

CARRERA INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Neuquén – 2016

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SIS-
TEMA MONITOR DE ESPESORES BASADO EN
CRISTAL DE CUARZO”**



Germán Nahuel Bogado - ING-374
Daniel Alejandro Kaluza - ING-145

Dr. Mauricio Troviano – Director
Ing. Alejandro Koffman – Co-Director

Departamento de Electrotecnia – Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Comahue - Argentina

Resumen

Existen diversos métodos de deposición aplicables a la fabricación de capas finas de materiales, como la evaporación por haz de electrones, evaporación térmica y bombardeo iónico o sputtering, entre otras. Estas técnicas tienen como característica común, que generan (por distintos medios) una “nube” del material que se desea depositar, para lograr de esta manera, que se adhiera a un sustrato, obteniendo un contacto a nivel atómico.

La técnica de evaporación térmica presenta, como ventaja principal sobre las otras técnicas, un consumo eficiente del material empleado. A su vez, ofrece una mayor versatilidad al momento de intercambiar el material a evaporar, y permite obtener capas finas del orden de los nanómetros, en una amplia gama de materiales.

Para una gran variedad de aplicaciones, resulta de interés controlar el espesor del material depositado durante el proceso de fabricación. Este control se realiza implementando un monitor de espesor, utilizando un cristal piezoeléctrico como sensor y una barrera física conocida como shutter, que se emplea para cubrir o exponer, tanto a la muestra como al sensor, a conveniencia con el fin de obtener el espesor deseado.

El cristal se dispone próximo al sustrato a recubrir, de manera que una porción de su superficie se encuentre expuesta, y así, al cargarse con material, se alteran las propiedades del cristal, produciendo que su frecuencia característica disminuya, principalmente, en función del espesor sobre él. Un monitor de espesor detecta dichas variaciones para estimar el valor de espesor de la capa.

En el presente trabajo se diseñó e implementó un monitor de espesor, compuesto de los sub-sistemas requeridos para su funcionamiento, tales como fuente de alimentación, porta-sustrato, porta-cristal, interfaz gráfica de usuario para visualización, placas de acondicionamiento de señal, potencia y procesamiento y control.

La validación del sistema se efectuó depositando capas delgadas de aluminio sobre sustratos de vidrio, para posteriormente caracterizar las muestras obtenidas, midiendo su espesor final de manera directa con el equipo desarrollado, contrastándolas con la estimación de espesor obtenida midiendo la curva de transmitancia de cada muestra y realizando el ajuste por el método *Transfer Matrix*. Se estableció por contraste las especificaciones finales del equipo desarrollado, obteniendo como resultado una resolución de

frecuencia de 1 Hz, que corresponde a una incerteza en la medición de espesor de 0,012 nm (utilizando aluminio como material depositado), similar a las prestaciones de equipos comerciales estándar.

Abstract

There are several techniques for depositing thin layers of materials on a substrate, the electron beam evaporation, thermal evaporation and sputtering among others. These techniques have a common characteristic, the production of a “cloud” of the material to be deposited and thus achieving its adherence to a substrate by contact at an atomic level.

The evaporation technique has a main advantage over other evaporation techniques, given it offers an efficient consumption of the used material. At the same time, this technique offers greater versatility when the evaporation material is exchanged. Nanometer layers can be obtained through this technique, applying to a wide range of materials.

In many applications the control of the deposited material becomes relevant during the manufacturing process for a number of applications. This control is performed by implementing a thickness monitor, using a piezoelectric crystal as a sensor and a physical barrier known as shutter, which is used which is used for both the sample and the sensor to be covered or exposed at convenience in order to obtain the desired thickness in order to obtain the desired thickness.

The quartz crystal is placed close to the substrate with a portion of its surface exposed. When loaded with material, the quartz crystal’s properties change, so that its characteristic frequency decreases, mainly depending on the thickness of the applied layer. A thickness monitor detects said variations to estimate the layer thickness.

In this work, a thickness monitor was designed and implemented, including those sub-systems required for its operation, such as power supply, substrate-holder, glass-holder, visualization graphical user interface, signal conditioning, power, processing and control boards.

