



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ciencias

Instituto de Investigación en Comunicación Óptica

***Automatización de Experimentos Relacionados con la Epitaxia en
Fase Líquida***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA:

M.C.A. Francisco Sánchez Niño

Asesor:

Dr. Francisco J. De Anda Salazar

San Luis Potosí, S. L. P.

Junio 2016



Facultad de Ciencias

Instituto de Investigación en Comunicación Óptica

***Automatización de Experimentos Relacionados con la Epitaxia en
Fase Líquida***

Alumno

Asesor

Francisco Sánchez Niño

Dr. Francisco J. de Anda Salazar

San Luis Potosí, S.L.P.

Junio 2016



Sinodales:

Dr. Andrei Yu.Gorbatchev

Dr. Viatcheslav Mishornyi

Dr. Oscar F. Núñez Olvera

Dra. Marcela Mejía Carlos

Dr. Víctor Compeán Jasso

Dr. Javier Martínez Juárez

San Luis Potosí, S.L.P.

Junio 2016

Dedicatoria

*A mis padres que sin ellos no hubiera sido posible.
Gracias por ser la fuente de motivación de salir adelante.
Gracias por su apoyo siempre incondicional, su comprensión y
cariño a lo largo de mi formación académica.*

Agradecimientos

Al Dr. Francisco J. de Anda Salazar por darme la oportunidad y el apoyo para realizar el presente proyecto de tesis.

Por todo tu respaldo, comprensión, cariño, cuidados, consejos y apoyo. Por todo lo que hemos pasado y vivido durante este tiempo Eve.

A mis hermanos Graciela, Javier, Rocío, Alejandro, Miguel y Oscar por su comprensión y apoyo durante este tiempo.

A todos mis profesores, compañeros y amigos que estuvieron conmigo en el trayecto de mi formación académica y personal.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo al otorgar una beca para estudios de posgrado durante el período de septiembre de 2009 a agosto de 2013.

Contenido

1	1
Introducción y Objetivos	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estructura de la Tesis.....	2
2	4
Epitaxia en Fase Líquida	4
2.1 ¿Qué es Epitaxia en Fase Líquida?.....	5
2.2 Aplicaciones de la Epitaxia en Fase Líquida.....	7
2.3 Sistema Experimental de LPE	7
3	10
Control de Flujo de Gases del Sistema de LPE.....	10
3.1 Vacío Bomba Jet.....	11
3.2 Vacío Bomba de Adsorción.....	11
3.3 Flujo de Hidrógeno.....	12
3.4 Programa de Control.....	13
4	16
Programa de Control de Régimen de Crecimiento.....	16
4.1 Régimen de Crecimiento	17
4.2 Programa de Control.....	18
5	21
Deposición Automatizada de las Fases Líquidas por LPE.....	21
5.1 Deposición de la Fase Líquida Sobre Substratos.....	22
5.2 Mecanismo de Control	23
5.3 Hardware	25
5.4 Software.....	29
6	33
Sistema de Monitoreo de la Concentración de Hidrógeno en el Laboratorio de LPE.....	33
6.1 Monitoreo de la concentración de Hidrógeno	34
6.2 Red Inalámbrica de Sensores.....	35

6.3	Diseño del Sistema	37
6.3.1	Transmisor Inalámbrico de Datos	37
6.3.2	Sensor de Hidrógeno	39
6.3.3	Receptor Inalámbrico de Hidrógeno	40
6.4	Tarjeta Portátil Detectora de Hidrógeno.....	43
6.4.1	Diseño de la Tarjeta Portátil.....	43
6.4.2	Software	45
7	48
	Pesaje de Materiales que Constituyen la Fase Líquida de Crecimiento	48
7.1	Imágenes Digitales	50
7.2	NI Vision	53
7.3	Balanza Analítica.....	55
7.4	Cámara.....	57
7.5	Sistema de Iluminación	59
7.6	Técnicas de Conteo y Combinaciones.....	61
7.7	Algoritmo de Pesaje	63
7.8	Algoritmo de Detección de Piezas.....	68
7.9	Sistema de Visión Implementado	73
8	78
	Resultados.....	78
8.1	Control de Flujo de Gases	79
8.2	Control de Régimen de Crecimiento	81
8.3	Deposición de la Fase Líquida Sobre Substratos.....	82
8.4	Monitoreo de la Concentración de Hidrógeno	85
8.5	Pesaje de Materiales de la Fase Líquida	86
9	122
	Conclusiones.....	122
10	123
	Extensión del Proyecto	123
	Referencias	126
	Publicaciones y Congresos	129

1

Introducción y Objetivos

1.1 Introducción

El desarrollo de dispositivos semiconductores como el diodo, transistor, láser, fotodiodos, fototransistores, entre otros, contribuyeron al avance de la electrónica aplicada en áreas como las comunicaciones, medicina, procesamiento de imágenes y señales, control y automatización de procesos y telecomunicación, solo por mencionar algunas de las áreas que se vieron beneficiadas con el desarrollo de nuevas tecnologías de materiales semiconductores. Existen diversas técnicas para fabricar dispositivos semiconductores con las cuales se logran obtener unidades con buenas características eléctricas, ópticas, impedancia y térmicas entre otras. El auge de la técnica de crecimiento de cristales por epitaxia en fase líquida se da en los años 60's cuando se comienza a experimentar con sistemas opto-electrónicos como el fotodiodo, fototransistor y el láser.

Algunas de las técnicas que permiten obtener materiales opto-electrónicos son: Epitaxia en fase líquida (Liquid Phase Epitaxy, LPE), Epitaxia por haces moleculares (Molecular Beam Epitaxy, MBE), Epitaxia por fase gaseosa (Metalorganic Chemical Vapour Deposition, MOCVD), [1, 2, 6]. La obtención de los materiales con características muy semejantes a través de estas técnicas requiere precisión en el proceso y monitoreo de las condiciones bajo las cuales se realiza, esto garantizará la reproducibilidad de los experimentos y tener un producto de buena calidad.

Por lo tanto se hace necesario la automatización de todas o algunas de las etapas del proceso. También se deben de supervisar valores de señales físicas como temperatura, humedad y presión. Para el monitoreo y automatización de los procesos antes mencionados se diseñaron sistemas electrónicos capaces de controlar, monitorear y automatizar cada una de las etapas inmiscuidas en el proceso de fabricación de los materiales optoelectrónicos.

1.2 Objetivos

El presente trabajo consiste en el diseño, desarrollo e implementación del software, hardware y mecánica de control de los procesos involucrados en el crecimiento de dispositivos semiconductores, utilizando la técnica de epitaxia en fase líquida (LPE) en el laboratorio de crecimiento de cristales del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, IICO-UASLP.

Se automatizarán varios de los procesos inmiscuidos en la realización de los experimentos, con esto se pretende reducir los errores cometidos por el usuario al momento de realizar crecimientos por LPE así como optimizar cada uno de los procedimientos.

Para verificar la funcionalidad de cada uno de los sistemas implementados se realizarán diversos experimentos con la finalidad de encontrar posibles errores de funcionamiento, mejoras y la correcta puesta en marcha de la instrumentación diseñada.

1.3 Estructura de la Tesis

El presente trabajo consta de 10 capítulos distribuidos de la siguiente forma: el capítulo 1 nos presenta una breve descripción del área en la cual se desarrolla el trabajo así como los objetivos, el capítulo 2 describe la técnica de epitaxia en fase líquida que es utilizada en el laboratorio de cristales del Instituto para la obtención de dispositivos como fotodiodos y fototransistores. En este mismo capítulo se detalla el sistema experimental utilizado y las aplicaciones de LPE. En el capítulo 3 se muestran y analizan los programas de control de flujo de gases del sistema, haciendo mención que los crecimientos se realizan bajo una atmosfera de hidrógeno lo que ayuda evitar oxidaciones en los materiales utilizados. El capítulo 4 presenta el software y hardware de control del régimen de crecimiento, se controla y monitorea la temperatura de homogenización, saturación y contacto de las soluciones líquidas y el sustrato. La automatización de la deposición de las partes excedentes de la solución líquida sobre el sustrato se presenta en el capítulo 5, mientras que en el capítulo 6 se presenta una red inalámbrica de sensores para el monitoreo de los niveles de concentración de hidrógeno dentro del laboratorio de crecimiento por LPE.

El poder acelerar el proceso de pesaje de los materiales utilizados en los experimentos de LPE es una gran ventaja en la realización de éstos, es por eso que en el capítulo 7 se muestra el sistema de visión implementado para realizar el proceso antes mencionado, se describen las características de la cámara y sistema de iluminación implementados, así como la técnica de procesamiento de imágenes que permite la detección de las piezas a utilizar durante el experimento de crecimiento epitaxial. Los resultados obtenidos en cada una de las etapas desarrolladas a lo largo de este trabajo se ilustran en el capítulo 8. En el capítulo 9 se presentan las conclusiones referentes a los sistemas de automatización desarrollados para la obtención de forma semiautomática de dispositivos optoelectrónicos.

Finalmente, se presenta en el capítulo 10 una posible extensión del proyecto en cuanto al pesaje de materiales y la obtención de la temperatura *liquidus* de las soluciones líquidas y el sustrato a utilizar.

2

Epitaxia en Fase Líquida

La epitaxia en fase líquida (Liquid Phase Epitaxy, LPE) es una técnica que permite el crecimiento de capas epitaxiales a partir de una solución sobresaturada que entra en contacto con un sustrato, donde por lo general el solvente es previamente elegido. Algunos de los materiales utilizados comúnmente como solvente en el crecimiento de películas epitaxiales de los grupos III-V son el Ga y el In. A continuación se describe de forma breve la técnica de epitaxia en fase líquida, algunas aplicaciones y el sistema experimental de crecimiento epitaxial por LPE, [1, 2, 6].

2.1 ¿Qué es Epitaxia en Fase Líquida?

La epitaxia en fase líquida es una técnica que surge en la década de los 60's y permitió el desarrollo de dispositivos semiconductores como fotodiodos, fototransistores y láseres con excelentes parámetros ópticos – eléctricos [1, 2, 6].

Además de permitir la obtención de nuevos materiales formados por múltiples capas como lo son los heteroláseres. Hay que indicar que la técnica de LPE resulta ser relativamente sencilla lo que permite montar sistemas experimentales dentro de los laboratorios de investigación sin mayor dificultad.

Realizar un crecimiento por fase líquida implica conocer el diagrama de fase que determina la relación de las partes líquida y sólida a diferentes temperaturas en el estado de equilibrio o cercano al equilibrio. La técnica de epitaxia en fase líquida se basa en que la solubilidad de un constituyente diluido en un solvente líquido, decrece cuando disminuye la temperatura; es por esto que el enfriamiento de una solución líquida saturada conlleva a la aparición de una fase sólida en ella.

La técnica de LPE aprovecha ese fenómeno para que al poner en contacto la solución sobresaturada con el sustrato se genera una deposición del material compuesto desde el líquido hacia el sustrato. La fase sólida se adhiere al sustrato de manera ordenada, conservando las características cristalinas del mismo, [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Para comprender mejor como se realiza la deposición de cristales por LPE describiremos la figura 2.1.

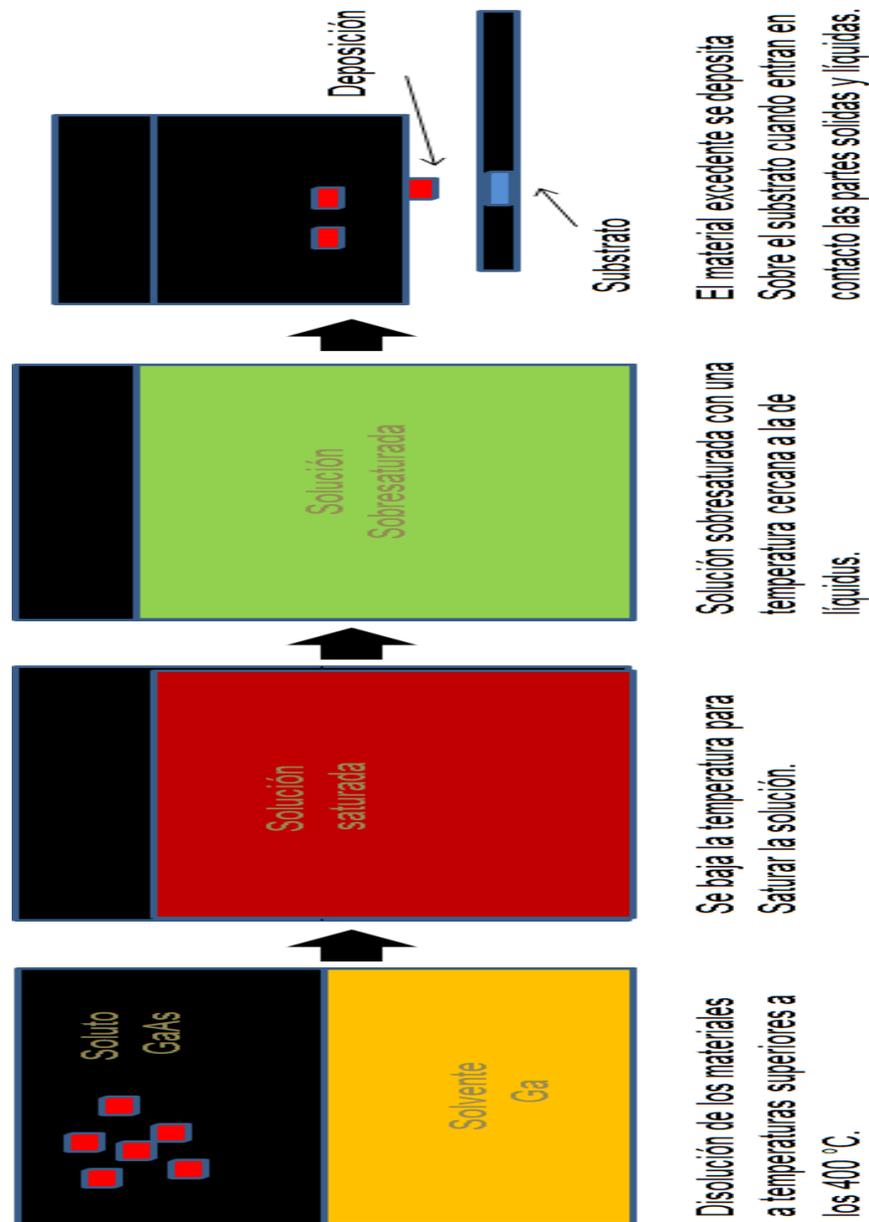


Figura 2.1. El crecimiento de cristales por epitaxia en fase líquida se basa en la sobresaturación de una solución de tal manera que al entrar en contacto con una parte sólida el material excedente de la solución se deposita sobre el sustrato.

Los pasos a realizar en un experimento común de crecimiento epitaxial por fase líquida se enlistan a continuación:

1. Se prepara una solución utilizando, por ejemplo Galio (Ga) como solvente y Arseniuro de Galio (GaAs) como soluto.
2. Se calienta la solución hasta la disolución y homogenización de ambos materiales, generalmente esto se logra a temperaturas superiores a los 600 °C.

3. Posteriormente se descende la temperatura de tal manera que la solución se sature.

4. Un tiempo después se lleva la solución por debajo de la temperatura de saturación denominada liquidus, esta temperatura corresponde al momento en el cual aparece un sólido en la fase líquida, indicador de que la solución se encuentra sobresaturada, [1, 2, 6].

5. Finalmente se pone en contacto la parte sólida, es decir, el sustrato con las partes líquidas sobresaturadas de tal manera que el excedente de la solución se deposita de manera ordenada sobre el sustrato obteniendo un crecimiento epitaxial, [1, 2,6].

6. Para homogenizar las capas crecidas es necesario recocer las muestras crecidas. Dependiendo de las características del dispositivo crecido se elegirá la temperatura, por ejemplo 800 °C. A este proceso se le conoce como recocido.

2.2 Aplicaciones de la Epitaxia en Fase Líquida

Los métodos para crecer capas epitaxiales, tal como epitaxia por fase gaseosa, epitaxia por haces moleculares y epitaxia por fase líquida [1, 2, 6] permiten obtener una gran variedad de estructuras semiconductoras con diversas características de voltaje, corriente y emisión de fotones.

Las técnicas de crecimiento epitaxial se utilizan de forma extensa en la fabricación de dispositivos como circuitos integrados, fotodiodos, fototransistores y transistores de alta frecuencia.

También se utilizan en la obtención de nuevos materiales optoelectrónicos así como mejorar las estructuras semiconductoras ya existentes.

2.3 Sistema Experimental de LPE

Los procesos y elementos esenciales que están inmiscuidos en un sistema experimental de crecimiento epitaxial por fase líquida son:

1.- Tubo de cuarzo o reactor recubierto por un horno cilíndrico y por donde se hace fluir hidrógeno durante el experimento.

2.- Horno cilíndrico conectado al tubo de cuarzo. Dentro del tubo se encuentra un bote de grafito.

3.- Bote de grafito de tipo deslizante donde se depositan el sustrato y las soluciones líquidas que serán utilizadas para realizar el crecimiento.

4.- Para poder elevar la temperatura en el interior del sistema se utiliza una resistencia de Kanthal (la resistencia de Kanthal tiene forma de espira y alrededor de la espira circula una corriente que provoca el calentamiento de la resistencia).

5.- La temperatura del reactor es monitoreado por un termopar tipo K que está colocado justo a un lado del bote de grafito que contiene las partes sólida y líquida del crecimiento.

6.- El control de temperatura se realiza con un controlador programable conectado a una unidad de potencia de tipo SCR que regula la temperatura por medio de inyección de corriente.

7.- Para tener un flujo de hidrógeno constante y controlado se utiliza un controlador de flujo de gases.

8.- Es necesario garantizar un alto grado de pureza en el hidrógeno que circula en el sistema, para lograr esto, se hace uso de un purificador con celda difusora hecha de paladio y plata, [1, 2, 6].

En la figura 2.2 se muestra el bote de grafito, horno y el tubo de cuarzo utilizados en el sistema de crecimiento.

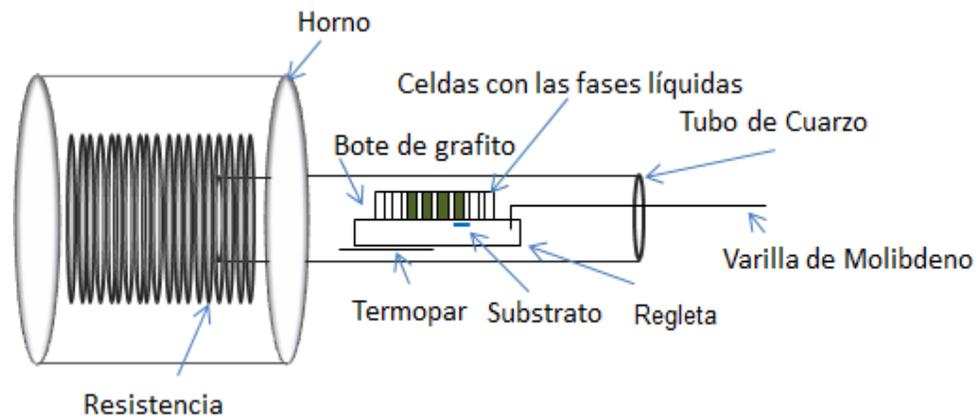


Figura 2.2. Sistema de crecimiento epitaxial por LPE utilizado en el laboratorio de crecimiento de cristales del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, IICO-UASLP.

Es necesario monitorear las concentraciones de vapor de agua presentes en el sistema ya que concentraciones altas pueden afectar el experimento, por lo que se requiere un analizador con una sensibilidad de partes por millón de vapor de agua. Se cuenta con un sistema de vacío para limpiar el reactor cuando se requiera, tal es el caso cuando se introducen los materiales a crecer. Se utilizan dos tipos de bombas para realizar vacío al sistema, la primera de ellas es una bomba tipo Jet que genera un vacío burdo y para realizar un vacío más fino se utilizan bombas de adsorción, se seleccionaron este tipo de bombas porque no contaminan el sistema, [1, 2, 3, 4, 5, 6]. En la figura 2.3 se puede observar un diagrama del sistema de crecimiento.

ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA

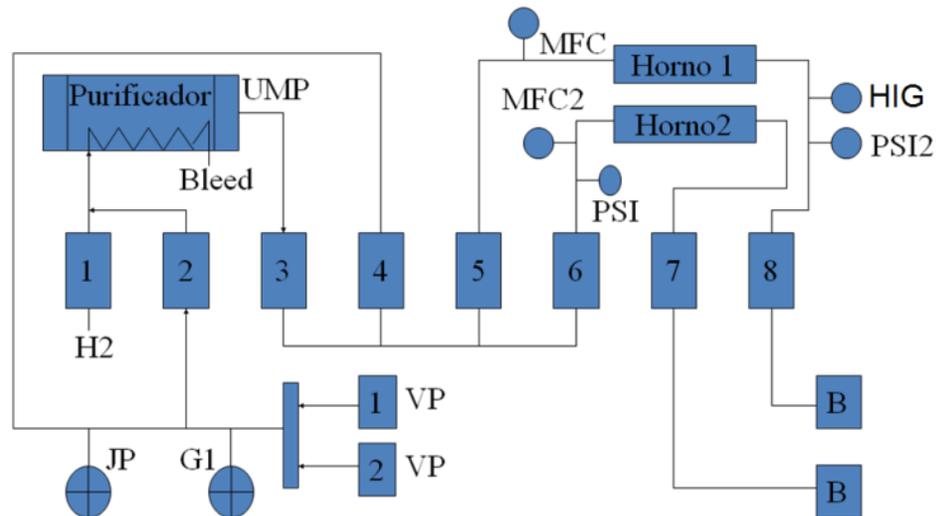


Figura 2.3. Diagrama del sistema de crecimiento de cristales por epitaxia en fase líquida.

El sistema consta de una serie de tuberías interconectadas entre sí por medio de válvulas neumáticas las cuales son accionadas por electroválvulas con el fin de ejecutar los diferentes procesos involucrados en el crecimiento de dispositivos opto-electrónicos realizados en el sistema.

Hay que mencionar que es necesario utilizar válvulas neumáticas debido a que en el sistema fluye hidrógeno el cual es altamente inflamable por lo que no debe de entrar en contacto con superficies calientes, ya que al combinarse con oxígeno a estas temperaturas existe el riesgo de una explosión, [1, 2, 3,4, 5, 6].

3

Control de Flujo de Gases del Sistema de LPE

En este capítulo se describirá de una forma breve, el control de flujo de gases para obtener dispositivos semiconductores por medio de epitaxia en fase líquida. Se discutirá el proceso de vacío a través de las bombas de Adsorción y Jet para purificar el reactor que contiene las fases sólidas y líquidas. Además se ilustrará la forma en que se realiza el flujo de hidrógeno que es elemental para realizar los experimentos por LPE.

3.1 Vacío Bomba Jet

El primer paso para realizar el crecimiento es preparar una solución saturada que será depositada en alguna de las celdas del bote de grafito. En seguida se coloca el sustrato en un pequeño nicho que se localiza sobre la regleta del bote de grafito. Una vez terminado este proceso se introduce el bote de grafito en el tubo de cuarzo y se cierra el reactor del sistema. Debido a que el reactor fue expuesto al ambiente es necesario realizar un vacío al sistema con el propósito de extraer todo el aire que se introdujo mientras estuvo abierto, para esto se realiza un primer vacío con una bomba de vacío de tipo Jet que funciona bajo el efecto de Venturi. Al realizar este proceso obtenemos vacíos por debajo de un PSI. En la figura 3.1 se muestra la forma en cómo se realiza este vacío, [3, 4, 5, 6, 29].

Vacío Bomba Jet

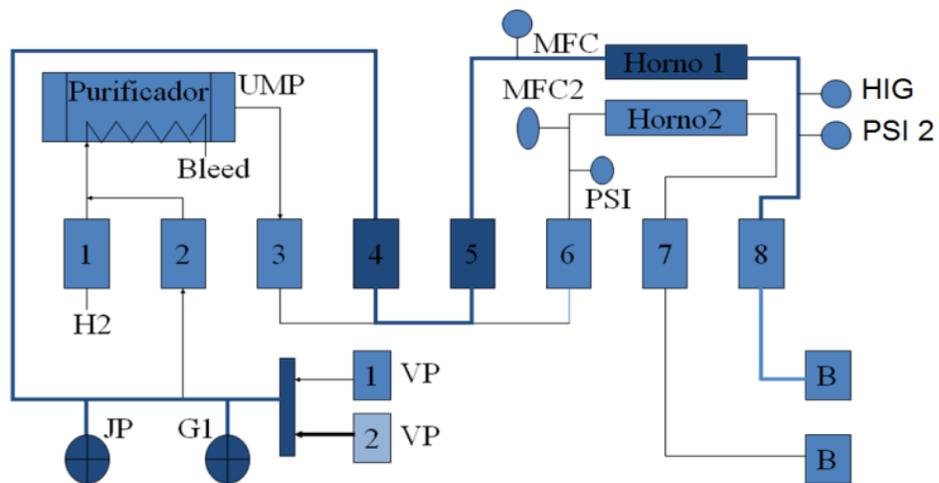


Figura 3.1. Accionamiento de las válvulas para hacer vacío con la bomba tipo Jet al sistema de LPE. Las válvulas que aparecen en color claro se encuentran cerradas mientras que las de color oscuro están abiertas.

Se abre la válvula de paso de la bomba Jet (JP) y se accionan las válvulas cuatro y cinco lo que permite hacer vacío al sistema tal como se observa en la figura anterior, la tubería y válvulas en color oscuro muestran el sentido del proceso, [3, 4, 5, 6, 29].

3.2 Vacío Bomba de Adsorción

Una vez terminado el vacío con la bomba tipo Jet se procede a realizar un vacío mayor haciendo uso de bombas de vacío denominadas de adsorción (VP1 y VP2). Con este vacío se obtienen lecturas en el orden de los 100 militorr. En la figura 3.2 se ilustra dicho proceso, [3, 4, 5, 6, 29].

Bombas de Adsorción

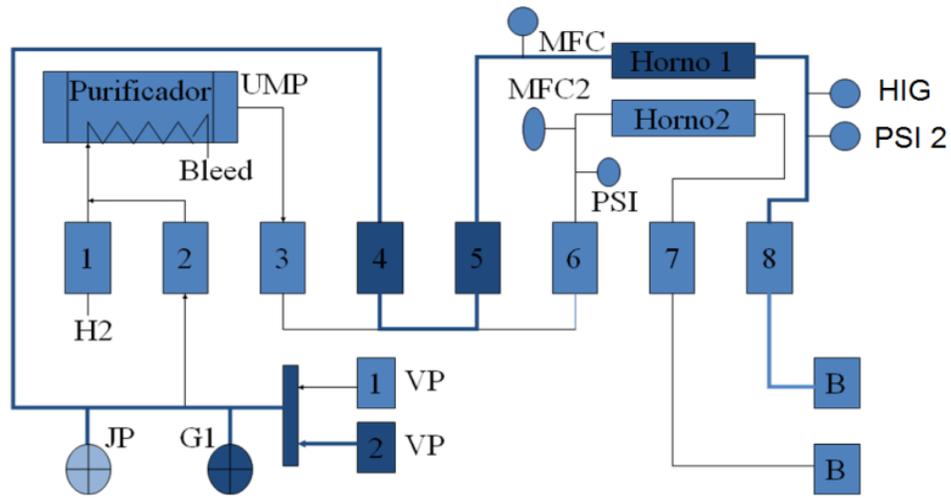


Figura 3.2. Para realizar vacío con las bombas de adsorción se accionan las válvulas 4 y 5 así como VP1 o VP2 según la bomba de adsorción que se utilice.

Las bombas de adsorción utilizan una zeolita para que los gases se adhieran a la superficie de sus poros. Una de las características de este tipo de bomba es que entre más fría se encuentre mayor será la capacidad de adsorción que tendrán, es por eso que se requiere del uso de nitrógeno líquido para enfriarlas antes de ser utilizadas. Una vez que las bombas de adsorción se saturan, en ese momento termina la generación de vacío con estas. Se utiliza primero la bomba Jet para no saturar rápidamente la zeolita de las bombas de adsorción de modo que estas alcancen un mejor vacío [3, 4, 5, 6, 29].

3.3 Flujo de Hidrógeno

El crecimiento de material semiconductor se debe realizar bajo una atmósfera de hidrógeno evitando que las soluciones utilizadas se oxiden, obteniendo de esta forma dispositivos de mejores características ópticas-eléctricas, [3, 4, 5, 6, 7, 29]. Para purificar el sistema se realiza el procedimiento mostrado en la figura 3.3.

Flujo de Hidrogeno

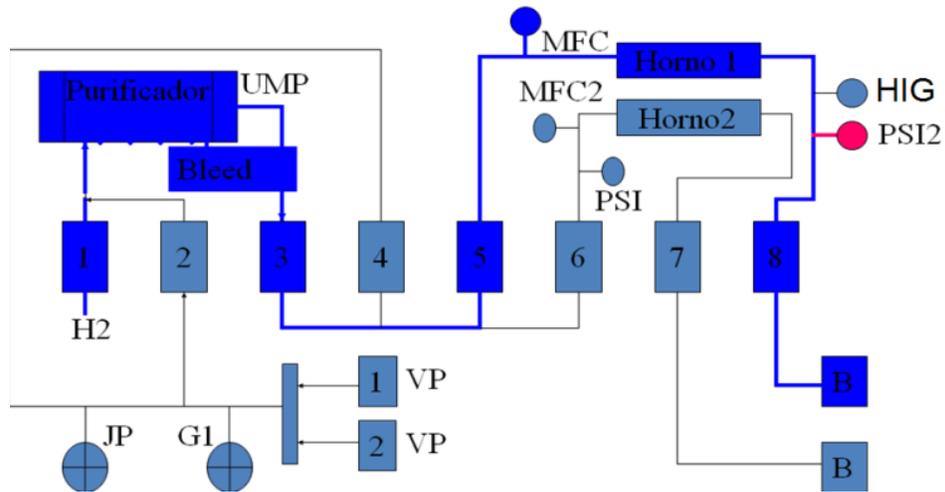


Figura 3.3. El flujo de hidrógeno y purificación del sistema se realiza activando las válvulas 1, 3 y 5. Al realizar el proceso en presencia de H_2 garantiza la no aparición de películas de óxido en las películas epitaxiales del dispositivo semiconductor.

El proceso inicia con la apertura de la válvula número 1 que permite la entrada del hidrógeno al sistema, posteriormente él gas es purificado haciéndolo circular por un purificador, al abrir las válvulas 3 y 5 se permite la entrada de hidrógeno ultra purificado al reactor del sistema, [3, 4, 5, 6, 7, 29].

Una vez que se alcanza una presión interna de 15 PSI es accionada la válvula número 8 permitiendo el flujo constante de H_2 a lo largo de todo el experimento. El hidrógeno ayuda a disminuir el crecimiento de películas de óxido presentes en las superficies de los materiales sólidos y líquidos las cuales no permiten que exista un buen contacto entre la solución y el substrato, [3, 4, 5, 6, 7, 29].

3.4 Programa de Control

Hay que mencionar que los procesos anteriores se encuentran automatizados. El panel de control implementado en LabVIEW para esta aplicación se muestra en la figura 3.4. Para acceder al programa es necesario introducir una clave de seguridad de tal manera que se restringe el acceso al software de control. Otra característica del programa es el monitoreo del sistema vía internet. LabVIEW proporciona esta función a los programas desarrollados en su ambiente de programación [3, 4, 5, 6, 7, 29].

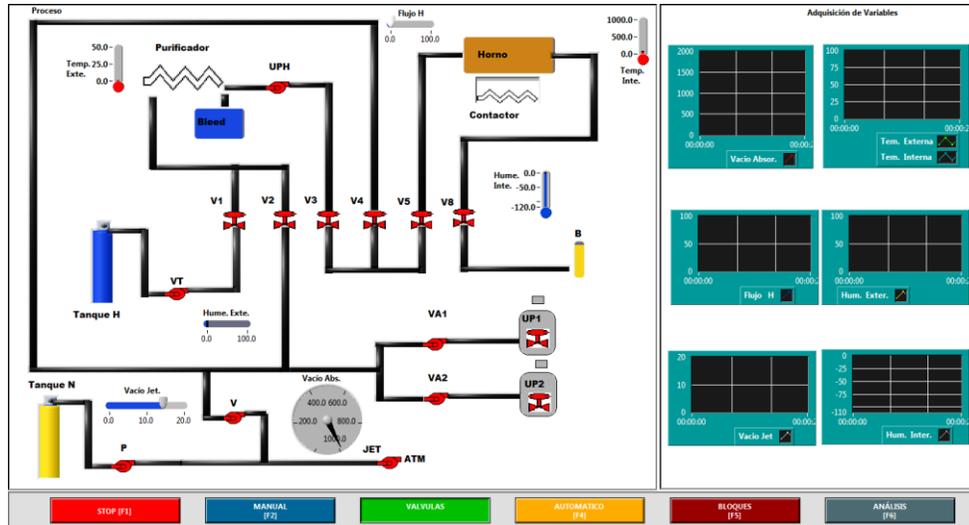


Figura 3.4. Panel frontal del programa de control del sistema de LPE.

Se hizo una representación virtual del sistema de crecimiento. En este panel virtual se muestran el conjunto de tuberías, válvulas e indicadores que permiten visualizar la temperatura interna, temperatura externa, presión, vacío, humedad, tanques de hidrógeno y nitrógeno que conforman al sistema de crecimiento, [3, 4, 5, 6, 7, 29].

Además de todo lo anterior también se cuenta con unos indicadores gráficos que muestran el comportamiento a lo largo del tiempo de las variables físicas presentes durante el proceso de crecimiento. El programa implementado en LabVIEW envía una serie de comandos hacia una tarjeta de control que es conectada al sistema de LPE, [3, 4, 5, 6, 7, 29].

Todos los datos que lee y escribe LabVIEW hacia la tarjeta de control se envían a través del puerto USB de la computadora. El usuario puede elegir la forma de realizar el experimento, es decir, el programa opera en cuatro formas: automática, semiautomática, manual y virtual. Dependiendo de las características del experimento el usuario elegirá la forma de operar que más se adapte a sus necesidades. En la figura 3.5 se muestra un diagrama a bloques de la tarjeta de control implementada. La tarjeta se basa en un microcontrolador PIC18F4550 que se comunica con la PC vía el puerto USB, a través del cual se envía los comandos a ejecutar por el microcontrolador. Se implementaron etapas de potencia y de acondicionamiento de señales por medio de las cuales el PIC18F4550 interactúa con el sistema de crecimiento, [3, 4, 5, 6, 7, 29].

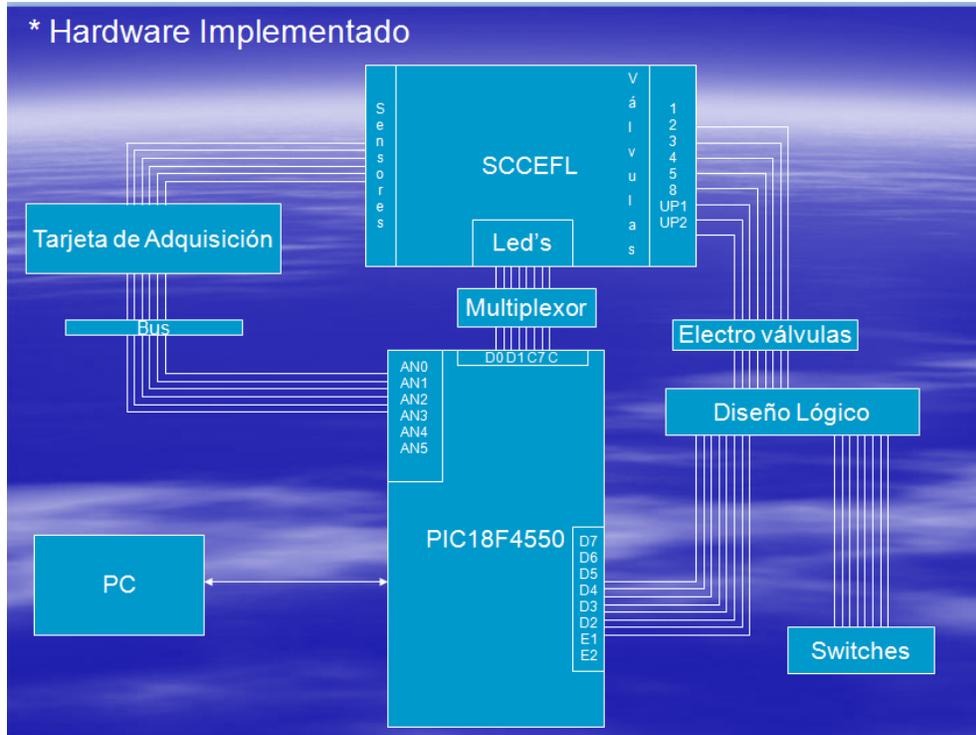


Figura 3.5. Diagrama a bloques de la tarjeta de control basada en un microcontrolador PIC18F4550.

4

Programa de Control de Régimen de Crecimiento

En este capítulo se describe en que consiste el régimen de crecimiento para obtener dispositivos opto-electrónicos a través del método de epitaxia en fase líquida así como el programa implementado en esta etapa para realizar esta fase del proceso de forma manual, automática o semiautomática según las necesidades del usuario. Hay que mencionar que el régimen de crecimiento varía o cambia en función de los materiales a utilizar o el tipo de estructura que se desea obtener.

4.1 Régimen de Crecimiento

El régimen de crecimiento consiste en implementar un diagrama de temperatura el cual cambia dependiendo de los materiales a utilizar y la estructura que se desea obtener. En la figura 4.1 se muestra un régimen de crecimiento comúnmente utilizado para dispositivos de una sola capa epitaxial [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

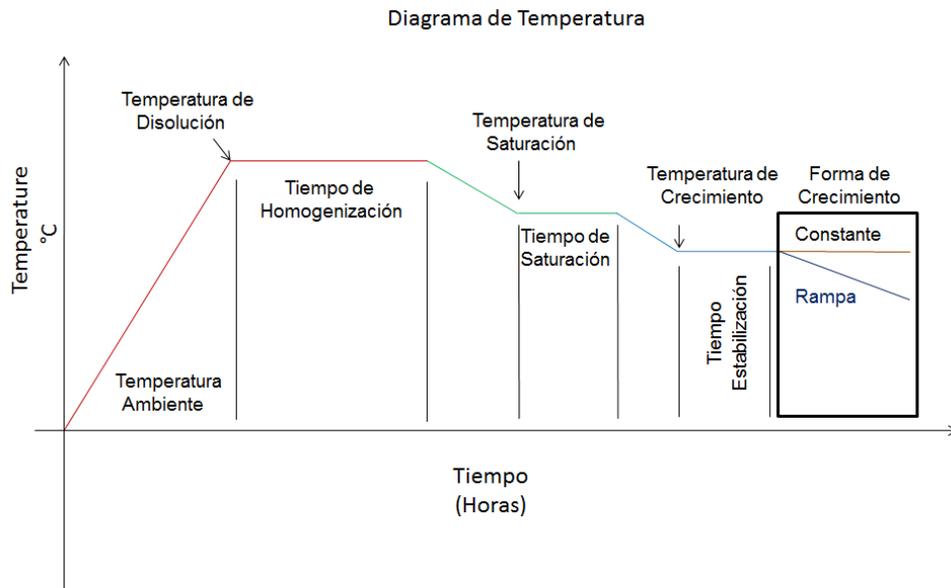


Figura 4.1. Régimen de temperatura general implementado para la obtención de estructuras epitaxiales. Las temperaturas y tiempos cambian según los materiales a utilizar.

Una vez que los materiales se encuentran dentro del reactor se realiza vacío y se hace fluir hidrógeno hasta obtener una humedad interna del sistema de aproximadamente 80 °C. Se procede a iniciar con el diagrama de temperatura para realizar el crecimiento de la estructura cristalina. Tal como se observa en la imagen anterior se procede a incrementar la temperatura, se eleva desde temperatura ambiente hasta un valor superior a los 650 °C disolviendo los materiales. Después de un tiempo de estabilización, se desciende la temperatura a unos 550 °C para saturar la solución. Se permanece un tiempo a esta temperatura y se vuelve a bajar a 540 °C sobresaturando la solución. En este momento comienza la deposición del material excedente. La fase líquida se pone en contacto con el sustrato. La deposición de cristales se puede hacer de dos formas: manteniendo la temperatura constante y realizando los movimientos de deposición o bajando la temperatura de forma gradual en pasos de medio grado o un grado y realizando el contacto entre el sustrato y la solución líquida. Las temperaturas y tiempos así como la forma de realizar el contacto entre los elementos depende del tipo de experimento que se desea realizar. Una vez terminados estos pasos se procede a bajar la temperatura por debajo de los 60 °C. A esta temperatura ya es posible retirar las soluciones.

Por lo general es necesario realizar un proceso de recocido al dispositivo obtenido con el fin de hacer que las capas crecidas se hagan uniformes, este proceso consiste en exponer el material durante unas tres horas a una temperatura de 800 °C dentro del reactor del sistema, hay que recordar que todas estas etapas se realizan bajo un flujo de hidrógeno constante.

