados.
- La válvula manual del tanque 1 debe estar cerrada en tanto que la del tanque 2 debe permanecer abierta.
- La cantidad de agua en el tanque principal debe ser suficiente como para llenar los dos tanques al mismo tiempo, en caso de tener este requerimiento.

Al cumplir estos lineamientos, se puede apreciar la configuración esquemática del módulo de control de nivel en tanques acoplados tal como lo indica la Figura 3.10.

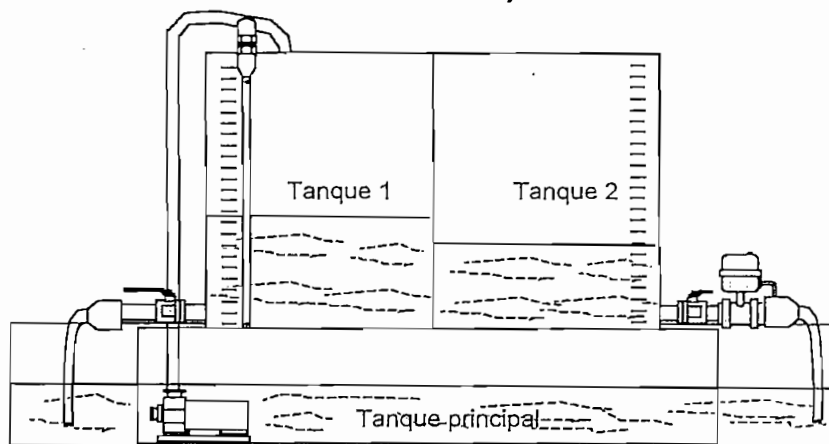


Figura 3.10 Módulo de control de nivel en tanques acoplados

Las acciones que se pueden realizar en el programa de control son:

- Controlar el nivel del agua en alguno de los tanques, accionando directamente la electroválvula o la bomba virtuales.

- Permitir el control del nivel automáticamente, luego de proporcionar un valor de referencia para uno de los tanques.

Igual que en el caso anterior, el usuario tiene la capacidad de controlar los actuadores pulsando el botón del mouse en el control respectivo. Al entrar en funcionamiento alguno de los elementos, se inicia una animación gráfica de los controles que representan a dicho elemento.

Ya que en la planta ambos tanques tienen prácticamente las mismas dimensiones, las pruebas realizadas tanto para los sensores de flotación como para el llenado y desfogue de los tanques individualmente, arrojan los mismos resultados anteriores.

Se procedió a determinar el funcionamiento cuando se tiene un determinado nivel de acoplamiento, siguiendo las siguientes pautas:

- Las pruebas se realizaron para un nivel de acoplamiento mínimo, medio y máximo. Es decir se liberaron para cada ensayo los tapones 1, 4 y 7 respectivamente.
- Los ensayos se inician con un nivel mínimo en ambos tanques.
- La bomba se colocó en el tanque 1 y se midió el tiempo que le toma al tanque 2 llegar al nivel del tanque 1.
- Empleando el sistema de control automático, se procede a llenar el establecer un valor de referencia en el tanque 2 de 10, 20 y 30 cm.
- Se procedió a observar la diferencia de nivel que se tiene durante el proceso de llenado.
- Una vez terminada la prueba con el tapón 1 liberado, se procedió a repetirla para los tapones 4 y 7.

Los resultados obtenidos en estas pruebas se detallan en la Tabla 3.9; es decir, la manera en que la altura del líquido en el tanque 1 es mayor que la del tanque 2, de acuerdo al nivel de acoplamiento.

Tabla 3.9 Diferencia de nivel de los tanques durante el llenado

	0 ~ 10	0 ~ 20	0 ~ 30
Tapón 1	3 mm	8 mm	10 mm
Tapón 4	1 mm	1 mm	1 mm
Tapón 7	1 mm	1 mm	1 mm

En el conjunto de tanques acoplados se puede ingresar un valor de nivel requerido de líquido solo para uno de los tanques, puesto que en el transcurso del tiempo el nivel llegará a ser el mismo en ambos tanques. El usuario puede determinar en cual de los tanques desea se efectúe el control de manera arbitraria y cambiar su decisión en cualquier momento.

Como parte de las pruebas se procede a realizar la comparación entre los niveles mostrados en el computador y los existentes en los tanques, con lo cual se obtiene para el tanque 1 los mismos valores de error de la Tabla 3.8 y para el tanque 2 el error es el mostrado en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Error de medición en el tanque 2

Nivel en el tanque 1 Cm	Error máximo mm
0 ~ 10	2
10 ~ 30	3
30 ~ 37	2

Se debe tomar en cuenta que durante el proceso de control los niveles de los tanques no serán los mismos, puesto que esto depende del acoplamiento entre ellos; es decir, del número de aberturas que se encuentren libres.