System validation was achieved by depositing thin aluminum layers on glass substrate samples, each one characterized by measuring their final thickness directly with the equipment developed and comparing them afterwards with standard measurements of the same samples using a mathematical model based on the Transfer Matrix adjustment. The final specifications of the developed equipment were established by comparison, resulting in a frequency resolution of 1 Hz, which corresponds to a thickness uncertainty of 0.012

nm (using aluminum as deposited material), similar to the performance of standard commercial equipment.

Dedicatoria y agradecimientos

Dedicamos esta tesis a nuestros padres quienes siempre nos apoyaron incondicionalmente.

Especialmente a Florencia y a Victoria quienes brindaron su apoyo y aliento en todo momento.

A nuestros compañeros y amigos, quienes fueron un gran apoyo durante toda la carrera, y siempre nos acompañaron.

A nuestros profesores, quienes supieron transmitir su conocimiento y valores, durante todos estos años.

A nuestros tutores quienes nos ayudaron a desarrollar y a redactar esta tesis.

A todos los que nos apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, a quienes se les debe, por su apoyo incondicional.

Agradecemos especialmente a Kurt Taretto, por la motivación a emprender este trabajo.

A Carlos Canal, Sebastián Cuevas Mujica, Fernando Liozzi y a Fernando Gentili por su tiempo, consejos, por facilitarnos el hardware necesario para crear los prototipos y por su predisposición para ayudarnos en todo momento.

También a Marcelo Araoz por los consejos y lineamientos transmitidos que nos encaminaron y nos acercaron a la solución de diversos problemas.

A Daniel Garrido por asistirnos con el instrumental necesario al momento del desarrollo de los prototipos.

A Alejandro Kaluza por el esfuerzo, voluntad y ayuda en la fabricación de piezas esenciales para el desarrollo de esta tesis.

A Jorge Niglia facilitarnos el acceso a componentes que no se conseguían en el país.

Finalmente, le agradecemos a Mauricio Troviano y a Alejandro Koffman por su tiempo, ayuda y aliento en el desarrollo de esta tesis.

Tabla de contenidos

| | |
|---|------------|
| Resumen | i |
| Abstract | iii |
| Dedicatoria y agradecimientos | v |
| Capítulo 1 – Introducción | 7 |
| Capítulo 2 – Fundamentos del monitor de espesor | 9 |
| 2.1 Funcionamiento de la técnica de deposición por evaporación..... | 9 |
| 2.2 Fundamentos para la medición de espesor depositado | 11 |
| 2.2.1 Características del cristal de medición | 11 |
| 2.2.2 Osciladores piezoeléctricos | 12 |
| 2.2.3 Enfoque para la adquisición de datos..... | 13 |
| 2.2.4 Modelo matemático para la estimación del espesor depositado | 14 |
| 2.3 Factor geométrico | 17 |
| Capítulo 3 - Diseño del sistema | 19 |
| 3.1 Etapas de alimentación, potencia, acondicionamiento, procesamiento y control..... | 20 |
| 3.1.1 Etapa de alimentación | 20 |
| 3.1.2 Etapa de acondicionamiento de señal | 20 |
| 3.1.3 Etapa de procesamiento y control | 25 |
| 3.1.4 Etapa de potencia | 31 |
| 3.2 Interfaz Gráfica de Usuario (IGU) | 32 |
| Capítulo 4 – Validación del instrumento..... | 35 |
| 4.1 Ensayos de estabilidad | 35 |
| 4.1.1 Criterio de estabilidad | 35 |
| 4.1.2 Resultados | 36 |
| 4.2 Ensayo de espesores depositados..... | 40 |
| Capítulo 5 - Conclusiones | 45 |
| 5.1 Trabajos futuros | 45 |
| Capítulo 6 – Referencias | 47 |
| Anexo I - Circuitos | 51 |
| Anexo II - Instructivo de instalación IGU y complementos necesarios..... | 54 |
| Anexo III - Manual de operación..... | 59 |

Capítulo 1 – Introducción

La propuesta de tesis fue generada por el Grupo de Fotovoltaica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de esta Universidad, formado por el Dr. Kurt Taretto, el Dr. Mauricio Troviano, el Dr. Marcos Soldera, el Ing. Matías Córdoba y el Ing. Alejandro Koffman. El objetivo de esta tesis es el diseño e implementación de un equipo monitor de espesor, capaz de resolver espesores a depositar sobre un sustrato, en el orden de los nanómetros. El sistema será utilizado en primera instancia para caracterizar contactos eléctricos de celdas solares de fabricación propia.