Para obtener películas epitaxiales de diferentes materiales es necesario conocer sus diagramas de temperaturas. Estos diagramas son estudiados tanto teóricamente como experimentalmente para muchas de las estructuras de interés práctico. Una vez que se conocen los diagramas de crecimiento se puede establecer la relación de composiciones entre las fases sólida y líquida a diferentes temperaturas.

El grosor de las capas crecidas se puede variar regulando el tiempo de contacto, variando el volumen de la parte líquida o variando los intervalos de las temperaturas en las que se realiza el proceso, [3, 4, 5,6, 7].

4.2 Programa de Control

Al igual que los procesos anteriores el régimen de crecimiento también se encuentra automatizado y puede ser operado por el usuario de forma manual, automático o semiautomático de acuerdo a las características y necesidades de su experimento. En la figura 4.2 podemos ver el panel de control del programa principal de crecimiento y en la figura 4.3 un diagrama de flujo muy general del programa de control desarrollado para esta etapa del proceso. Se puede observar en la imagen 4.2 que el programa desarrollado consiste de un panel virtual constituido de una serie de botones, controles e indicadores que sirven para configurar los parámetros de crecimiento deseados.

Estos parámetros incluyen desde los tiempos de las temperaturas de disolución, saturación, crecimiento, temperaturas del diagrama correspondiente a los materiales a utilizar, crecimiento a temperatura constante o variable así como los tiempos de flujo de hidrógeno, vacíos Jet y adsorción, [3, 4, 5, 6, 7].

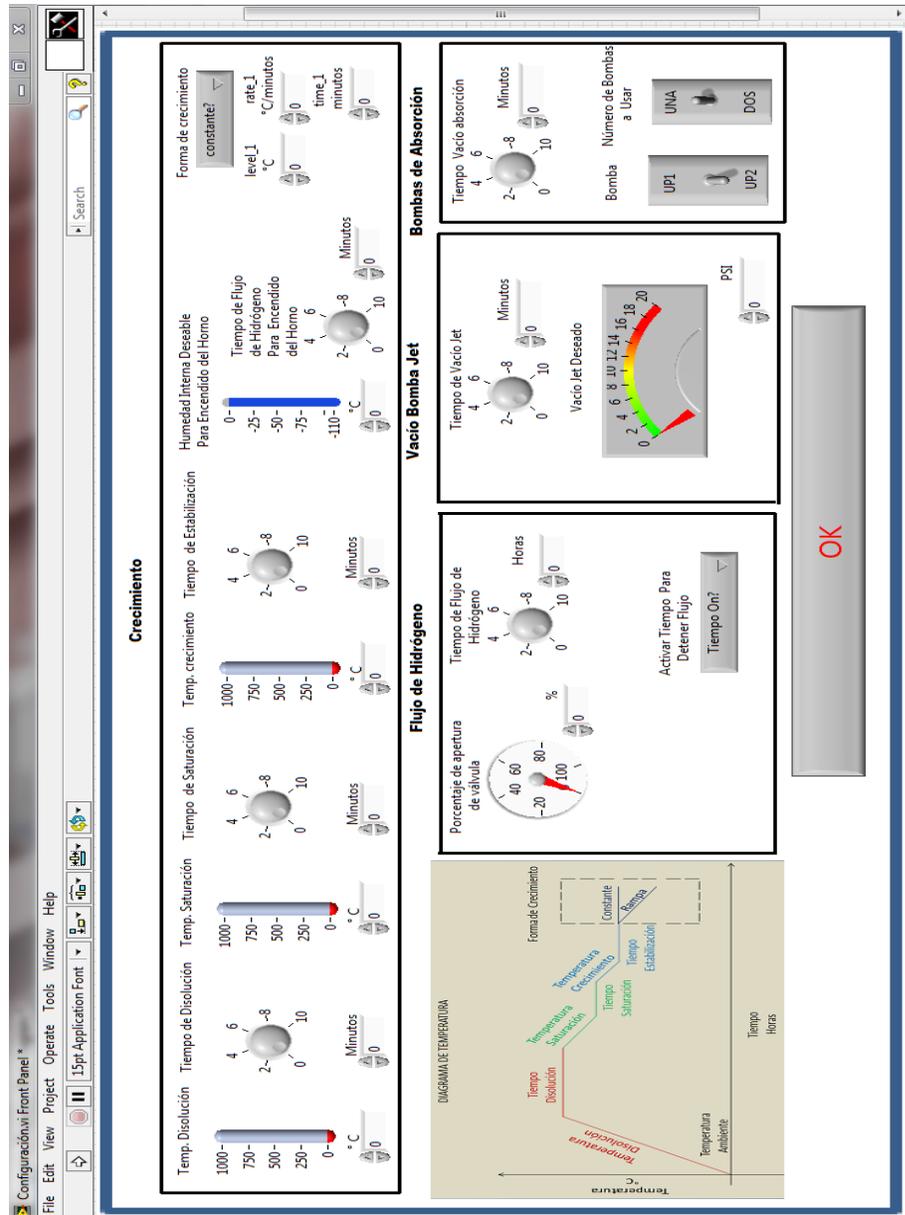


Figura 4.2. Panel frontal del programa de régimen de crecimiento por LPE.

Se puede observar en el diagrama a bloques que el programa solicita los parámetros de crecimiento y monitorea en todo momento el proceso. De esta forma el usuario puede visualizar como se va desarrollando el experimento. Se muestran los valores de las temperatura externa-interna, humedad externa-interna, flujo de hidrógeno, temperatura de crecimiento, disolución, saturación, tiempos de disolución, crecimiento, tipo de crecimiento así como los procesos de vacío y flujo de hidrógeno, [3, 4, 5, 6, 7].

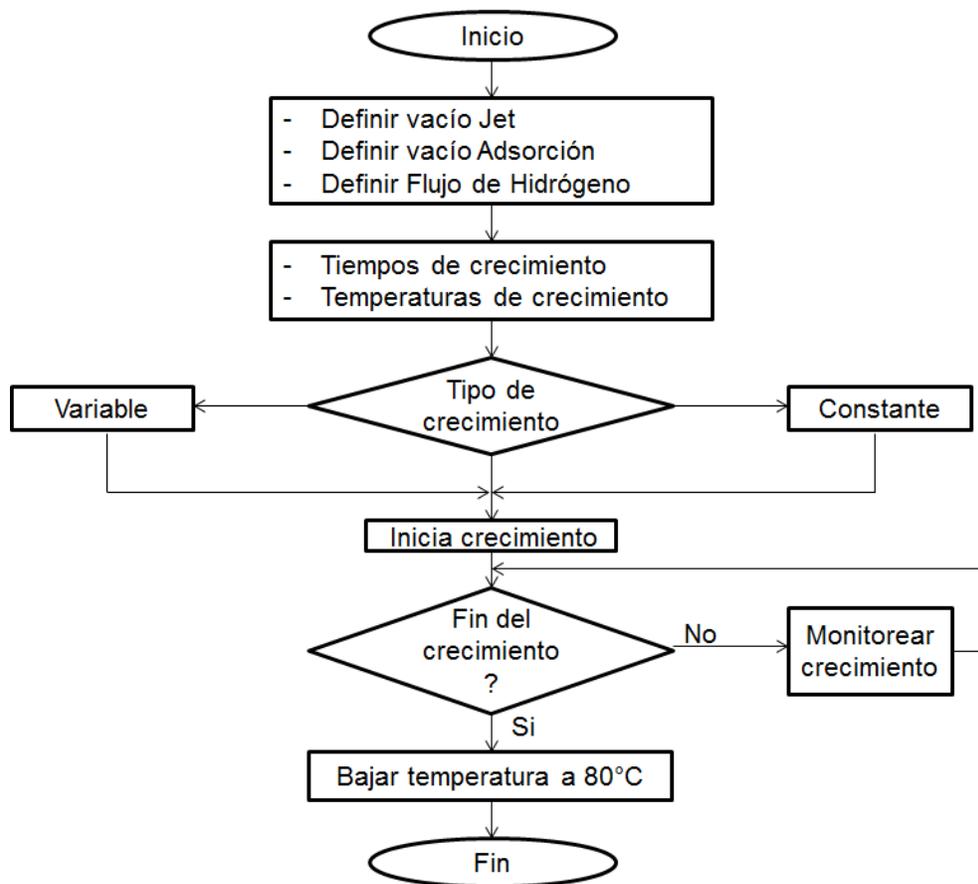


Figura 4.3. Diagrama de flujo del programa de control de crecimiento desarrollado en LabVIEW.

5

Deposición Automatizada de las Fases Líquidas por LPE

En este capítulo analizaremos el sistema mecánico y de control diseñados para automatizar los movimientos de deposición del material excedente de las soluciones líquidas sobresaturadas cuando entran en contacto con el sustrato.

5.1 Deposición de la Fase Líquida Sobre Substratos

La epitaxia en fase líquida es una técnica que ha sido muy estudiada para la obtención de capas epitaxiales de materiales opto-electrónicos. Una de las principales ventajas que ofrece esta técnica es que permite hacer el crecimiento a temperaturas por debajo de la temperatura de fusión de los cristales mejorando su calidad [1, 2, 3].

El sistema experimental donde se realiza la deposición de los cristales está formado por un horno cilíndrico con un bote de grafito de tipo regleta deslizante el cual se compone de dos partes: el tronco y el deslizador; el tronco usualmente queda fijo y en sus cavidades se depositan las soluciones líquidas que pueden ser de diferentes composiciones mientras que la regleta tiene un nicho en el cual se coloca el sustrato, éste se desplaza en relación con el tronco logrando de esta forma que el sustrato entre en contacto con cada una de las soluciones líquidas, en la figura 5.1 se observa el bote de grafito y en la figura 5.2 vemos el tubo de cuarzo y el horno cilíndrico, [3].

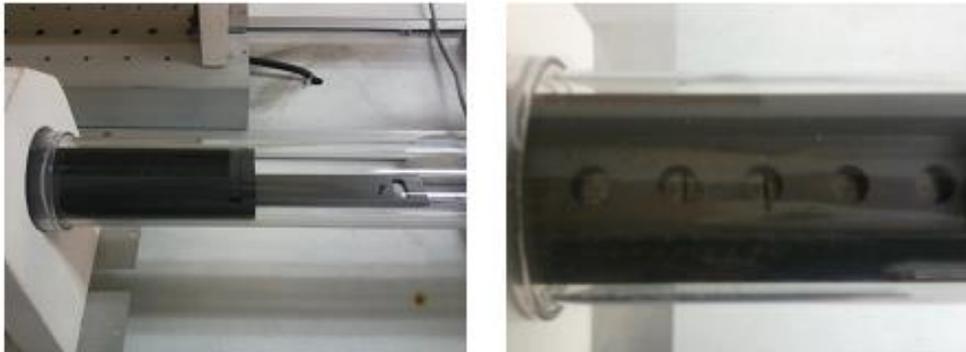


Figura 5.1. Bote de grafito de tipo deslizante: regleta y tronco.

Con la implementación de este sistema se logra tener crecimientos más controlados y reproducibles. Al tener experimentos con un mayor grado de reproducibilidad se facilita el estudio de nuevas estructuras optoelectrónicas. También se pueden establecer condiciones más concretas bajo las cuales se logran buenos crecimientos de capas epitaxiales. La automatización del contacto entre las partes líquidas y el sustrato se integró a los diseños de hardware y software ya existente para el manejo automático de flujo de gases, con esto se pretende lo siguiente:

- Tener un control más preciso en los tiempos de crecimiento y mayor reproducibilidad de los mismos.
- Espesores de crecimientos epitaxiales más controlados.
- Reducir ruidos mecánicos producidos por el operador.



Figura 5.2. Bote de grafito dentro del tubo de cuarzo.

5.2 Mecanismo de Control

En esta sección describiremos el sistema mecánico construido para automatizar la deposición de material excedente de las soluciones líquidas al poner en contacto el sustrato con las partes líquidas, en la figura 5.3 se muestra el esquema del sistema implementado.

Se rediseñó la tapa del reactor acoplado un tubo de acero de unos 30 cm de longitud. En el interior del tubo se localiza una varilla de molibdeno con la que se desplaza la regleta donde se deposita el sustrato, en el otro extremo de la varilla se acopló un pedazo de hierro que funciona como el núcleo de un electroimán. Sobre el tubo se desplaza una bobina, la cual al ser energizada crea un campo magnético que provoca que el núcleo de hierro se amarre a la bobina. La bobina se fijó a un pequeño banco de desplazamiento óptico, este contiene un tornillo sin fin que está unido a un pequeño carrete en donde se montó el electroimán. El tornillo sin fin está ensamblado a una perilla que está unida a la flecha de un motor de corriente directa.

El tornillo sin fin tiene una resolución de 10 cuerdas por centímetro, esto nos da la capacidad de tener desplazamientos de 1 mm por revolución. Teniendo en cuenta la resolución del encoder se traduce en movimientos mínimos de 0.015 mm.

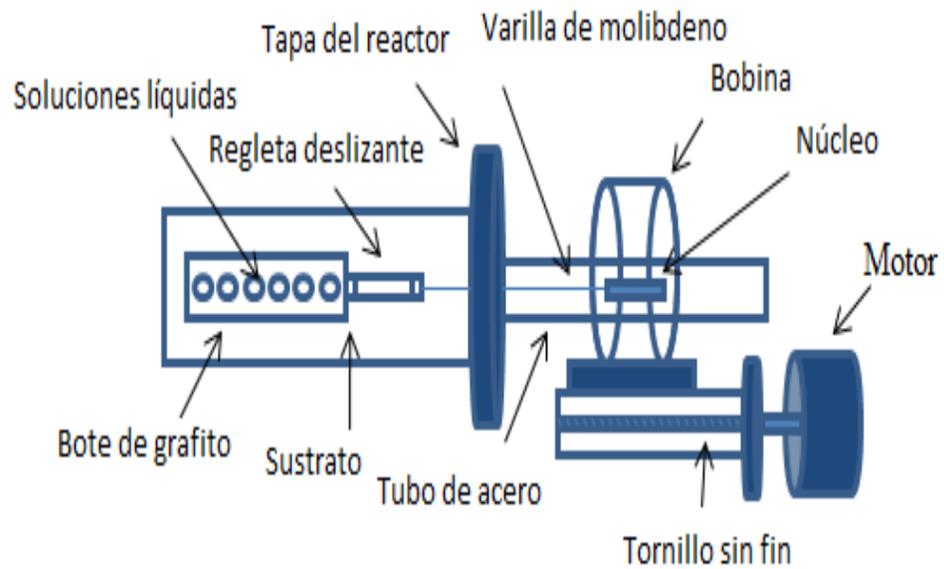


Figura 5.3. Sistema mecánico implementado para controlar la deposición de cristales por LPE.

Hay que mencionar que se cuenta con sensores de fin de carrera para evitar un posible daño al bote de grafito así como para posicionar de manera correcta el sistema de movimiento. En la figura 5.4 se muestra el sistema final implementado.

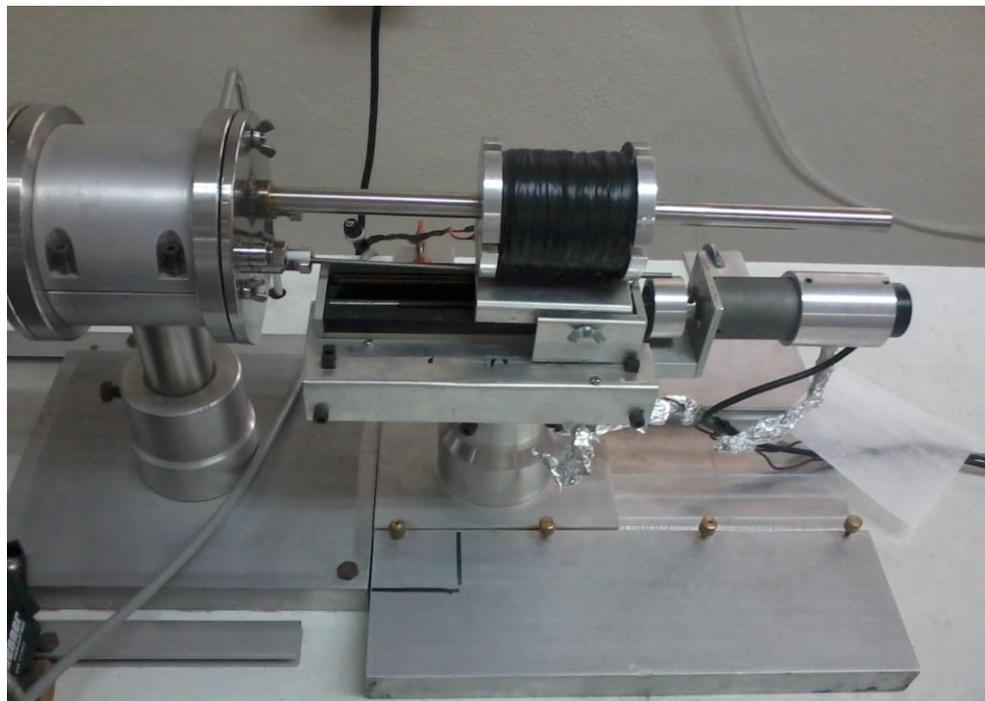


Figura 5.4. Sistema final implementado para controlar la deposición de cristales por LPE.

5.3 Hardware

El espesor de las capas sobre el sustrato se determina controlando la posición, velocidad y tiempo del movimiento a realizar. Estos parámetros son controlados en base a un motor de corriente directa utilizando la técnica de modulación por anchura de pulso (PWM por sus siglas en inglés). En la figura 5.5 se muestra el diagrama a bloques del hardware de control, [4, 6, 16, 17, 18, 19, 39]. El control del motor está basado en un microcontrolador LM629 de la compañía National Semiconductor que opera como esclavo, especializado en el control de movimiento de motores de corriente directa, brushless, servomotores y todo tipo de servomecanismos que sean gobernados por una señal de retroalimentación de tipo incremental de cuadratura. Sus principales características son:

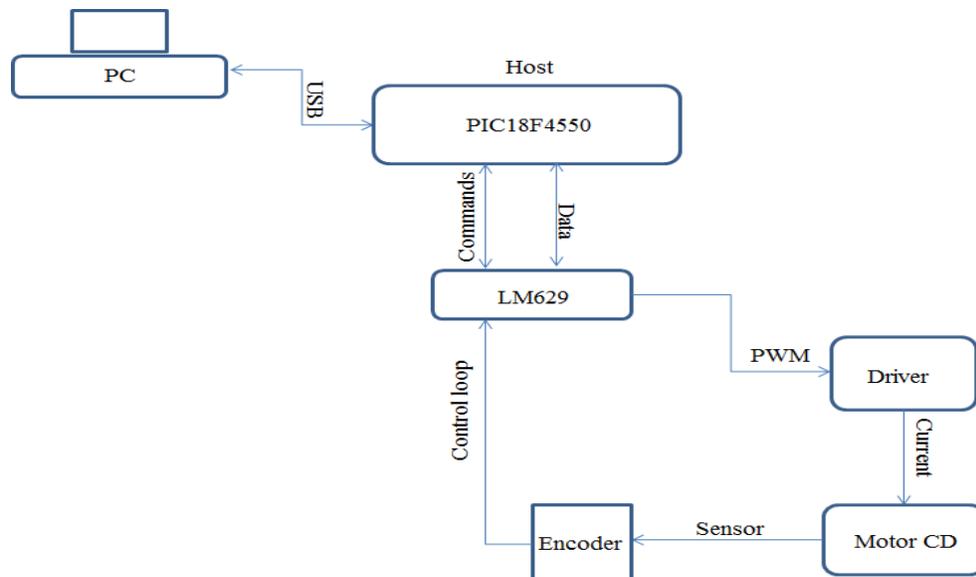


Figura 5.5. Hardware de control para la realización del movimiento.

- Tres registros de 32 bits para la posición, velocidad y aceleración.
- Un control digital PID programable.
- Una señal de salida PWM de 8 bits en magnitud y signo.
- Un generador interno de perfiles de trayectoria trapezoidales.
- La velocidad, posición y parámetros del PID pueden ser cambiados durante el movimiento mientras que para cambiar la aceleración es necesario que termine la trayectoria previamente cargada.
- Dos modos de operación: posición y velocidad.
- Es capaz de manejar señales incrementales en cuadratura.

Para comenzar el movimiento, el procesador carga los valores de aceleración, velocidad y posición deseada en el generador de trayectorias del LM629. Durante cada periodo de muestreo estos valores son usados para calcular la nueva posición deseada, a la que se le resta la posición real, obtenida por el encoder óptico incremental. De esta manera se origina la señal de error, que es la entrada al filtro compensador PID. Una vez realizado esto se produce la señal PWM de salida que va a la etapa de potencia que alimenta al motor, [4, 6, 16, 17, 18, 19, 39].

Para nuestra aplicación se opera el LM629 en modo posición, el procesador maestro carga los parámetros de aceleración, velocidad y posición. La velocidad aumenta en función de la aceleración especificada hasta alcanzar la velocidad deseada, cargada en el registro correspondiente. La velocidad se mantiene hasta que la desaceleración del motor se activa, con una magnitud igual a la aceleración. El LM629 usa un control PID para compensar el lazo de control, que se representa como:

$$(5.1) \quad U_n = [(k_p * e_n) + (k_i * \sum_{n=0}^N e_n) + ((k_d) * (e_n - e_{n-1}))]$$

En la operación, el algoritmo del filtro recibe una señal de error de 16 bits proveniente de la resta entre la señal del generador de trayectorias y la realimentación en posición. La señal se satura a los 16 bits para impedir un comportamiento imprevisible del sistema. Esta señal de error multiplicada por el coeficiente proporcional (K_p) se suma en cada muestreo a los errores acumulados anteriormente en forma de suma integral multiplicada por (K_i) para conseguir una señal de 24 bits, aunque solo los 16 bits más significativos serán usados posteriormente para sumarlos con el coeficiente derivativo (K_d) en $n-1$.

Los 16 bits menos significativos de cada uno de los tres productos (cada producto es un registro de 32 bits) se suman para producir la señal de control. De estos 16 bits, los 8 más significativos forman la salida que, tras ser debidamente tratada, decodificada y amplificada por la etapa de potencia que alimentará al motor para conducirlo a la posición deseada. En la figura 5.6 se muestra un diagrama a bloques proporcionado por el fabricante del funcionamiento interno del microcontrolador, [4, 6, 16, 17, 18, 19, 39].

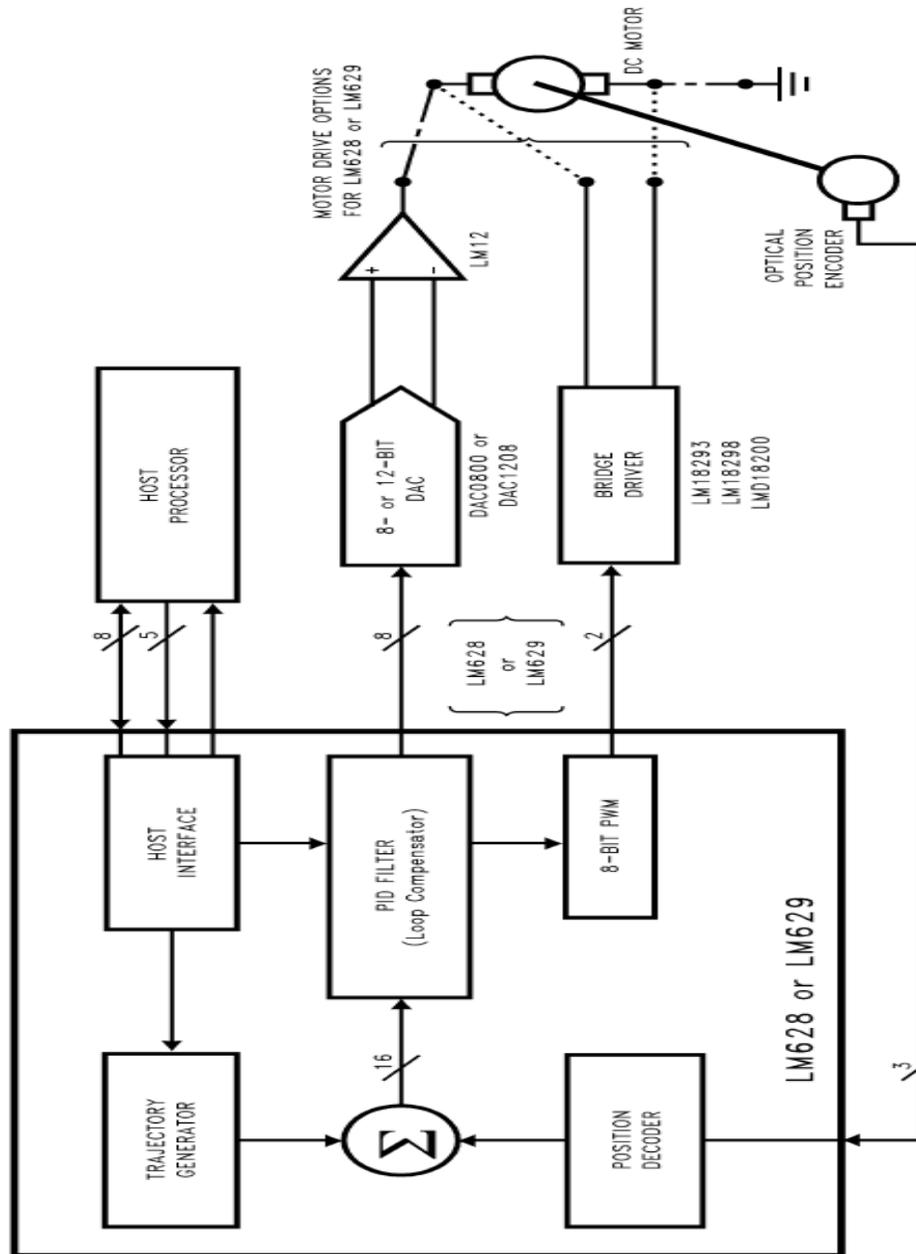


Figura 5.6. Diagrama a bloques de un servosistema típico basado en un microcontrolador LM628 o LM629.

Como maestro se utiliza un microcontrolador PIC18F4550 el cual se comunica por medio del puerto USB que funciona a máxima velocidad en modo bulk transfer con la PC para recibir los comandos y datos a cargar al LM629. De esta forma se le indicará al LM629 que genere o actualice una nueva trayectoria la cual será ejecutada por el motor. En la figura 5.7 se ilustra el diagrama esquemático del circuito implementado [4, 6, 16, 17, 18, 19, 39].

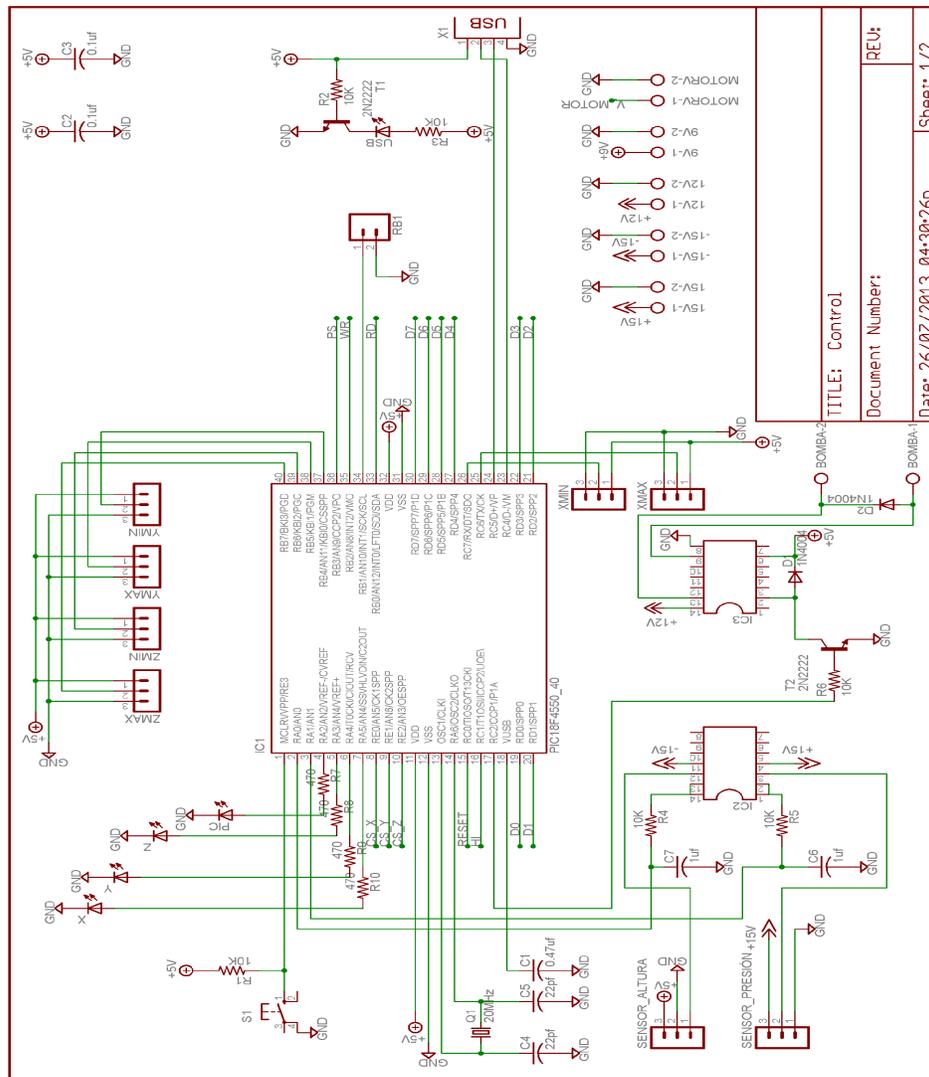
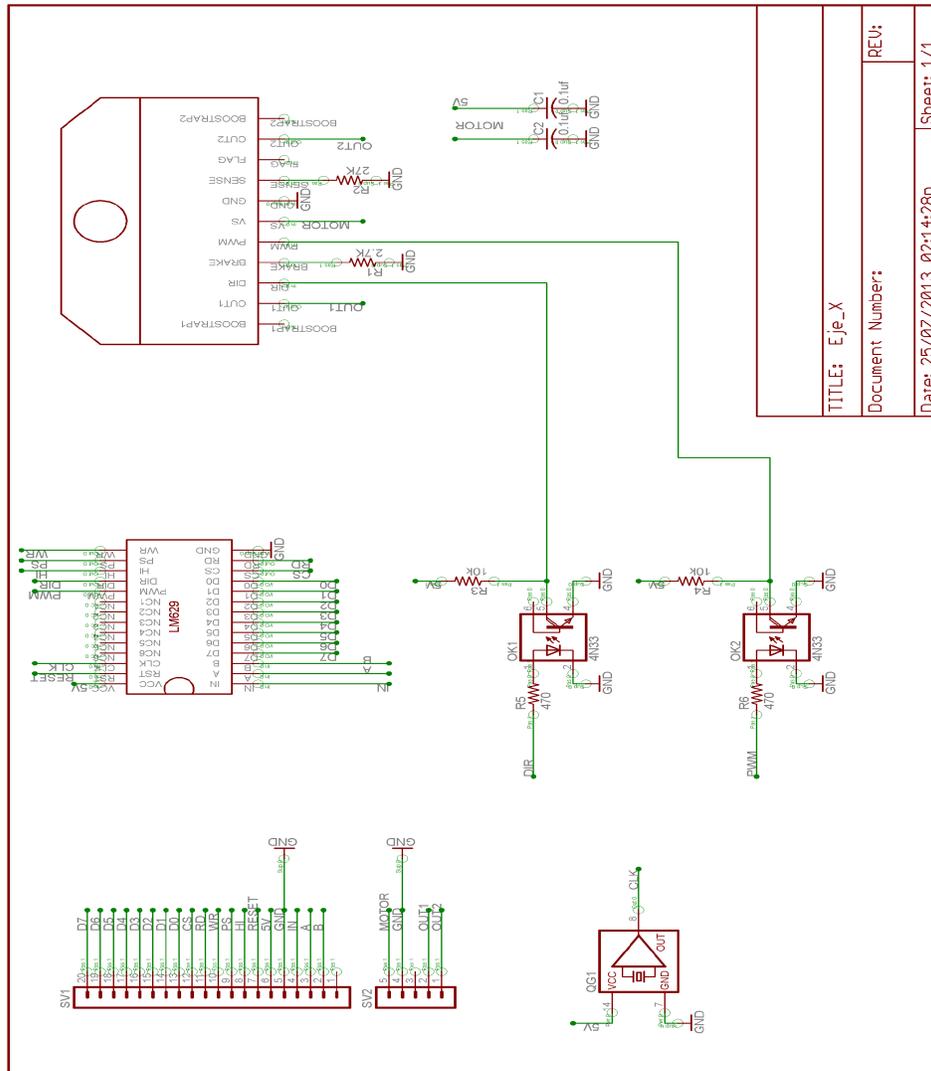


Figura 5.7. Tarjeta de control implementada para realizar el contacto entre las fases líquida y sólida de los experimentos realizados por LPE.

Como driver para energizar al motor se tiene un puente H, LMD18200, también de National Semiconductor. Para cerrar el lazo de control se utilizó un encoder incremental con resolución de 200 pulsos por revolución y velocidad de rotación máxima de 6000 rpm de la compañía Microtech, MES-20-200P. En la figura 5.8 observamos el puente H que energiza al sistema de control de la deposición de cristales por LPE [4, 6, 16, 17, 18, 19, 39].



TITLE: Eje_X
Document Number:
Date: 25/07/2013 02:14:28p
Sheet: 1/1

Figura 5.8. Tarjeta de potencia para energizar el motor utilizado en el sistema de control de deposición de cristales por LEP.

5.4 Software

El programa de control se ha desarrollado en el ambiente de programación LabVIEW en el cual se envían las trayectorias a ejecutar por el LM629 para posicionar el substrato en el lugar indicado. En la figura 5.9 se muestra el panel de control.

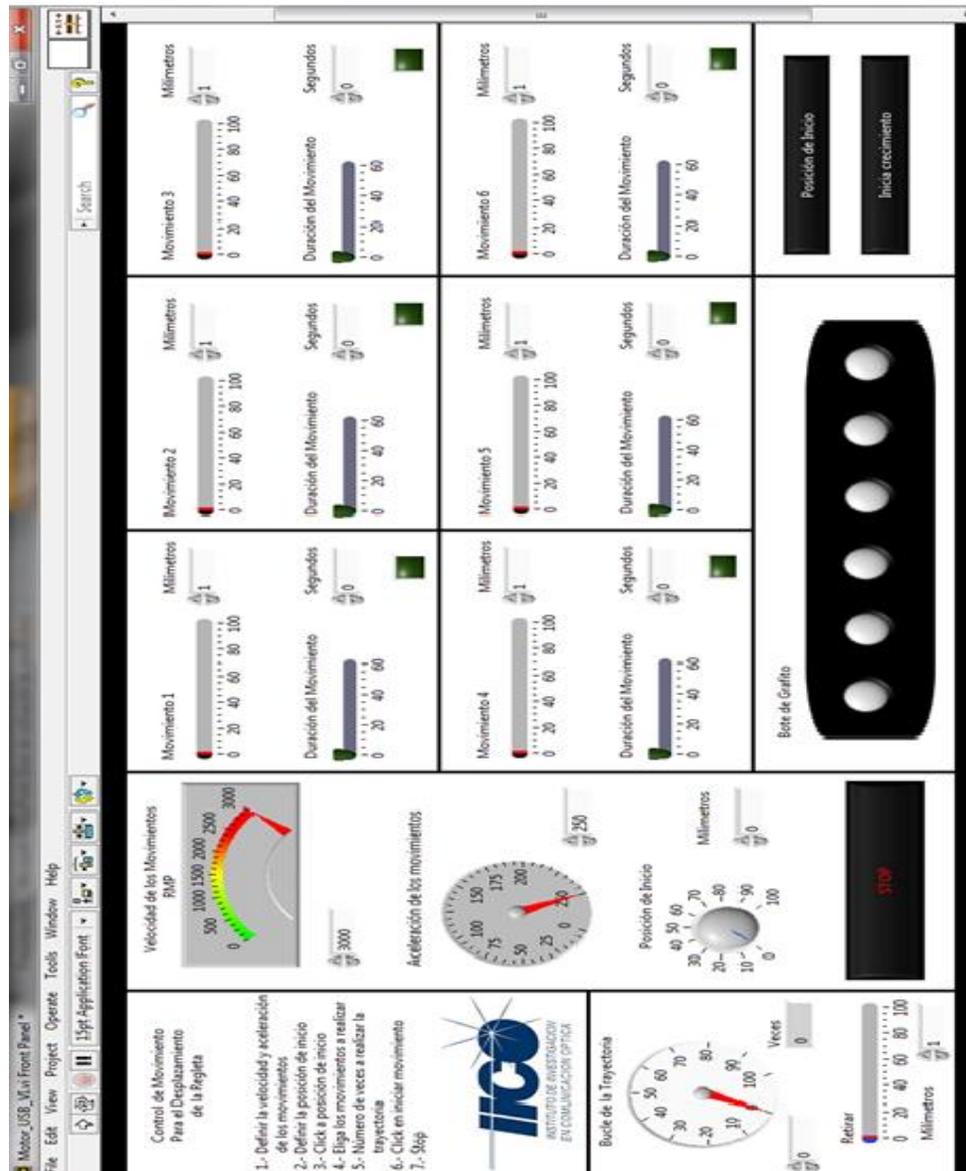


Figura 5.9. Panel frontal del programa de control hecho en LabVIEW para la aplicación del control de movimiento de fases sólidas para la obtención de dispositivos opto-electrónicos.

Además del programa de control de la PC se implementó el programa del microcontrolador PIC18F4550 que actúa como maestro del LM629. Este consiste básicamente en quince subrutinas y el programa principal que se encargan de realizar: la configuración del PIC18F4550, comunicación USB, configuración del LM629, detección de la posición de home y la detección del fin de carrera del movimiento. A continuación las describiremos brevemente.

- Rutina “Inicializa”: es la encargada de configurar los puertos del PIC18F4550 como entradas o salidas digitales, además de asignar puertos analógicos y limpiar variables.

- Rutina “Ready”: se encarga de verificar el bit de ocupado del registro de estado del LM629.
- Rutina “Tray End”: determina si la trayectoria deseada se ha ejecutado.
- Rutina “Command”: encargada de ejecutar los comandos del LM629.
- Rutina “Datald”: carga los datos del LM629.
- Rutina “Reset_LM”: rutina encargada de verificar que el restablecimiento del LM629 es correcto. Si el reset se ejecutó el status byte debe cambiar de 0x00 a 0x84 ó 0xC4. Después de limpiar los registros de las interrupciones el status byte cambia de 0x84 a 0x80 o 0xC4 a 0xC0.
- Rutina “Filter on”: energiza el motor, carga los parámetros del PID y la trayectoria a realizar por el motor.
- Rutina “Motor_off”: desenergiza el motor.
- Rutina “Posición”: carga la posición deseada en el registro correspondiente.
- Rutina “Velocidad”: carga la velocidad máxima a alcanzar en el registro indicado.
- Rutina “Aceleración”: carga la aceleración deseada.
- Rutina “Home”: define la posición de cero absoluto del sistema.
- Rutina “#int_RB7_RB4”: rutina de servicio de interrupción por cambio en los bits 4-7 del puerto b, en estos canales se conectan los sensores de fin de carrera y home.
- Rutina “Hexa”: encargada de convertir los datos de la trayectoria de ASCII a código binario.
- Rutina “Valida”: encargada de validar los datos a cargar en el LM629.
- Rutina “Concatena”: encargada de concatenar los datos de la trayectoria.
- Rutina “main”: rutina principal del programa, además de llamar a las demás rutinas también se ejecuta dentro de esta la comunicación del PIC18F4550 con la PC a través del puerto USB.

Todo este conjunto de rutinas y el programa principal se desarrollaron en el lenguaje de programación C haciendo uso del compilador PIC C de la compañía CCS que soporta a la gran mayoría de las familias de microcontroladores PIC de Microchip. En la figura 5.10 se muestran unos diagramas de bloques sugeridos por el fabricante para implementar algunas de las funciones desarrolladas en el programa de control del microcontrolador LM629 en conjunto con el PIC18F4550, [4, 6, 16, 17, 18, 19, 39].