De la misma forma que en la configuración de un solo tanque, en el modo de funcionamiento automático se dispone de la variable *Tolerancia* que puede tomar valores de 1%, 2%, 5% y 10 %. También se comprobó que en la mínima tolerancia los actuadores funcionan durante más tiempo mientras se llega al valor de nivel deseado con mayor cercanía.

3.3.3 CONSIDERACIONES SOBRE EL FUNCIONAMIENTO

Los dispositivos descritos en el presente trabajo de tesis, así como los archivos necesarios para la ejecución del programa de control proveen los elementos necesarios para estructurar el módulo didáctico de control de nivel de líquidos.

Durante el funcionamiento en cualquiera de las configuraciones del módulo, se deben observar las siguientes consideraciones sobre el funcionamiento.

- Cuidar que el nivel de agua en el tanque principal sea el suficiente, para satisfacer las necesidades del control configurado. De esta manera se evita que en el algún momento la bomba inmersible trabaje sin tener agua que enviar, lo cual desembocaría en un calentamiento de la misma.
- Mantener el cuidado requerido en las conexiones hacia la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200. Un error en esta conexión puede causar daños irreversibles a la tarjeta, por tanto debe seguirse estrictamente la siguiente distribución de pines.

Tabla 3.11 Conexiones de los terminales

PIN DB-9	Terminal LAB-PC-1200	
1. Nivel del tanque 1	2	ACH1
2. Nivel del tanque 2	3	ACH2
3. Tierra analógica	11	AGND
4. Sensor de máximo nivel 1	4	ACH3
5. Sensor de máximo nivel 2	5	ACH4
6. Control de la bomba	10	DAC0OUT
7. Control de la electroválvula	12	DAC1OUT
8. Tierra analógica	11	AGND
9. Sin conexión	-	-

- Mantener libre de cualquier obstáculo la parte móvil de los conmutadores de flotación. Estos son una parte necesaria para el manejo seguro de la planta, pues mantienen constante monitoreo sobre un posible exceso de líquido dentro de los tanques.
- Verificar que el agua en el tanque principal no contenga impurezas que puedan taponar la entrada o salida de los conductos de la bomba inmersible.
- Colocar los sensores capacitivos en los espacios destinados específicamente para ellos en los tanques, conservando siempre la posición vertical.

- En caso de errores en el funcionamiento del computador en el que se encuentra la tarjeta Lab-PC-1200, los valores de las salidas hacia los actuadores se mantienen en el estado final. Es por tanto necesario reiniciar el sistema, tanto en el módulo de acondicionamiento como en el programa de control.
- Mantener las conexiones libres del contacto con el agua.
- Realizar las conexiones de las tuberías de la manera más segura, sin permitir la existencia de fugas de líquido.

Todas estas consideraciones, además de aquellas que son evidentes y necesarias para la conservación del equipo, como evitar golpes o caídas, aseguran el funcionamiento del módulo para los fines didácticos que fue construido.

CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas como fruto de los experimentos y pruebas realizadas en el desarrollo de este trabajo. Al finalizar se anotan a manera de recomendaciones las aplicaciones que se pueden dar al sistema de control implementado, para su utilización del módulo dentro del aprendizaje en el área de instrumentación.

4.1 CONCLUSIONES

El presente trabajo de tesis ha brindado la oportunidad de investigar, diseñar, construir y probar un sistema de control real.

El desarrollo de este tema y los resultados obtenidos permiten llegar a las siguientes conclusiones:

- Un modelo demostrativo a pequeña escala, como el del presente trabajo, expone de manera clara y sencilla los criterios de control, específicamente cómo mantener constante una variable física, el nivel del líquido, en presencia de una perturbación.
- Las complicadas consolas de control existentes en la industria, y orientadas para el uso de operadores experimentados, se pueden llegar a reemplazar por un computador, donde los datos pueden presentarse en forma numérica para facilidad del operador.
- Programas como el LabVIEW permiten incluso modelar en forma gráfica todo un proceso o planta, facilitando la comprensión de su funcionamiento, lo que permitirá tomar decisiones más rápidas en casos de emergencia.