El enfoque aplicado en el desarrollo del equipo consiste en disponer un cristal de cuarzo de medición, próximo a un sustrato, para sensar el espesor del material que se deposita en él. De esta manera, se estima el espesor del material depositado sobre el sustrato, en función del material depositado sobre el cristal piezoeléctrico, ya que, al cargarse con material, la frecuencia característica del cristal varía. Dichas variaciones son captadas a través de circuitos electrónicos que a su vez transmiten esta información hacia una computadora para ser visualizada en una interfaz gráfica de usuario.

Existen diversas maneras de implementar la electrónica complementaria que necesita el cristal de medición. Un criterio común, consiste en utilizar un circuito oscilador basado en el cristal de medición, para obtener una señal representativa del espesor que se deposita sobre el mismo [1 - 3]. Posteriormente, dicha señal puede ser procesada de diversas maneras, entre las cuales se destaca la utilización de uno o más mezcladores de frecuencia [4 - 6], lo que permite obtener una señal representativa, con una frecuencia menor a la original. Por tal motivo, esta técnica ofrece la posibilidad aliviar la exigencia de la electrónica del equipo, al operar en frecuencias menores.

La realización del equipo se dividió en el diseño e implementación de los siguientes subsistemas: fuente de alimentación; placa de acondicionamiento de señal; placa de procesamiento y control; placa de potencia; interfaz gráfica de usuario para visualización y comando de funciones del sistema.

Con el fin de desarrollar la electrónica detallada, en el capítulo 2 se dan los conceptos necesarios para comprender los aspectos fundamentales de la técnica de deposición por evaporación, a su vez, se tratan los fundamentos para la medición de espesores

depositados, en conjunto con el enfoque aplicado en la adquisición de datos y la importancia del factor geométrico para la medición.

En el capítulo 3 se detallan las etapas diseñadas e implementadas para constituir el sistema, y se explican las características más relevantes de cada una de ellas junto con la interfaz gráfica de usuario.

En el capítulo 4 se describen los ensayos realizados y los resultados obtenidos de los mismos, obteniendo así, los parámetros característicos del equipo, como el factor geométrico del conjunto utilizado, el tiempo de estabilización del sistema, su resolución de frecuencia final y su incerteza de espesor asociada. Con esta información se comparan las características principales del equipo respecto a las de un equipo comercial.

En el capítulo 5 se dan las conclusiones finales del trabajo, resumiendo los resultados obtenidos y se plantean los trabajos a futuro.

Capítulo 2 – Fundamentos del monitor de espesor

En el siguiente capítulo se desarrollan los fundamentos teóricos básicos que permiten diseñar un monitor de espesor. En la sección 2.1 se explica el funcionamiento de la técnica de deposición por evaporación. En la sección 2.2 se expresan los fundamentos para la medición del espesor depositado, considerando las especificaciones necesarias para la electrónica empleada. Finalmente, en la sección 2.3 se introduce el factor geométrico y su importancia para la medición.

2.1 Funcionamiento de la técnica de deposición por evaporación

Existen diversos métodos para lograr la deposición en vacío de un material en un sustrato, los mismos pueden clasificarse en tres grandes grupos: deposición de vapor física, deposición de vapor química y deposición asistida por plasma [7]. Dentro del grupo de deposición de vapor física, se encuentran las técnicas de deposición por arco catódico [8], deposición por haz de electrones [9], deposición por evaporación [10], deposición por láser pulsante [11] y deposición por sputtering [12]. Para el desarrollo de este trabajo, resulta de interés la deposición por evaporación.

La técnica de deposición por evaporación se define, en términos generales, como el calentamiento por efecto Joule de un material hasta evaporarlo, para que posteriormente, pueda condensar sobre un sustrato de interés. En la *Figura 2.1* se observa un filamento típico de tungsteno, que suele emplearse para la evaporación de aluminio. Éste, tiene como función soportar al material y calentarlo hasta su punto de evaporación.



Figura 2.1. Filamento de evaporación empleado experimentalmente. En este caso, se encuentra bañado en aluminio.