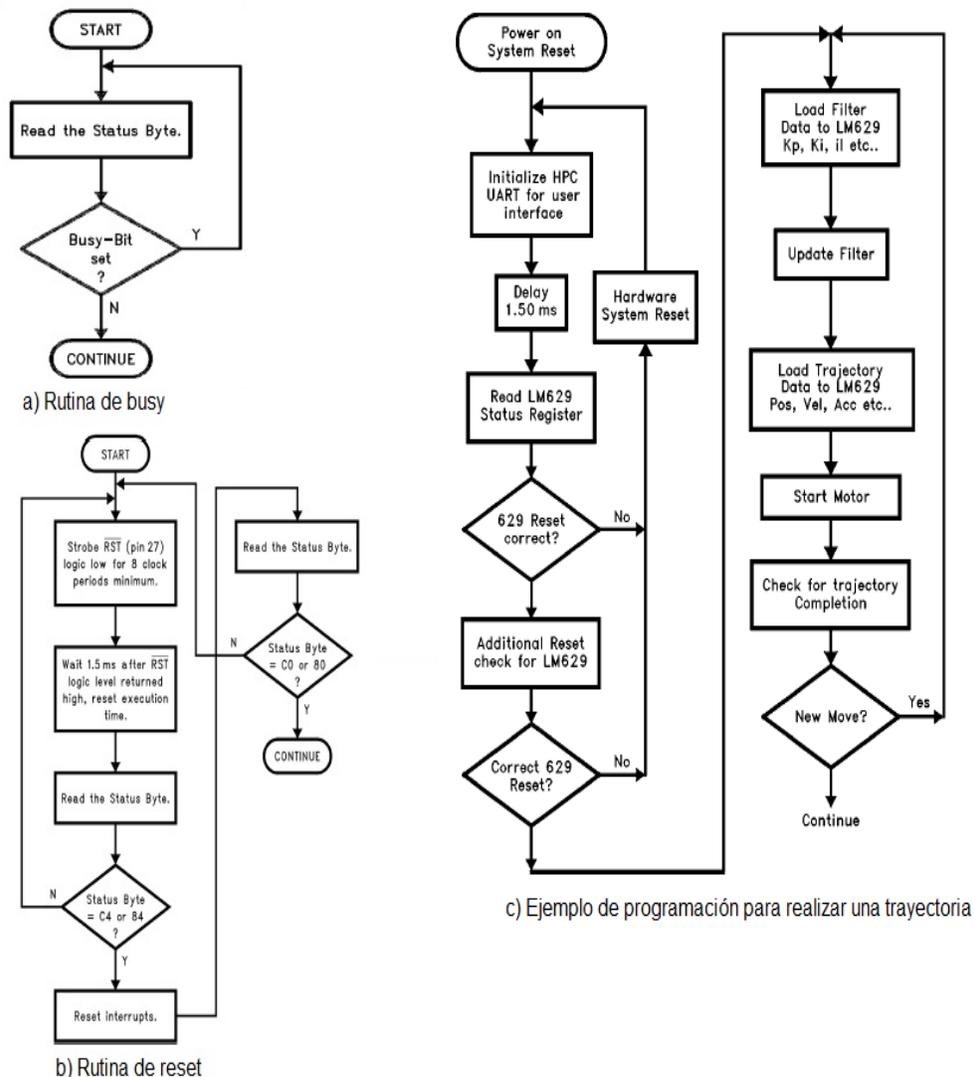


Figura 5.10. Se presentan algunos diagramas de bloques sugeridos por el fabricante para desarrollar las rutinas de control del microcontrolador LM629.

6

Sistema de Monitoreo de la Concentración de Hidrógeno en el Laboratorio de LPE

En este capítulo presentamos el diseño de una red inalámbrica de sensores de hidrógeno que se utiliza dentro del laboratorio de crecimiento de cristales del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Este sistema de sensores se usa como medida de seguridad y protección para el equipo, usuarios y personal al momento de realizar experimentos relacionados con la obtención de cristales por la técnica de epitaxia en fase líquida. Se hace necesario el monitoreo de posibles fugas de Hidrógeno en el sistema de crecimiento ya que los experimentos se realizan bajo una atmosfera de hidrógeno y este gas es altamente inflamable y en concentraciones mayores al cuatro o cinco por ciento es realmente peligroso pudiendo provocar explosiones de diversas magnitudes.

6.1 Monitoreo de la concentración de Hidrógeno

El crecimiento de cristales por medio de la técnica de epitaxia en fase líquida para la obtención de dispositivos opto-electrónicos se realiza bajo una atmosfera de hidrógeno, esto se hace con el fin de evitar oxidaciones en los substratos y soluciones sobresaturadas ya que la calidad y características de los componentes crecidos se verían afectadas.

En el proceso de crecimiento, es necesario abrir el reactor del sistema para colocar los materiales en el bote de grafito. Durante esta etapa el interior del reactor es expuesto a una gran cantidad de partículas de oxígeno que se adhieren al bote de grafito, tubo de cuarzo, horno y tubería. Para eliminarlas y purificar el interior del sistema se realizan dos procesos: vacío al reactor y flujo de hidrógeno. Las partículas de oxígeno son arrastradas y enviadas fuera del sistema de crecimiento al aplicar estos procesos.

Algunos de los inconvenientes de utilizar hidrógeno es que es inflamable, altamente peligroso en concentraciones superiores al 4% llegando a producir explosiones de diversas magnitudes cuando se tiene esta concentración a temperaturas superiores a 80 °C o es expuesto a chispazos producidos por cortos circuitos o la activación de bobinas electromagnéticas.

Debido a lo anterior se utilizan elementos neumáticos en el sistema de crecimiento, estos son activados por electroválvulas por medio de dispositivos electrónicos, por medio del encendido y apagado de estos se realiza el control de los procesos inmiscuidos en el equipo de crecimiento.

Aunado al sistema de control se diseñó una red de sensores para la detección de hidrógeno con los que se pretende detectar posibles fugas de H₂ tratando de evitar concentraciones peligrosas de este gas dentro del laboratorio durante la realización de los crecimientos, ya que la mayoría de estos se realizan a temperaturas superiores a los 400 °C, temperatura a la cual el hidrogeno en altas concentraciones es sumamente peligroso. También se pretende que en caso de una fuga por fallo del sistema neumático se detecte la fuga de los gases por medio de los detectores y que estos envíen una señal al hardware de control para que detenga el proceso así como emitir señales de alarma tanto visuales como auditivas para que el personal se aleje de las instalaciones y se resguarde en un lugar seguro hasta que la situación sea controlada, [2, 3, 7, 8].

6.2 Red Inalámbrica de Sensores

La red de sensores consiste de tres tarjetas que contienen cada una un sensor que detecta la concentración de hidrógeno en el laboratorio, la señal de salida del sensor se conecta a uno de los convertidores análogo/digital internos de un microcontrolador PIC16F877A el cual en función del valor leído envía un comando en forma inalámbrica a través de un módulo transmisor de radiofrecuencia hacia un receptor. Además cada una de las tarjetas contiene indicadores visuales y auditivos que alertan al personal de posibles fugas de hidrógeno así como los niveles de concentración en el laboratorio provocados por la fuga. En la figura 6.1 se muestra el diagrama a bloques de las tarjetas detectoras de hidrógeno.

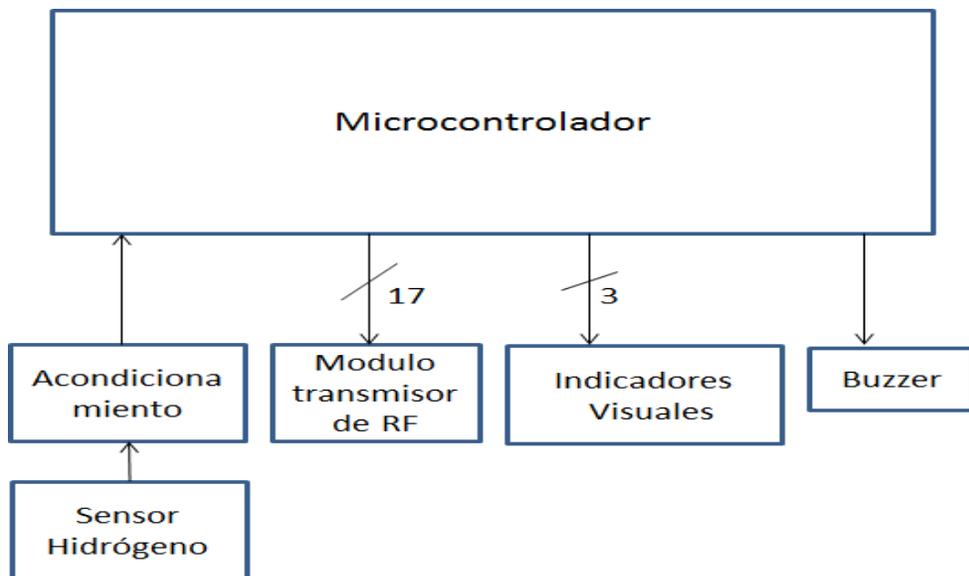


Figura 6.1. Diagrama a bloques de las tarjetas detectoras inalámbricas de concentración de hidrógeno utilizadas en el laboratorio de crecimiento de cristales.

La tarjeta receptora se localiza en el exterior del laboratorio, sirve de indicador a los usuarios que se encuentran cercanos al laboratorio de una posible amenaza o situación de riesgo en el interior de éste, en la figura 6.2 se ilustra el diagrama a bloques de la tarjeta receptora.

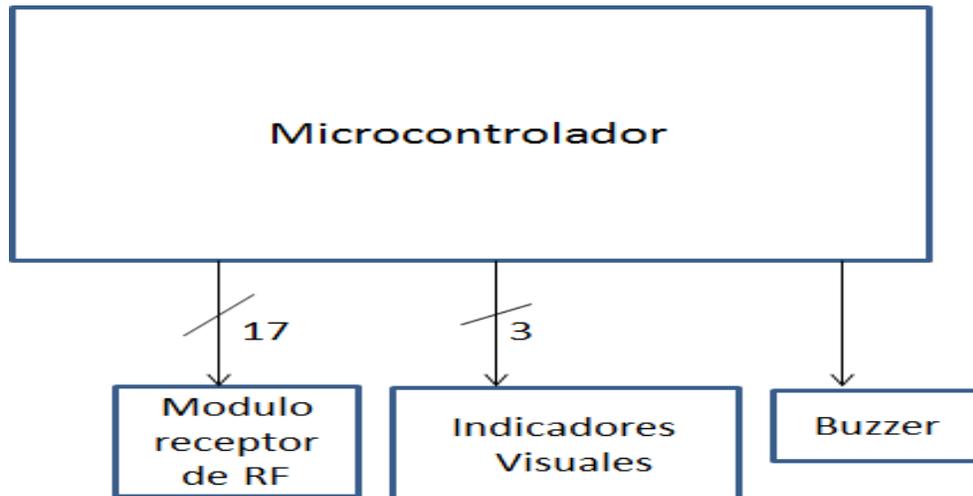


Figura 6.2. Diagrama a bloques de la tarjeta receptora de datos inalámbricos provenientes de los detectores de hidrógeno.

En total se instalaron cuatro tarjetas, una en el pasillo cercano al laboratorio, que funciona como indicador de seguridad para el personal, una directamente en la parte superior en donde se encuentra el sistema, otra más en un laboratorio cercano en donde también se realizan crecimientos por LPE y una más monitoreando los niveles de hidrógeno en un sistema de crecimiento en desarrollo que utiliza una técnica diferente a la de LPE, en la figura 6.3a se muestra el diagrama a bloques de la red de sensores de hidrógeno y en la figura 6.3b las tarjetas reales de cada detector de hidrógeno. El monitoreo de los niveles de concentración de hidrógeno dentro del laboratorio en caso de una posible fuga se realizará en todo momento incluso aunque no se esté realizando experimento alguno, lo que se pretende con este sistema es detectar las fugas y repararlas antes de que exista algún riesgo al momento de realizar los crecimientos.

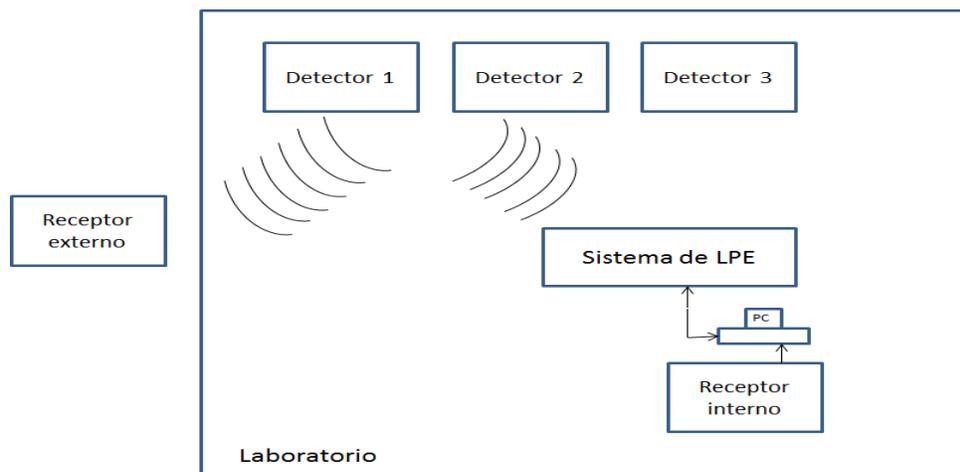


Figura 6.3A. Diagrama a bloques de la red de sensores utilizada en el laboratorio de crecimiento de cristales por LPE para la detección de posibles fugas de hidrógeno.



Figura 6.3B. Tarjetas diseñadas para detectar fugas de hidrógeno en los sistemas de crecimiento de LPE del laboratorio de cristales del IICO.

6.3 Diseño del Sistema

El sistema de detección de fugas de hidrógeno dentro del laboratorio de crecimiento de cristales por epitaxia en fase líquida está constituido por los siguientes elementos, los cuales se detallan en esta sección:

- Transmisor inalámbrico de datos
- Sensor de Hidrógeno
- Receptor inalámbrico de datos

6.3.1 Transmisor Inalámbrico de Datos

El transmisor inalámbrico está formado por un microcontrolador PIC16F877A que funciona como codificador de los datos que se enviarán a través de un transmisor de radiofrecuencia. El microcontrolador utiliza un convertidor análogo digital para leer las señales provenientes del sensor de hidrógeno. El sensor mide las concentraciones de hidrógeno presentes en el laboratorio [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Capítulo 6: Sistema de monitoreo de la concentración de hidrógeno en el laboratorio de LPE



Figura 6.4. Patillaje del microcontrolador PIC16F877A utilizado en el diseño del detector inalámbrico de hidrógeno.

Como módulo de radiofrecuencia se utilizó el modelo TWS-434. La frecuencia de transmisión de este dispositivo es en los 433.92 MHz en amplitud modulada a una velocidad máxima de 8Kbps. El fabricante propone conectar una antena de 30 cm de longitud para un envío de datos óptimo. En la figura 6.5 se presenta el patillaje de este módulo y un posible esquema de conexión, [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

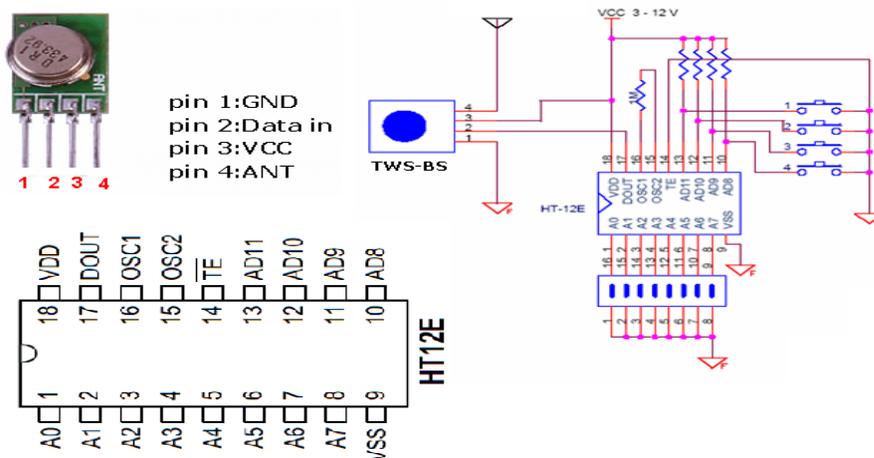


Figura 6.5. Módulo transmisor de datos por radiofrecuencia.

La palabra de transmisión está conformada por 17 bits los cuales consisten en:

- Un periodo en cero, de longitud igual a los datos a transmitir (1 bit de inicio, 8 bits de dirección y 4 bits de datos).
- Un bit de inicio.

- Dirección de ocho bits.
- Datos de 8 bits.

El paquete de datos se transmite bit a bit, es decir, cada uno de los pulsos pertenece a un valor digital ya sea un uno o un cero. La forma en la que se identifica si es un uno o un cero lógico es por el ancho del pulso enviado. Como se puede ver en la figura 6.6, para transmitir un "0" la longitud del pulso debe ser del 66% del ancho del periodo de trabajo mientras que para transmitir un "1" este debe de ser aproximadamente el 33% del ciclo de trabajo. De esta forma lo que se hace es introducir una serie de pulsos de diferente anchura a transmitir por el módulo de RF, [9, 10, 11, 12,13, 14, 15].

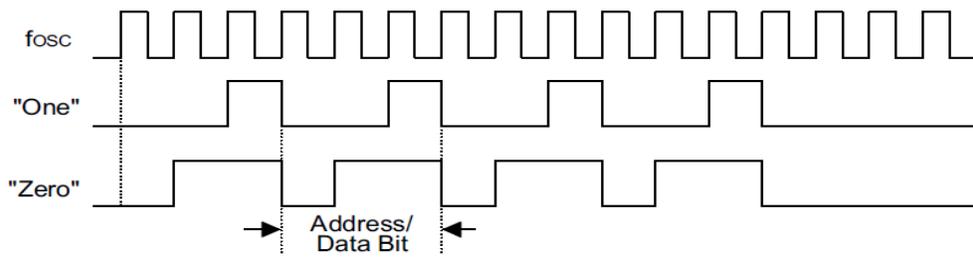


Figura 6.6. Forma de onda de los datos a transmitir por el transmisor de RF.

6.3.2 Sensor de Hidrógeno

La medición de la concentración de hidrógeno se hace con un sensor de trazas de hidrógeno de la compañía Synkera modelo H2-PN-701 que es capaz de detectar concentraciones de hidrógeno en el orden de 10 a 1000 ppm. En la figura 6.7 se ilustra la respuesta característica del sensor en presencia de diversas concentraciones de hidrógeno, estas graficas son proporcionadas por el fabricante.

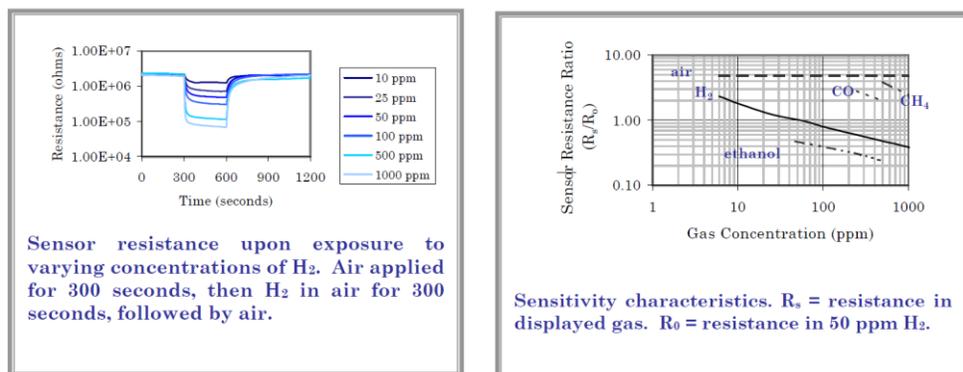


Figura 6.7. Respuesta característica del sensor en presencia de hidrógeno.

El sensor puede ser utilizado usando un simple divisor de voltaje. Es necesario aplicar dos voltajes uno de calentamiento y otro de alimentación. El primero se utiliza para mantener al sensor a una temperatura constante aumentando de esta forma la sensibilidad del sensor y el segundo se aplica directamente a un divisor de frecuencia para obtener el voltaje de salida. El circuito y esquema del sensor se muestran en la figura 6.8, [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

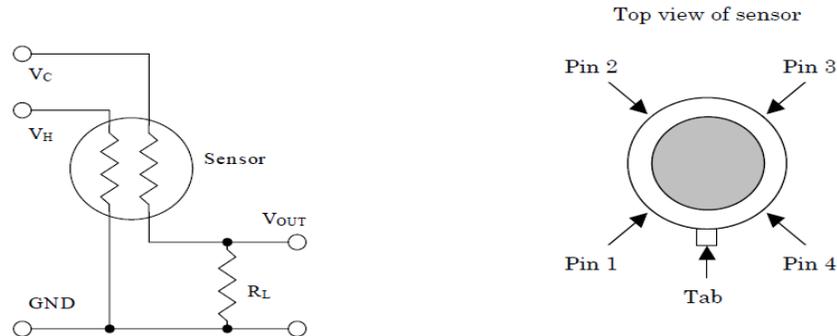


Figura 6.8. Circuito básico de medición, pin 1 y 3 se conectan al voltaje de calentamiento y los pines 2 y 4 al voltaje de alimentación.

La resistencia del sensor se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$(6.1) \quad R_s = \frac{V_c - V_{out}}{V_{out}} * R_L$$

Dónde:

- R_s es la resistencia del sensor
- V_c es el voltaje de calentamiento
- V_{out} es el voltaje de salida
- R_L es la resistencia de carga

6.3.3 Receptor Inalámbrico de Hidrógeno

La tarjeta receptora se diseñó utilizando un PIC16F877A y el módulo receptor RWS-434. Esta tarjeta se acopla al equipo de control del sistema de crecimiento, de tal manera que en cuanto se recibe la señal del transmisor de que la concentración de hidrógeno es mayor a 200 ppm el programa de control del sistema emite una señal sonora y visual para alertar de la fuga de hidrógeno al personal. En la figura 6.9 se muestra el módulo receptor de radiofrecuencia, [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Capítulo 6: Sistema de monitoreo de la concentración de hidrógeno en el laboratorio de LPE

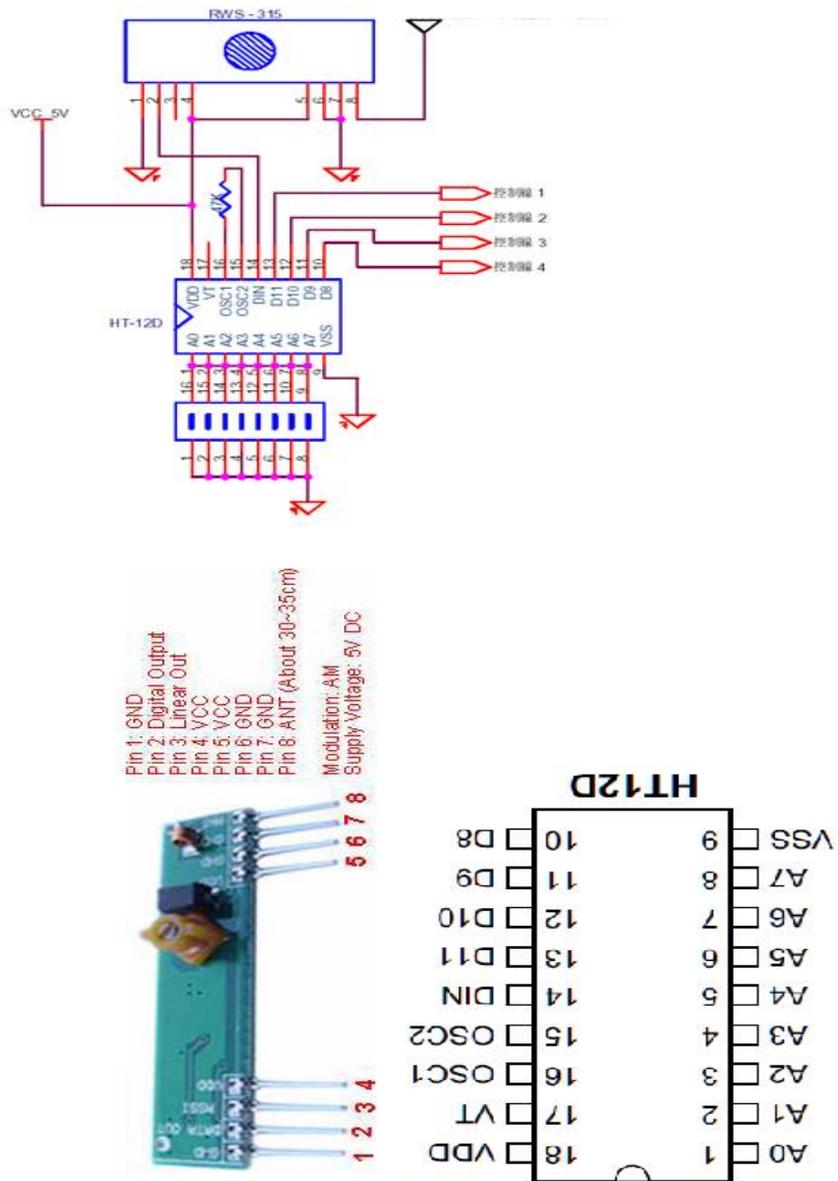


Figura 6.9. Módulo receptor de datos por radiofrecuencia.

El diagrama de tiempos de recepción y el diagrama de flujo de validación y adquisición de datos son mostrados en la figura 6.10.

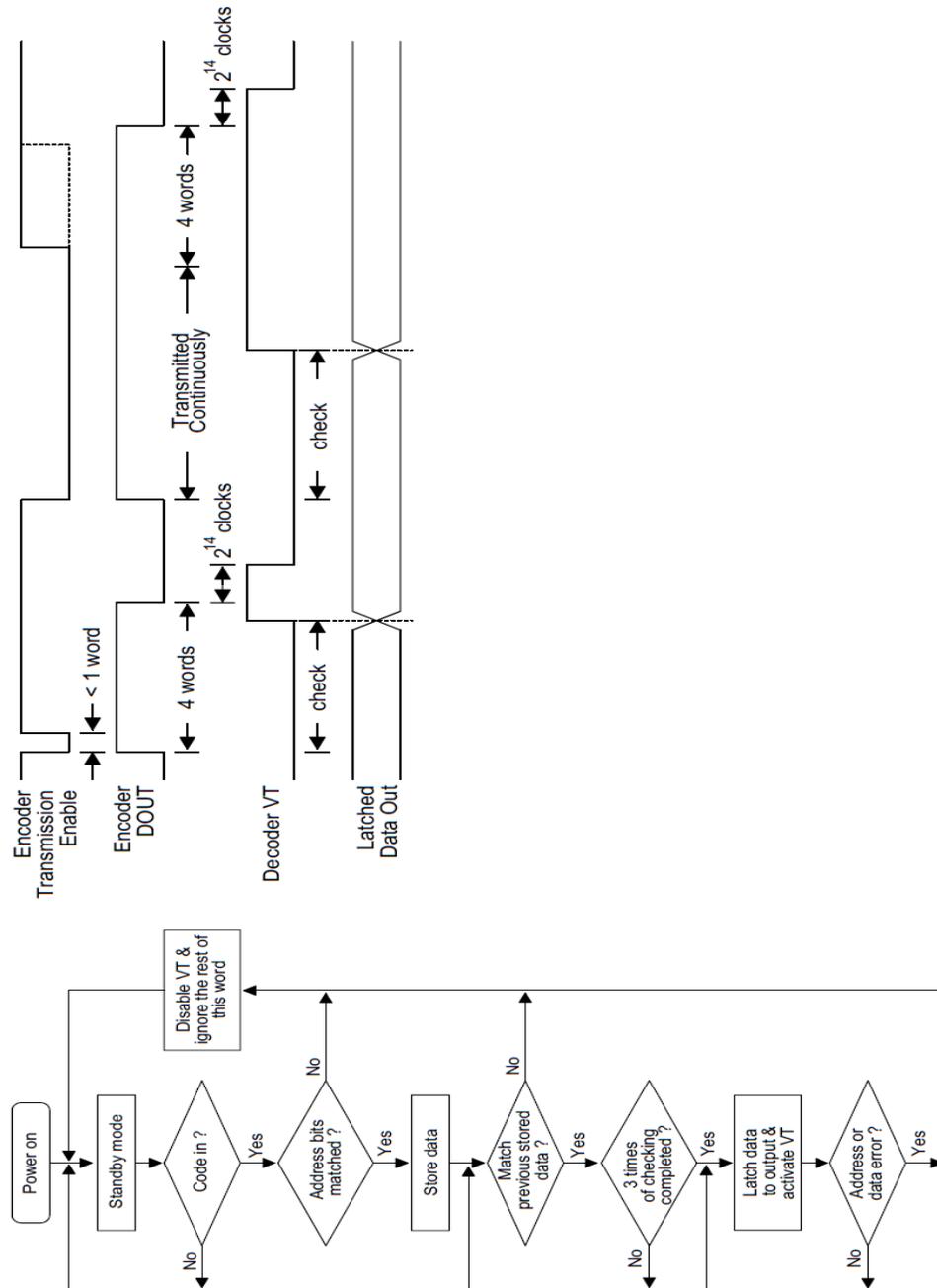


Figura 6.10. Diagrama de tiempos validación de los datos recibidos.

Los detectores serán acoplados a la instrumentación y software desarrollados para el control de flujo de gases y la deposición de cristales en forma automática del sistema de crecimiento de cristales por epitaxia en fase líquida.

6.4 Tarjeta Portátil Detectora de Hidrógeno

Como una alternativa a las tarjetas detectoras de hidrógeno que se encuentran en el laboratorio de crecimiento de cristales por LPE se diseñó una pequeña tarjeta móvil para detectar fugas de hidrógeno. Hay que recordar que las tarjetas de hidrógeno se encuentran montadas en la parte superior del laboratorio, esto se debe a que al ser el hidrógeno un gas con una densidad menor a la del aire se eleva rápidamente hacia las partes superiores del laboratorio. En esta sección del capítulo estudiaremos la tarjeta móvil diseñada para la detección de fugas de H_2 en el sistema de crecimiento de materiales opto-electrónicos por LPE, los temas a tratar son los siguientes:

- Diseño de la tarjeta portátil
- Software

6.4.1 Diseño de la Tarjeta Portátil

El diseño de esta tarjeta se basa en un microcontrolador PIC12F1572 cuyas principales características son las siguientes:

- Set de 49 instrucciones y pila de 16 niveles.
- Velocidad de reloj interno de 31 KHz hasta 32 MHz.
- Tres módulos PWM de 16 bits.
- Generador de formas de onda complementarias (CWG).
- Cuatro módulos internos ADC de 10 bits, convertidor digital a analógico DAC de 5 bits y comparador.
- Dos temporizadores de 8 bits (TMR0/TMR2) y un temporizador de 16 bits (TMR1).

Es un microcontrolador de nueva generación de 8 patas, encapsulado PDIP utilizado en una gran variedad de aplicaciones tales como sistemas de iluminación LED, control de motores paso a paso, motores de corriente directa, fuentes de alimentación y aplicaciones de propósito general. En la figura 6.11 se muestra su patillaje y encapsulado, [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Capítulo 6: Sistema de monitoreo de la concentración de hidrógeno en el laboratorio de LPE



Figura 6.11. Patillaje del microcontrolador PIC12F1572 utilizado para la presente aplicación.

La tarjeta se basa en el microcontrolador PIC12F1572 como cerebro principal, a través del canal análogo RA0 se toma la lectura proveniente del sensor de hidrógeno cuya señal es acoplada al microcontrolador una vez manipulada por el amplificador operacional LM324, que en configuración de seguidor unitario. Se decidió hacer uso de este operacional ya que cuenta con la capacidad de ser alimentado con una sola tensión de voltaje para su operación. En la figura 6.12 se ilustra el diagrama a bloques de la tarjeta.

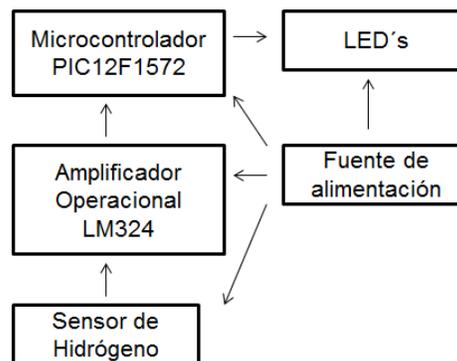


Figura 6.12. Diagrama a bloques de la tarjeta portátil para detectar fugas de hidrógeno en el sistema de LPE.

Como podemos observar en el diagrama a bloques, una vez que es tomada la lectura proveniente del sensor de H₂ a través del convertidor análogo-digital. La señal es comparada internamente con tres niveles que indican la concentración del gas, dependiendo del valor puede encender alguno de los LED's que se encuentran en la tarjeta. En la tabla siguiente se muestran estos niveles.

Comando	Voltaje	LED
Seguro	0.0 - 0.8 volts	Verde
Atención	0.8 – 1.5 volts	Ámbar
Peligro	1.5 – 5.0 volts	Rojo

Tabla 6.1. Encendido de los LED's en función del comando o voltaje leído por el convertidor análogo-digital conectado al sensor de H₂.

Capítulo 6: Sistema de monitoreo de la concentración de hidrógeno en el laboratorio de LPE

En la figura 6.13 se muestra la tarjeta diseñada basada en el PIC12F1572. El tamaño final de la tarjeta es de aproximadamente 10.0 cm de largo por 5.0 cm de ancho. El sistema es alimentado por medio de una batería recargable de 9 volts que entra a un regulador 7805 que proporciona el voltaje de alimentación del microcontrolador, sensor y el operacional LM324. Además de esto se utiliza un LM317 para proporcionar el voltaje de calentamiento de 5.4 volts para el sensor de hidrógeno.

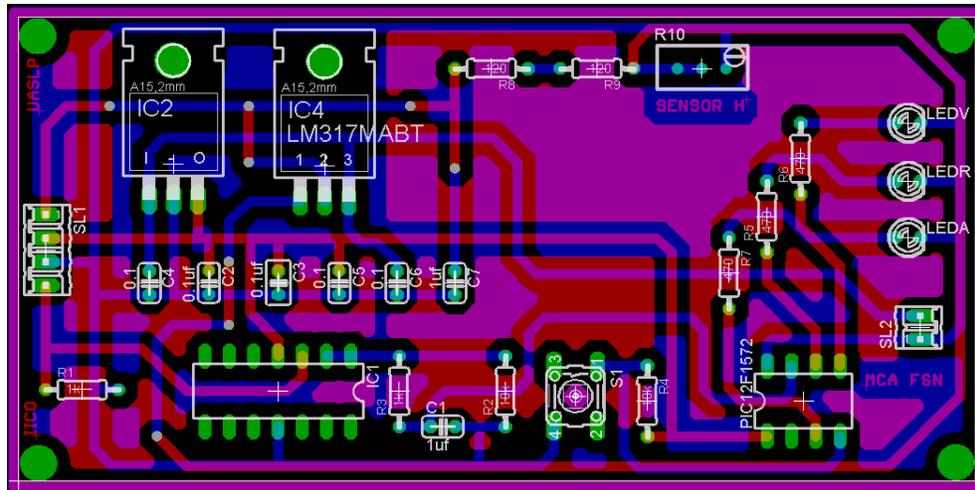


Figura 6.13. Diseño final de la tarjeta portátil utilizada para detectar fugas de H₂.

6.4.2 Software

El microcontrolador PIC12F1572 aunque es de gama baja está optimizado para soportar lenguajes de programación como "C" además del ensamblador. El programa fue desarrollado en el compilador PIC C de CCS y en la figura 6.14 se muestra el diagrama de flujo implementado para la aplicación.

Capítulo 6: Sistema de monitoreo de la concentración de hidrógeno en el laboratorio de LPE

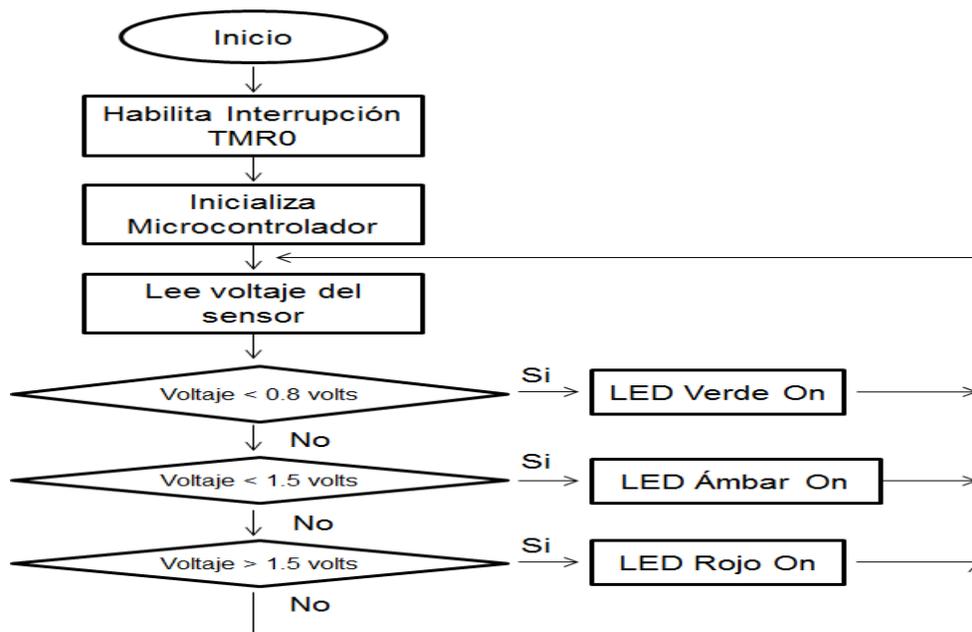


Figura 6.14. Diagrama de flujo para la lectura de los niveles de concentración de H₂ con la tarjeta móvil diseñada.

En la tabla 6.1 se ilustran los valores de voltaje que el programa del microcontrolador lee de forma constante de la salida del sensor de hidrógeno. El valor se compara con tres voltajes previamente definidos, mientras el voltaje se encuentra por debajo de los 800 mV se enciende el LED verde indicando que las concentración de H₂ es segura para realizar el experimento. Si el voltaje leído por el convertidor análogo-digital está por debajo de 1.5 V y por arriba de los 800 mV se activa el LED ámbar indicando la existencia de una pequeña fuga de hidrógeno. Si el voltaje proveniente del sensor supera el valor de 1.5 volts de forma abrupta se enciende el LED rojo indicando una fuga grande de gas, se debe detener el proceso y resguardar el personal en un lugar seguro. Hay que mencionar que los niveles de voltaje se obtuvieron de forma práctica además los LED's parpadean a diferente frecuencia dependiendo del estado de la lectura.

Comando	LED	Tiempo de Parpadeo
Seguro	Verde	1000 milisegundos
Atención	Ámbar	500 milisegundos
Peligro	Rojo	250 milisegundos

Tabla 6.2. Tiempos de parpadeo de los LED's en función del comando o voltaje leído por el convertidor interno análogo-digital del microcontrolador conectado al sensor de Hidrógeno.

En la figura 6.15 se muestra la tarjeta móvil diseñada para medir fugas de hidrógeno en el sistema de crecimiento del laboratorio de cristales.

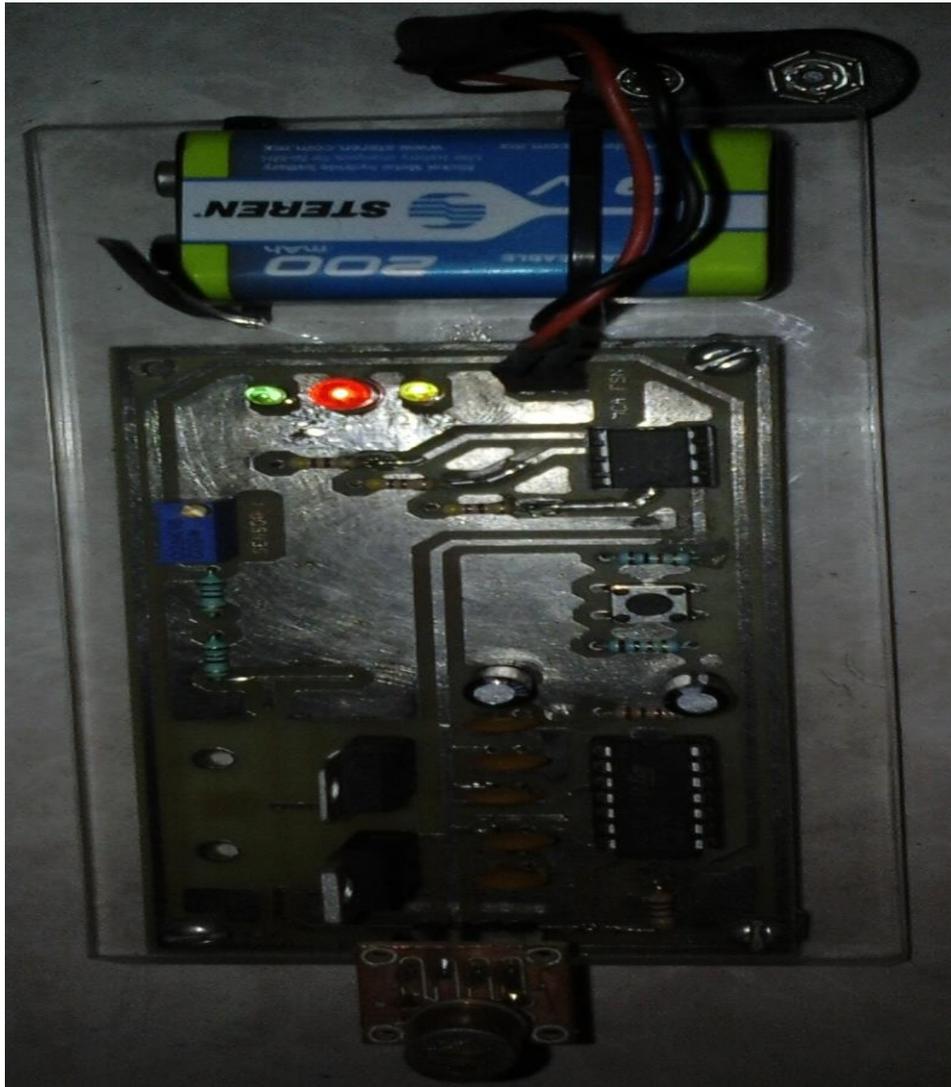


Figura 6.15. Diseño final de la tarjeta portátil para detección de fugas de hidrógeno en el laboratorio de cristales.