- Un sensor de tipo capacitivo resultó tener entre sus principales características de confiabilidad la ausencia de partes mecánicas.
- Se comprobó y por lo mismo se concluye que los sensores de tipo capacitivo, como el construido para el módulo, no se emplean en mediciones continuas como la realizada debido a que no brindan precisiones aceptables.
- Así mismo, se comprobó el hecho que en la industria se emplean los sensores capacitivos solo como sensores discretos de encendido y apagado.
- Cuando se emplea un sensor capacitivo las variaciones de capacitancia están en el orden de los picofaradios, de aquí que los circuitos de acondicionamiento se tornen relativamente más complejos.
- La operación del sistema depende del líquido a emplearse, el agua potable puede variar su composición química, cambiando así el punto de operación de trabajo. Debido a esto se requiere la calibración cada vez que se cambie el líquido en el tanque.
- Se determinó que la sensibilidad del sensor construido es de 17,44 pF/cm, y por esto las variaciones del nivel del líquido debido a perturbaciones generan un cambio inmediato en las lecturas del computador. La correcta medición se realiza cuando el líquido se encuentra en reposo.
- Las perturbaciones producidas por el agua cuando es impulsada por la bomba generan ciertos errores momentáneos si este flujo se produce demasiado cerca de las paredes del sensor.
- El desfogue del líquido produce una perturbación menor que el ingreso del mismo, ya que este se realiza en la parte inferior de los tanques, lo cual redundo en que las lecturas durante este proceso no sean erróneas.
- Ya que el proceso de desfogue es más lento que el de llenado, se produce una diferencia de nivel entre los tanques mucho menor, y muy poco perceptible, durante este desfogue.

- El sistema construido puede asegurar un error en la medición de +/- 3 mm como promedio en toda la escala de medición, cuando se halla calibrado correctamente.
- El control por computador no es la única técnica de la cual se dispone. El control ahora catalogado como tradicional o antiguo aún funciona en muchas instalaciones, aunque es innegable que poco a poco será desplazado por los avances de la tecnología y el posible abaratamiento de los costos en la implementación de sistemas computarizados
- Un instrumento existente en la industria o en el laboratorio tiene ya sus características definidas, como son sus señales de entrada y de salida y la interfaz de usuario fija dada por perillas, botones pulsadores y demás. Es decir, el fabricante define la funcionalidad del instrumento; por tanto, el usuario no puede cambiarla y debe acoplar su aplicación al instrumento del cual dispone. Aquí se marca la diferencia con los instrumentos virtuales, donde un usuario determina las características de su equipo, en base a sus necesidades, obviamente dentro de ciertos límites.
- Es necesario mantener clara la diferencia entre un sistema de automatización o de control y supervisión y un sistema de instrumentación virtual, ya que los instrumentos virtuales pueden ser una parte integrante de los primeros, que evidentemente serán de mayor alcance y complejidad.
- Con el avance en la tecnología de comunicaciones, la información de un proceso industrial no solo se mantendrá en una computadora local, sino que se la podrá llevar a través de una red a otras computadoras e incluso a cualquier parte del mundo, por medio de modems.
- El software desarrollado en LabVIEW ha demostrado tener las capacidades necesarias para mantener un sistema de control sencillo, evidenciando que su utilización no se limita a la instrumentación virtual. Este programa de desarrollo se emplea en el control implementado debido al requerimiento específico, puesto que a nivel de costos un programa de esta capacidad es sub-utilizado en una aplicación como la desarrollada.
- El apoyo que brinda la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200 es determinante en el desarrollo de una aplicación como la del presente trabajo; pues gracias a esta

- Mantener en el tanque principal el nivel de agua necesario para que la bomba no trabaje sin líquido en ningún momento.
- Realizar las conexiones hacia la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200 con mucho cuidado, ya que se pueden causar daños definitivos a la tarjeta. Debe seguirse estrictamente la distribución de pines indicada en la Tabla 3.11
- Mantener libre de cualquier obstáculo la parte móvil de los sensores de flotación. Estos son una parte necesaria para el manejo seguro de la planta, pues mantienen constante monitoreo sobre un posible exceso de líquido dentro de los tanques.
- Verificar que el agua en el tanque principal no contenga impurezas que puedan taponar la entrada o salida de los conductos de la bomba inmersible.
- Colocar los sensores capacitivos en los espacios destinados específicamente para ellos en los tanques, conservando siempre la posición vertical.
- En caso de errores en el funcionamiento del computador en el que se encuentra la tarjeta Lab-PC-1200, los valores de las salidas hacia los actuadores se mantienen en el estado final. Es por tanto necesario reiniciar el sistema, tanto en el módulo de acondicionamiento como en el programa de control (Referirse al manual del usuario para el reinicio del sistema).
- Mantener las conexiones eléctricas libres de contacto con el agua.
- Realizar las conexiones de las tuberías de la manera más segura, sin permitir la existencia de fugas de líquido.

Con estos condicionantes se puede utilizar el sistema construido, recordando siempre que en los complejos industriales se encontrarán sistemas que emplean transducción capacitiva solo como elementos de encendido/apagado.

APLICACIONES DIDACTICAS DEL MODULO.