En la *Figura 2.2* se muestra un esquema básico del sistema de deposición de aluminio, por evaporación, compuesto por una cámara de vacío, un soporte para la colocación del sustrato en conjunto con el cristal de medición (Xtal), un filamento de tungsteno con sus contactos eléctricos empleados para evaporar el Aluminio colocado sobre el mismo, la fuente de alimentación que provee la corriente necesaria para calentar el filamento y la conexión para la bomba de vacío.

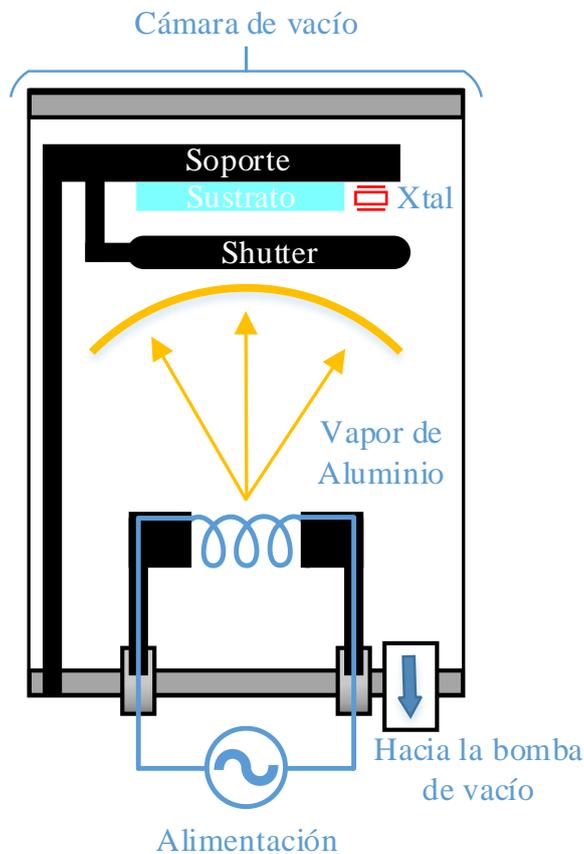


Figura 2.2. Esquema básico del sistema completo para la deposición de aluminio, en conjunto con el cristal (Xtal) piezoeléctrico utilizado para realizar la medición.

El proceso de evaporación, requiere el uso de una cámara de vacío capaz de alcanzar un nivel de vacío de 10^{-6} Torr [13], para prevenir la reacción del material evaporado, con la atmósfera ambiente. Bajo estas condiciones, las partículas de vapor viajan en línea recta desde la fuente de evaporación hasta el sustrato, por lo que se considera a efectos prácticos, un emisor puntual desde el centro del filamento, produciendo un perfil de evaporación esférico, dado que no existe una dirección de propagación preferencial.

Una vez montados los elementos, se debe considerar la posición inicial del shutter cubriendo tanto al sustrato como al cristal, posteriormente se debe generar el nivel de vacío para comenzar la evaporación. Luego, se procede a hacer circular una alta corriente alterna a través del filamento, hasta que su temperatura sea suficiente para evaporar el aluminio sobre él de manera uniforme [14]. Finalmente se acciona el shutter de manera que quede expuesto el conjunto del sensor y sustrato hasta obtener el espesor deseado, momento en el cual se acciona nuevamente el shutter cubriendo el conjunto.

La técnica aplicada para realizar la medición del espesor depositado, se basa en disponer de un cristal piezoeléctrico de cuarzo (Xtal) próximo al sustrato, de manera que parte de su superficie se vea afectada por la deposición (ver *Figura 2.2*). Al cargarse el cristal con material, su frecuencia de oscilación característica disminuirá en función del espesor de la capa depositada sobre el mismo.

2.2 Fundamentos para la medición de espesor depositado

2.2.1 Características del cristal de medición

El espesor de la capa depositada sobre el cristal puede medirse indirectamente gracias a la propiedad piezoeléctrica que poseen los cristales de cuarzo. Esta propiedad se manifiesta al aplicarles una diferencia de potencial entre sus terminales. Las fuerzas que ésta genera sobre los iones de la red cristalina, deforman al material flexionándolo en un sentido u otro según la polaridad la misma. El efecto piezoeléctrico es reversible, es decir, si los terminales se dejan a circuito abierto y se ejerce una fuerza sobre el material, aparecerá una diferencia de potencial entre ellos. Cuando se usa como oscilador, el cristal se construye de forma tal que pueda vibrar libremente a la frecuencia deseada y estas oscilaciones mecánicas, provocan una corriente alterna en el circuito externo.