7

Pesaje de Materiales que Constituyen la Fase Líquida de Crecimiento

Realizar un crecimiento de Epitaxia en Fase Líquida requiere necesariamente la medición o pesaje de cada uno de los componentes que conforman a la solución líquida. Por ejemplo si se realiza un experimento con un material cuaternario impurificado se necesitan pesar cinco diferentes compuestos. Pero si a esto le agregamos que el crecimiento consiste de una heteroestructura con varias capas entonces es necesario realizar diversas pesadas, es decir, cinco pesadas por cada capa. Este procedimiento por lo general toma tiempo, hasta un día para hacer cada una de las pesadas de los materiales involucrados en el experimento. Pues el operador debe intercambiar las piezas hasta obtener el peso deseado. Las piezas intercambiadas se escogen según la experiencia del operador.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

Debido a esto se propuso el desarrollo de una herramienta auxiliar en la realización de esta tarea, este dispositivo se basa en un sistema de visión semiautomático capaz de detectar las piezas a pesar indicándole al usuario aquellas que se aproximan al peso necesario de cada uno de los componentes que se utilizaran en el crecimiento por LPE. Este sistema trata de resolver los siguientes problemas:

- ✓ Desarrollar el algoritmo idóneo para realizar este trabajo de forma semiautomática.
- ✓ El problema no es sencillo ya que se requiere precisiones de hasta 10 μg .
- ✓ Hasta donde se sabe no existe algo similar en el mercado, es decir, no existe alguna máquina que realice este proceso.
- ✓ El sistema de visión debe ser capaz de distinguir piezas con áreas en el orden de milímetros cuadrados y espesores sumamente pequeños.
- ✓ Además la máquina de visión debe tener la capacidad de identificar y recordar el peso de a cada una de las piezas medidas en el experimento.
- ✓ Realizar n-cantidad de operaciones para obtener todas las combinaciones posibles de pesos de cada una de las piezas que son pesadas en la balanza analítica.
- ✓ Leer la información arrojada por la balanza analítica hacia la PC y almacenar la información para su utilización.
- ✓ Tener una precisión variable en la obtención de las piezas que se aproximan al peso necesario de cada uno de los componentes, este margen de error es definido por el usuario.
- ✓ Indicar de una forma simple al usuario aquellas piezas que puede considerar para realizar el crecimiento epitaxial.

7.1 Imágenes Digitales

Una imagen se puede definir como una función de dos dimensiones que representan la intensidad de la luz en un punto específico donde esta incide, esto se puede representar como:

$$(7.1) f(x, y)$$

Donde f representa la intensidad de la luz en el punto (x, y) y “ x ” e “ y ” representan la posición o punto espacial en el cual es medida la intensidad de la luz. A cada uno de los puntos donde es medida la intensidad de la luz de una imagen se le llama de forma convencional “pixel”, por lo tanto una imagen esta forma por cientos o miles de pixeles. El plano de medición de la posición de los pixeles de una imagen tiene como referencia u origen a las coordenadas $(0,0)$ en la esquina superior izquierda de la imagen, esto lo podemos observar en la figura 7.1, se puede observar que el valor de los pixeles a lo largo del eje “ x ” se incrementan conforme existe un desplazamiento de izquierda a derecha mientras que el valor de los pixeles en “ y ” cambian conforme se desplaza de arriba hacia abajo de la imagen, [21, 25, 28, 30, 38, 40].

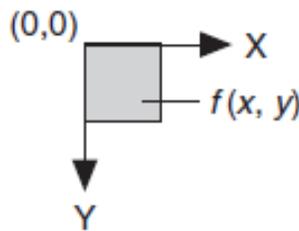


Figura 7.1. Sistema coordinado para una imagen digital representada por pixeles, el origen se situó en la esquina superior izquierda de la imagen.

Cuando una imagen es digitalizada el sensor de la cámara utilizada la convierte en un número discretizado de pixeles que representan la intensidad de la luz en diversos puntos del plano de la imagen. Una imagen digital posee tres propiedades básicas [21, 25, 28, 30, 38, 40]:

- ✓ Resolución: la resolución de una imagen está determinada por el número de pixeles que la conforman, ordenados en una matriz de m -columnas por n -renglones, donde “ m ” representa los pixeles a lo largo del eje “ x ” y “ n ” representa los pixeles a lo largo del eje “ y ”.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

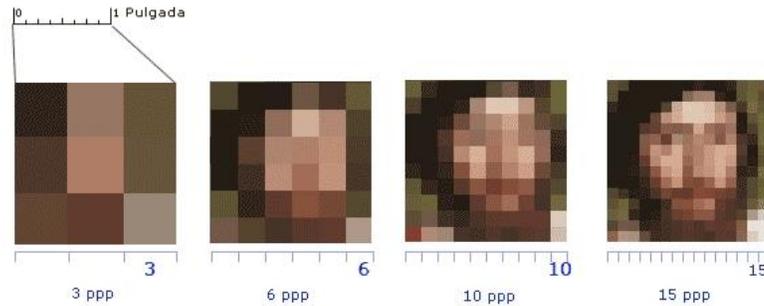


Figura 7.2. Resolución de una imagen, a mayor número de pixeles mejor será la imagen digitalizada.

- ✓ Profundidad de bits: se define como el número de niveles o escalas en que puede ser dividida la imagen. Esto se puede ver como 2^n donde “n” representa el número de bits utilizados. Así por ejemplo si se utilizan 8 bits para digitalizar a la imagen la definición de esta será de 2^8 , es decir, 256 posibles niveles de profundidad.

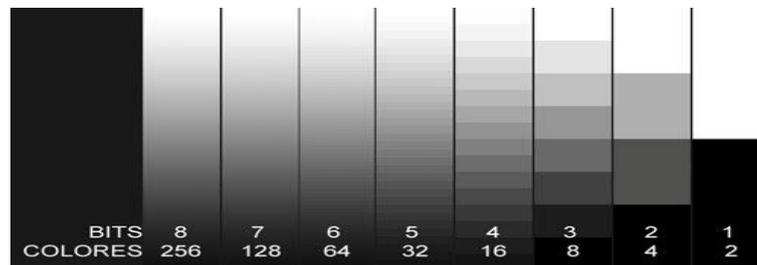


Figura 7.3. Profundidad de bits en una imagen digitalizada, a mayor número de bits de profundidad mayor será las escalas en que se puede dividir la imagen.

- ✓ Número de planos: corresponde al número de arreglos de pixeles que conforman a la imagen, así una imagen en escala de grises tiene un plano en el caso de una imagen a color está conformada por tres planos, si la imagen es de tipo RGB, un plano será para el plano R-red, otro para el plano G-green y uno más para el plano B-blue.

Existen diferentes tipos de imágenes que se pueden clasificar de acuerdo al número de planos y definición que estas poseen en el momento en que se digitalizan, algunas de ellas son, [21, 25, 28, 30, 38, 40]:

- ✓ Imágenes en escala de grises: está formada de un solo plano el cual contiene a los pixeles de la imagen. Cada pixel se puede codificar utilizando alguna de las siguientes profundidades: 8 bits (0-255 niveles de escala de grises, donde le cero representa el color negro y el 256 el color blanco), 16 bits sin signo (0 a 65535 niveles de escala de grises), 16 bits con signo (-32768 a 32767 niveles de profundidad).

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento



Figura 7.4. Ejemplo de una imagen en escala de grises de 8 bits de profundidad.

- ✓ Imágenes a color RGB: estas imágenes están formadas por tres planos que contienen a los arreglos de píxeles de la imagen digitalizada. Estas imágenes se basan en el uso de los tres colores fundamentales que generan la luz blanca, como lo son el Rojo, Verde y Azul. Cada uno de los planos puede tener profundidades de 8, 16 bits con signo o sin signo.

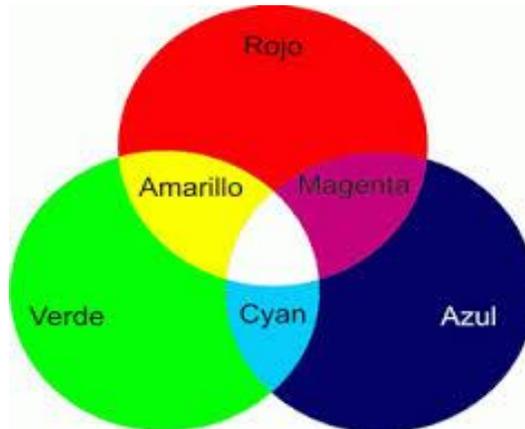


Figura 7.5. Modelo RGB que utiliza los colores fundamentales que forman a la luz.

- ✓ Imágenes a color HSL: compuestas también por tres planos que contienen a los píxeles que forman a la imagen. El modelo HSL consiste en descomponer el color en valores más cercanos a los de la percepción del ojo humano. El plano matiz (H) corresponde a la percepción del color. El plano saturación (S) indica la intensidad del color. El plano luminosidad (L) indica la cantidad de luz que hay en ese color.

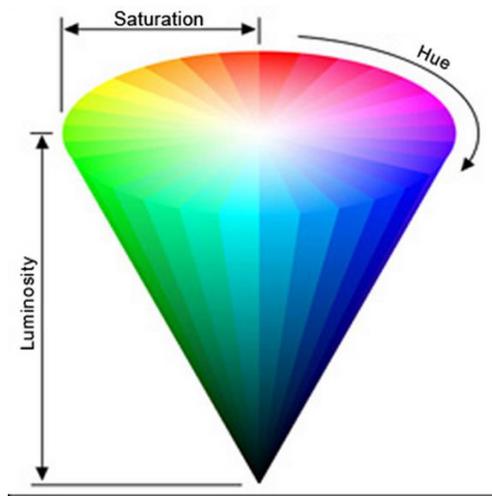


Figura 7.6. El modelo HSL intenta obtener colores más cercanos a los que el ojo humano percibe, una diferencia notable con respecto al modelo RGB.

7.2 NI Vision

LabVIEW cuenta con una gran gama de herramientas para implementar sistemas de visión y procesamiento de imágenes de manera rápida, fácil y eficiente. Estas se pueden utilizar para automatizar o semi-automatizar sistemas industriales, científicos, académicos y de investigación en áreas tan diversas como la salud, procesos químicos y físicos, manufactura, robótica, inspección de partes, seguridad entre otras. La herramienta de trabajo con la que cuenta LabVIEW para el desarrollo e implementación de máquinas de visión y procesamiento de imágenes es NI Vision.

NI Vision es el ambiente de trabajo utilizado para manipulación, adquisición y procesamiento de imágenes que se incluye en el ambiente de trabajo de LabVIEW. NI Vision cuenta con tres grandes bloques que agrupan a todas las herramientas de desarrollo para sistemas de visión [22, 23, 24, 26, 27, 30, 38, 40], estas son:

- ✓ El módulo de desarrollo “NI Vision Development” el cual contiene múltiples VI’s que soportan diversas funciones y algoritmos de adquisición y procesamiento de imágenes así como el despliegue de estas y que son soportados y utilizados en NI LabVIEW.
- ✓ El módulo de “NI Vision Builder para Inspección Automatizada”, es un ambiente de desarrollo independiente que no requiere de programación para la implementación de máquinas de visión. Sus herramientas sirven para la configuración de diversas cámaras de adquisición de imágenes, tratamiento y procesamiento de las

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

imágenes, todo esto para la toma de decisiones dentro de un proceso así como el reconocimiento de patrones.

- ✓ El módulo “NI Visión Acquisition Software” que es utilizado para soportar una gran variedad de dispositivos de adquisición de imágenes. Soporta diversos tipos de cámaras como cámaras USB, WEB, 1394, GigE, IP camera, Gigabit Ethernet, entre otras.

Todos estos módulos permiten tener un sistema de visión completo para la implementación de máquinas de visión y procesamiento de imágenes utilizando una gran variedad de dispositivos de adquisición. En un inicio el módulo de visión de LabVIEW solo soportaba cámaras propias de NI como las NI-IMAQ, Smart-cameras. Esto significaba un problema para aquellos desarrolladores que utilizaban herramientas de adquisición de terceros. La versión de NI LabVIEW 2009 incluye ya una serie de librerías que soportan dispositivos de adquisición de imágenes de terceros como cámaras WEB y el protocolo de comunicación USB a estas librerías las llamó NI-IMAQdx. Una vez que se adquiere la imagen es necesario procesarla para resaltar ciertas características de la imagen adquirida, esto con el fin de mejorar la imagen, detectar objetos, encontrar fallas, identificar partes o medir alguna variable. NI Vision contiene cientos de funciones para realizar este trabajo, algunas de ellas son: filtrado, análisis de partículas, binarización, detección de bordes, segmentación, morfología, análisis en frecuencia, histograma, imágenes en escala de grises, imágenes a color, búsqueda de patrones, máquinas de visión, identificación de códigos OCR.

Además contiene dos herramientas de desarrollo rápido dentro de LabVIEW como son el Vision Acquisition Express y el Vision Assistan Expres que son utilizados para una configuración, manipulación y procesamiento rápido de aplicaciones de visión. Son herramientas de configuración rápida sin necesidad de programación que funcionan en el IDE de LabVIEW. Aunado a todo esto NI tienen cientos de cámaras y tarjetas de adquisición para ser utilizados en conjunto con el modulo completo de NI Vision incluyendo sus diversos módulos que lo integran, en la figura 7.7 se muestran algunas de estas herramientas [22, 23, 24, 26, 27,30, 38, 40].



Figura 7.7. Herramientas de trabajo para adquisición, manipulación y desarrollo de sistemas de visión de NI para ser utilizadas en conjunto con LabVIEW.

7.3 Balanza Analítica

Para realizar el pesado de los materiales a utilizar en los experimentos de LPE se hace uso de una pesa analítica modelo OHAUS-AP110 de alta precisión capaz de medir hasta con cinco dígitos de precisión cada uno de los pesajes realizados. En la figura 7.8 se muestra la imagen de la balanza analítica utilizada, [30, 38, 40].



Figura 7.8. Balanza analítica utilizada para tomar el pesaje de los materiales utilizados para realizar experimentos por LPE.

Las principales características de esta balanza se enlistan a continuación:

- Tarjeta de comunicación RS-232 entre la PC y la balanza analítica. La tarjeta de comunicación de la balanza tiene un consumo de corriente de 5 mA y 5 Volts.
- El Tareo de los pesajes se puede realizar de forma manual o por medio de comandos enviados desde la PC.
- El protocolo de comunicación se basa en tramas de comunicación en formatos ASCII. La trama de comunicación está formada por 19 bytes que corresponden a la siguiente información: 2 bytes de inicialización, 5 bytes del modo de operación, por ejemplo el peso que para esta aplicación se usa en gramos, un byte de estabilización y 10 bytes que contienen la información del peso leído por la balanza. Cinco dígitos de precisión en la lectura del peso.
- En la configuración serie de comunicación utiliza 9600 baudios, 8 bits de datos y un bit de paro.

Para realizar la comunicación entre la PC y la balanza analítica se desarrolló un programa en LabVIEW que envía una serie de comandos para realizar la configuración, lectura y tareo de la balanza analítica. En la figura 7.9 se muestra el panel de control principal que se implementó para realizar las funciones antes mencionadas.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento



Figura 7.9. Panel principal desarrollado en LabVIEW utilizado para realizar la comunicación RS-232 entre la PC y la balanza analítica.

Además de este programa se diseñó una pequeña tarjeta electrónica que funciona como interfaz entre los puertos de comunicación RS-232 de la balanza y el puerto de comunicación USB del ordenador, esto debido a que las actuales computadoras por lo general ya no utilizan el puerto de comunicación RS-232. En la figura 7.10 se muestra el esquema de esta tarjeta, [30, 38, 40].

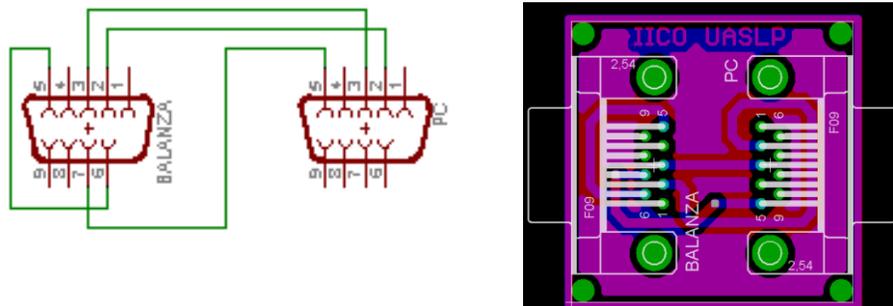


Figura 7.10. Tarjeta desarrollada para realizar la comunicación entre la balanza analítica y la PC.

El algoritmo implementado para realizar la lectura del peso de cada uno de los materiales es muy simple, consiste en configurar la comunicación entre ambos dispositivos, se envía el comando de tareo para iniciar el proceso e inmediatamente se lee el búfer del puerto serie, los bytes leídos se separan para poder manipular los que corresponden exclusivamente a los del peso arrojado por la balanza, se convierte la información de ASCII a string y de string a un valor numérico con parte decimal para finalmente desplegar el peso con una precisión de 5 dígitos, en la figura 7.11 se muestra el diagrama de flujo de este algoritmo.

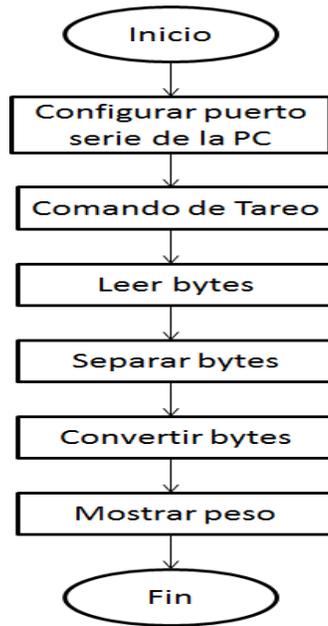


Figura 7.11. Diagrama de flujo del algoritmo para lectura de peso de los materiales a usar en el crecimiento por LPE.

7.4 Cámara

Para adquirir cada una de las imágenes correspondientes a las piezas pesadas por el usuario se utilizó una pequeña cámara web modelo iSlim 321R Features que se comunica por USB con la computadora, en la imagen 7.12 se muestra la imagen de esta cámara, [30, 38, 40].



Figura 7.12. Cámara web utilizada para adquirir las imágenes de las piezas medidas para ser utilizadas en los crecimientos de cristales por LPE.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

Algunas de sus principales características son las siguientes:

- Cámara Web cam VGA de alta resolución de bajo costo.
- Incluye leds infrarrojos para visión nocturna.
- Resolución de 640 x 480 con una velocidad de imagen de 30 cuadros por segundo (30 fps).
- Transmisión USB 2.0 de alta velocidad.
- Zoom óptico de 3x.

Para hacer uso de esta cámara dentro del sistema de visión para la detección de piezas se utilizan las herramientas NI-IMAQdx de LabVIEW. En la figura 7.13 se muestra la imagen del panel de control y bloques de las herramientas utilizadas para adquirir las imágenes de las piezas a pesar, [22, 23, 24, 26, 27, 30, 38, 40].

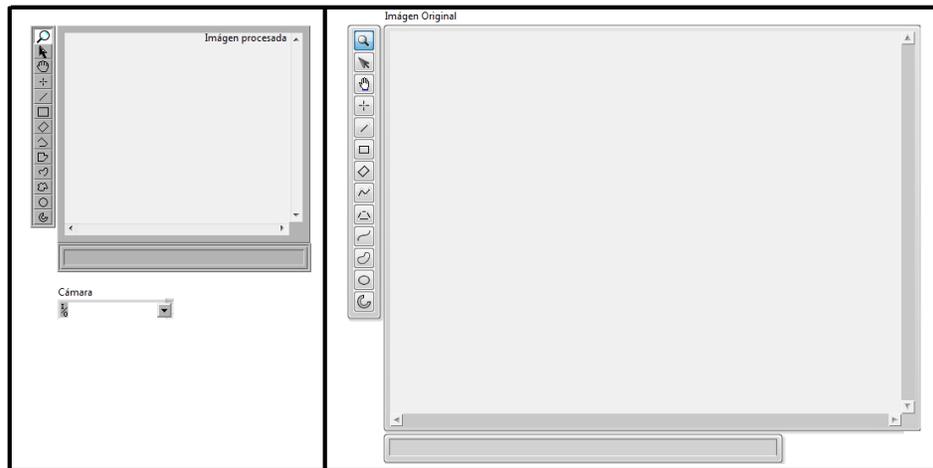


Figura 7.13. Para manipular la cámara iSlim 321R se hace uso de las herramientas de NI-IMAQdx de LabVIEW.

El algoritmo para manipular la cámara y leer las imágenes consiste en configurar la cámara, activar el modo grabación de la iSlim 321R, se procesa la imagen para mejorarla y detectar las piezas y finalmente se muestra la imagen procesada y la original, en la figura 7.14 se muestra el diagrama de flujo de esta etapa.

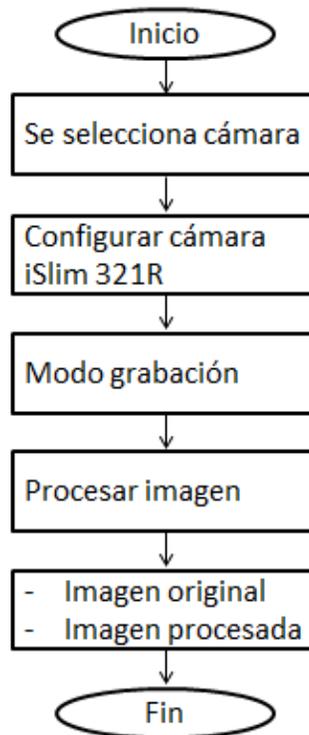


Figura 7.14. Diagrama de flujo del algoritmo de detección de piezas a pesar utilizando visión con LabVIEW.

7.5 Sistema de Iluminación

La iluminación en un sistema de visión es una parte importante para que la aplicación funcione de forma correcta y sea capaz de detectar y resaltar detalles fundamentales en los elementos a detectar. Para la presente aplicación se utilizó como sistemas de iluminación dos posibles fuentes de luz que pueden trabajar de forma independiente o en conjunto para resaltar ciertas características de las piezas a detectar. Una de las fuentes de iluminación es la luz blanca de las lámparas utilizadas para alumbrar el laboratorio de crecimiento de cristales por LPE. La detección de las piezas a pesar bajo esta iluminación, resultó ser bastante eficiente ya que se pueden detectar una gran variedad de formas y pesos de las piezas medidas, en la figura 7.15 se muestra una imagen adquirida con este tipo de luz de una serie de piezas pesadas en la balanza analítica del laboratorio de crecimiento de cristales, [20, 30, 38, 40].

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

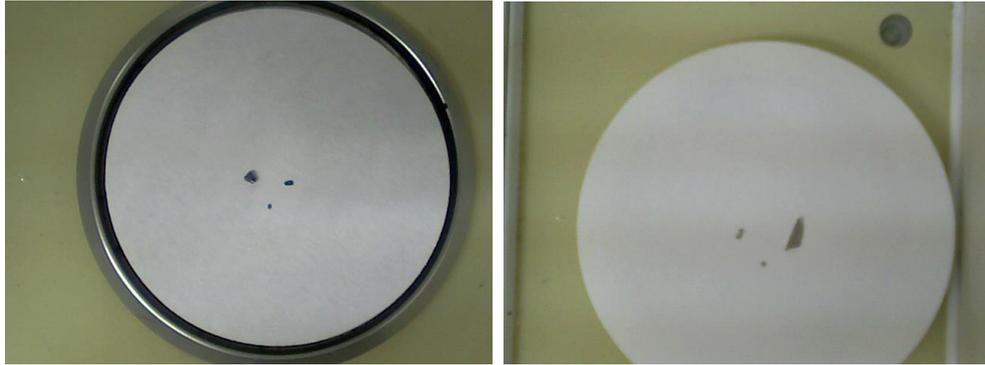


Figura 7.15. Imágenes tomadas de piezas pesadas cuya fuente de iluminación son las lámparas para iluminar el laboratorio.

Además de esta posible fuente de iluminación se diseñó una fuente adicional basada en tecnología LED de luz blanca de alta luminosidad. Esta fuente de luz se puede añadir como una herramienta auxiliar para la iluminación de la zona de interés por parte del sistema de visión y procesamiento de imágenes. En la figura 7.16 se muestra la tarjeta de iluminación desarrollada para la presente aplicación.

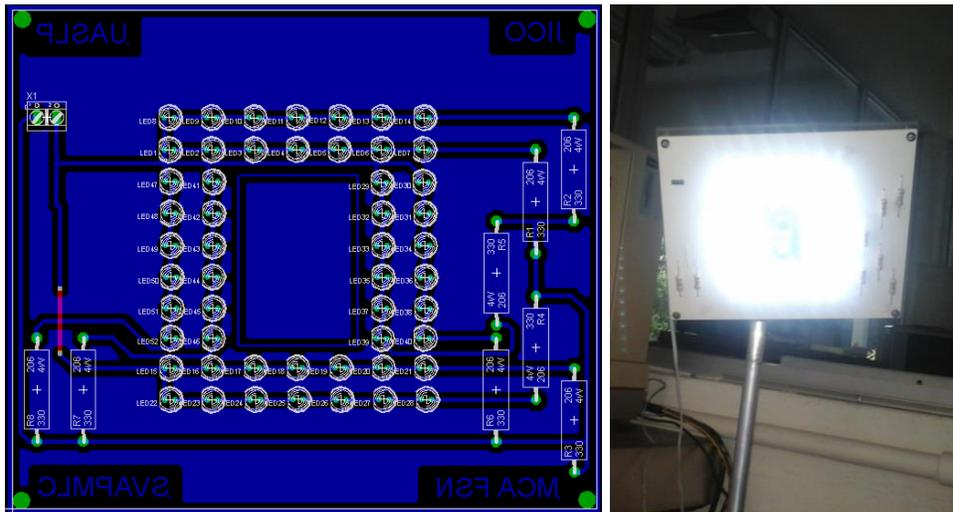


Figura 7.16. Sistema de iluminación diseñado para ser utilizado en el sistema de visión para la detección de piezas utilizadas en crecimiento de cristales por LPE.

En la figura 7.17 se muestran algunas imágenes tomadas con este tipo de iluminación, los LED's que se utilizan tienen las siguientes características: voltaje de alimentación de 3.2 Volts, iluminación color blanco, tamaño de 5 mm, corriente de 100 mA, potencia de 400 mW y luminosidad de 7000 mcd.

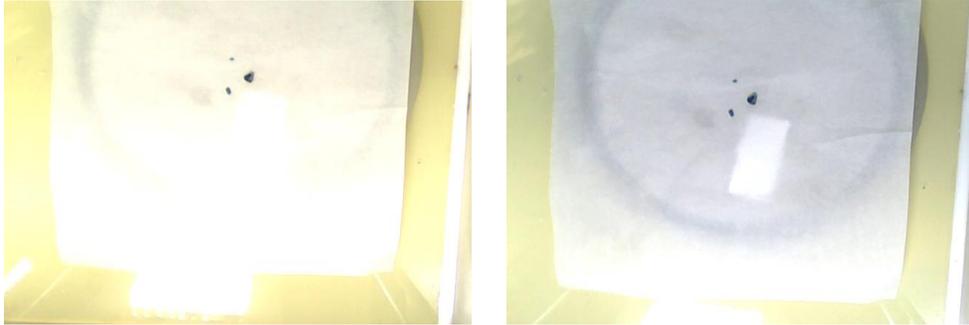


Figura 7.17. Imágenes tomadas de piezas pesadas cuya fuente de iluminación es luz LED, la tarjeta elaborada en las instalaciones del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica IICO en el laboratorio de circuitos impresos.

7.6 Técnicas de Conteo y Combinaciones

Es de vital importancia para el algoritmo de selección de piezas que están en el rango de peso deseado reconocer tres elementos esenciales para lograr esta tarea, estos son:

- El número de piezas que se han pesado, es muy importante porque gracias a esta variable el algoritmo determinara el momento en que debe de dejar de adquirir datos, enumerar las piezas detectadas en la imagen tomada por el sistema de visión y conocer el número máximo de combinaciones que puede realizar con los diversos pesos adquiridos a través de la balanza analítica, estos pesos se almacenan en un arreglo de datos tipo flotante.
- El número de piezas máximo que se deben usar para el crecimiento epitaxial, el usuario puede elegir entre 1, 2, 3 y 4 piezas a ser seleccionadas por el algoritmo de determinación del peso deseado, utilizando esta variable y la anterior se logra determinar todas las combinaciones posibles de los pesos medios de cada una de las piezas pesadas, aquellas piezas cuya combinación de peso esté dentro del rango de peso permitido serán resaltadas por el software indicándole al usuario que son las indicadas para ser utilizadas en el experimento de LPE.
- Las combinaciones a tomar en cuenta por el algoritmo de pesaje sin que exista algún tipo de repetición de los datos o pesos combinados, esto permite obtener una mayor exactitud por parte del sistema de visión y reduce el error en el peso deseado acercándose lo más posible al peso ideal o deseado. El error máximo permitido por parte del algoritmo es de $\pm 2\%$ respecto al peso indicado por parte del usuario al programa de visión desarrollado en LabVIEW.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

Para calcular el número de combinaciones posibles a realizar con el peso de las diversas piezas pesadas se hace uso de la fórmula siguiente:

$$(7.2) \quad C_k^n = \binom{n}{k} = \frac{(n!)}{(n-k)!k!}$$

- ✓ C es el número de combinaciones posibles de tamaño k, estas combinaciones de peso son almacenadas en un arreglo de datos en LabVIEW.
- ✓ n es el número de piezas a pesar por parte del usuario.
- ✓ k es el número de piezas a ser utilizadas para el peso deseado.

Para realizar el cálculo porcentual del error en el peso obtenido por el algoritmo de pesaje respecto al peso deseado por el usuario la fórmula utilizada es la siguiente:

$$(7.3) \quad E = \frac{|PD - PO|}{PO} \times 100$$

- ✓ E es el error porcentual del sistema de visión para determinar las piezas a ser utilizadas para el experimento.
- ✓ PD es el peso deseado que determina el usuario.
- ✓ PO es el peso obtenido por el algoritmo de detección del peso.

Para determinar el rango de peso permitido se utilizan la fórmulas siguientes.

$$(7.4) \quad Max = \left(PD \times \frac{Rp}{100} \right) + PD$$

- ✓ M_{ax} es el peso máximo permitido.
- ✓ PD es el peso deseado.
- ✓ R_p es el error en el peso a medir.

$$(7.5) \quad Min = \left(PD \times \frac{Rp}{100} \right) - PD$$

- ✓ M_{in} es el peso mínimo permitido.
- ✓ PD es el peso deseado.
- ✓ R_p es el error en el peso a medir.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

Para realizar estas operaciones en el programa implementado para la determinación de las piezas a seleccionar se utilizaron las herramientas de Probabilidad y Estadística que se encuentran en la sección de Matemáticas de la paleta de funciones del diagrama de bloques de LabVIEW, esto se muestra en la figura 7.18.

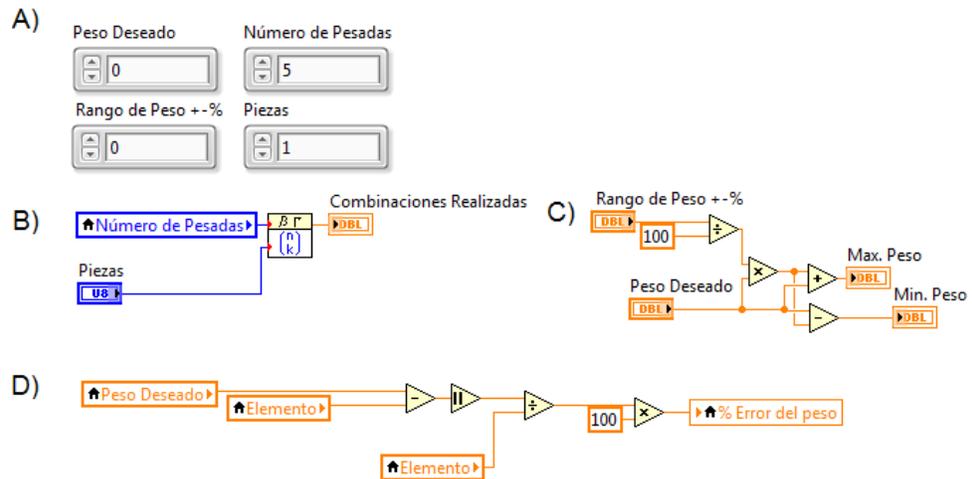


Figura 7.18. La parte A) de la figura ilustra las variables necesarias para realizar las combinaciones del algoritmo, la parte B) calcula las combinaciones a realizar, la figura C) muestra cómo se calculan los rangos permitidos y en la parte D) se muestra el cálculo del error en el pesaje.

7.7 Algoritmo de Pesaje

Este algoritmo implementado consiste en el manejo de índices de una serie de arreglos para ir formando todas las combinaciones de pesos posibles, estas relaciones de peso se almacenan en otro arreglo el cual posteriormente se comparará con el peso deseado de tres formas diferentes de tal manera que se le indique al usuario aquellas piezas que le conviene utilizar. En la imagen 7.19 se muestra el arreglo donde se almacenan los pesos de cada una de las piezas medidas.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

1.- Peso deseado
2.- Número de pesadas
3.- Cantidad de Piezas
4.- Rango de peso
5.- Seleccionar cámara
6.- Seleccionar puerto de balanza
7.- Verificar posición de la cámara

Peso Deseado: 0 Número de Pesadas: 5
Rango de Peso +- %: 0 Piezas: 1

Peso Obtenido: 0 Balanza: 0
% Error del peso: 0 Número de Piezas: 0

Min. Peso: 0 Max. Peso: 0
Combinaciones Realizadas: 1 Iteraciones: 0

Piezas Pesadas (gramos): 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0

Figura 7.19. Cada uno de los pesos tomados se almacenan en el arreglo de datos llamado “Piezas Pesadas”, además el usuario define el peso deseado, número de pesadas, piezas y rango de peso. El programa calcula y muestra el peso obtenido, el error, combinaciones realizadas, número de iteraciones de las piezas pesadas, el peso individual adquirido por medio de la balanza así como los rangos de peso máximo y mínimo permitidos.

Existen tres formas diferentes para determinar si el peso de las piezas es igual o está en rango al peso deseado:

- **Peso igual:** la primera de ellas consiste en comparar directamente cada uno de los valores leídos con el peso ideal, si este es igual en ese momento termina el algoritmo de pesaje, hay que indicar que este sería el caso ideal, si esto no sucede se procede a realizar el siguiente caso.
- **Peso en rango:** la segunda de las opciones consiste en encontrar alguna combinación de peso que se encuentre dentro del rango permitido de peso, esta opción es la más viable ya que por lo general durante la realización de esta parte del crecimiento de cristales el usuario lo que obtiene es un peso que esté en rango al peso deseado.
- **Peso con mínimo error:** si el programa no encuentra un peso igual o en rango al deseado dentro de todas las combinaciones posibles de peso, le indica al usuario aquella combinación cuyo error es el más pequeño.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

Una vez que el programa elige la piezas le indica al usuario el peso de las piezas elegidas esto se observa en la figura 7.20, hay que indicar que el programa está diseñado para elegir una combinación de una, dos, tres o cuatro piezas cuyos pesos se acercan al indicado.

Primer elemento	Tercer elemento
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Segundo elemento	Cuarto elemento
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Figura 7.20. Una vez que el algoritmo determina aquellas piezas cuya combinación se acerca al valor indicado, el programa le señala al usuario por medio de las casillas los elementos que se pueden utilizar.

El diagrama de flujo del programa implementado para resolver el presente algoritmo de pesaje se muestra a continuación:

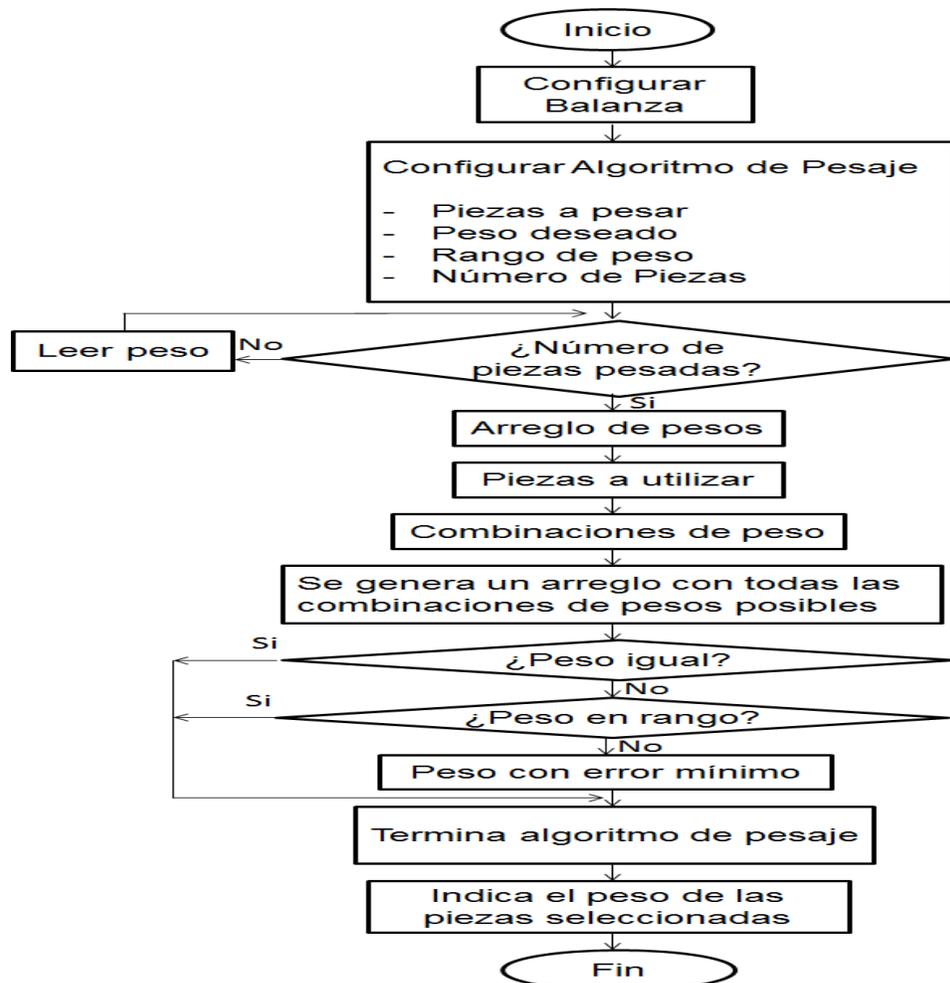


Figura 7.21. Diagrama de flujo del algoritmo de determinación de las piezas cuyo peso está en rango con el deseado.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

El algoritmo consiste de los siguientes pasos:

- ✓ Se configura la comunicación serie entre la PC y la balanza analítica para tomar cada uno de los pesos de las piezas. Se indican los parámetros de entrada necesarios para el algoritmo, es decir, peso deseado, piezas y rango.
- ✓ Se adquiere el peso de cada una de las piezas y se obtiene el número de combinaciones posibles de pesos. Se realizan todas las combinaciones posibles de acuerdo a la tabla siguiente en función de las piezas a elegir:

Piezas a tomar	Expresión utilizada
1	$Suma = k_{i=0}^n$
2	$Suma = k_{i=0}^{n-1} + k_{j=1}^n$
3	$Suma = k_{i=0}^{n-2} + k_{j=1}^{n-1} + k_{l=2}^n$
4	$Suma = k_{i=0}^{n-3} + k_{j=1}^{n-2} + k_{l=2}^{n-1} + k_{m=3}^n$

Tabla 7.1. Expresiones utilizadas para el manejo de índices de los arreglos que contienen los pesos correspondientes a cada pieza.

Hay que mencionar que estas expresiones se utilizan en conjunto con la ecuación 7.2 y estructuras if – if...else anidadas en un ciclo while, todas estas herramientas ayudan a determinar todas las combinaciones de peso posible, las variables utilizadas en estas expresiones y estructuras se muestran en la tabla 7.2.

Variable	Representación
Suma	Suma de pesos de tamaño r (r=1,2,3,4,)
k	Peso de cada pieza medida
i, j, l, m	Índices de los arreglos que contienen los pesos
n	Número de pesadas a realizar

Tabla 7.2. Variables utilizadas en las expresiones para obtener las combinaciones de peso posibles.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

- ✓ Buscar el peso que sea igual al deseado.
- ✓ Buscar aquel valor que este en rango con los pesos máximo y mínimo permitido.
- ✓ Determinar aquella combinación de peso cuyo error sea menor al peso ideal.
- ✓ Indicar al usuario el peso de las piezas que puede utilizar en el experimento.