El principal objetivo del presente trabajo de tesis es proveer una herramienta útil para posteriores demostraciones en el proceso de aprendizaje dentro del p nsu m de estudios de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Considerando esto, a continuación se presentan las descripciones de los procedimientos que se pueden seguir, como una alternativa para estas demostraciones. Se incluyen también los tópicos que se introducen en el desarrollo de las mismas.

4.2.1 CONTROL DE NIVEL EN UN TANQUE.

OBJETIVO

Entrenar al estudiante en un sistema de control típico, mediante el empleo del sistema de adquisición de datos LabVIEW.

PROCEDIMIENTO

1. Verifique la existencia de todos los conectores y tuberías necesarios para lograr el funcionamiento del módulo didáctico en su configuración de un solo tanque.
2. Provea de la cantidad suficiente de agua en el tanque principal para el normal desenvolvimiento del módulo.
3. Realice las conexiones necesarias de los sensores hacia el módulo de acondicionamiento, así como de este hacia la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200.
4. Ejecute en el computador el programa de control de nivel de líquidos, y seleccione el control en uno de los tanques.
5. De ser necesarias realice las calibraciones respectivas de acuerdo al trabajo de tesis.
6. Proceda a tomar mediciones y obtener conclusiones en base al funcionamiento del módulo didáctico.

TEMAS INVOLUCRADOS

Instrumentación

Adquisición de datos

Control on/off

Programación en LabVIEW

4.2.2 CONTROL DE NIVEL EN TANQUES ACOPLADOS.

OBJETIVO

Mostrar al estudiante el funcionamiento de un sistema de control industrial, mediante el empleo del sistema de adquisición de datos LabVIEW.

PROCEDIMIENTO

1. Verifique la existencia de todos los conectores y tuberías necesarios para lograr el funcionamiento del módulo didáctico en su configuración de tanques acoplados.
2. Provea de la cantidad suficiente de agua en el tanque principal para el normal desenvolvimiento del módulo.
3. Realice las conexiones necesarias de los sensores hacia el módulo de acondicionamiento, así como de este hacia la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200.
4. Seleccione el nivel de acoplamiento que desee, retirando los tapones de caucho que crea convenientes. Recuerde que dependiendo de esto se obtendrá la velocidad de transferencia del agua de un tanque a otro.
5. Ejecute en el computador el programa de control de nivel de líquidos, y seleccione el control en tanques acoplados.
6. De ser necesarias realice las calibraciones respectivas de acuerdo al trabajo de tesis.
7. Proceda a tomar mediciones y obtener conclusiones en base al funcionamiento del módulo didáctico para distintos niveles de acoplamiento.

TEMAS INVOLUCRADOS

Instrumentación

Adquisición de datos

Control on/off

Programación en LabVIEW

Modelación de sistemas

4.2.3 ADQUISICIÓN DE DATOS POR COMPUTADORA

OBJETIVO

Habilitar al estudiante en el manejo de los sistemas de adquisición de datos, en base a una aplicación generada en LabVIEW.

PROCEDIMIENTO

1. Verifique la existencia de todos los conectores y tuberías necesarios para lograr el funcionamiento del módulo didáctico en cualquiera de sus configuraciones.
2. Provea de la cantidad suficiente de agua en el tanque principal para el normal desenvolvimiento del módulo.

3. Realice las conexiones necesarias de los sensores hacia el módulo de acondicionamiento, así como de este hacia la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC-1200.
4. Ejecute en el computador el programa de control de nivel de líquidos, y seleccione el control en la configuración seleccionada.
5. De ser necesarias realice las calibraciones respectivas de acuerdo al trabajo de tesis.
6. Realice las mediciones de los voltajes en los terminales 1 y 2 del conector DB-9, empleando un osciloscopio. De acuerdo a la ecuación empleada en la conversión de voltaje a nivel y sus mediciones de voltaje calcule el nivel en el tanque.
7. Compare los valores calculados con los valores de nivel proporcionados por el programa y obtenga sus conclusiones.
8. Observe con el osciloscopio la forma de onda de los terminales 14 y 15 del conector DB-9, a la vez que manipula los controles virtuales de los actuadores y justifique esta forma.
9. Ejecute aisladamente el archivo de conversión voltaje a nivel y realice las mediciones de diferentes voltajes aplicados sobre los terminales 1 y 2 de tarjeta. Recuerde que estos terminales son entradas y solo admiten voltajes entre 0 y 10 V.
10. Genere un programa sencillo de adquisición de datos en LabVIEW, en base al archivo indicado y verifique su funcionamiento.

TEMAS INVOLUCRADOS

Instrumentación

Adquisición de datos

Programación en LabVIEW

Las anteriores son solo una muestra de la utilización que se le puede dar al módulo didáctico, dependiendo del enfoque que se desee dar al aprendizaje se pueden encontrar otras aplicaciones prácticas.