La frecuencia de oscilación de un cristal piezoeléctrico depende de la geometría del mismo, del material que lo compone y de su tipo de corte respecto a la orientación cristalográfica del mismo [15]. Es importante notar que la frecuencia de oscilación es sensible a la temperatura de operación del cristal. El tipo de corte de los cristales modifica el comportamiento de la frecuencia frente a variaciones de la temperatura, por ello existen distintos tipos de cortes conocidos como AT, BT, XY, IT y SC siendo los primeros los

utilizados por excelencia en estas aplicaciones, dado que exhiben un gran desempeño frente a variaciones en la temperatura de operación [16].

Los cristales empleados típicamente en las mediciones de espesor son de cuarzo y se comercializan por las firmas INFICON y Kurt J. Lesker, entre otras como se ve en [17] y [18].

Entre las características principales de los cristales empleados para esta aplicación se destacan por ser de corte AT, por su diámetro de 14 mm, su frecuencia característica inicial de 6 MHz y sus contactos de oro. Su vida útil se encuentra definida en el rango de frecuencias comprendido entre 6 – 5,35 MHz.

2.2.2 Osciladores piezoeléctricos

Los osciladores convencionales basados en cristal piezoeléctrico, se pueden representar con un sistema realimentado como el de la *Figura 2.3*, que muestra el diagrama en bloques de un oscilador convencional compuesto por la ganancia de lazo directo $A(j\omega)$ y la ganancia de lazo de realimentación $B(j\omega)$, donde se considera que el cristal piezoeléctrico se encuentra incluido.

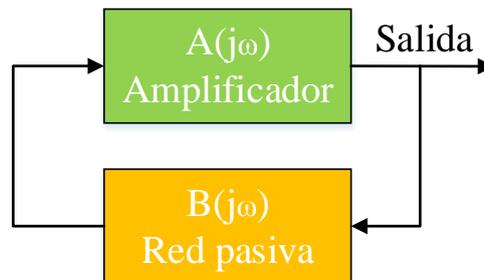


Figura 2.3. Diagrama en bloques de un oscilador convencional. $A(j\omega)$ representa la ganancia del sistema a lazo abierto, mientras que $B(j\omega)$ es la ganancia del lazo de realimentación que, en este caso, se plantea como positiva.

Los circuitos convencionales típicos que se ajustan a esta topología son conocidos como Colpitts [19], Clapp [20] y Hartley [21], entre otros. Su diseño se basa en calcular los componentes periféricos necesarios, para el funcionamiento del oscilador a una frecuencia fija, predefinida por el cristal a emplear.

Para el diseño del monitor de espesor, debe considerarse que el cristal de medición a utilizar, varía su frecuencia característica entre 6 – 5,35 MHz en función del espesor del

material que se deposita sobre él. Por ello resulta necesario implementar un oscilador que acepte la variación de la frecuencia de oscilación sin la necesidad de realizar recalibraciones con la frecuencia.

Existen osciladores basados en lógica digital, que tienen la capacidad de operar en un amplio rango de frecuencias sin la necesidad de calibración, aunque debe atenderse la distorsión de fase inherente a los circuitos integrados. Por ello en este trabajo se implementa un oscilador basado en lógica digital.

2.2.3 Enfoque para la adquisición de datos

Para medir el espesor depositado sobre un sustrato, utilizando un cristal de medición, se requiere que éste se encuentre oscilando, para obtener una señal representativa de dicho espesor. Con esta consideración, se desprende la necesidad de utilizar un circuito oscilador que excite y se adapte a las variaciones de frecuencia del cristal de medición.

A su vez, dado que el modo de oscilación del cristal de medición se encuentra en torno a los 6 MHz, en general, se opta por emplear un circuito oscilador de referencia en conjunto con un mezclador de frecuencias [4 - 6]. De esta manera, se logra reducir la frecuencia portadora (en al menos un orden de magnitud) con el fin de favorecer la variación porcentual de la señal de medición, aumentando así la sensibilidad del equipo. En la *Figura 2.4* se muestra un diagrama en bloques expresando el enfoque aplicado.