En la figura 7.22 se muestra una parte del código implementado en LabVIEW para realizar las tareas antes mencionadas.

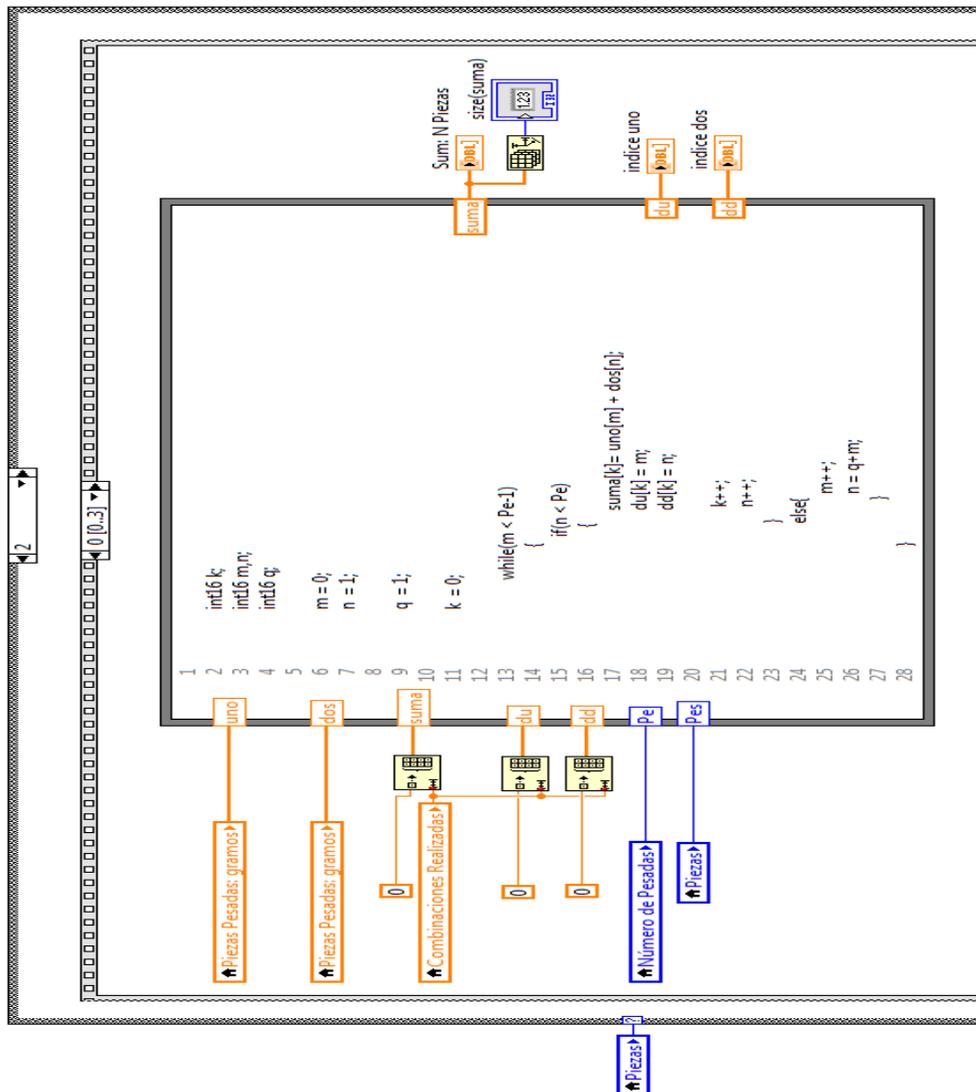


Figura 7.22. Código implementado en LabVIEW para obtener todas las combinaciones de pesos.

7.8 Algoritmo de Detección de Piezas

La detección de las piezas pesadas es una tarea complicada debido a su reducido tamaño y peso, por lo que se requiere un procesamiento de imágenes óptimo para lograr su adecuada detección. Los pasos para detectar cada una de las piezas pesadas son los siguientes:

- Colocar base en la balanza, esto es necesario ya que el platillo donde se colocan las piezas a pesar es del mismo color de ellas, por lo que es de vital importancia diferenciar entre el fondo de la imagen y las piezas a utilizar.
- Sistema de iluminación adecuado, como se mencionó en la sección 7.5 la iluminación en una aplicación de visión es muy importante ya que de esto depende la calidad de la imagen adquirida y las características que se desean resaltar de las piezas que se quieren digitalizar en una imagen, para esta aplicación basta con la iluminación del laboratorio y en caso de ser necesario se hace uso de la iluminación auxiliar que se diseñó para esta aplicación.
- Es necesario definir tres características de configuración de la cámara muy importantes en la adquisición de imágenes:
 - a) Resolución del sistema, es decir, el objeto más pequeño que es capaz de detectar. Para nuestra aplicación el objeto más pequeño a medir tiene un peso aproximado de 0.5 mg.
 - b) Distancia de trabajo que consiste en la longitud óptima en línea entre la lente de la cámara y el objeto bajo inspección, en nuestra aplicación esta distancia no es mayor a 30 cm.
 - c) El campo de visión que consiste en el área de trabajo que la lente de la cámara puede captar, en este desarrollo el campo de visión consiste del área del platillo de la balanza donde se deposita la pieza a pesar.
- Se configura la manipulación de la cámara por parte de LabVIEW a través de los NI-IMAQdx.
- Se inicia el programa de adquisición de imágenes desarrollado en LabVIEW junto a las herramientas de NI-Vision.
- Se procesa la imagen para detectar las piezas y enumerarlas, se hace uso de herramientas de NI Vision Assistant para realizar estas tareas.
- Se despliega la imagen que muestra aquellas piezas que el usuario debe de utilizar para realizar el crecimiento por LPE.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

En la figura 7.23 se muestra el diagrama de bloques de los pasos que se realizar para detectar a cada una de las piezas pesadas en el algoritmo de pesaje.

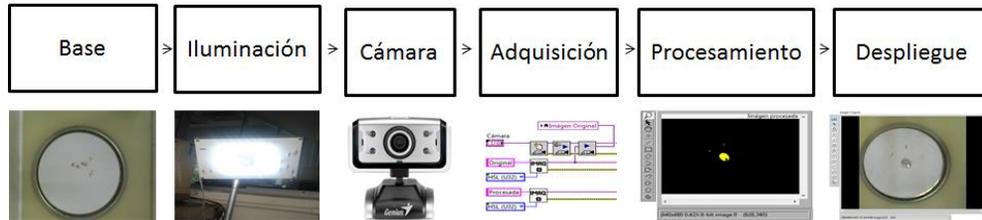


Figura 7.23. Diagrama de bloques utilizado para detectar una pieza a pesar.

Para adquirir la imagen de cada pieza se realizan siguientes pasos:

- Se inicia una Session In VISA en donde se selecciona la cámara a utilizar.
- Se cargan las características de la cámara utilizando IMAQdx Open Camera.vi.
- Se configura el modo de adquisición continua usando IMAQdx Configure Grab.vi.
- Una vez hechos los pasos anteriores se ejecuta el IMAQdx Grab.vi que adquiere y muestra la imagen actual.
- Una vez que se procesa la imagen y se indican las piezas a usar termina el programa y es necesario cerrar la Session In Visa y cerrar las características cargadas por el Open Camera.vi esto se hace con IMAQdx Close Camera.vi.

En la figura 7.24 se muestra el diagrama de bloques de que se implementa para adquirir las imágenes de las piezas pesadas.

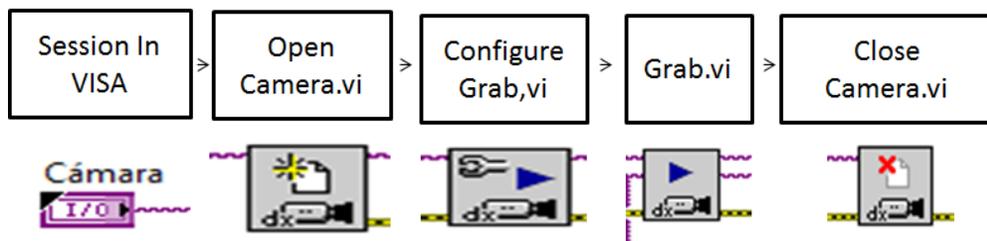


Figura 7.24. Diagrama de bloques utilizado para adquirir las imágenes de las piezas pesadas.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

Una vez que se tiene la imagen es necesario mejorarla, eliminar aquello que no es de interés para el análisis, procesarla y mostrar la pieza pesada de forma digital, los pasos para realizar este algoritmo de detección de piezas son los siguientes:

- La imagen adquirida por la cámara es rotada 270° esto para hacer que la imagen real y la imagen digitalizada coincidan, ya que por razones de diseño mecánico la cámara adquiere la imagen rotada en 270° respecto a la imagen real.
- Una vez rotada la imagen está lista para ser procesada, en primer lugar se extrae uno de los planos de la imagen para convertirla en escala de grises, el plano utilizado es el de luminosidad (plano L de la imagen en formato HSL).
- Inmediatamente se aplica un filtro de convolución a la imagen en escala de grises, con esto se desea resaltar características de luminosidad de las piezas a detectar y poder diferenciarlas del fondo de la imagen.
- Después la imagen es binarizada, esto consiste en cambiar la imagen a cero y unos, en donde un "0" corresponde a un pixel del fondo de la imagen y un "1" a un pixel de la pieza detectada.
- Se define una región de interés de tal manera que aquellas zonas que no son importantes para el análisis se eliminen dejando solo presentes las que realmente interesan.
- Se aplica una función morfológica en el manejo de pixeles que consisten en rellenar huecos en las imágenes detectadas.
- Se remueve posible ruido de la imagen binaria.
- Se aplica una función de análisis de imágenes que devuelve características de aquellas piezas detectadas, tal como área, perímetro, centro de masa, coordenadas xy, todo esto en pixeles.

En la figura 7.25 se muestra el diagrama a bloques del algoritmo de detección de piezas pesadas.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

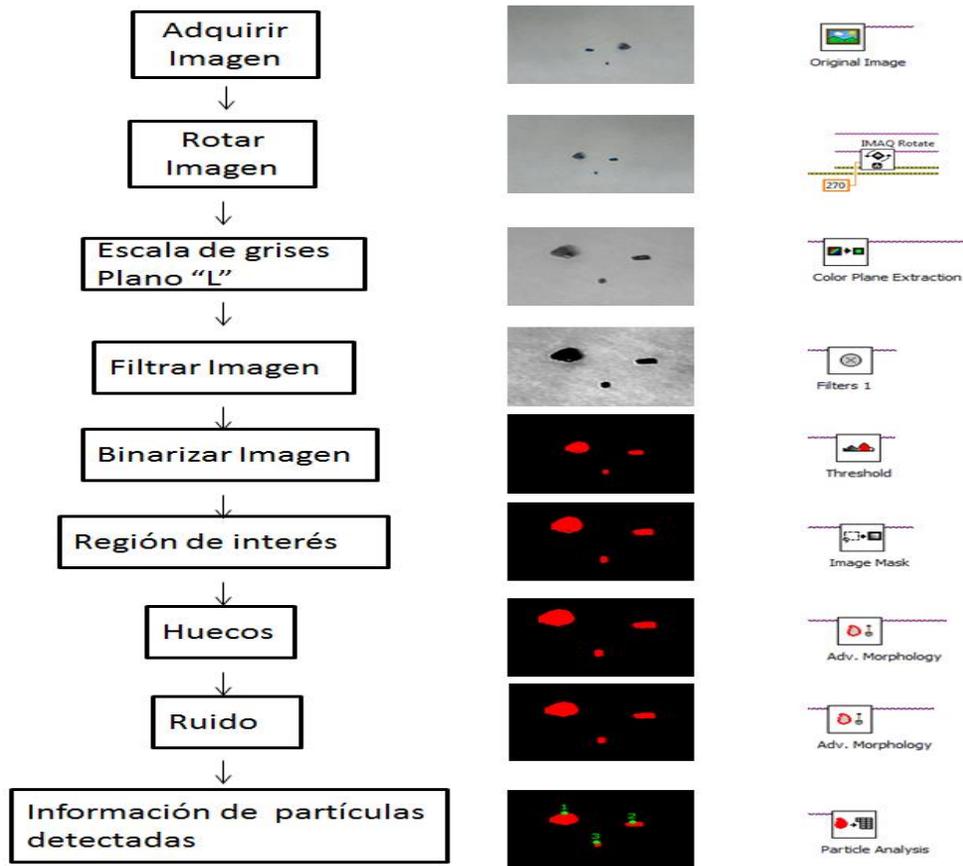


Figura 7.25. Diagrama de bloques utilizado para detectar las piezas pesadas.

A todo este proceso se le conoce como "análisis de partículas", este consiste en recopilar información de las partículas presentes en una imagen. A una región continua de píxeles que son distintos de "0" se le va a conocer como "partícula". Para poder detectar estas partículas de una imagen es necesario utilizar imágenes en escala de grises binarizada. Aquellos píxeles que son igual a cero se consideran como parte del fondo de la imagen a procesar. El "análisis de partículas" es utilizado para detectar diversas formas en una imagen permitiendo por ejemplo detectar imperfecciones en las soldaduras de tarjetas electrónicas, defectos en obleas de silicio y detectar objetos en sistemas de control de movimiento.

Además de este procesamiento se aplican tres pasos más para detectar de forma precisa cada una de las piezas pesadas, estos son:

- Una operación AND sobre las imágenes original y procesada esto con el afán de poder detectar piezas que se encuentran muy cercanas entre sí y poder distinguir a cada una de ellas.
- Etiqueta y distinción de las partículas detectadas.
- Separación de las partículas detectadas.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

El resultado de aplicar estas operaciones se muestra en la figura 7.26, en donde se puede apreciar como las imágenes son separadas y etiquetadas a través de diferentes colores donde cada uno representa a cada pieza detectada.

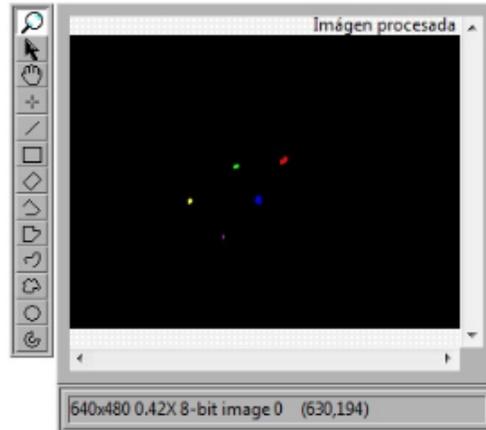


Figura 7.26. Imagen resultante después de aplicar las funciones AND, etiquetado y separación.

Finalmente después de realizar todos los pasos antes indicados se enumeran cada una de las piezas localizadas por medio de los pasos siguientes:

- Se obtiene un arreglo bidimensional de las coordenadas “xy” de las piezas detectadas, estos valores están dados en píxeles.
- Se separan los datos “x” y “y” haciendo uso de una función index array dentro de un ciclo for.
- Cada dato de cada pieza, conforme estos aparecen, se almacenan en un arreglo en donde se concatenaran con el valor de una variable que se incrementa en cada ocasión que una pieza es detectada.
- Se produce una etiqueta de enumeración para identificar en orden a cada pieza que es colocada en el platillo de la balanza analítica conforme son colocadas para ser pesadas.

El resultado de este proceso se muestra en las imágenes de la figura 7.27, hay que mencionar que durante la realización de las pruebas se llegó a colocar hasta 30 piezas en el platillo de la balanza y el sistema de visión las reconoció sin ningún problema, además las piezas de menor y mayor peso que se utilizaron y que fueron detectadas por el sistema de visión fueron de 0.5 mg y 2.1 gramos respectivamente.

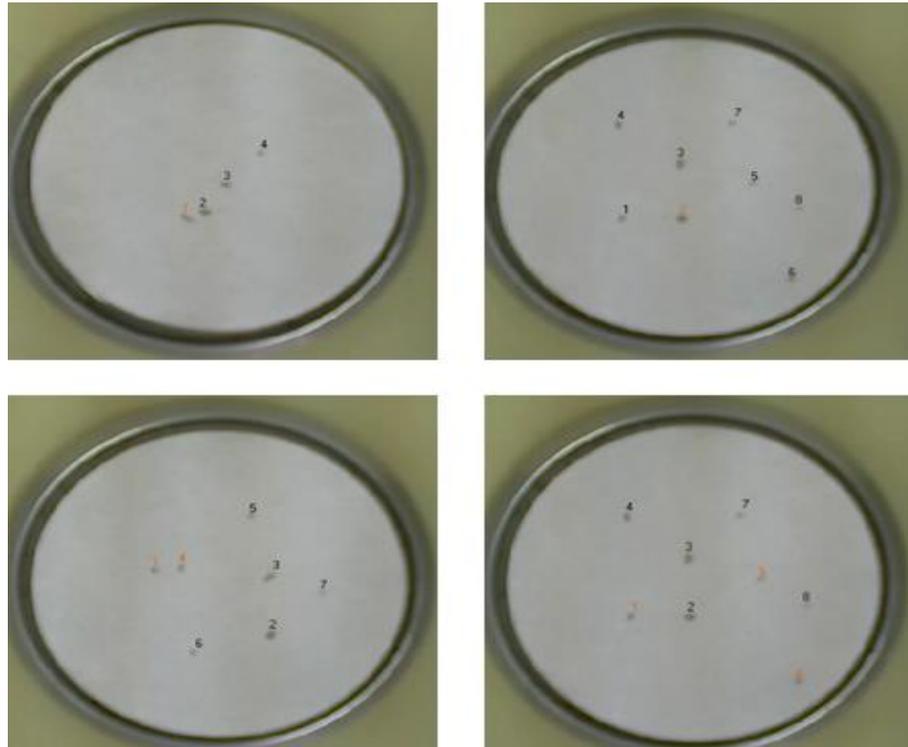


Figura 7.27. Numeración de las imágenes pesadas y detectadas por el sistema de visión implementado para semi - automatizar el pesaje de los materiales utilizados en el experimento de LPE.

7.9 Sistema de Visión Implementado

De la unión de todas las herramientas mencionadas en las secciones anteriores se obtiene como resultado el sistema de visión para la detección semi-automatizada del pesaje de los materiales utilizados en el crecimiento de cristales por epitaxia en fase líquida. Este sistema se utiliza como una herramienta de apoyo por parte de los usuarios para determinar aquellas piezas que se utilizarán en el experimento epitaxial.

Esta aplicación se desarrolló utilizando hardware diseñado en las instalaciones del instituto, tal como el sistema de iluminación y la tarjeta de acoplamiento del puerto de comunicación USB de la PC y el puerto serie de la balanza analítica. Además se utiliza una cámara de adquisición de bajo costo así como la balanza analítica modelo OHAUS-AP110 que ya pertenecía al laboratorio de cristales del instituto. A nivel software se utilizaron las herramientas de NI Vision, LabVIEW, IMAQdx, NI Vision Assistant para realizar todo el procesamiento de las imágenes y detección de los objetos a medir.

El esquema del sistema de visión diseñado para realizar esta tarea se muestra en la figura 7.28.

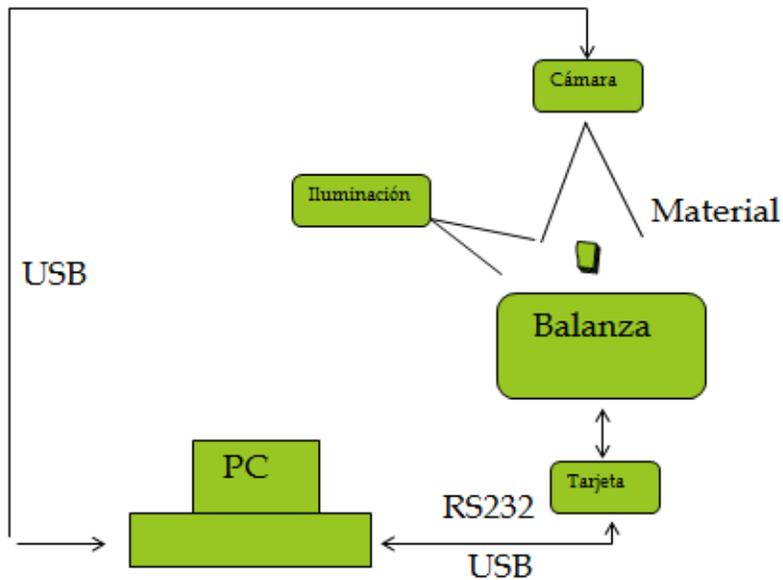


Figura 7.28. Sistema de visión diseñado para realizar el pesaje de los materiales utilizados en los experimentos por LPE basado en LabVIEW.

Los pasos generales utilizados en el sistema de visión son los siguientes:

- ✓ Colocar base.
- ✓ Sistema de iluminación.
- ✓ Cámara web en posición.
- ✓ Configurar adquisición de la imagen.
- ✓ Configurar balanza analítica.
- ✓ Definir características del pesaje (piezas, pesadas, error, rango de pesos).
- ✓ Iniciar modo grabación de la cámara.
- ✓ Tomar peso de cada pieza.
- ✓ Se genera un arreglo con todos los pesos de cada pieza.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

- ✓ Se rota la imagen original.
- ✓ Se procesa la imagen para detectar las piezas usadas (análisis de partículas).
- ✓ Se genera un arreglo con todas las posiciones "xy", las posiciones son medidas en pixeles de cada pieza pesada.
- ✓ Se implementan los pasos de separación y etiquetado de imágenes, y un arreglo con todas las posiciones "xy" en pixeles de cada pieza.
- ✓ Se generan todas las combinaciones posibles de pesos.
- ✓ Se implementa el algoritmo de detección de peso.
- ✓ Se enumeran todas las piezas de acuerdo al orden como se colocaron para ser pesadas.
- ✓ Se resaltan de color naranja aquellas que son las indicadas para realizar el crecimiento de cristales por LPE.
- ✓ Fin del programa

En la figura 7.29 se muestra el funcionamiento de este programa, las características de la prueba son las siguientes, se deseaba obtener un peso igual o cercano a 0.012 gramos, las piezas se seleccionarían de entre 8 piezas tomadas al azar, el error permitido es de 2%, el programa le permite al usuario elegir las piezas a utilizar, esto lo hace en función del error mínimo que se obtiene al seleccionar 1, 2, 3 o 4 de entre todas las piezas pesadas, los rangos de peso máximo y mínimo son respectivamente 0.01224 - 0.01176 gramos.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

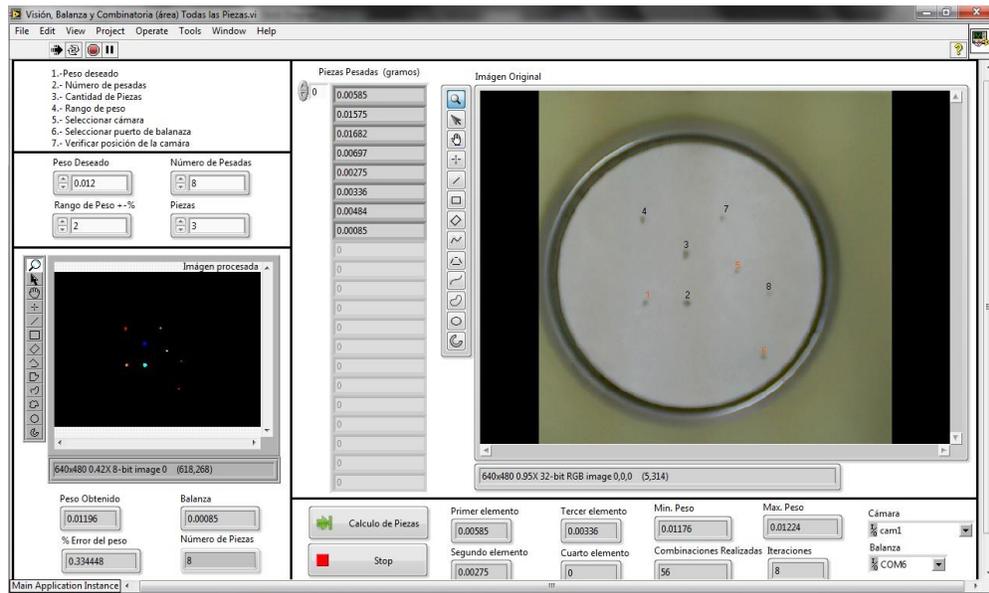


Figura 7.29. Ejemplo de funcionamiento del sistema de visión diseñado para realizar el pesaje de los materiales utilizados en los experimentos por LPE basado en LabVIEW.

Los resultados obtenidos al correr esta prueba fueron los siguientes:

“El error obtenido estuvo por debajo del 2% llegando apenas al 0.335%, el peso que se obtuvo fue de 0.01196 gramos y el número de piezas que arrojan este peso es de tres que son resaltadas en color naranja y que se indican como las piezas 1, 5, 6 cuyos pesos son 0.00585 gramos, 0.00275 gramos y 0.00336 gramos”.

Debemos mencionar que el tiempo aproximado para procesar las imágenes es por debajo de 1 segundo y el tiempo total que toma realizar todo el proceso es menor a 15 minutos, esto para pruebas de una hasta treinta pesadas. Para medir el tiempo de procesamiento se utiliza una herramienta de NI Vision Assistant llamada “Performance meter” que arroja el tiempo aproximado que tarda en realizarse el tratamiento y procesamiento de una imagen.

Para corroborar el correcto funcionamiento del sistema de visión se realizaron infinidad de pruebas bajo diferentes condiciones de iluminación, peso deseado, número de pesadas, piezas, error, rangos, en la mayoría de los casos se obtuvieron resultados satisfactorios, estos resultados y pruebas serán analizados en detalle en la sección 8.5 del capítulo 8.

Capítulo 7: Pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida del crecimiento

En la figura 7.30 se muestra el panel principal implementado en LabVIEW para el sistema de visión, este se divide en cuatro secciones, una de ellas referente a las características del pesaje (pesadas, error, rango, piezas), otra donde se muestra la imagen procesada y los resultados numéricos obtenidos (peso, error, iteraciones), la sección principal donde se muestra la imagen real tomada por la cámara web y en donde se marcan de color naranja las piezas que el programa indica que son las más adecuadas para hacer el crecimiento por LPE y la última sección que contiene los botones de paro y calculo así como el peso de las piezas seleccionadas.

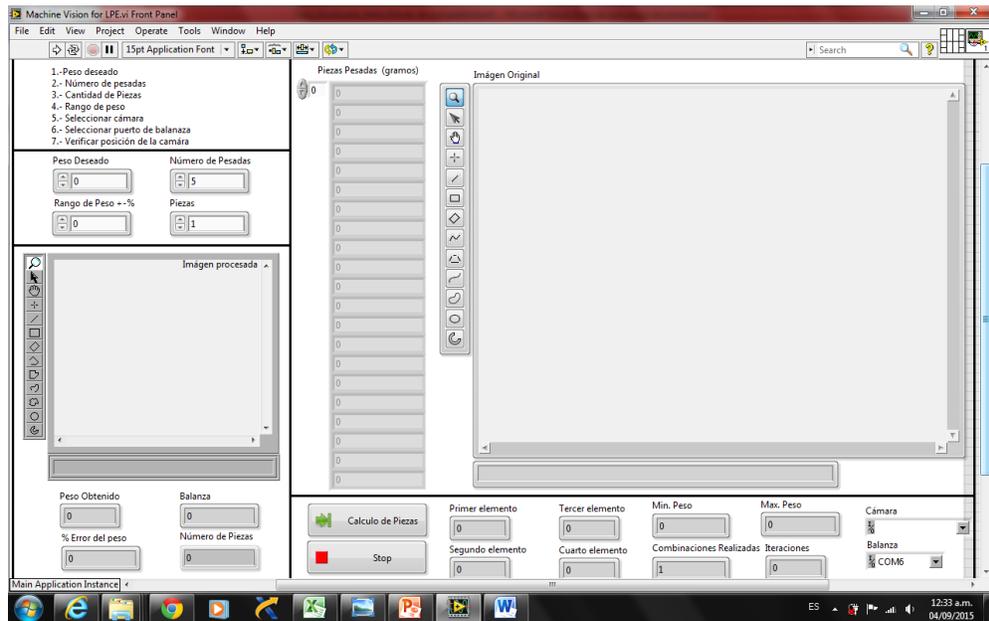


Figura 7.30. Panel de control del programa diseñado en LabVIEW para el sistema de visión implementado para realizar el pesaje de los materiales utilizados en los experimentos por LPE.

8

Resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos a partir de la implementación de cada una de las etapas anteriores.

Como se mencionó anteriormente al ir desarrollando cada una de las etapas se realizaban diversas pruebas tanto a nivel hardware como a nivel software para validar el correcto funcionamiento de la electrónica e instrumentación diseñada además de depurar cada uno de los programas tanto de la PC como de los microcontroladores utilizados.

Una vez probados los sistemas electrónicos, mecánicos y de programación se procedía a realizar diversos experimentos de crecimiento por LPE para validar los sistemas desarrollados y comprobar su eficiencia.

Hay que recordar que uno de los objetivos del trabajo de tesis es el de mejorar las características de los dispositivos crecidos por epitaxia en fase líquida. Tener un mayor control en los tiempos de crecimiento y el grosor de las capas epitaxiales crecidas. Garantizar la reproducibilidad de cada uno de los experimentos, todo esto a través de la disminución de los errores cometidos por el usuario por medio de la automatización de algunos de los procesos involucrados en la técnica de LPE.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las etapas inmiscuidas en el trabajo de tesis.

8.1 Control de Flujo de Gases

La automatización del flujo de gases del sistema de LPE se realizó con el fin de recaudar información sobre las variables físicas presentes a lo largo del crecimiento. Almacenar esta información para su posterior análisis y poder entender cómo es que afectan a la realización del experimento así como encontrar las condiciones óptimas para realizar el crecimiento epitaxial.

La figura 8.1 muestra un perfil de los datos recopilados durante la realización de algunas de las pruebas de funcionamiento del sistema de control de gases.

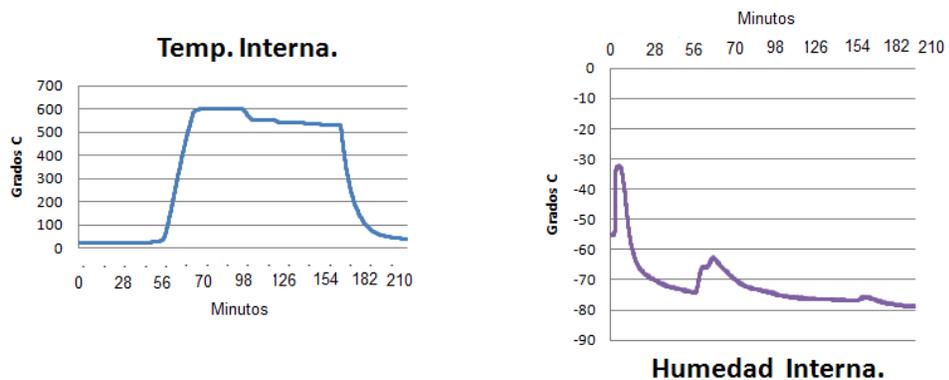


Figura 8.1. Perfil de humedad interna y la temperatura interna durante una prueba de funcionamiento del sistema de control de flujo de gases.

Podemos observar en la imagen como la humedad interna desciende drásticamente al inicio del experimento esto debido a la exposición del reactor al ambiente durante el proceso de deposición y colocación de las fases líquidas y solidas en el bote de grafito. Conforme transcurre el experimento y se realizan los vacíos y flujo de hidrógeno la humedad comienza a mejorar hasta alcanzar el valor de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ con este valor se hace factible el comenzar a calentar el sistema. Es importante mencionar que se alcanzaron valores de hasta $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ de humedad interna lo cual indica valores muy altos de pureza en el sistema. El segundo pico que se observa en la gráfica de humedad coincide con el momento en que inicia el calentamiento del sistema, el bote de grafito tiende a adherir en sus paredes partículas de oxígeno conforme se calienta el bote este comienza a liberar dichas partículas que serán arrastradas por el flujo constante de H_2 . Después de cierto tiempo la humedad se estabiliza y comienza a descender hasta valores de $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ tal como se puede observar en la gráfica de humedad, [31, 32].

En la figura 8.2 observamos perfiles de humedad interna, temperatura interna y humedad externa además de una imagen que muestra una sección transversal de un crecimiento realizado utilizando el sistema de control de flujo de gases, [31, 32].

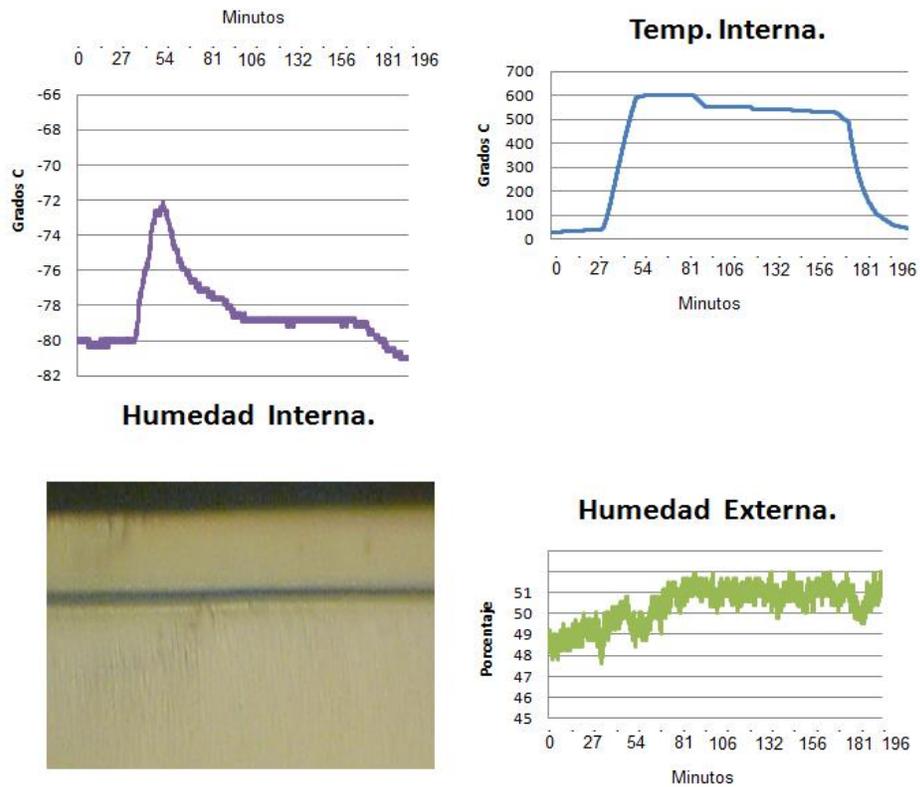


Figura 8.2. Comportamiento de la humedad interna, temperatura interna y humedad externa durante un crecimiento realizado con el sistema de control de flujo de gases.

En la figura 8.3 se muestra el comportamiento de las variables de humedad interna, temperatura interna, temperatura externa así como la imagen de otro crecimiento realizado al cual se le aplica el proceso de recocido. Con el proceso de recocido se pretende difundir las impurezas introducidas deliberadamente en una de las capas epitaxiales, [31, 32].

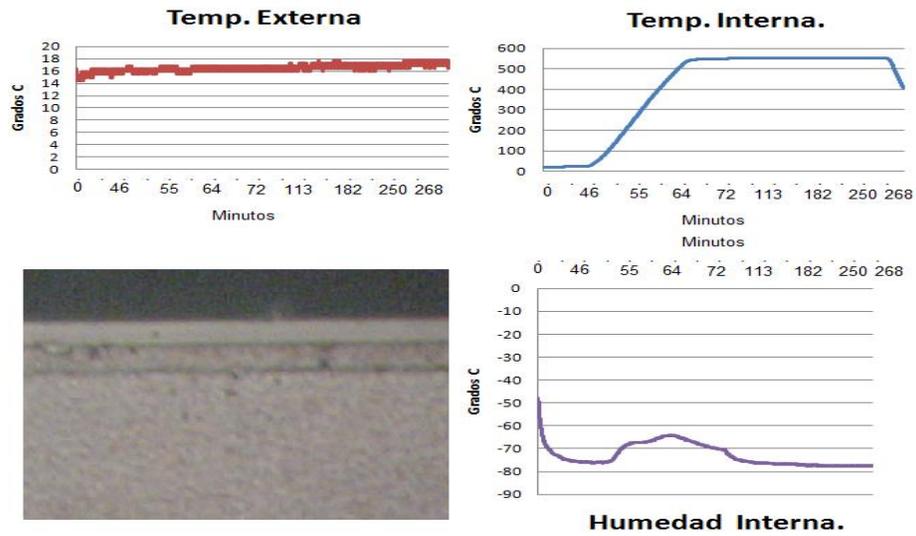


Figura 8.3. Comportamiento de la humedad interna, temperatura interna y temperatura externa durante el recocido de tres horas y media de una muestra.

8.2 Control de Régimen de Crecimiento

El programa de control del régimen de crecimiento permite al usuario predefinir el perfil o diagrama de temperatura bajo el cual se realizará el crecimiento así como realizar el proceso de recocido a las muestras obtenidas por LPE. En las siguientes imágenes se muestran algunos de los perfiles de los datos recopilados al aplicar diversos diagramas de temperatura durante algunos experimentos realizados, [31, 32].

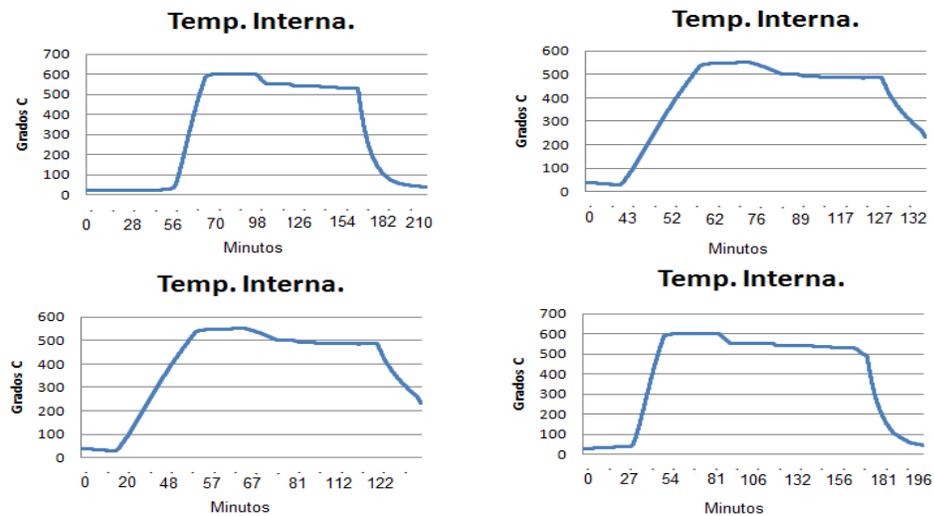


Figura 8.4. Diversos regímenes de crecimiento controlados desde el programa de LabVIEW.

El programa de LabVIEW permite al usuario definir los tiempos y temperaturas de disolución, sobresaturación y crecimiento. Así como crecimiento bajo una temperatura constante o variable. El usuario también cuenta con la capacidad para definir nuevos parámetros del PID para el control de temperatura así como modificar diversos parámetros del controlador de temperatura, [31, 32].

8.3 Deposición de la Fase Líquida Sobre Substratos

El automatizar estos movimientos es una gran aportación ya que se eliminaron por completo los saltos naturales y por lo tanto las líneas de meniscus en las capas crecidas cuando el operador realiza el movimiento durante el experimento. Al implementar esta automatización se pretende:

- Tiempos de crecimientos más cortos y mayor reproducibilidad de los experimentos
- Espesores de crecimientos epitaxiales más controlados
- Reducir ruidos mecánicos producidos por el operador

Debemos mencionar que se realizaron diversos crecimientos para comprobar el correcto funcionamiento del mecanismo de movimiento. Uno de los experimentos realizados consistió en lo siguiente: como sustrato se utilizó una oblea de arseniuro de galio (GaAs) y como solución líquida galio (Ga 0.074282 gr) y arseniuro de galio (GaAs 0.01998 gr). Con estos valores se determinó que la temperatura de puntos de liquidus es de 746°C (real 751°C). Se ejecutó todo el proceso de crecimiento, desde la determinación de los puntos de liquidus, pesaje de los materiales a crecer, vacío con las bombas jet y adsorción, flujo de hidrógeno y la implementación del diagrama de temperaturas en donde se sincronizó el programa de movimiento obteniendo resultados satisfactorios, en la figura 8.5 se muestra una imagen de la capa crecida comparándola con la imagen de un crecimiento realizado de forma manual. Se observa claramente como desaparecen las líneas de meniscus al utilizar el sistema de control de movimiento para la deposición de las fases líquidas sobre el sustrato, [33].