BIBLIOGRAFÍA

SENSORES Y ANALIZADORES. Harry H. Norton Colección Electrónica informática. Editorial Gustavo Gili S.A. 1984 Barcelona España

FISICA GENERAL. Francis Sear, Mark Zemansky. Editorial Aguilar SA 1971 Barcelona España.

CATALOGO DE INSTRUMENTACION. National Instruments 1997 Barcelona, España

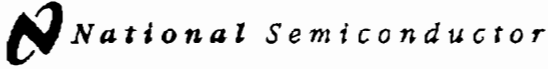
SIMULACION PARA MEDICION DEL NIVEL DE LIQUIDOS. Tesis de grado. Guillermo Salgado. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. 1987

ELECTRONICA DE CIRCUITOS. Robert Boylestad. Editora Prentice-Hall 1992. Río de Janeiro, Brasil

INSTRUMENTACION INDUSTRIAL. Luis Corrales. Escuela Politécnica Nacional. 1998. Quito, Ecuador.

www.ing.puc.cl/~ciauc/proyectonormas/Encuesta/paramaguapotable.htm. Parámetros de calidad del agua potable

www.natinst.com/labview/index.htm. Información sobre LabVIEW.



February 1995

LM566C Voltage Controlled Oscillator

LM566C Voltage Controlled Oscillator

General Description

The LM566CN is a general purpose voltage controlled oscillator which may be used to generate square and triangular waves, the frequency of which is a very linear function of a control voltage. The frequency is also a function of an external resistor and capacitor.

The LM566CN is specified for operation over the 0°C to +70°C temperature range.

Features

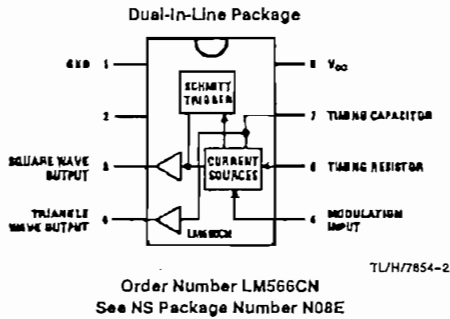
- Wide supply voltage range: 10V to 24V
- Very linear modulation characteristics

- High temperature stability
- Excellent supply voltage rejection
- 10 to 1 frequency range with fixed capacitor
- Frequency programmable by means of current, voltage, resistor or capacitor

Applications

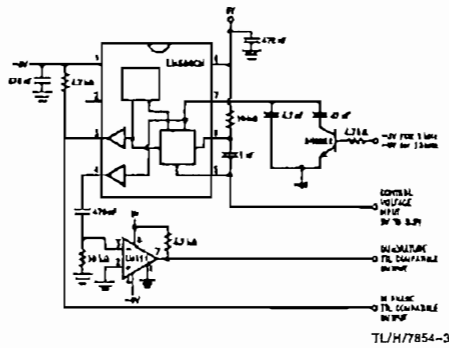
- FM modulation
- Signal generation
- Function generation
- Frequency shift keying
- Tone generation

Connection Diagram



Typical Application

1 kHz and 10 kHz TTL Compatible Voltage Controlled Oscillator



Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Power Supply Voltage 26V
 Power Dissipation (Note 1) 1000 mW
 Operating Temperature Range, LM566CN 0°C to +70°C
 Lead Temperature (Soldering, 10 sec.) +260°C

Electrical Characteristics $V_{CC} = 12V, T_A = 25^\circ C$, AC Test Circuit

Parameter	Conditions	LM566C			Units
		Min	Typ	Max	
Maximum Operating Frequency	$R_O = 2k$ $C_O = 2.7 pF$	0.5	1		MHz
VCO Free-Running Frequency	$C_O = 1.5 nF$ $R_O = 20k$ $f_O = 10 kHz$	-30	0	+30	%
Input Voltage Range Pin 5		$\frac{3}{4} V_{CC}$		V_{CC}	
Average Temperature Coefficient of Operating Frequency			200		ppm/°C
Supply Voltage Rejection	10-20V		0.1	2	%/V
Input Impedance Pin 5		0.5	1		MΩ
VCO Sensitivity	For Pin 5, From 8-10V, $f_O = 10 kHz$	6.0	6.6	7.2	kHz/V
FM Distortion	$\pm 10\%$ Deviation		0.2	1.5	%
Maximum Sweep Rate			1		MHz
Sweep Range			10:1		
Output Impedance Pin 3			50		Ω
Pin 4			50		Ω
Square Wave Output Level	$R_{L1} = 10k$	5.0	5.4		Vp-p
Triangle Wave Output Level	$R_{L2} = 10k$	2.0	2.4		Vp-p
Square Wave Duty Cycle		40	50	60	%
Square Wave Rise Time			20		ns
Square Wave Fall Time			50		ns
Triangle Wave Linearity	+1V Segment at $\frac{1}{2} V_{CC}$		0.5		%

Note 1: The maximum junction temperature of the LM566CN is 150°C. For operation at elevated junction temperatures, maximum power dissipation must be derated based on a thermal resistance of 115°C/W, junction to ambient.

Applications Information

The LM566CN may be operated from either a single supply as shown in this test circuit, or from a split (\pm) power supply. When operating from a split supply, the square wave output (pin 3) is TTL compatible (2 mA current sink) with the addition of a 4.7 kΩ resistor from pin 3 to ground.

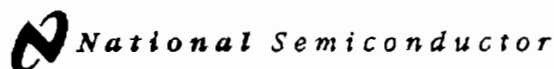
A 0.001 μF capacitor is connected between pins 5 and 6 to prevent parasitic oscillations that may occur during VCO switching.

$$f_O = \frac{2.4(V^+ - V_5)}{R_O C_O V^+}$$

where

$2K < R_O < 20K$

and V_5 is voltage between pin 5 and pin 1.



November 1994

LM741 Operational Amplifier

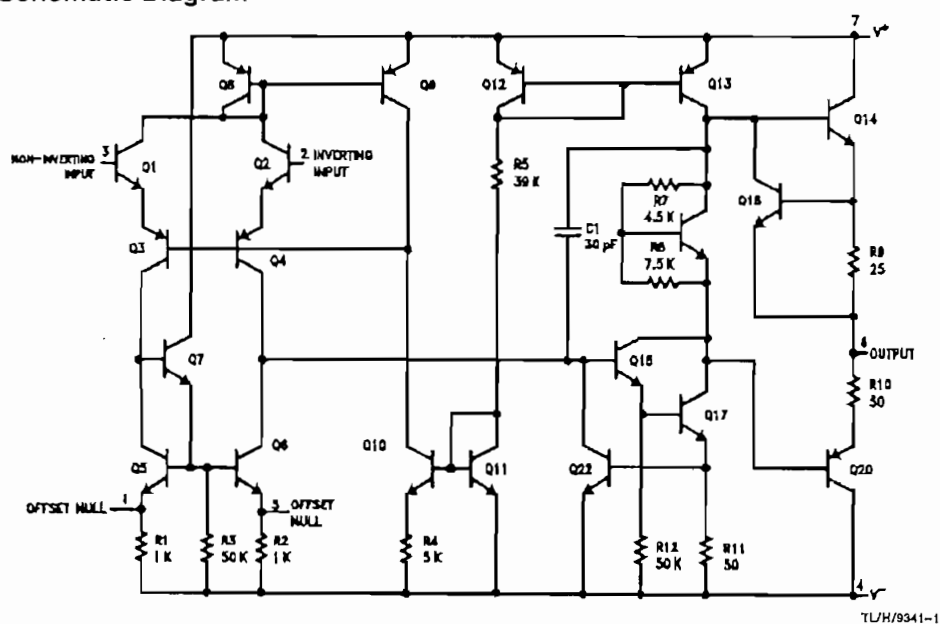
General Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications. The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and

output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

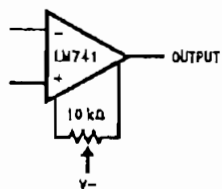
The LM741C/LM741E are identical to the LM741/LM741A except that the LM741C/LM741E have their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

Schematic Diagram



TU/H/9341-1

Offset Nulling Circuit



TU/H/9341-7

LM741 Operational Amplifier

Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

(Note 5)

	LM741A	LM741E	LM741	LM741C
Supply Voltage	±22V	±22V	±22V	±18V
Power Dissipation (Note 1)	500 mW	500 mW	500 mW	500 mW
Differential Input Voltage	±30V	±30V	±30V	±30V
Input Voltage (Note 2)	±15V	±15V	±15V	±15V
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous
Operating Temperature Range	-55°C to +125°C	0°C to +70°C	-55°C to +125°C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Junction Temperature	150°C	100°C	150°C	100°C
Soldering Information				
N-Package (10 seconds)	260°C	260°C	260°C	260°C
J- or H-Package (10 seconds)	300°C	300°C	300°C	300°C
M-Package				
Vapor Phase (60 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C
Infrared (15 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

ESD Tolerance (Note 6)	400V	400V	400V	400V
------------------------	------	------	------	------

Electrical Characteristics (Note 3)