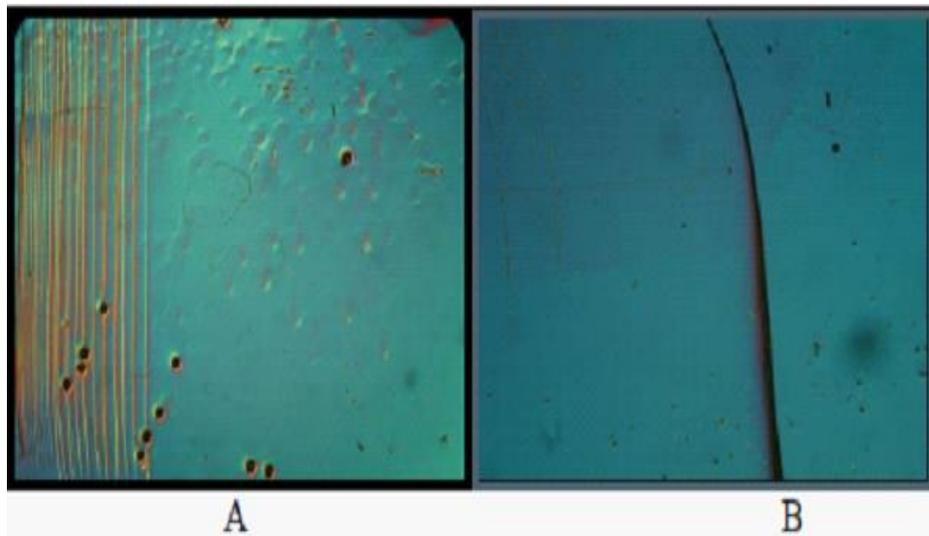


Figura 8.5. En la imagen 8.5 A se observa un crecimiento realizado de forma manual en el observamos líneas de meniscus en la capa crecida mientras que en la imagen 8.5 B se observa una capa crecida libre de líneas de meniscus utilizando el sistema automático de crecimiento.

En la figura 8.6 se muestran las capas epitaxiales crecidas haciendo uso del sistema de control de movimiento de la regleta del bote de grafito; este consistió en un dispositivo de dos capas, la solución de la primer capa está compuesta por 3.0039 gr de Ga sobresaturada con 0.0813 gr de GaAs crecidas sobre un sustrato de As, la segunda capa está compuesta por 3.0694 gr de Ga y sobresaturada con 0.0825 gr de GaAs esta segunda capa se dopó con 0.0011 gr de Zn. La temperatura de crecimiento de la primer capa fue de 750.5 grados Celsius mientras que para la segunda capa fue de 755.5 grados Celsius en ambos casos el tiempo de crecimiento fue de cuatro minutos, [33].

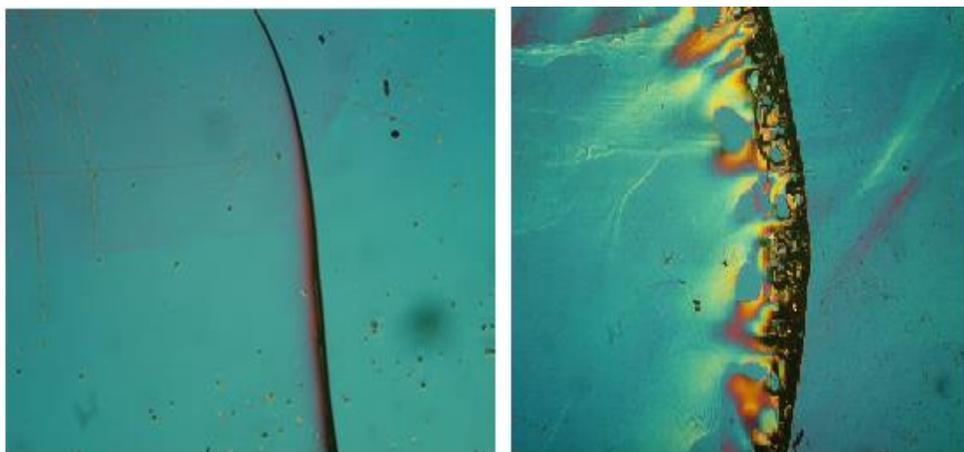


Figura 8.6. Crecimiento epitaxial de dos capas haciendo uso del control de movimiento del sistema de LPE.

El sistema puede ser utilizado no solo para crecer dispositivos de una capa se pueden crecer materiales de dos capas e incluso extender a multicapas de hasta 6 que es la capacidad con la que cuenta el bote de grafito. En la figura 8.7 se muestra el programa final implementado para crecer dispositivos multicapa. El programa de LabVIEW es un panel de control en donde el usuario define la posición, velocidad, aceleración y número de movimientos que se realizarán durante el experimento, toda esta información es transmitida por el puerto USB de la computadora hacia el Microcontrolador, [33].

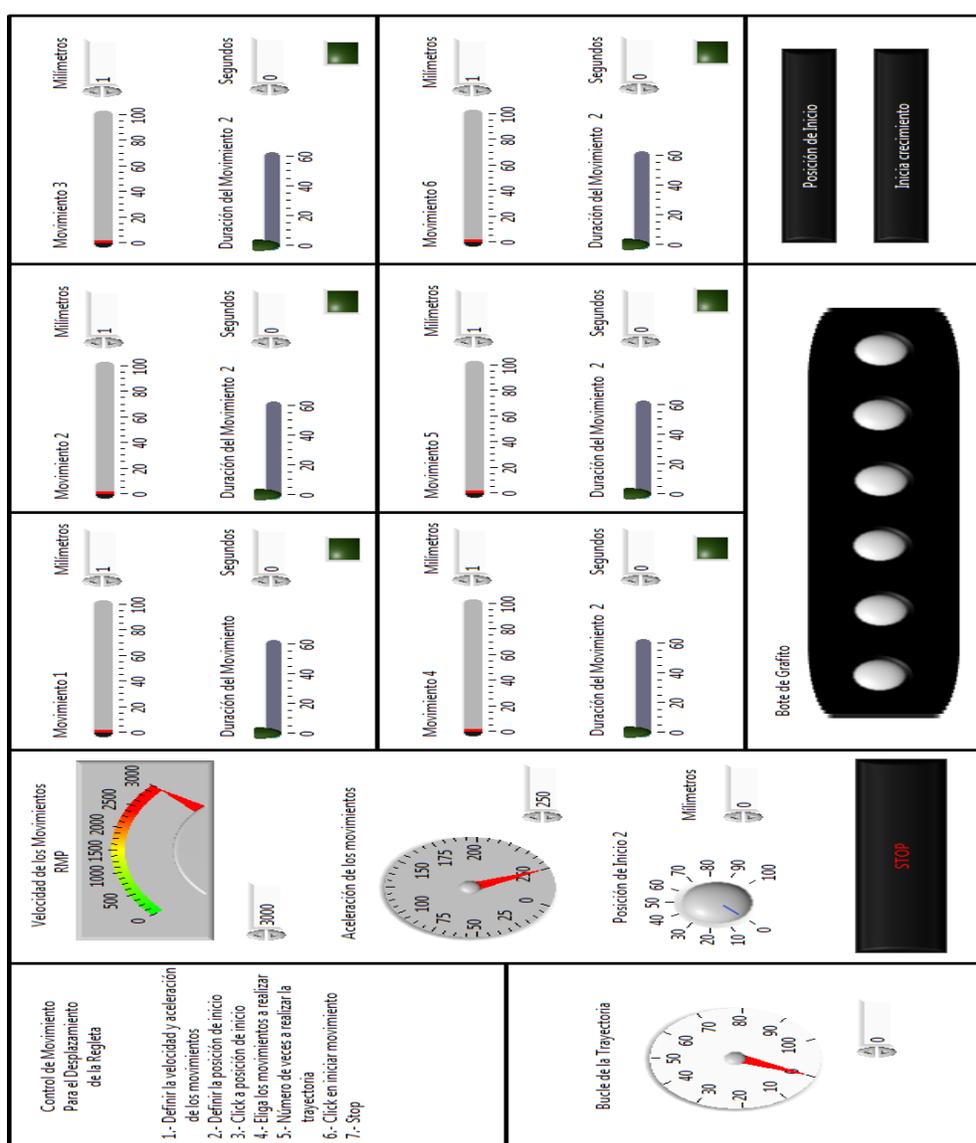


Figura 8.7. Programa final implementado en LabVIEW para realizar crecimientos epitaxiales multicapa.

8.4 Monitoreo de la Concentración de Hidrógeno

Se diseñaron módulos inalámbricos de detección de fugas de hidrógeno que son utilizados en el sistema de crecimiento de cristales por LPE. Estos dispositivos complementan las medidas de seguridad durante la realización de crecimientos epitaxiales en el laboratorio. Puesto que el sensor funciona a una temperatura de 240° y se calienta mediante un circuito en lazo abierto las variaciones en el ambiente de operación pueden afectar la respuesta del sensor por lo que se realizó un estudio de las variaciones en la salida del sensor en función del tiempo. En las siguientes imágenes se muestran algunas de las gráficas obtenidas de las lecturas adquiridas por el sensor de trazas de hidrógeno. Se realizaron pruebas durante varios días a lo largo de nueve horas para verificar el correcto funcionamiento del sensor así como la respuesta de este en ausencia de hidrógeno y en presencia de hidrógeno. Hay que mencionar que estas nueve horas de toma de lectura se realizaron en diferentes momentos, es decir, durante la mañana, la tarde y por la tarde-noche con el propósito de observar cómo podrían afectar los cambios de temperatura, humedad, presión, etc. dentro del laboratorio en las lecturas del sensor, [34].

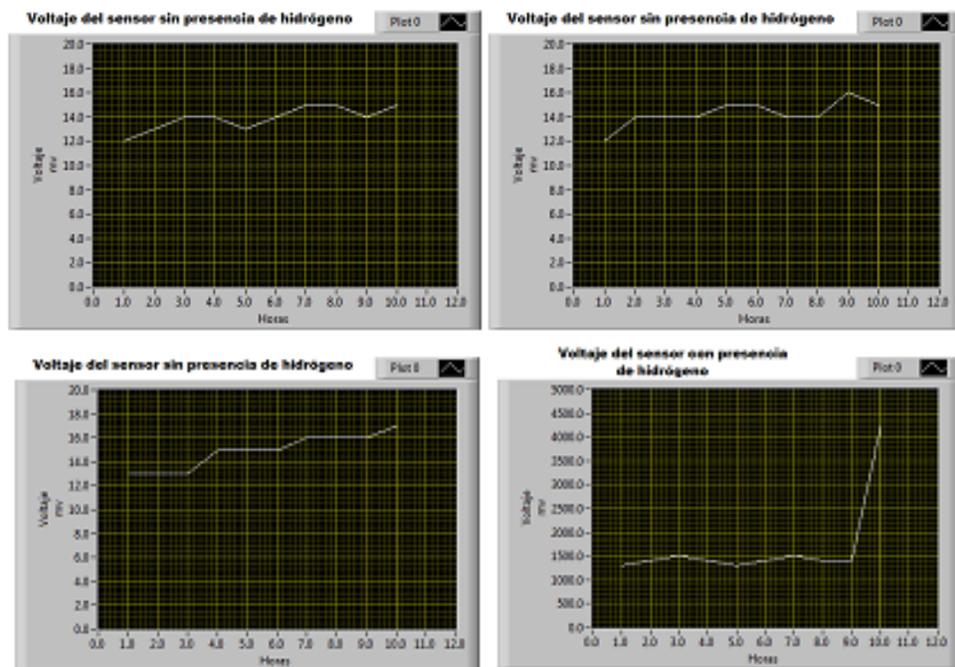


Figura 8.8. Lecturas obtenidas por el sensor durante nueve horas continuas de funcionamiento.

En la imagen de la izquierda parte superior de la figura 8.8 podemos observar el comportamiento del sensor tomando lecturas durante nueve horas seguidas a partir de las ocho de la mañana mientras que la imagen de la derecha corresponde a lecturas tomadas por la tarde comenzando a las doce del mediodía y terminando a las nueve de la noche.

Podemos observar que el funcionamiento del sensor es realmente estable, estas medidas se realizaron sin presencia de hidrógeno.

En la imagen de la izquierda parte inferior de la figura 8.8 podemos observar el comportamiento del sensor tomando lecturas durante nueve horas a partir de las doce del mediodía mientras que la imagen de la derecha corresponde a lecturas tomadas por la tarde-noche comenzando a las cinco de la tarde y terminando a la una de la mañana.

Las lecturas tomadas en la primer imagen también se realizaron sin presencia de hidrógeno, nuevamente se observa la estabilidad del sensor, mientras que las lecturas tomadas en la segunda imagen se realizaron primero sin presencia de hidrógeno y después justo cuando comenzaba la décima hora de lectura se puso al sensor en presencia de “forming gas” con un contenido de 5 % en volumen de Hidrógeno lo que provoco un cambio muy abrupto en la señal del sensor, [34].

El voltaje de salida típico del sensor es en el orden de milivolts y en presencia de hidrógeno cambia al orden de volts, esta prueba se realizó en varias ocasiones y el resultado fue el mismo, un cambio verdaderamente abrupto en la señal del sensor cuando existe hidrógeno en el ambiente, [34].

Ya se han realizado detecciones de fugas reales de hidrógeno en los sistemas de crecimiento por LPE utilizando las tarjetas detectoras. La detección exacta del punto de fuga se realizó acoplado una extensión en el sensor de hidrógeno de la tarjeta. Debido a esto se decidió diseñar una pequeña tarjeta portátil para detectar fugas de hidrógeno en cualquier punto del sistema de crecimiento por LPE, [34].

8.5 Pesaje de Materiales de la Fase Líquida

En esta sección se discutirán los resultados obtenidos al implementar el sistema de visión basado en LabVIEW para el pesaje de materiales de la fase líquida. Se realizaron diversas pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de visión, esto involucra desde la correcta detección de las piezas por parte del software, la numeración correcta de las piezas conforme se colocan en el platillo de la balanza analítica así como la obtención del peso indicado por el usuario.

A continuación se muestran una serie de tablas y gráficos obtenidos al realizar diversas pruebas de funcionamiento del programa de visión, la primer parte muestra los datos de 12 pruebas corridas con diversos pesos y pesadas, la segunda parte resultados totales de las pruebas realizadas y en la tercera parte los resultados por piezas a seleccionar.

En la tabla 8.1 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.01000 gramos seleccionando solo una pieza con un error deseado de 2%, En cada renglón se lista el número de total de piezas pesadas de las cuales se selecciona solo una, la de peso más cercano al deseado. Las piezas indicadas en cada renglón son diferentes es decir que se cambiaron en cada experimento. Este ejemplo es trivial pues en realidad nunca se requiere el peso exacto en una sola pieza sin embargo sirve para demostrar que la experiencia del usuario es muy importante para el éxito del proceso, si el usuario pesa piezas pesadas, todas tendrán un peso muy diferente al peso deseado y por lo tanto el error va a ser muy grande, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.01001 gramos con un error resultante de 0.099% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 8 pruebas de las cuales 6 fueron correctas con un error menor al 2% y 2 de las pruebas estuvieron por encima del error permitido. La figura 8.9 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas por debajo del 2% de error y por arriba de este valor.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.01000	2	0.01004	0.398	1
	4	0.01001	0.099	
	5	0.01003	0.299	
	6	0.00996	0.401	
	7	0.00895	11.7	
	8	0.01052	4.9	
Total de pruebas	9	0.00996	0.4016	
8	10	0.01003	0.299	

Tabla 8.1. Datos obtenidos al seleccionar una pieza de entre 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, y 10 piezas para obtener un peso de 0.01000 gramos. Se obtuvo un error del 0.099% que representa un peso de 0.010001 gramos.

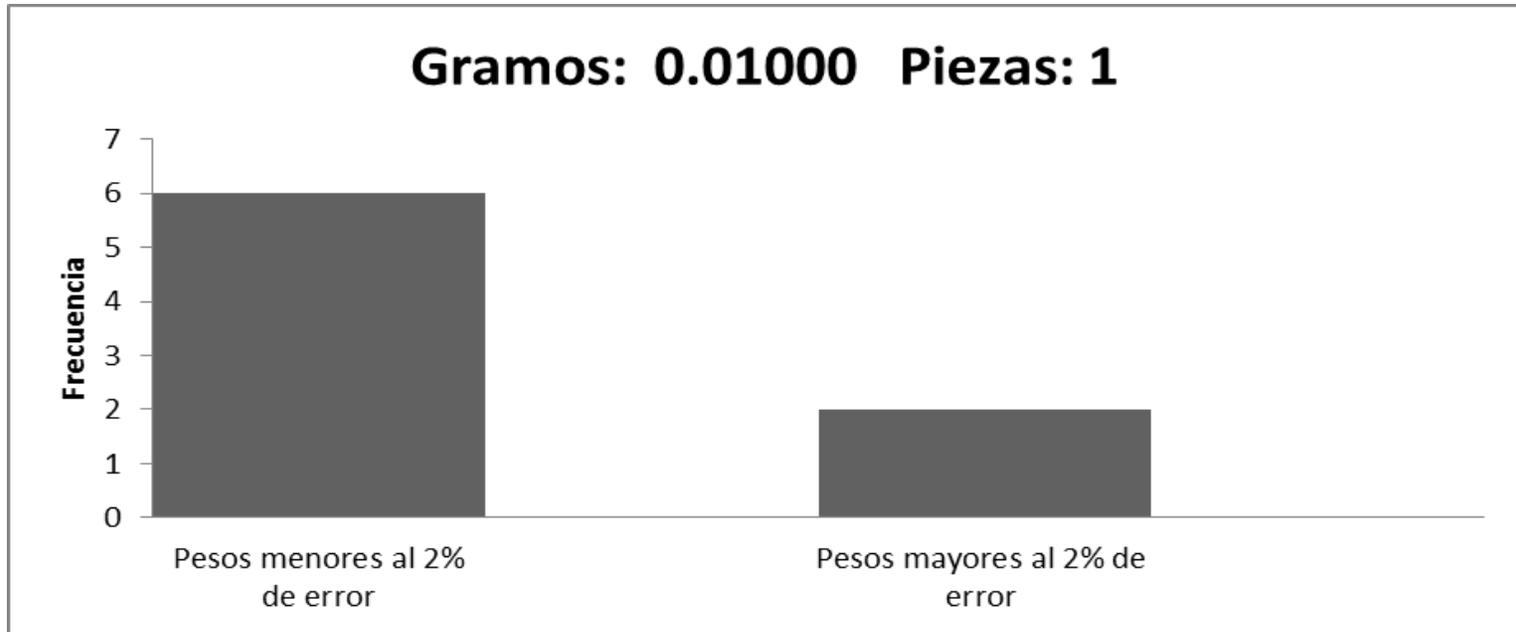


Figura 8.9. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar una pieza de entre 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, y 10 piezas para obtener un peso de 0.01000 gramos. Se obtuvo un error del 0.099% que representa un peso de 0.010001 gramos.

En la tabla 8.2 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.01000 gramos seleccionando dos piezas, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.01000 gramos con un error resultante de 0.0% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 8 pruebas de las cuales 5 estuvieron por debajo del error aceptado y 3 por encima del error permitido. La figura 8.10 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas correctas y erróneas. Es posible observar el efecto de escoger las piezas juiciosamente pues vemos en los dos últimos renglones que con 10 piezas se obtuvieron errores diferentes al cambiar el conjunto de las diez piezas usadas.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.01000	3	0.00957	6.7	2
	4	0.00958	4.38	
	5	0.01013	1.28	
	7	0.00986	1.42	
	8	0.01002	0.199	
	9	0.0081	23.45	
Total de pruebas	10	0.00999	0.1	
8	10	0.01000	0	

Tabla 8.2. Datos obtenidos al seleccionar 2 piezas de entre 3, 4, 5, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01000 gramos. Se obtuvo un error del 0.0% que representa un peso de 0.010000 gramos.

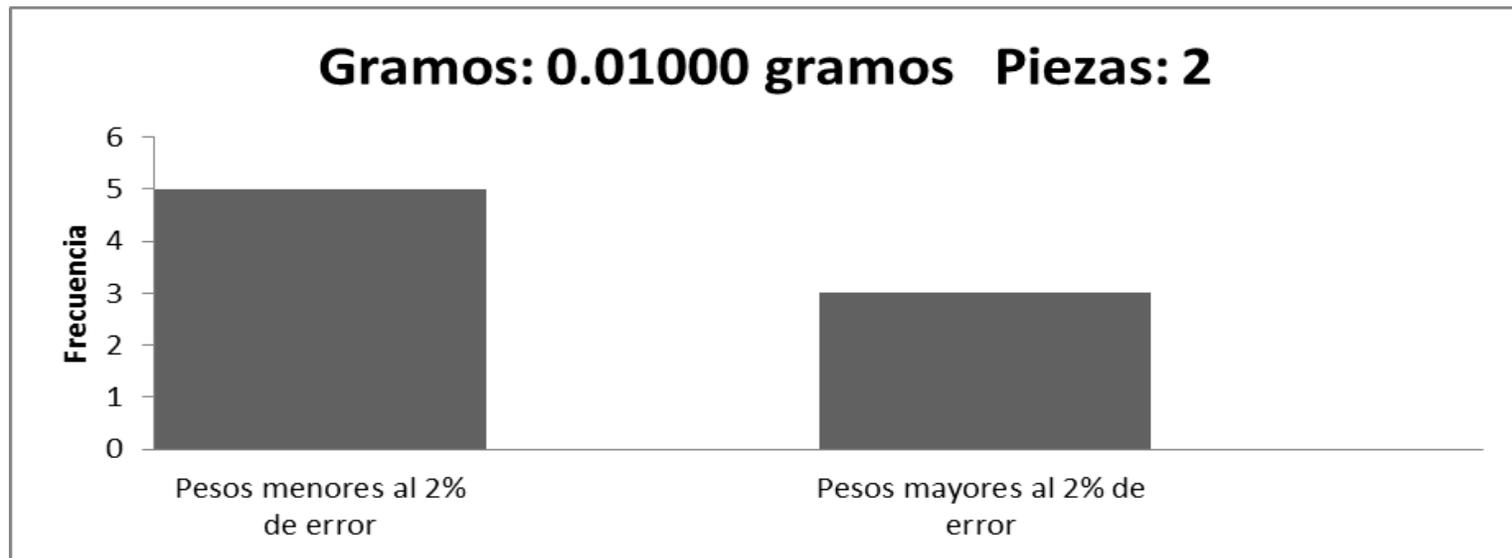


Figura 8.10. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar dos piezas de entre 3, 4, 5, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01000 gramos. Se obtuvo un error del 0.0% que representa un peso de 0.010000 gramos.

En la tabla 8.3 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.01000 gramos seleccionando tres piezas, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.01002 gramos con un error resultante de 0.12% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 7 pruebas de las cuales 4 fueron correctas y 3 erróneas. La figura 8.11 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas correctas y erróneas.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.01000	4	0.01154	13.3	3
	5	0.01027	2.63	
	6	0.01261	20.69	
	7	0.01019	1.86	
	8	0.00983	1.72	
Total de pruebas	9	0.00995	0.5	
7	10	0.01002	0.12	

Tabla 8.3. Datos obtenidos al seleccionar 3 piezas de entre 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01000 gramos. Se obtuvo un error del 0.12% que representa un peso de 0.010002 gramos.

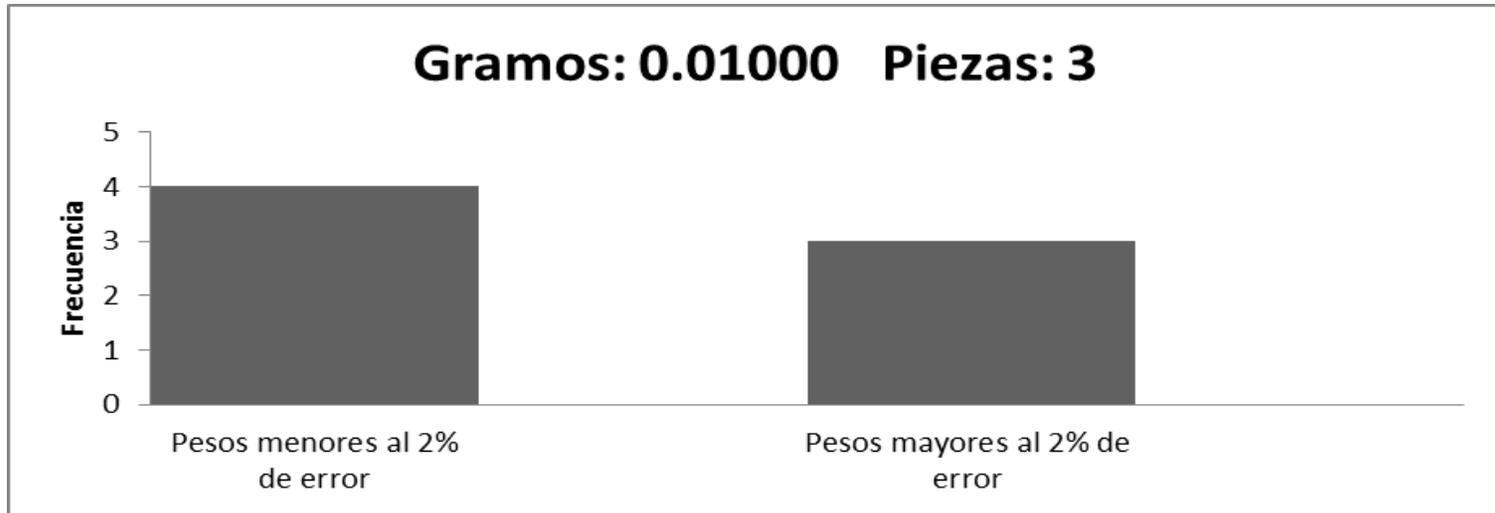


Figura 8.11. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar tres piezas de entre 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01000 gramos. Se obtuvo un error del 0.12% que representa un peso de 0.010002 gramos.

En la tabla 8.4 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.01000 gramos seleccionando cuatro piezas, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.01013 gramos con un error resultante de 0.29% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 7 pruebas de las cuales 4 fueron correctas y 3 erróneas. La figura 8.12 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas correctas y erróneas.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.01000	5	0.01314	23.89	4
	6	0.01928	48	
	7	0.00990	1	
	8	0.01435	30.3	
	9	0.01006	0.59	
Total de pruebas	10	0.01013	0.29	
7	10	0.00984	1.6	

Tabla 8.4. Datos obtenidos al seleccionar 4 piezas de entre 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01000 gramos. Se obtuvo un error del 0.29% que representa un peso de 0.01013 gramos.

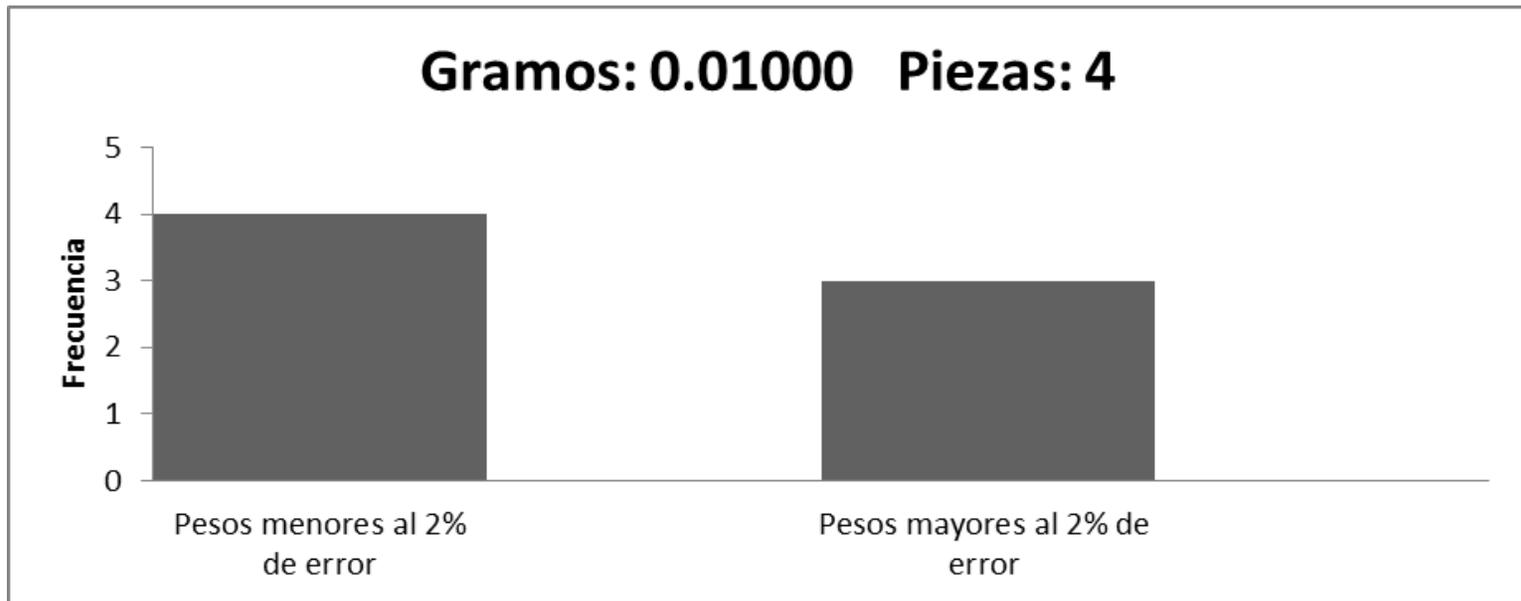


Figura 8.12. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar cuatro piezas de entre 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01000 gramos. Se obtuvo un error del 0.29% que representa un peso de 0.01013 gramos.

En la tabla 8.5 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.02300 gramos seleccionando dos piezas, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.02300 gramos con un error resultante de 0.0% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 9 pruebas de las cuales 7 fueron correctas y 2 erróneas. La figura 8.13 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas correctas y erróneas.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.02300	2	0.02281	0.83	2
	3	0.02217	3.74	
	4	0.02267	1.45	
	5	0.02304	0.17	
	6	0.02036	12.96	
	7	0.02313	0.56	
	8	0.02300	0	
Total de pruebas	9	0.02268	1.4	
9	10	0.02342	1.79	

Tabla 8.5. Datos obtenidos al seleccionar 2 piezas de entre 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.02300 gramos. Se obtuvo un error del 0.0% que representa un peso de 0.02300 gramos.

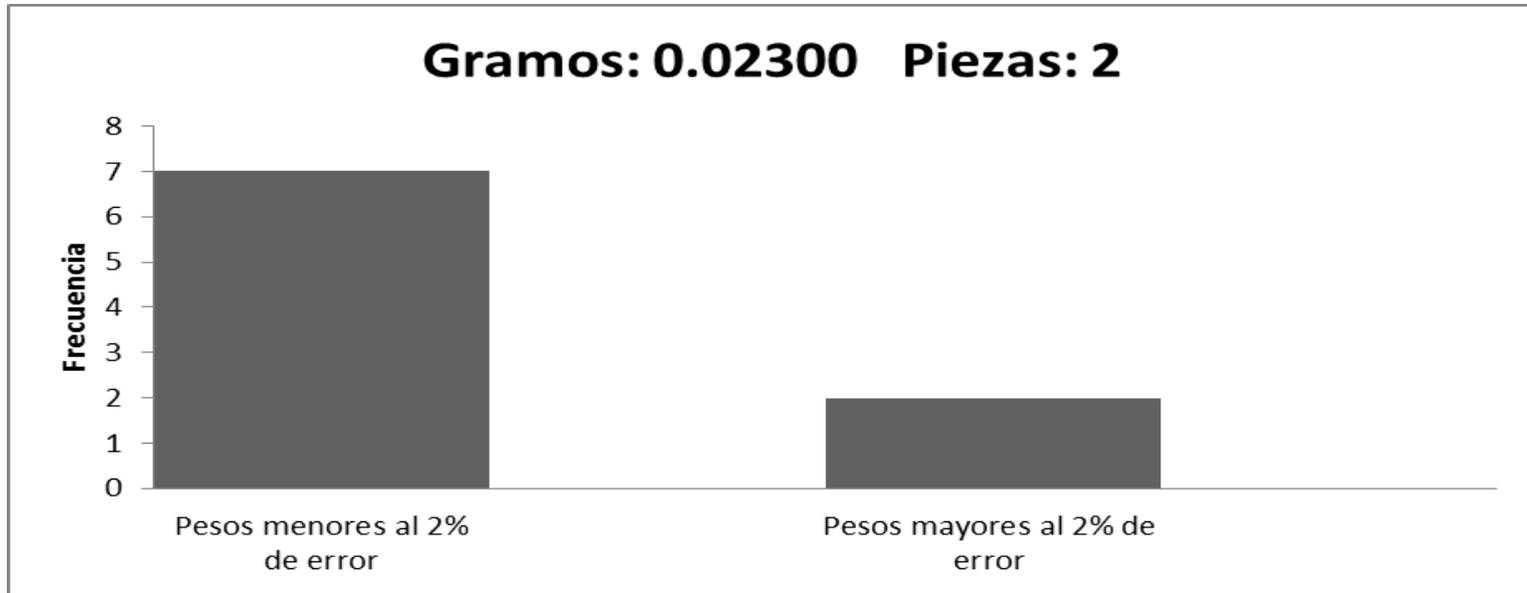


Figura 8.13. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar 2 piezas de entre 2,3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.023 gramos. Se obtuvo un error del 0.0% que representa un peso de 0.02300 gramos.

En la tabla 8.6 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.03700 gramos seleccionando tres piezas, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.03710 gramos con un error resultante de 0.27% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 7 pruebas de las cuales 5 fueron correctas, y 2 erróneas. La figura 8.14 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas correctas y erróneas.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.03700	4	0.03368	9.85	3
	5	0.0336	10.9	
	6	0.03756	1.49	
	7	0.03652	1.31	
	8	0.03645	1.5	
Total de pruebas	9	0.0371	0.27	
7	10	0.03721	0.56	

Tabla 8.6. Datos obtenidos al seleccionar 3 piezas de entre 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.03700 gramos. Se obtuvo un error del 0.27% que representa un peso de 0.03710 gramos.

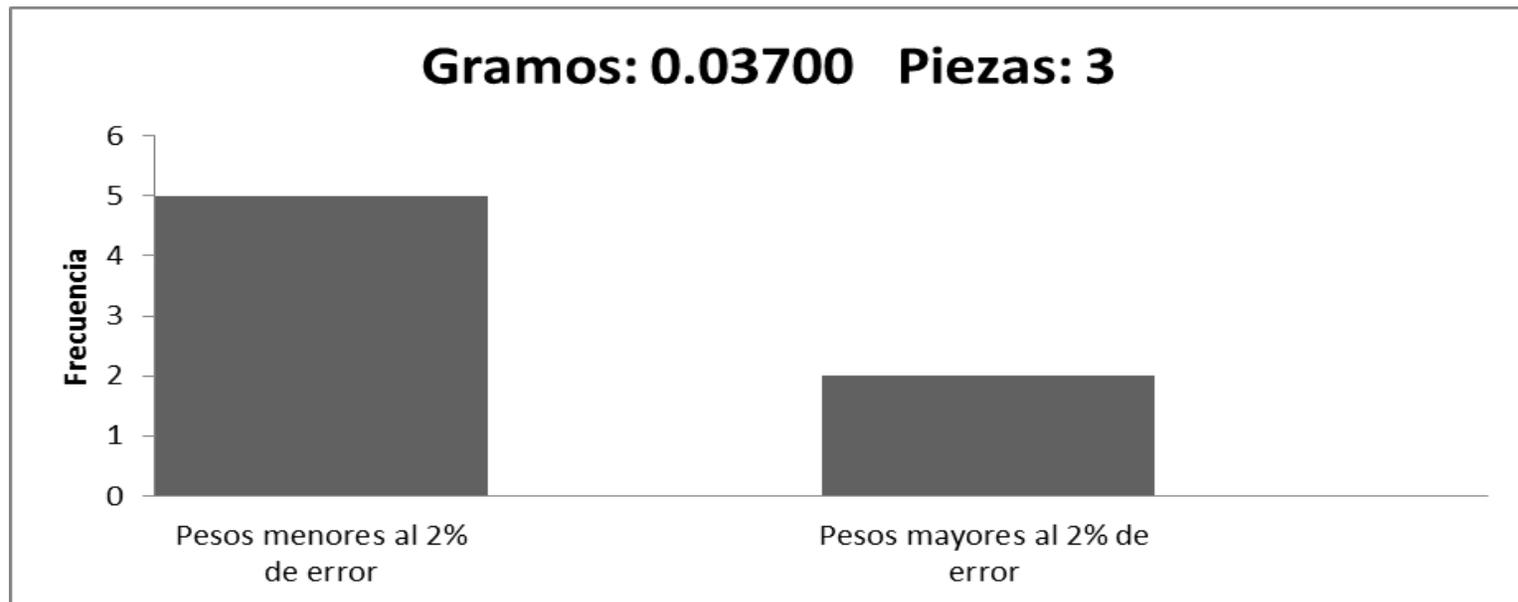


Figura 8.14. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar 3 piezas de entre 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.03700 gramos. Se obtuvo un error del 0.27% que representa un peso de 0.03710 gramos.

En la tabla 8.7 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.04800 gramos seleccionando cuatro piezas, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.04787 gramos con un error resultante de 0.27% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 6 pruebas de las cuales 4 fueron correctas, y 2 erróneas. La figura 8.15 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas correctas y erróneas.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.04800	5	0.05382	10.81	4
	6	0.04385	9.46	
	7	0.04877	1.57	
	8	0.04725	1.58	
Total de pruebas	9	0.04787	0.27	
6	10	0.04728	1.52	

Tabla 8.7. Datos obtenidos al seleccionar 4 piezas de entre 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.04800 gramos. Se obtuvo un error del 0.27% que representa un peso de 0.04787 gramos.

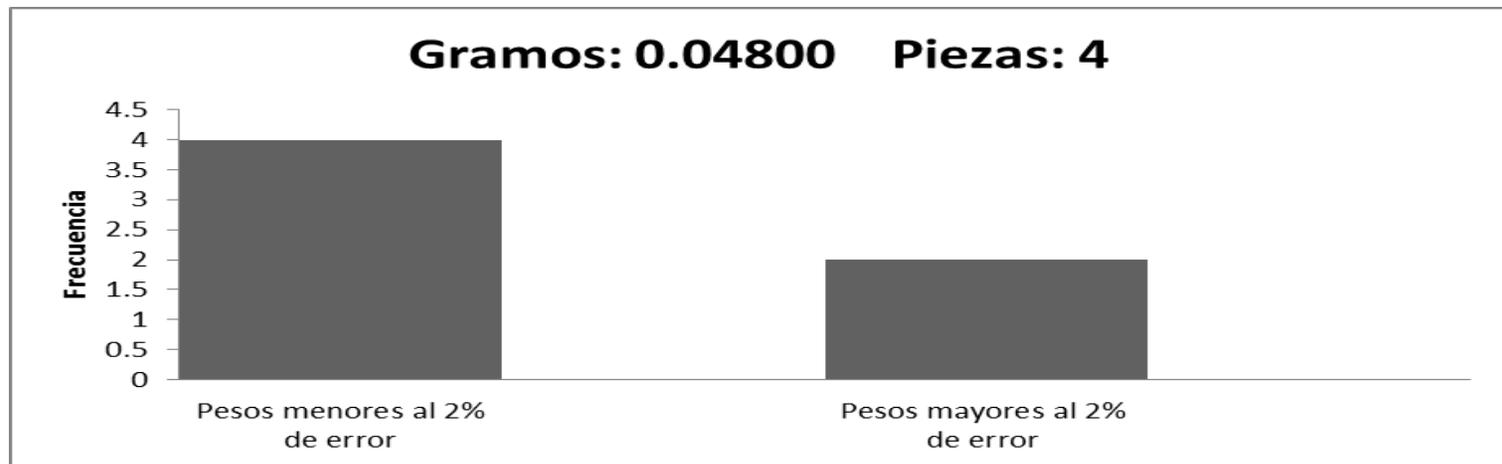


Figura 8.15. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar 4 piezas de entre 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.04800 gramos. Se obtuvo un error del 0.27% que representa un peso de 0.04787 gramos.

En la tabla 8.8 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.05100 gramos seleccionando cuatro piezas, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.05027 gramos con un error resultante de 1.45% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 7 pruebas de las cuales 2 fueron correctas, y 5 erróneas. La figura 8.16 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas correctas y erróneas.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.05100	4	0.04789	6.49	4
	5	0.05428	6.04	
	6	0.05910	13.7	
	7	0.05293	3.6	
	8	0.05298	3.7	
Total de pruebas	9	0.05022	1.55	
7	10	0.05027	1.45	

Tabla 8.8. Datos obtenidos al seleccionar 4 piezas de entre 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.05100 gramos. Se obtuvo un error del 1.45% que representa un peso de 0.05027 gramos.