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0		1.0	5.0		2.0	6.0	mV mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0			7.5	mV mV
Average Input Offset Voltage Drift				15							$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Voltage Adjustment Range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{V}$	±10				±15			±15		mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.0	30	20	200		20	200		nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			70	85	500			300		nA
Average Input Offset Current Drift				0.5							$\text{nA}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80	80	500		80	500		nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			0.210		1.5			0.8		μA
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0		M Ω
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}, V_S = \pm 20\text{V}$	0.5									M Ω
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$							±12	±13		V
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				±12	±13					V
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}, R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}, V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}, V_O = \pm 10\text{V}$	50			50	200		20	200		V/mV V/mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}, R_L \geq 2\text{ k}\Omega,$ $V_S = \pm 20\text{V}, V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}, V_O = \pm 10\text{V}$	32									V/mV V/mV
	$V_S = \pm 5\text{V}, V_O = \pm 2\text{V}$	10			25			15			V/mV

FEATURES

- Single Supply Operation (+8V to +22V)
- Pulse Output Compatible with All Logic Forms
- Programmable Scale Factor (K)
- Linearity $\pm 0.05\%$ Typical-precision Mode
- Temperature Stability $\pm 100\%$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ Typical
- High Noise Rejection
- Inherent Monotonicity
- Easily Transmittable Output
- Simple Full Scale Trim
- Single-Ended Input, Referenced to Ground
- Also Provides Frequency-to-Voltage Conversion
- Direct Replacement for RC/RV/RM-4151

APPLICATIONS

- Voltage-to-Frequency Conversion
- A/D and D/A Conversion
- Data Transmission
- Frequency-to-Voltage Conversion
- Transducer Interface
- System Isolation

GENERAL DESCRIPTION

The XR4151 is a device designed to provide a simple, low-cost method for converting a DC voltage into a proportional pulse repetition frequency. It is also capable of converting an input frequency into a proportional output

voltage. The XR4151 is useful in a wide range of applications including A/D and D/A conversion and data transmission.

ORDERING INFORMATION

Part No.	Package	Operating Temperature Range
XR4151P	8 Lead 300 Mil PDIP	-40 $^{\circ}\text{C}$ to +85 $^{\circ}\text{C}$
XR4151CP	8 Lead 300 Mil PDIP	0 $^{\circ}\text{C}$ to +70 $^{\circ}\text{C}$
XR4151MD	8 Lead 4.4mm EIAJ SOP	0 $^{\circ}\text{C}$ to +70 $^{\circ}\text{C}$

BLOCK DIAGRAM

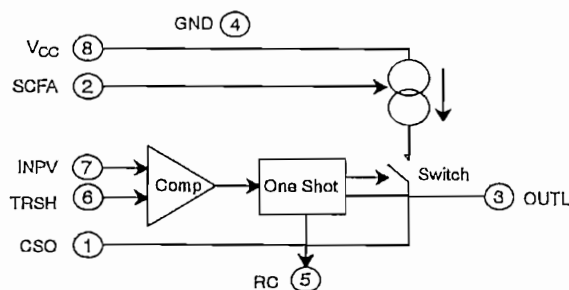


Figure 1. Block Diagram

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Test Conditions: $V_{CC} = 15V$, $T_A = +25^{\circ}C$, Unless Otherwise Specified

Parameter	Min.	Max.	Typ.	Unit	Conditions
Supply Current					
XR4151MD, CP	2.0	6.0	3.5	mA	$8V < V_{CC} < 15V$
	2.0	7.5	4.5	mA	$15V < V_{CC} < 22V$
XR4151P	2.0	7.4	4.5	mA	$15V < V_{CC} < 22V$
Conversion Accuracy Scale Factor					
XR-4151MD, CP	0.90	1.10	1.00	kHz/V	Circuit of Figure 2, $V_I=10V$
XR-4151P	0.92	1.08	1.00	kHz/V	$RS=14.0K$
Drift With Temperature			± 100	ppm/ $^{\circ}C$	Circuit of Figure 2, $V_I=10V$
Drift With V_{CC}					
XR4151MD, CP			0.2	%/V	Circuit of Figure 2, $V_I=1.0V$
XR4151P	-0.9	0.9	0.2	%/V	$8V < V_{CC} < 18V$
Input Comparator					
Offset Voltage		10	5	mV	
Offset Current		± 100	± 50	nA	
Input Bias Current		-300	-100	nA	
Common Mode Range ¹	0	$V_{CC} - 3$	0 to $V_{CC} - 2$	V	
One-Shot					
Threshold Voltage, Pin 5	0.63	0.70	0.667	xV_{CC}	
Input Bias Current, Pin 5		-500	-100	nA	
Reset V_{SAT}		0.5	0.15	V	Pin 5 = 2.2mA
Current Source					
Output Current			138.7	μA	Pin 1, $V=0$, $RS=14.0k\Omega$
Change With Voltage		2.5	1.0	μA	Pin 1, $V=0V$ to $V=10V$
Off Leakage		50	0.15	nA	Pin 1, $V=0V$
Reference Voltage	1.80	2.28	2.05	V	Pin 2
Logic Output					
V_{SAT}		0.50	0.15	V	Pin 3, $I=3.0mA$
V_{SAT}		0.30	0.10	V	Pin 3, $I=2.0mA$
Off Leakage		1.0	0.1	μA	

Notes

¹ Input Common Mode Range includes ground.

Bold face parameters are covered by production test and guaranteed over operating temperature range.

Specifications are subject to change without notice

Frequency-to-Voltage Conversion

The XR4151 can be used as a frequency-to-voltage converter. Figure 4 shows the single-supply FVC configuration. With no signal applied, the resistor bias networks tied to pins 6 and 7 hold the input comparator in the off state. A negative going pulse applied to pin 6 (or positive pulse to pin 7) will cause the comparator to fire the one-shot. For proper operation, the pulse width must be less than the period of the one-shot, $T = 1.1 R_0 C_0$. For a 5Vpp square-wave input the differentiator network formed by the input coupling capacitor and the resistor bias network will provide pulses which correctly trigger the one-shot. An external voltage comparator can be used to "square-up" sinusoidal input signals before they are applied to the XR4151. Also, the component values for the input signal differentiator and bias network can be altered to accommodate square waves with different

amplitudes and frequencies. The passive integrator network $R_B C_B$ filters the current pulses from the pin 1 output. For less output ripple, increase the value of C_B .

For increased accuracy and linearity, use an operational amplifier integrator as shown in Figure 5, the precision FVC configuration. Trim the offset to give -10mV out with 10Hz in and trim the full scale adjust for -10V out with 10kHz in. Input signal conditioning for this circuit is necessary just as for the single supply mode and the scale factor can be programmed by the choice of component values. A tradeoff exists between the amount of output ripple and the response time, through the choice or integration capacitor C_1 . If $C_1 = 0.1\mu F$ the ripple will be about 100mV. Response time constant $\tau_R = R_B C_1$. For $R_B = 100k\Omega$ and $C_1 = 0.1\mu F$, $\tau_R = 10msec$.

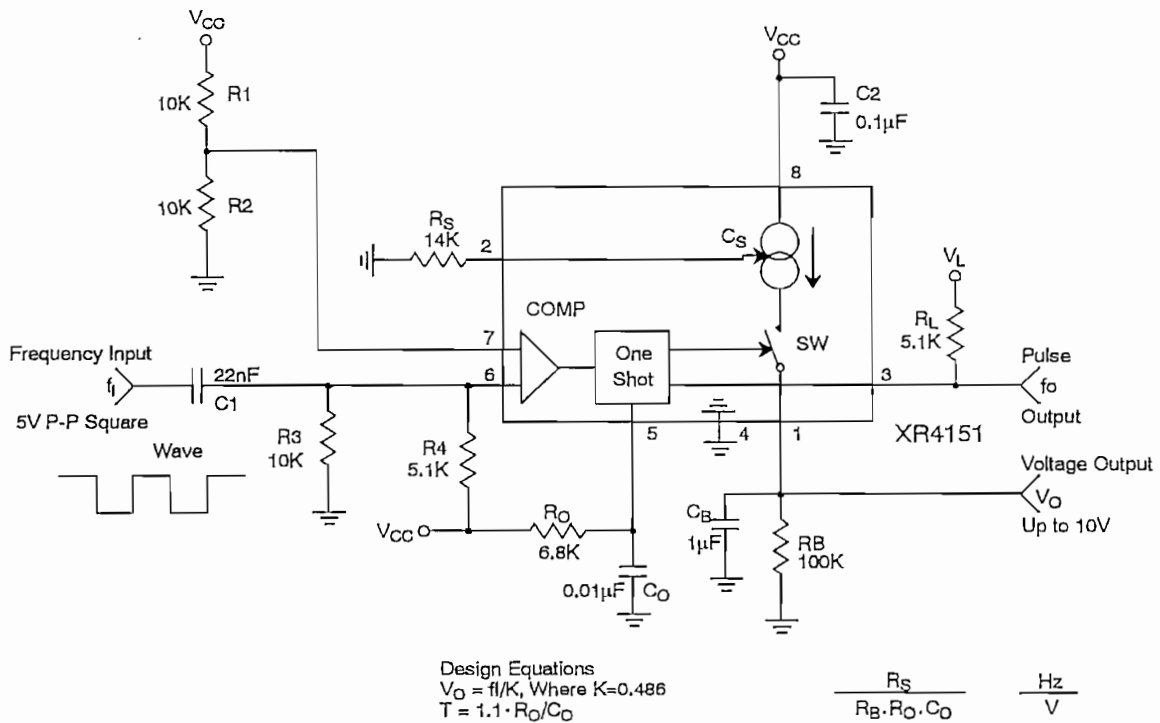


Figure 4. Frequency to Voltage Converter