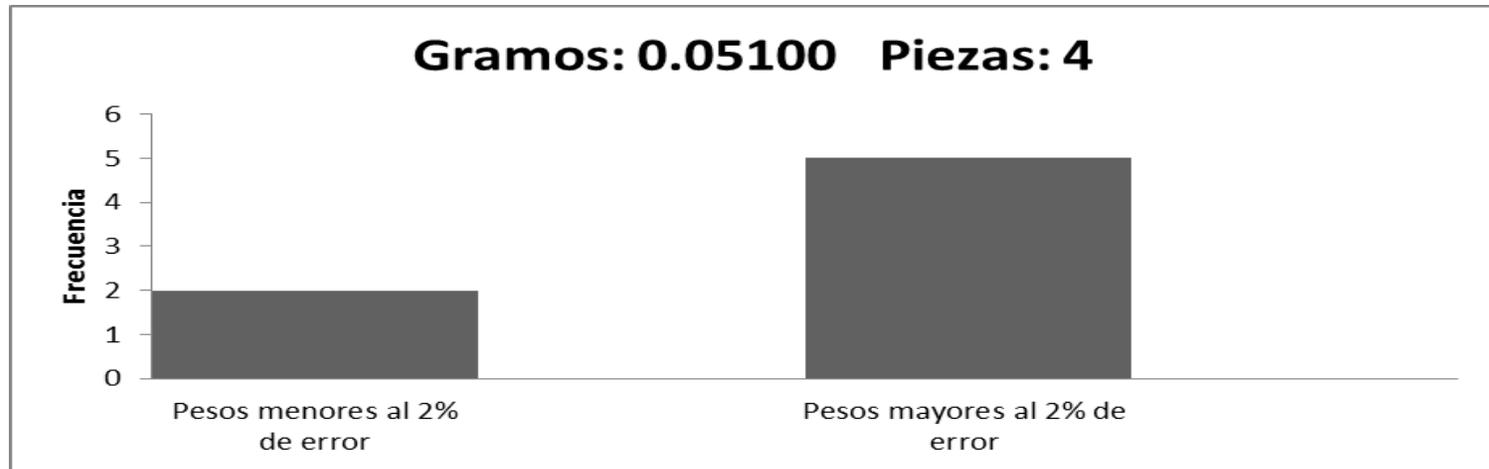


Figura 8.16. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar 4 piezas de entre 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.05100 gramos. Se obtuvo un error del 1.45% que representa un peso de 0.05027 gramos.

En la tabla 8.9 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.01600 gramos seleccionando 2 piezas, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.01620 gramos con un error resultante de 1.23% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 9 pruebas de las cuales 2 fueron correctas, y 7 erróneas. La figura 8.17 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas correctas y erróneas.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.01600	2	0.01644	2.67	2
	3	0.01645	2.73	
	4	0.01651	3.08	
	5	0.01645	2.73	
	6	0.01654	3.2	
	7	0.01632	1.96	
	8	0.01620	1.23	
Total de pruebas	9	0.01636	2.2	
9	10	0.01640	2.43	

Tabla 8.9. Datos obtenidos al seleccionar 4 piezas de entre 2,3,4,5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01600 gramos. Se obtuvo un error del 1.23% que representa un peso de 0.01620 gramos.

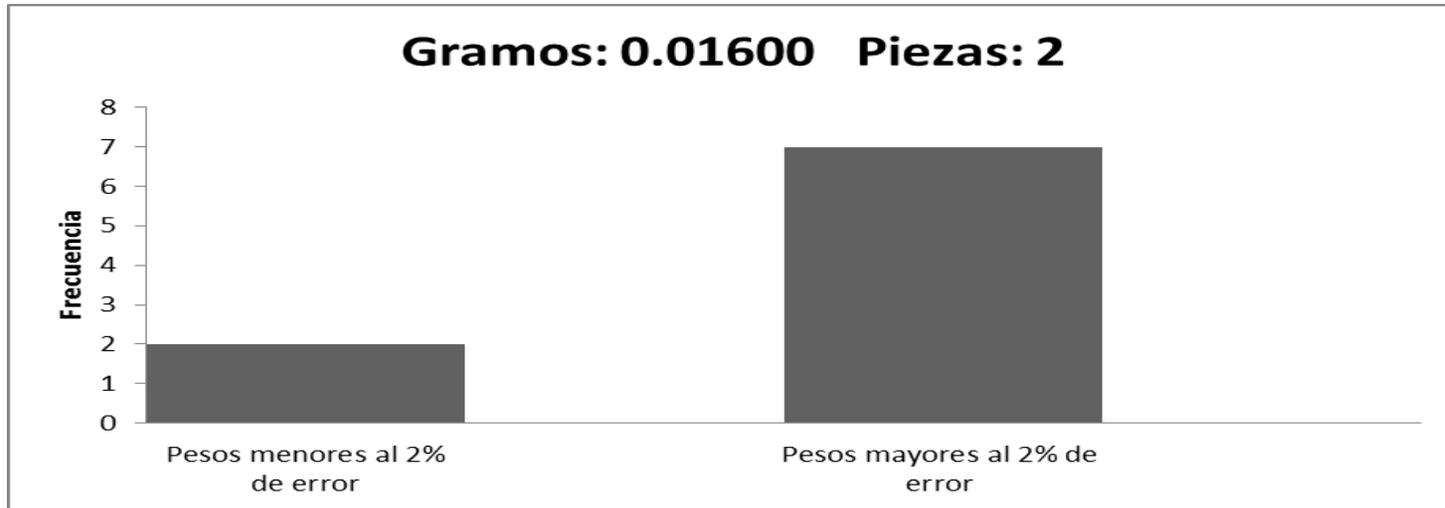


Figura 8.17. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar 2 piezas de entre 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01600 gramos. Se obtuvo un error del 1.23% que representa un peso de 0.01620 gramos.

En la tabla 8.10 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.03100 gramos seleccionando 3 piezas, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.03089 gramos con un error resultante de 0.356% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 7 pruebas de las cuales 6 fueron correctas y 1 errónea. La figura 8.18 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas correctas y erróneas.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.03100	4	0.02886	7.4	3
	5	0.03074	0.84	
	6	0.03073	0.87	
	7	0.03114	0.45	
	8	0.03117	0.54	
Total de pruebas	9	0.03089	0.356	
7	10	0.03127	0.86	

Tabla 8.10. Datos obtenidos al seleccionar 3 piezas de entre 4,5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.03100 gramos. Se obtuvo un error del 0.356% que representa un peso de 0.03089 gramos.

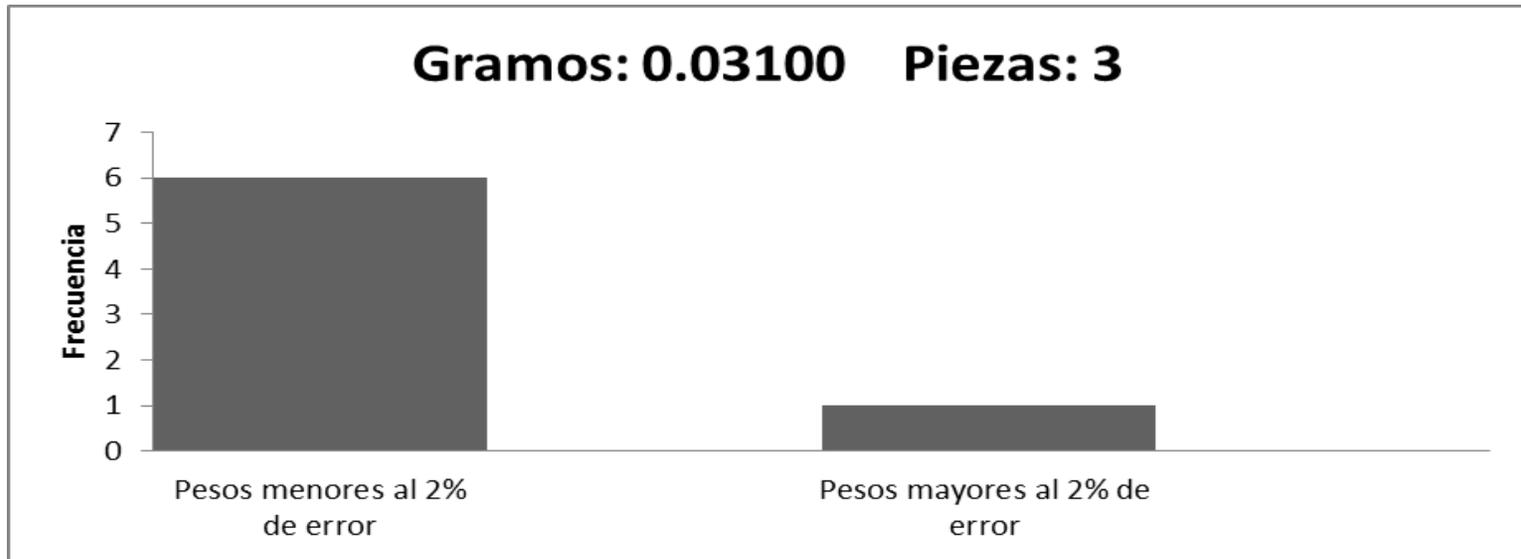


Figura 8.18. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar 3 piezas de entre 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.03100 gramos. Se obtuvo un error del 0.356% que representa un peso de 0.03089 gramos.

En la tabla 8.11 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.01200 gramos seleccionando 2 piezas, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.01206 gramos con un error resultante de 0.49% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 7 pruebas de las cuales 4 fueron correctas y 3 erróneas. La figura 8.19 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas correctas y erróneas.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.01200	4	0.01311	8.46	2
	5	0.01316	8.81	
	6	0.01127	6.47	
	7	0.01182	1,52	
	8	0.01181	1.6	
Total de pruebas	9	0.01206	0.49	
7	10	0.01219	1.56	

Tabla 8.11. Datos obtenidos al seleccionar 2 piezas de entre 4,5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01200 gramos. Se obtuvo un error del 0.49% que representa un peso de 0.01206 gramos.



Figura 8.19. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar 2 piezas de entre 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01200 gramos. Se obtuvo un error del 0.49% que representa un peso de 0.01206 gramos.

En la tabla 8.12 se enlistan los datos obtenidos al tratar de obtener un peso de 0.01200 gramos seleccionando 3 piezas, la prueba se realizó con diferentes números de pesadas, la mejor opción que se logró con el uso del programa de visión fue un peso de 0.01200 gramos con un error resultante de 0.0% respecto al peso esperado, se hicieron un total de 6 pruebas de las cuales 3 fueron correctas, y 3 erróneas. La figura 8.20 ilustra el histograma de cómo se distribuyó la frecuencia entre pruebas correctas y erróneas.

Peso Deseado (gramos)	Número de Piezas Pesadas	Peso Obtenido (gramos)	Error (%)	Piezas a Seleccionar
0.01200	5	0.01301	7.7	3
	6	0.01137	5.5	
	7	0.01254	4.3	
	8	0.01196	0.33	
Total de pruebas	9	0.01191	0.75	
6	10	0.01200	0	

Tabla 8.12. Datos obtenidos al seleccionar 3 piezas de entre 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01200 gramos. Se obtuvo un error del 0.0% que representa un peso de 0.01200 gramos.

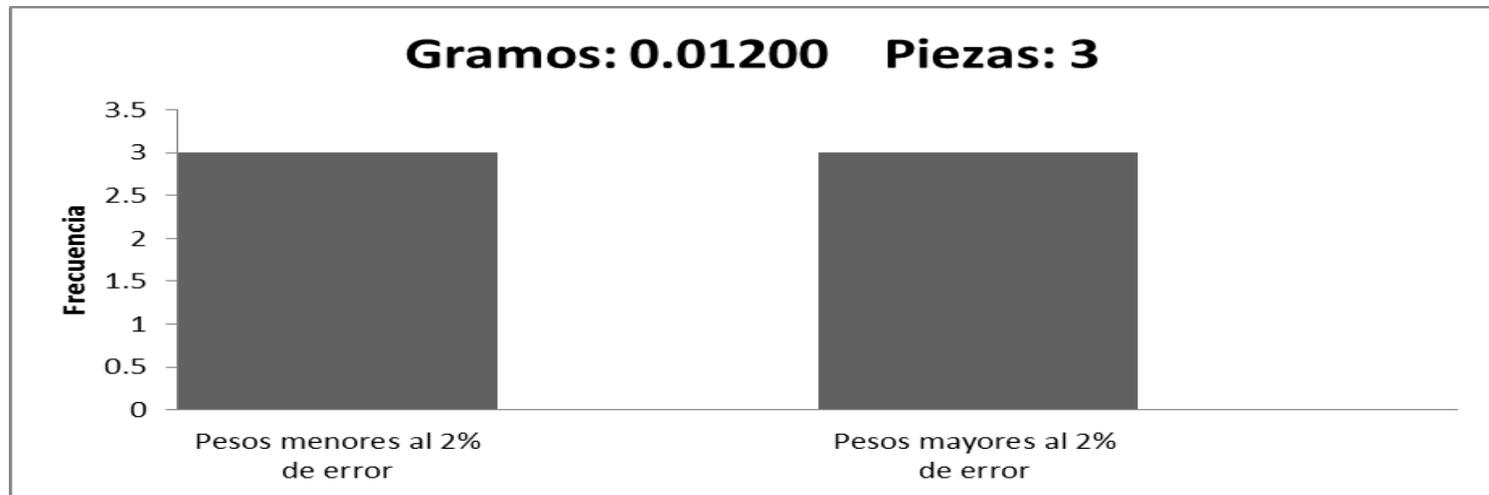


Figura 8.20. Histograma de los resultados obtenidos al seleccionar 3 piezas de entre 5, 6, 7, 8, 9 y 10 piezas para obtener un peso de 0.01200 gramos. Se obtuvo un error del 0.0% que representa un peso de 0.01200 gramos.

En la tabla 8.13 se muestran todos los datos obtenidos al realizar las diferentes pruebas de funcionamiento del programa de detección de peso, se puede ver que el máximo error en el pesaje es del 48% mientras que el mínimo error es del 0.0%, se realizaron un total de 88 pruebas, estas se agrupan en 24 clases para construir una tabla de frecuencia de error en el pesaje obtenido por el software de visión, cada clase tiene amplitud del 2%.

Errores Obtenidos en cada Experimento											
0.398	6.7	13.3	23.89	0.83	9.85	10.81	6.49	2.67	7.4	8.46	7.7
0.099	4.38	2.63	48	3.74	10.9	9.46	6.04	2.73	0.84	8.81	5.5
0.299	1.28	20.69	1	1.45	1.49	1.57	13.7	3.08	0.87	6.47	4.3
0.401	1.4	1.86	30.3	0.17	1.31	1.58	3.6	2.73	0.45	1.52	0.33
11.7	1.42	1.72	0.59	12.96	1.5	0.27	3.7	3.2	0.54	1.6	0.75
4.9	0.199	0.5	0.29	0.56	0.27	1.52	1.55	1.96	0.356	0.49	0
0.4016	23.45	0.12	1.6	0	0.56	2.2	1.45	1.23	0.86	1.56	2.43
0.299	0.1	0	1.79								

Población	Mayor	Menor	Rango	Clases	Amplitud
88	48	0	48	24	2.0

Tabla 8.13. Total de pruebas realizadas para verificar el correcto funcionamiento del sistema de visión desarrollado para medir el peso de los materiales a utilizar en un experimento de epitaxia en fase líquida.

En la tabla 8.14 se presentan los datos experimentales agrupados por su frecuencia de ocurrencia en 24 clases, se puede observar que la mayor cantidad de experimentos realizados caen en el intervalo del 0-2% de error en el peso obtenido, de 88 pruebas realizadas 52 de ellas caen en el rango de correcto que representa una frecuencia relativa 59.1% mientras que el resto de los resultados se distribuyen en las clases restantes, la suma de todas ellas representan el 40.9% de las pruebas realizadas.

Tabla de Frecuencia de Errores en el Peso Obtenido por el Programa de Visión Desarrollado en LabVIEW						
Clases	Intervalos %	Marca	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Acumulada Relativa
1	[0,2)	1	52	0.59	52	0.59
2	[2,4)	3	11	0.13	63	0.72
3	[4,6)	5	4	0.05	67	0.77
4	[6,8)	7	6	0.07	73	0.84
5	[8,10)	9	4	0.05	77	0.89
6	[10,12)	11	3	0.03	80	0.92
7	[12,14)	13	3	0.03	83	0.95
8	[14,16)	15	0	0.00	83	0.95
9	[16,18)	17	0	0.00	83	0.95
10	[18,20)	19	0	0.00	83	0.95
11	[20,22)	21	1	0.01	84	0.96
12	[22,24)	23	2	0.02	86	0.98
13	[24,26)	25	0	0.00	86	0.98
14	[26,28)	27	0	0.00	86	0.98
15	[28,30)	29	0	0.00	86	0.98
16	[30,32)	31	1	0.01	87	0.99
17	[32,34)	33	0	0.00	87	0.99
18	[34,36)	35	0	0.00	87	0.99
19	[36,38)	37	0	0.00	87	0.99
20	[38,40)	39	0	0.00	87	0.99
21	[40,42)	41	0	0.00	87	0.99
22	[42,44)	43	0	0.00	87	0.99
23	[44,46)	45	0	0.00	87	0.99
24	[46,48)	47	1	0.01	88	1.00

Tabla 8.14. Tabla de frecuencia construida para agrupar la distribución de la frecuencia del error en el pesaje obtenido por el programa de visión implementado en LabVIEW.

La figura 8.21 muestra el valor porcentual que aporta cada una de las clases en que se agrupan los experimentos realizados en función del error del peso obtenido así como el histograma de la distribución de la frecuencia de los experimentos realizados.

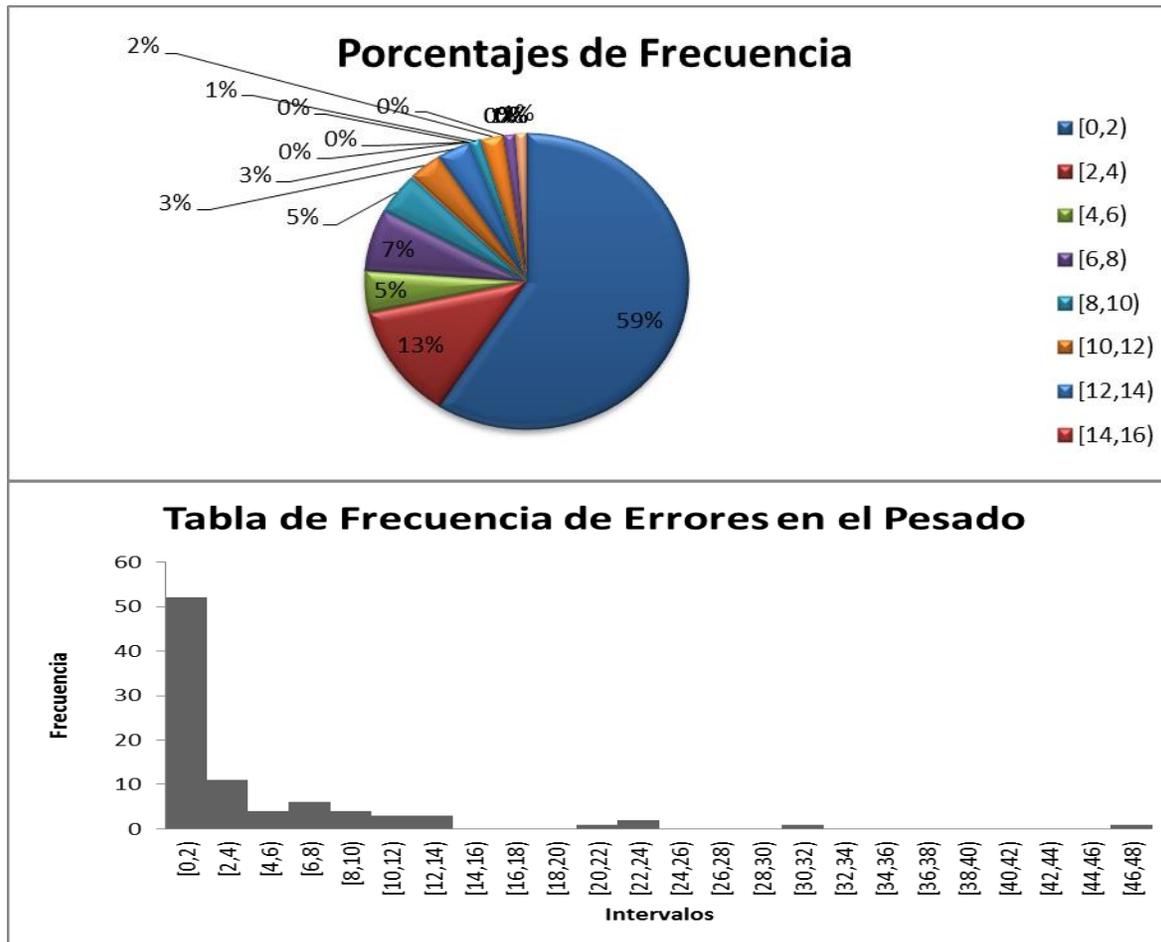


Figura 8.21. Grafica porcentual e histograma de la frecuencia de error de los pesos obtenidos por el sistema de visión para la detección del peso de materiales a utilizar en crecimientos de LPE.

La tabla 8.15 muestra la distribución de frecuencia del error obtenido al utilizar la máquina de visión de pesaje, las pruebas realizadas se agrupan en los estados 0 y 1 que corresponden a los valores “pesos menores al 2% de error” y “pesos mayores al 2% de error”, de las 88 pruebas realizadas 52 de ellas están en el estado 0 y 36 en el estado 1, esto en valores porcentuales representan el 59.1% y 40.9% respectivamente en cada uno de los estados, es decir, casi el 60.0% de las pruebas realizadas resultaron favorables, aun así en los casos erróneos el programa de visión da una recomendación de aquellas piezas que mejor se podrían ajustar al peso que requiere el usuario.

Total de Pruebas	
Pesos menores al 2% de error	Pesos mayores al 2% de error
52	36

Total de Experimentos
88

Tabla 8.15. Tabla de distribución de frecuencia del error en el peso obtenido por el sistema de visión para el pesaje de materiales a utilizar en LPE.

La figura 8.22 muestra el valor porcentual de la distribución de frecuencia del error en el pesaje de materiales utilizando el programa de visión así como el histograma de esta distribución de la frecuencia de cada uno de los experimentos realizados.

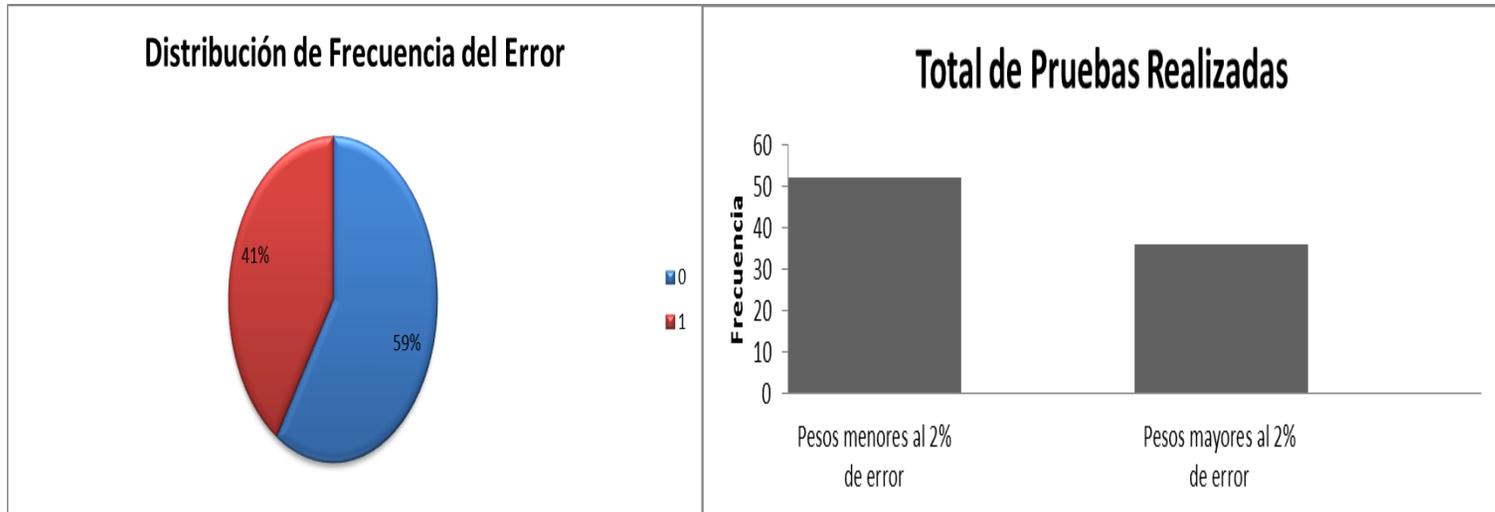


Figura 8.22. Grafica porcentual e histograma de la distribución de frecuencia de error de los pesos obtenidos por el sistema de visión para la detección del peso de materiales a utilizar en crecimientos de LPE.

La tabla 8.16 muestra la distribución de frecuencia del error obtenido al utilizar la máquina de visión de pesaje de aquellas pruebas en las que el peso requerido se obtuviera con solo 1 pieza, de las 88 pruebas realizadas 8 de ellas cumplen esta condición, los resultados obtenidos son 6 en el estado 0 y 2 en el estado 1, esto en valores porcentuales representan el 75% y 25% respectivamente en cada uno de los estados, es decir, el 75% de las pruebas realizadas resultaron favorables, aun así en los casos erróneos el programa de visión indica una recomendación de aquellas piezas que mejor se podrían ajustar al peso que requiere el usuario.

Total de Pruebas (Seleccionar 1 pieza)	
Pesos menores al 2% de error	Pesos mayores al 2% de error
6	2
Total de Experimentos	

8

Distribución de Frecuencia		
x	P(X=x)	%
0	6/8	75.0
1	2/8	25.0

Tabla 8.16. Tabla de distribución de frecuencia del error en el peso obtenido por el sistema de visión para el pesaje de materiales a utilizar en LPE, para casos en donde se requiere solo una pieza.

La figura 8.23 muestra el valor porcentual de la distribución de frecuencia del error en el pesaje de materiales utilizando el programa de visión así como el histograma de la distribución de frecuencia de cada uno de los experimentos realizados en donde se requiere solo una pieza.

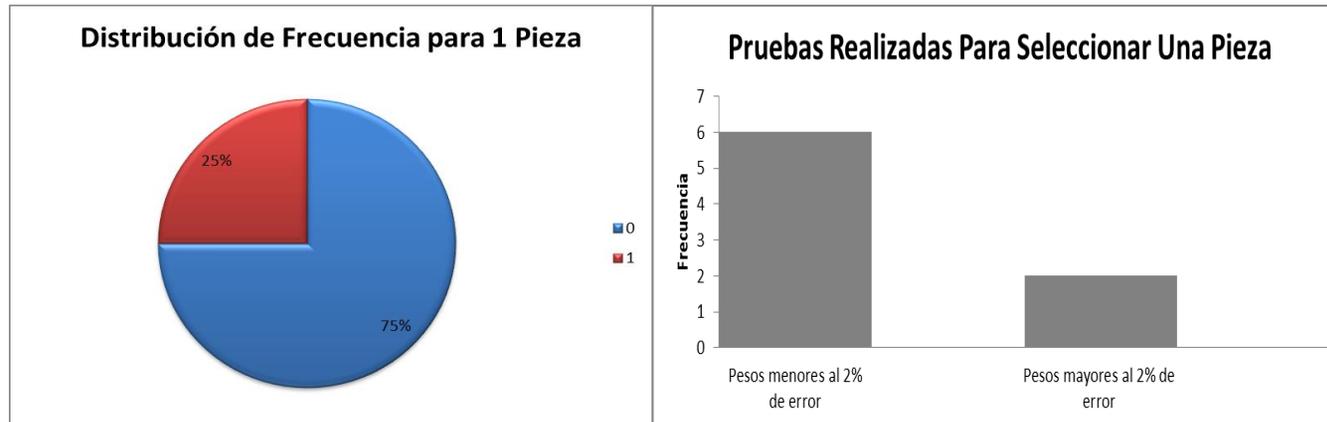


Figura 8.23. Grafica porcentual e histograma de la distribución de frecuencia de error de los pesos obtenidos por el sistema de visión para la detección del peso de materiales a utilizar en crecimientos de LPE en donde se requiere solo una pieza.

La tabla 8.17 muestra la distribución de frecuencia del error obtenido al utilizar la máquina de visión de pesaje de aquellas pruebas en las que el peso requerido se obtuviera con 2 piezas, de las 88 pruebas realizadas 33 de ellas cumplen esta condición, los resultados obtenidos son 18 en el estado 0 y 15 en el estado 1, en valores porcentuales representan el 54.5% y 45.5% respectivamente en cada uno de los estados, es decir, el 54.5% de las pruebas realizadas resultaron favorables, aun así en los casos erróneos el programa de visión indica una recomendación de aquellas piezas que mejor se podrían ajustar al peso que requiere el usuario.

Total de Pruebas (Seleccionar 2 piezas)	
Pesos menores al 2% de error	Pesos mayores al 2% de error
18	15
Total de Experimentos	
33	

Distribución de Frecuencia		
x	P(X=x)	%
0	18/33	54.5
1	15/33	45.5

Tabla 8.17. Tabla de distribución de frecuencia del error en el peso obtenido por el sistema de visión para el pesaje de materiales a utilizar en LPE, para casos en donde se requieren 2 piezas.

La figura 8.24 muestra el valor porcentual de la distribución de frecuencia del error en el pesaje de materiales utilizando el programa de visión así como el histograma de la distribución de frecuencia de cada uno de los experimentos realizados en donde se requieren 2 piezas.

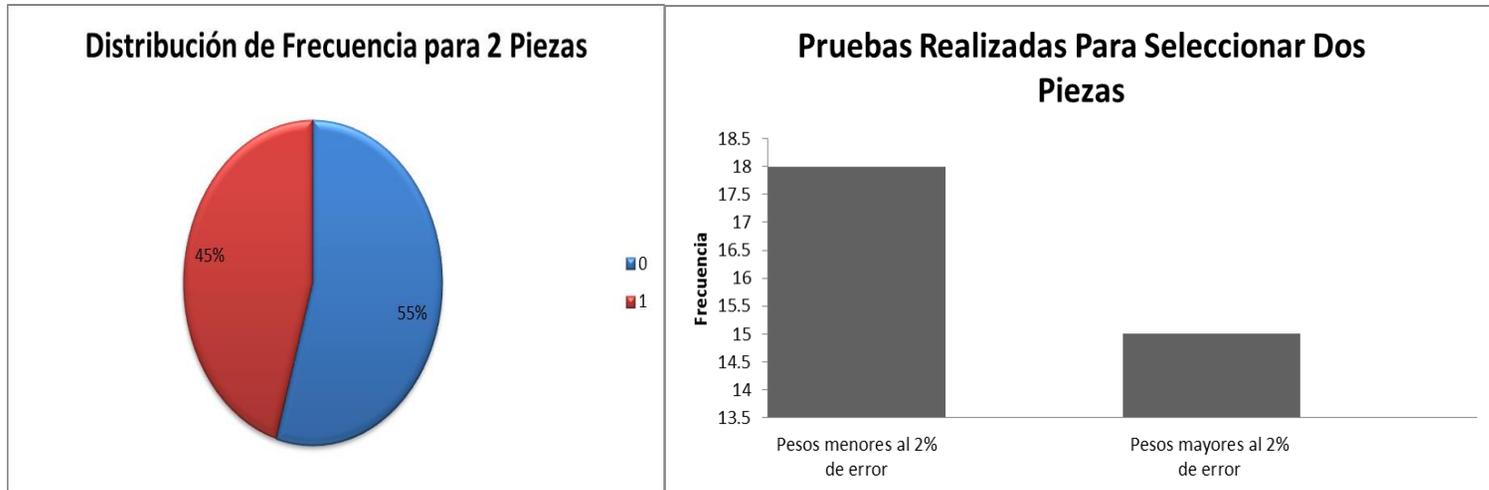


Figura 8.24. Grafica porcentual e histograma de la distribución de frecuencia de error de los pesos obtenidos por el sistema de visión para la detección del peso de materiales a utilizar en crecimientos de LPE en donde se requieren 2 piezas.

La tabla 8.18 muestra la distribución de frecuencia del error obtenido al utilizar la máquina de visión de pesaje de aquellas pruebas en las que el peso requerido se obtuviera con 3 piezas, de las 88 pruebas realizadas 27 de ellas cumplen esta condición, los resultados obtenidos son 18 en el estado 0 y 9 en el estado 1, esto en valores porcentuales representa el 66.7% y 33.3% respectivamente en cada uno de los estados, es decir, el 66.7% de las pruebas realizadas resultaron favorables aun así en los casos erróneos el programa de visión indica una recomendación de aquellas piezas que mejor se podrían ajustar al peso que requiere el usuario.

Total de Pruebas (Seleccionar 3 piezas)	
Pesos menores al 2% de error	Pesos mayores al 2% de error
18	9
Total de Experimentos	
27	

Distribución de Frecuencia		
x	P(X=x)	%
0	18/27	66.7
1	9/27	33.3

Tabla 8.18. Tabla de distribución de frecuencia del error en el peso obtenido por el sistema de visión para el pesaje de materiales a utilizar en LPE, para casos en donde se requieren 3 piezas.

La figura 8.25 muestra el valor porcentual de la distribución de frecuencia del error en el pesaje de materiales utilizando el programa de visión así como el histograma de la distribución de frecuencia de cada uno de los experimentos realizados en donde se requieren 3 piezas.

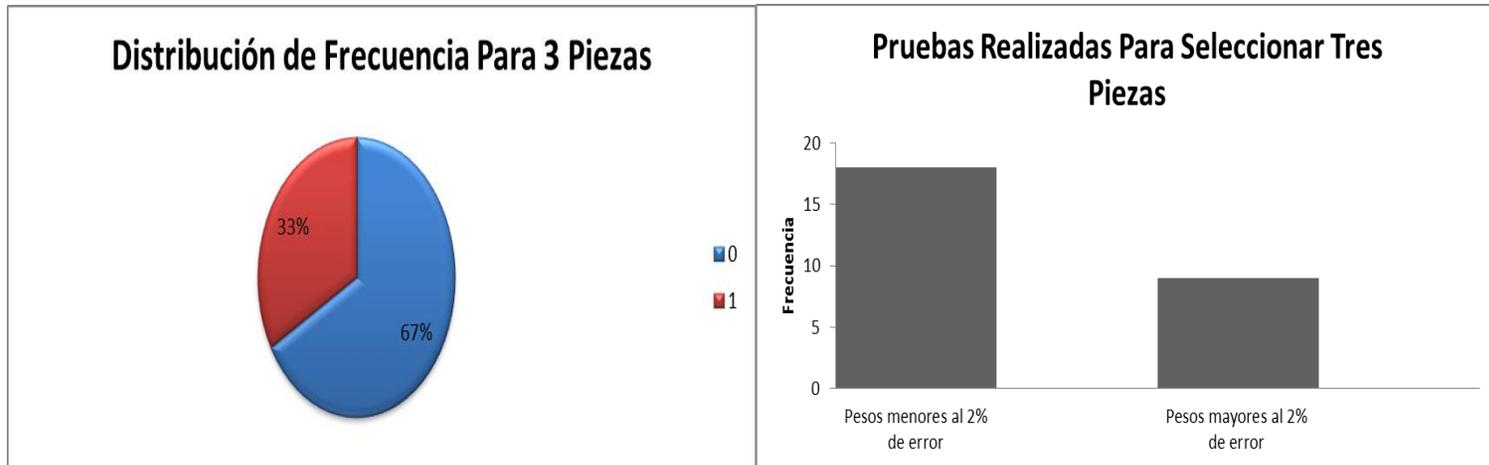


Figura 8.25. Grafica porcentual e histograma de la distribución de frecuencia de error de los pesos obtenidos por el sistema de visión para la detección del peso de materiales a utilizar en crecimientos de LPE en donde se requieren 3 piezas.

La tabla 8.19 muestra la distribución de frecuencia del error obtenido al utilizar la máquina de visión de pesaje de aquellas pruebas en las que el peso requerido se obtuviera con 4 piezas, de las 88 pruebas realizadas 20 de ellas cumplen esta condición, los resultados obtenidos son 10 en el estado 0 y 10 en el estado 1, esto en valores porcentuales representa el 50% y 50% respectivamente en cada uno de los estados, es decir, el 50% de las pruebas realizadas resultaron favorables, aun así en los casos erróneos el programa de visión indica una recomendación de aquellas piezas que mejor se podrían ajustar al peso que requiere el usuario.

Total de Pruebas (Seleccionar 4 piezas)	
Pesos menores al 2% de error	Pesos mayores al 2% de error
10	10
Total de Experimentos	
20	

Distribución de Frecuencia		
x	P(X=x)	%
0	10/20	50.0
1	10/20	50.0

Tabla 8.19. Tabla de distribución de frecuencia del error en el peso obtenido por el sistema de visión para el pesaje de materiales a utilizar en LPE, para casos en donde se requieren 4 piezas.

La figura 8.26 muestra el valor porcentual de la distribución de frecuencia del error en el pesaje de materiales utilizando el programa de visión así como el histograma de la distribución de frecuencia de cada uno de los experimentos realizados en donde se requieren 4 piezas.

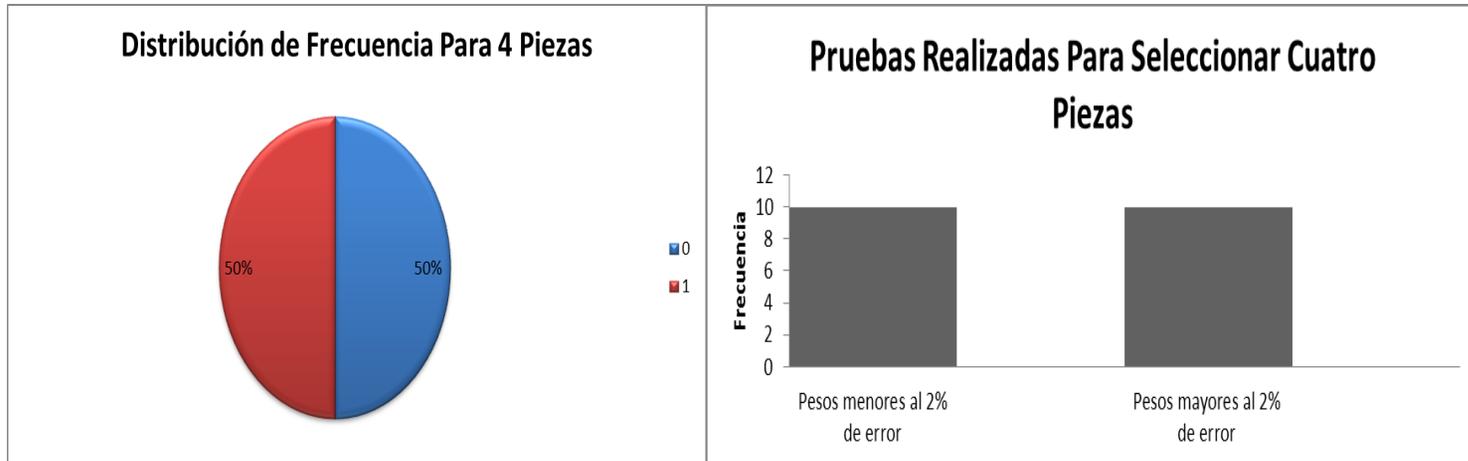


Figura 8.26. Grafica porcentual e histograma de la distribución de frecuencia de error de los pesos obtenidos por el sistema de visión para la detección del peso de materiales a utilizar en crecimientos de LPE en donde se requieren 4 piezas.

En la tabla 8.20 se puede observar que la moda en el error de las pruebas realizadas es 0.0%, la media 4.48%, mediana 1.5%, varianza de 54.2% y una desviación estándar de 7.36%, es de notar que el valor que más veces se obtuvo en el error del peso fue del cero por ciento.

Moda	Media	Mediana	Varianza	Desviación Estándar
0	4.48	1.565	54.2780	7.3674

Tabla 8.20. Es de resaltar que el valor obtenido en el error de peso al usar el programa de visión para la determinación del peso de los materiales a utilizar en el experimento de LPE fue del 0.0%.

Se muestran las pantallas de algunos de los resultados obtenidos al ejecutar el programa de pesaje de los materiales de la fase líquida.

Se puede observar que el peso requerido por el usuario es de 2 gramos con un error de ± 2 , se elegirían 2 piezas de entre 4 pesadas. El resultado obtenido fue un peso de 2.07478 gramos con un error de 3.6 % y las piezas a tomar por el usuario son las número 1 y 4 que son resaltadas en color naranja.

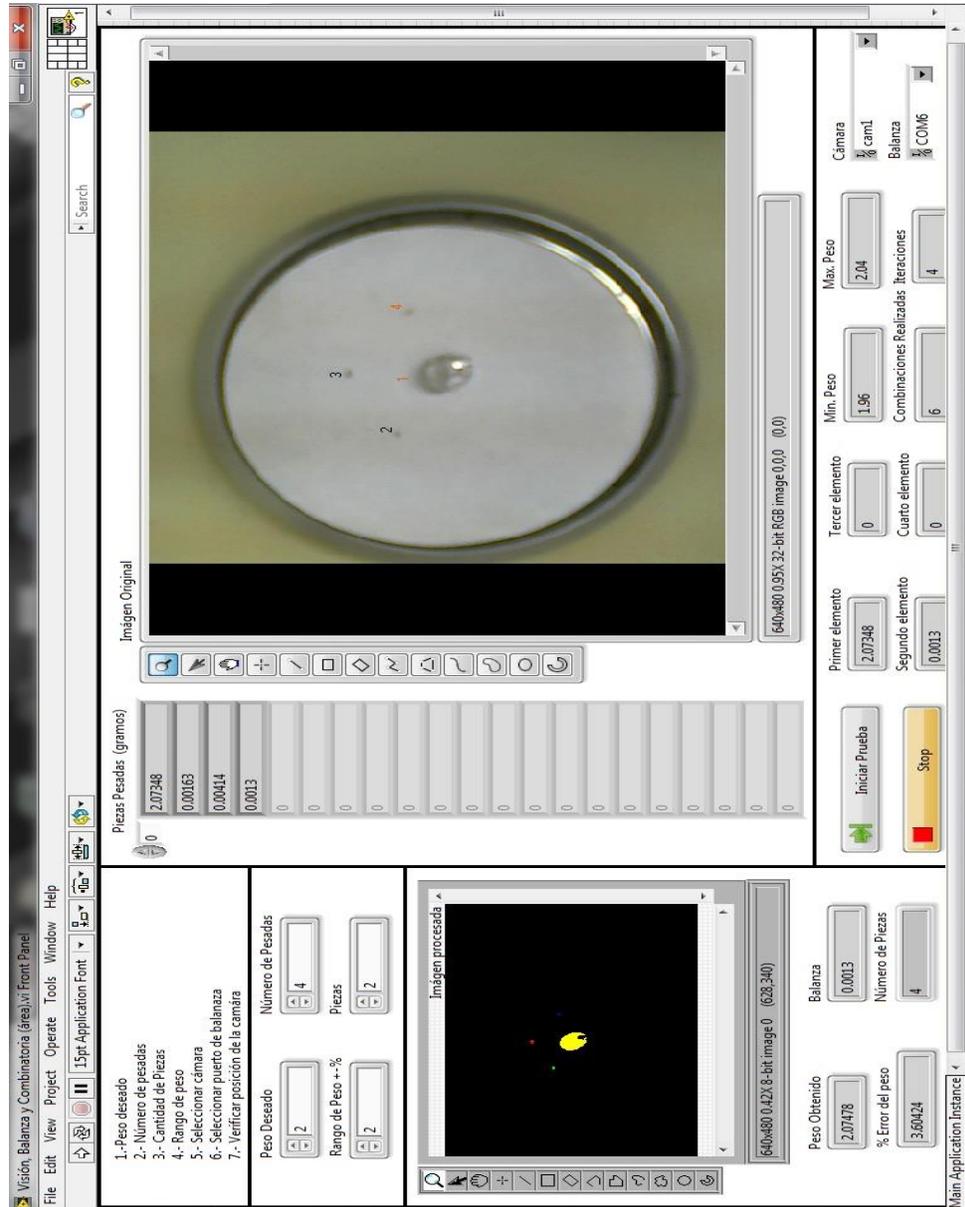


Figura 8.27. Lecturas obtenidas por el sistema de visión de pesaje de materiales de la fase líquida.

En la imagen 8.28 se puede observar que el peso requerido por el usuario es de 0.012 gramos con un error de ± 2 , se elegirían 2 piezas de entre 8 pesadas. El resultado obtenido fue un peso de 0.01181 gramos con un error de 1.6 % y las piezas a tomar por el usuario son las número 4 y 7 que son resaltadas en color naranja.



Figura 8.28. Lecturas obtenidas por el sistema de visión de pesaje de materiales de la fase líquida.

En la imagen 8.29 el peso requerido por el usuario es de 0.012 gramos con un error de ± 2 , se elegirían 3 piezas de entre 8 pesadas. El resultado obtenido fue un peso de 0.01196 gramos con un error de 0.33 % y las piezas a tomar por el usuario son las número 1, 5 y 6 que son resaltadas en color naranja.

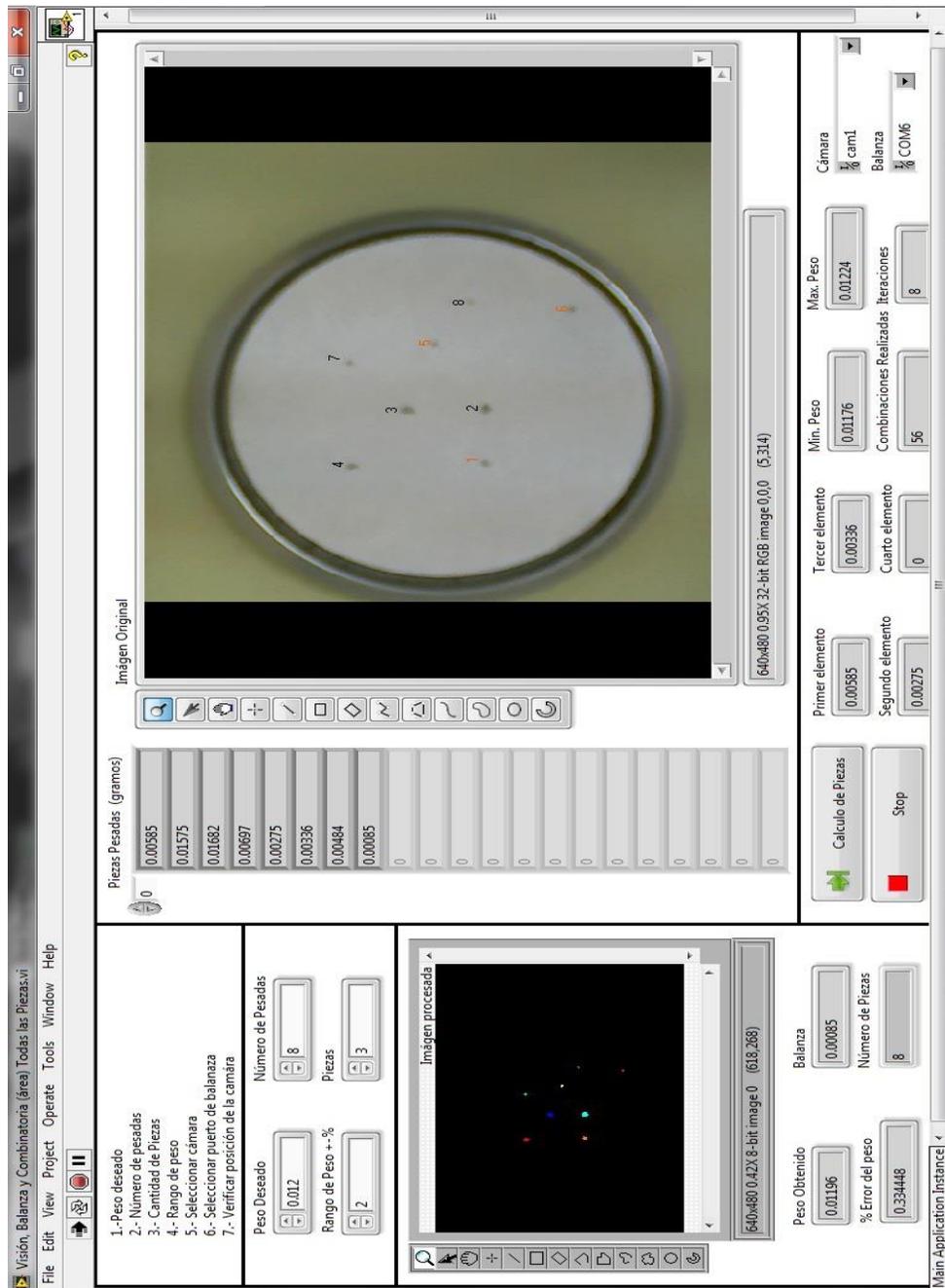


Figura 8.29. Lecturas obtenidas por el sistema de visión de pesaje de materiales de la fase líquida.

En la imagen 8.30 el peso requerido por el usuario es de 0.012 gramos con un error de ± 2 , se elegirían 3 piezas de entre 10 pesadas. El resultado obtenido fue un peso de 0.012 gramos con un error de 0.0 % y las piezas a tomar por el usuario son las número 6, 7 y 8 que son resaltadas en color naranja.

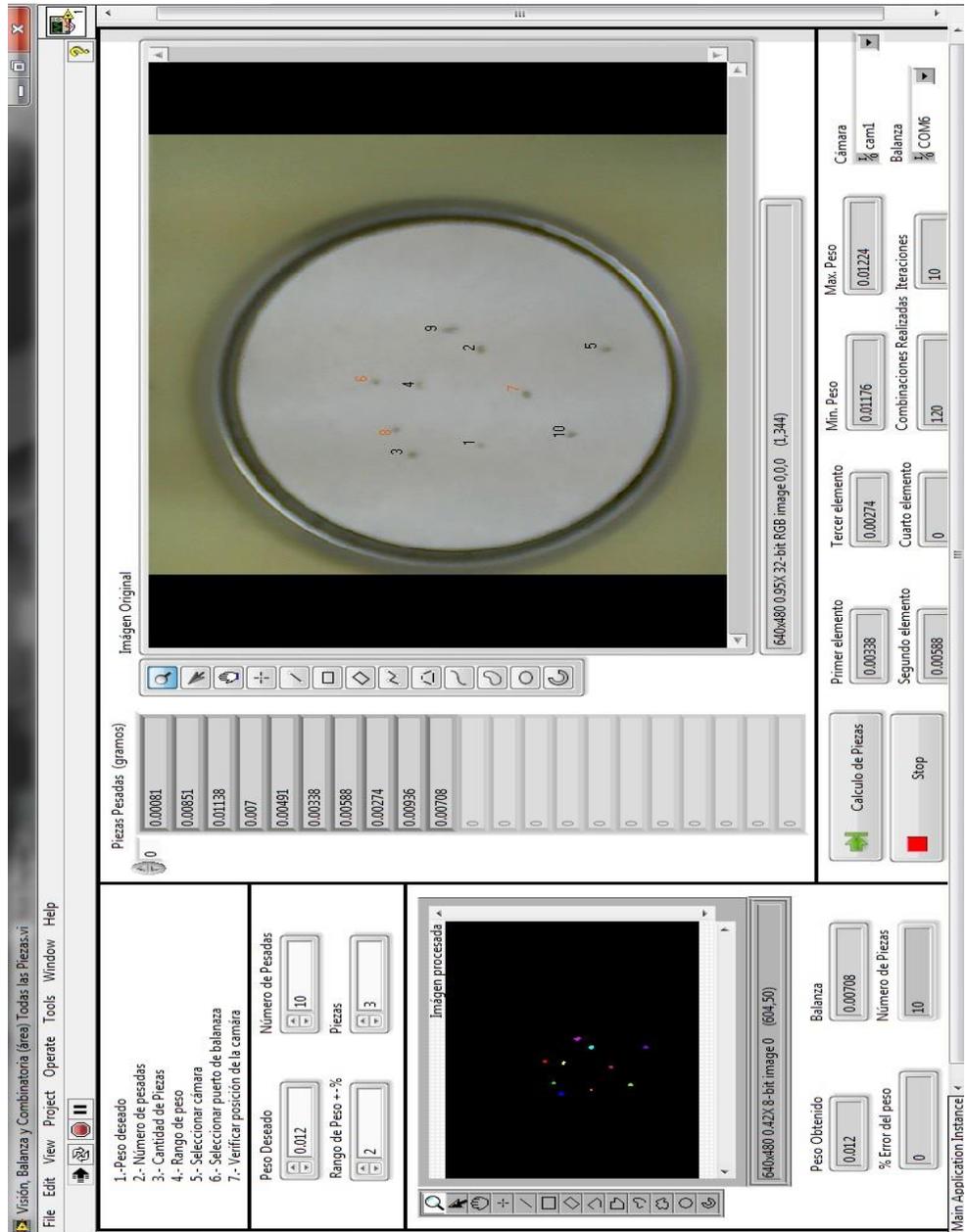


Figura 8.30. Lecturas obtenidas por el sistema de visión de pesaje de materiales de la fase líquida.

En la imagen 8.31 el peso requerido por el usuario es de 0.023 gramos con un error de ± 2 , se elegirían 2 piezas de entre 5 pesadas. El resultado obtenido fue un peso de 0.02304 gramos con un error de 0.17 % y las piezas a tomar por el usuario son las número 1, y 2 que son resaltadas en color naranja.

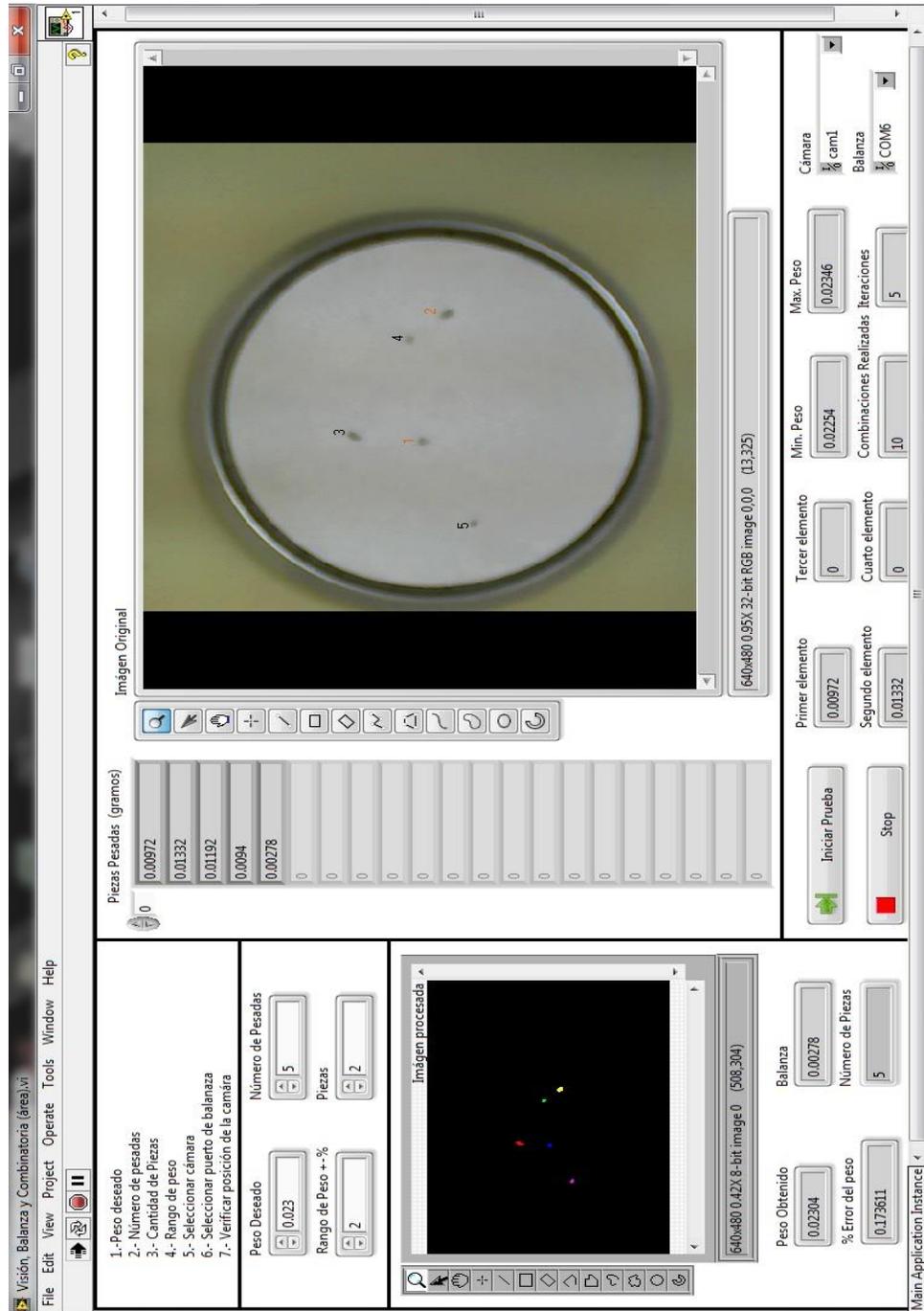


Figura 8.31. Lecturas obtenidas por el sistema de visión de pesaje de materiales de la fase líquida.

En la imagen 8.32 el peso requerido por el usuario es de 0.031 gramos con un error de ± 2 , se elegirían 3 piezas de entre 5 pesadas. El resultado obtenido fue un peso de 0.03074 gramos con un error de 0.84 % y las piezas a tomar por el usuario son las número 1, 2 y 4 que son resaltadas en color naranja.

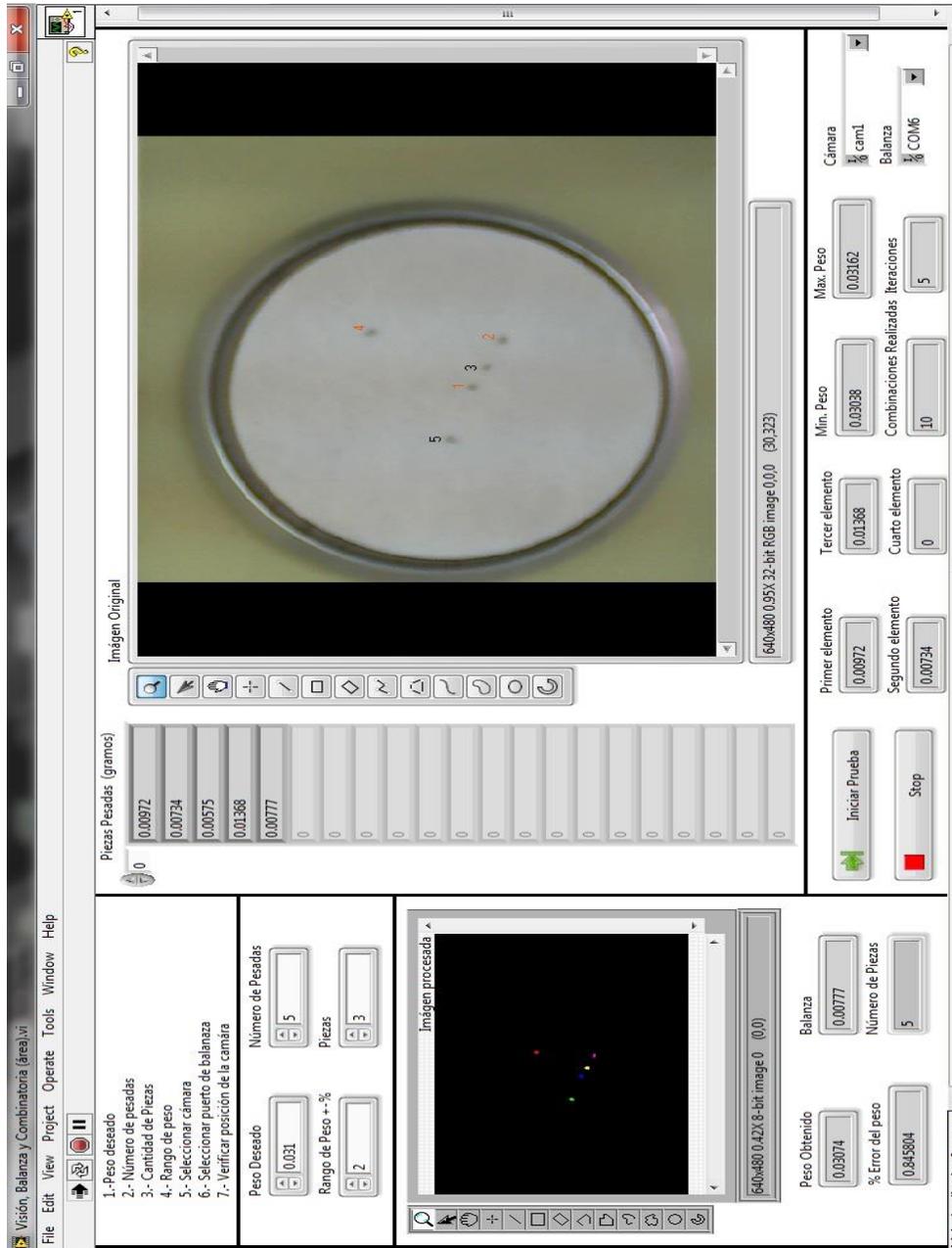


Figura 8.32. Lecturas obtenidas por el sistema de visión de pesaje de materiales de la fase líquida.

La imágenes anteriores muestran algunos de los resultados obtenidos al ejecutar el sistema de visión, en la imagen 8.33 se muestra el tiempo estimado para que NI Vision Assistant inspeccione alguna de las imágenes tomadas de las piezas a utilizar en el algoritmo de pesaje.

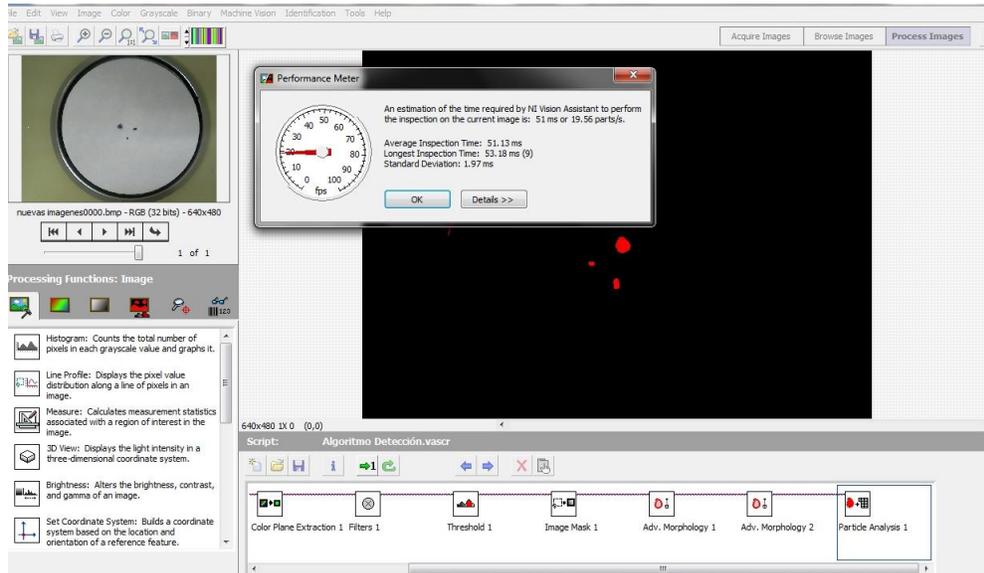


Figura 8.33. Herramienta Performance Meter de NI Vision Assistant para estimar el tiempo de inspección de cada una de las imágenes de las piezas utilizadas en la determinación del peso de la fase líquida.

Algunos de los puntos más sobresalientes al realizar estas pruebas fueron los siguientes:

- ❖ La pieza de menor tamaño que se utilizó para ser detectada por el sistema de visión fue de 0.4 mg.
- ❖ La pieza de mayor tamaño que se utilizó fue de 2 gramos.
- ❖ La cantidad máxima de piezas que se colocaron para ser detectadas, pesadas y determinar aquellas cuya combinación de pesos se acercan más al peso indicado por el usuario fue de 30 piezas.
- ❖ Las piezas deben de tener una distancia mínima entre ellas para ser detectadas por el sistema, esta distancia está por debajo del medio centímetro.
- ❖ Las piezas utilizadas para determinar la combinación de piezas que se acercan al peso deseado es de 1, 2, 3 o hasta 4 piezas.

- ❖ El sistema de visión enumera a todas las piezas y aquellas que selecciona como correctas las distingue de color naranja mientras que el resto de las piezas quedan de color negro.
- ❖ La velocidad de procesamiento de la imagen está por debajo de un segundo.
- ❖ El error mínimo obtenido al realizar una de las pruebas experimentales fue de 0% mientras que el error máximo fue de 48%. Para esta parte se pudo observar que el error en el pesaje se puede disminuir en gran medida gracias a dos factores, uno de ellos el número de piezas pesadas, en cuanto mayor número de piezas se tenga menor será el error y el segundo factor es el aporte de experiencia por parte del usuario, entre más experiencia tenga en realizar esta parte experimental menor será el error.
- ❖ El tiempo máximo en realizar todo el proceso, desde colocar las piezas, esperar a que se estabilice la balanza en cada uno de las pesadas y que el software realice todos sus algoritmos fue de aproximadamente 11 minutos a 13 minutos, esto tomando en cuenta que el tiempo de mayor demora es el de seleccionar, tomar y depositar la pieza en el platillo de la balanza y esperar a que esta se estabilice, este tiempo fue para una serie de pesadas de hasta 30 piezas.
- ❖ Hay que indicar que todos los experimentos se realizaron bajo diversos ambientes de iluminación, se usó el sistema de iluminación auxiliar diseñado para esta aplicación así como la luz de iluminación del laboratorio, en ambos casos se realizaron tanto por la mañana, tarde y noche obteniendo buenos resultados.
- ❖ Además en todos los experimentos realizados las piezas fueron siempre tomadas al azar de entre muchas piezas, esto para garantizar que el sistema de visión funciona de forma correcta.

9

Conclusiones

La técnica de epitaxia en fase líquida perdió popularidad con el advenimiento de otras técnicas como la epitaxia por haces moleculares (MBE) y la epitaxia a partir de compuestos metal-orgánicos. Algunas de las ventajas de la LPE sobre otras técnicas es lo relativamente sencillo que resulta montar los sistemas en condiciones normales de laboratorio así como las características ópticas y eléctricas de los dispositivos obtenidos. Con la automatización de los procesos vistos y analizados en los capítulos anteriores se tienen las siguientes ventajas:

- El monitoreo de variables como la temperatura, humedad, presión y vacío permiten conocer las condiciones óptimas bajo las cuales se realizan los experimentos.
- Se reducen los errores debidos al operador así como un control más preciso de los procesos involucrados.
- Almacenamiento de datos durante todo el experimento y una supervisión automática del crecimiento.
- Mejor reproducibilidad de los resultados además de mejorar las condiciones de seguridad para el operador y el laboratorio.
- Tiempos de crecimientos más cortos, reducción de ruidos mecánicos producidos por el operador y un mayor control del espesor de las capas crecidas.
- La aportación del presente trabajo consiste en que este tipo de sistemas de control pueden ser implementados para procesos donde deban de controlarse diferentes actividades y procesos, lo cual permitirá realizar propuestas de automatización para otros sistemas, procesos, laboratorios e industrias.

Todos los sistemas mecánicos, electrónicos y de software se diseñaron y fabricaron con herramientas propias del instituto. Todos estos sistemas fueron probados bajo diferentes condiciones permitiendo validar su correcto funcionamiento.

10

Extensión del Proyecto

En posteriores trabajos se puede ampliar la etapa de pesaje de materiales que contribuyen a la fase líquida de crecimiento. Además del sistema de visión utilizado para determinar los materiales a utilizar como fase líquida del experimento se pretende desarrollar un sistema robótico que se acople con el sistema de visión para tener un sistema de pesaje totalmente automatizado.

Se cuenta ya con el diseño del sistema mecánico y con el pre diseño de la tarjeta de control para una mesa "xyz" que serían utilizados para esta etapa.

En la figura 10.1 se muestra el diseño mecánico propuesto para esta aplicación. Como podemos observar en la figura el sistema mecánico consiste de una mesa con movimiento en el eje "x" y en el eje "y" de esta forma se posicionaría la herramienta del robot para tomar alguna de las piezas a pesar, estas se encuentran en pequeños recipientes agrupados en forma de matriz de 9 x 9. Una vez posicionado descendería la herramienta a lo largo del eje "z" para succionar el material y llevarlo hacia la balanza analítica para su pesaje.

Este sistema fue propuesto desde un inicio pero por falta de recursos económicos no fue posible su implementación.

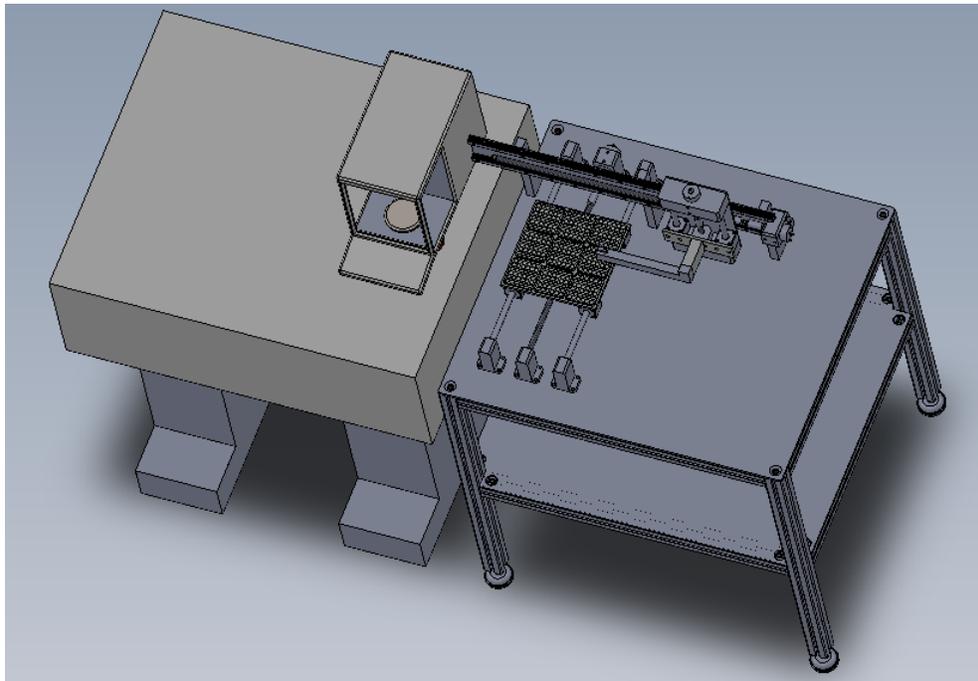


Figura 10.1. Sistema mecánico propuesto para ser acoplado al sistema de visión utilizado en el pesaje de materiales.

En la figura 10.2 se muestra la instrumentación para controlar el sistema mecánico “xyz” antes mencionado. La tarjeta se basa en un microcontrolador PIC18F4550 que se comunica vía el puerto USB con el programa de la PC en donde corre el programa de LabVIEW del sistema de visión implementado para el pesaje de los materiales.

El PIC18F4550 funciona como host de tres microcontroladores de propósito específico el LM629 utilizado para implementar servosistemas. Cada chip se encarga de controlar cada uno de los ejes de la mesa. Internamente cada microcontrolador genera una señal de PWM que energiza a cada uno de los puentes H conectados a los motores de corriente directa del robot. El sistema de control es cerrado por medio de encoders que retroalimentan la posición real de los ejes de la mesa hacia algoritmo de control del LM629. El algoritmo de control consiste de un perfil trapezoidal para ir de una posición a otra por medio de un PID digital.

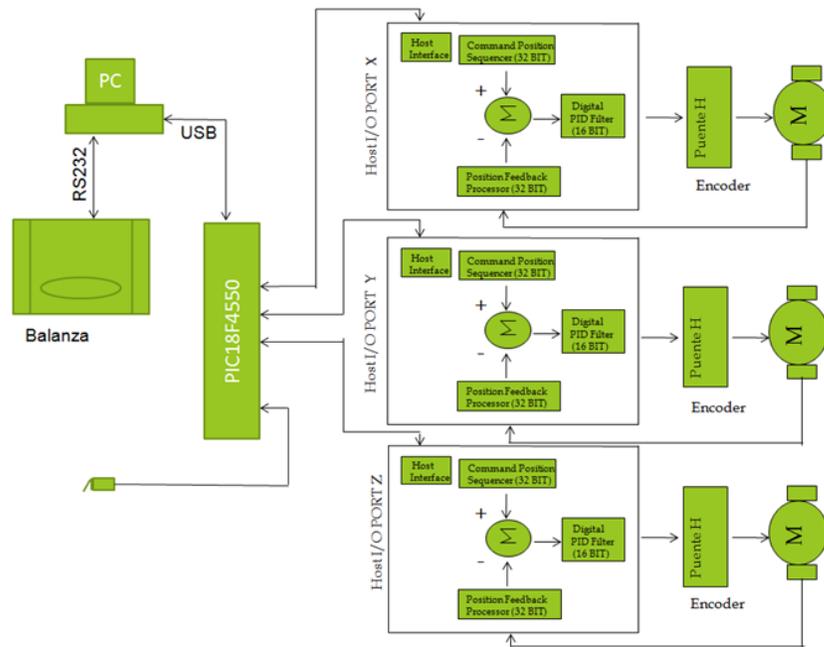


Figura 10.2. Diagrama a bloques del sistema de control de pesaje de materiales.

Otro punto a trabajar es la determinación y medición de los puntos de liquidus en forma automática. Normalmente se hace observando directamente la superficie del líquido, mientras se calienta lentamente, para medir la temperatura en que el último sólido desaparece de la superficie. El calentamiento debe ser muy lento para asegurar que la temperatura medida sea lo más cercana a la real y que el error cometido sea reproducible. Una vez determinado el punto de líquido se procede a intentar el crecimiento, esperando que el sólido en equilibrio con nuestro líquido tenga una composición tal que el crecimiento epitaxial sea permitido. Se propone un sistema de visión para realizar esta aplicación como el que se muestra en la figura 10.3.

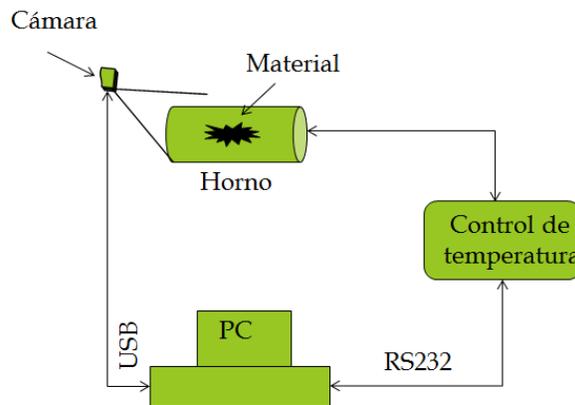


Figura 10.3. Máquina de visión a desarrollar para la determinación de puntos de liquidus utilizando LabVIEW en crecimientos por epitaxia en fase líquida.

Referencias

1. Tecnologías epitaxiales de crecimiento de cristales semiconductores, V. A., Mishournyi, I. C Hernández del Castillo, A. Yu. Gorvatchev y A. Lastras Martínez, Avance y Perspectiva volumen 21.
2. Fabricación y Caracterización Óptica de Materiales Semiconductores Para Aplicaciones en Optoelectrónica, Hernández Ariza Calderón, Rev. Acad. Colomb. Cienc. Volumen XXVII, Número 104 Septiembre de 2003.
3. LabVIEW 6i Programación Gráfica para el Control de Instrumentación, Antonio Manuel Lázaro, Paraninfo.
4. Applying PIC18 Microcontrollers Architecture, Programming, And Interfacing Using C And Assembly, Barry B. Brey, Prentice Hall.
5. C/C++ y Java Cómo Programar, Deitel Deitel, Prentice Hall.
6. Francisco Sánchez Niño, 2009, "Automatización del sistema de crecimiento de cristales por epitaxia en fase líquida", Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias Aplicadas, Facultad de Ciencias – UASLP.
7. Manipulación de Hidrógeno, Abelló Linde S.A, www.abellolinde.es.
8. Trace Hydrogen Sensor (P/N 701), Datasheet, Synkera Technologies Inc.
9. Somov, A. Baranov, D. Spirjakin, A Wireless Sensor- Actuator System for Hazardous Gases Detection and Control, Sensors and Actuators: A Physical (2014).
10. Microchip, Datasheet PIC16F877A/74A/76A/773A, 2001, www.microchip.com.
11. Microchip, Datasheet PIC18F2455/2550/4455/4550, 2004, www.microchip.com.
12. Transmitter Module: TWS-BS-3(433.92 MHz), Datasheet, www.wenshing.com.
13. HT12A/HT12E 212 series of encoders, Datasheet, April 11, 2000, www.wenshing.com.
14. Receiver Module: RWS-374-6(433.92 MHz), Datasheet, www.wenshing.com.
15. HT12D/HT12F 212 series of decoders, Datasheet, November 18, 2002, www.wenshing.com.

16. Robot Builder's Bonanza, Gordon McComb-Myke Predko, Third edition, Mc Graw Hill.
17. Introducción a la robótica, José María Angulo Usategui – Susana Romero Yesa, Thomson.
18. Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas, Groover Mikel, Mc Graw Hill.
19. The Art of Electronics, Paul Horowitz, Cambridge University Press.
20. Iluminación para las aplicaciones de visión artificial, Universidad Nacional de Quilmes, Ing. En Automatización y Control Industrial, Agosto de 2005.
21. Segmentación por Umbralización, Universidad Nacional de Quilmes, Ing. En Automatización y Control Industrial, Octubre de 2005.
22. NI Vision, NI Vision Assistant Tutorial, National Instruments, June 2008.
23. A Practical Guide to Machine Vision Lighting, Daryl Martin, Midwest Sales and Support Manager, Advanced illumination, October, 2007.
24. Introduction to NI Vision in LabVIEW for Education, Getting Started with Image Acquisition and Processing, National Instruments.
25. Detección de bordes en una imagen, Div. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Miguel Hernández, visión por computador, grupo de tecnología Industrial.
26. NI Vision, NI Vision Builder for Automated Inspection Tutorial, National Instruments, September 2011.
27. NI Vision, NI Vision Concepts Manual, National Instruments, June 2008.
28. Mahalanobis Distance, G J McLachlan, Resonance, June 1999.
29. Automatic Control System for the High Pressure CdTe Crystal Growth Furnace, Petr Praus, Eduard Belas, Jiří Bok, Roman Fesh, Jan Franc and Pavel Höschl Charles University, Faculty of Mathematics and Physics, Ke Karlovu 5, Prague 2, 121 16, Czech Republic.
30. Sistema de pesaje de alta precisión para fragmentos irregulares apoyado en procesamiento de imagen, Juan Carlos Muñoz Luna, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Noviembre 2013.
31. Control de gases de un sistema de crecimiento de cristales por la técnica de epitaxia en fase líquida, Francisco Sánchez Niño, Francisco J. De Anda Salazar, VI Congreso Internacional de Ingeniería Física, Junio 2012.
32. Automation of a crystal growth system by the liquid phase epitaxy technique, Sanchez-Nino, F. ; De Anda-Salazar, F.J. Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2012 9th International Conference on, DOI: 10.1109/ICEEE.2012.6421203, Publication Year: 2012, Page(s): 1 – 5, IEEE Xplore Digital Library.

33. Design of a Movement Control Equipment for Crystal Growth by the Liquid Phase Epitaxy Technique, Original Research Article, Procedia Technology, Volume 7, 2013, Pages 181-188 Francisco Sánchez-Niño, Francisco J. de Anda-Salazar.
34. A Hydrogen detectors Wireless network for monitoring the gas ambient in a laboratory, Francisco Sánchez-Niño, Francisco J. De Anda Salazar, VII Congreso Internacional de Ingeniería Física, Noviembre 2014.
35. Manipulator Controlled Since a Smartphone by Bluetooth, Francisco Sánchez-Niño, Griselda Rodríguez Pedroza, Edith G. Castillo Baldivia, VII Congreso Internacional de Ingeniería Física, Noviembre 2014.
36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2014.02.025>
37. <http://www.appinventorclassic.com>.
38. <http://www.national.com/>.
39. <http://www.microchip.com/>.
40. <http://mexico.ni.com>.

Publicaciones y Congresos

Publicaciones

1. Sánchez-Niño F. & De Anda-Salazar F. J. (2012), Automation of crystal growth system by the liquid phase epitaxy technique, IEEE Xplore Conference Publications, doi: 10.1109/ICEEE.2012.6421203.
2. Francisco Sánchez-Niño & Francisco J. de Anda-Salazar (2013), Design of a movement control equipment for crystal growth by the liquid phase epitaxy technique, Procedia Technology, 7, pp. 181-188.
3. F. Sánchez-Niño and & F. J. De Anda Salazar (2015), A Hydrogen detectors Wireless network for monitoring the gas ambient in a laboratory, J. Phys.: Conf. Ser. , 582(1), doi:10.1088/1742-6596/582/1/012038.
4. F Sánchez-Niño, G Rodríguez Pedroza & E. G. Castillo Baldivia (2015), Manipulator Controlled Since a Smartphone by Bluetooth, J. Phys.: Conf. Ser. , 582(1), doi:10.1088/1742-6596/582/1/012035.
5. Sánchez Niño, F., & De Anda Salazar, F.J., Hydrogen gas detector card. Journal of Applied Research and Technology (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jart2016.03.003>.

Congresos

1. "Control de gases de un sistema de crecimiento de cristales por la técnica de epitaxia en fase líquida", VI Congreso Internacional de Ingeniería Física.
2. "Automation of a crystal growth system by the liquid phase epitaxy technique", 9th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, CCE 2012
3. "Design of a movement control equipment for crystal growth by the liquid phase epitaxy technique", 2013 Iberoamerican Conference on Electronics Engineering and Computer Science.
4. "A Hydrogen detectors Wireless network for monitoring the gas ambient in a laboratory", VII Congreso Internacional de Ingeniería Física.
5. "Manipulator Controlled Since a Smartphone by Bluetooth", VII Congreso Internacional de Ingeniería Física.