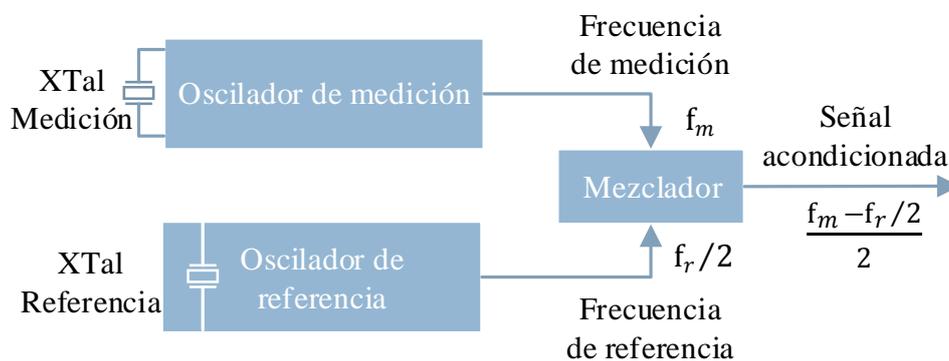


Figura 2.4. Enfoque típico para la medición. Éste consta de un oscilador de medición, un oscilador de referencia y un mezclador de frecuencias.

Para mezclar frecuencias existen dos enfoques, uno empleando una topología analógica y otro con una digital. Un diseño analógico presenta como ventaja principal la operación con armónicos principales, lo que ofrece un diseño robusto, pero requiere el

uso de filtros activos, fuente partida y emplea una cantidad mayor de componentes que su contraparte digital. Por otro lado, un diseño digital ofrece un circuito simple de menor cantidad de componentes, pero que sólo resulta efectivo si las señales empleadas presentan baja distorsión de fase (Jitter).

El Jitter (glitch), es la distorsión de fase que se manifiesta sobre la salida de circuitos osciladores digitales. En la *Figura 2.5* se muestran los efectos del Jitter sobre una señal digital. Se puede apreciar como la distorsión de fase provoca transiciones tempranas y/o tardías sobre la señal original distorsionándola. Estos desplazamientos en los flancos, se traducen en errores al momento de medir la frecuencia de oscilación de la señal.

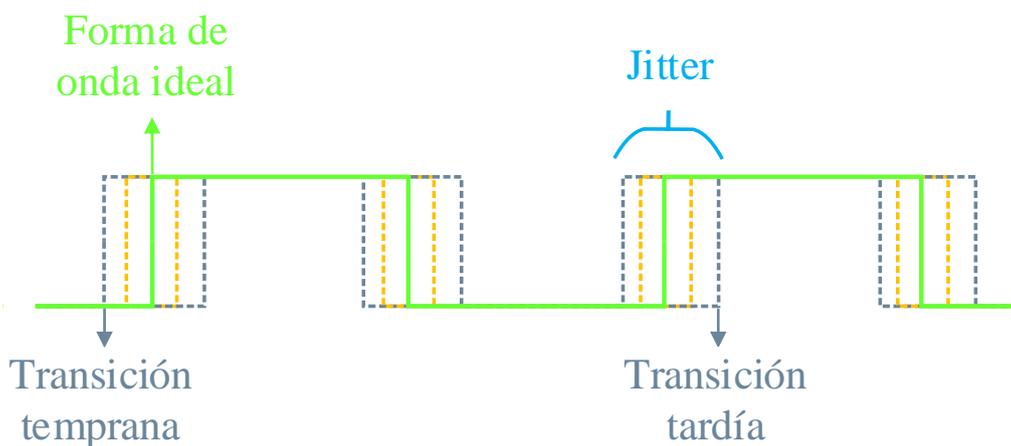


Figura 2.5. Diagrama temporal con Jitter. Pueden observarse una forma de onda ideal, una forma de onda con un flanco temprano (transición temprana) y una forma de onda con un flanco tardío (transición tardía).

Se puede inferir que, como resultado de esta distorsión, en caso de emplear un mezclador digital, éste debe ser capaz de tolerar estas variaciones en sus señales de entrada, y presentar baja distorsión a la salida, de otra forma, se presentarían errores sustanciales en los flancos de la señal de salida.

2.2.4 Modelo matemático para la estimación del espesor depositado

Existen distintos modelos utilizados para la estimación de espesor [22]. El modelo matemático empleado aquí es el mismo que utiliza en el equipo comercial “FTM7 Film

Thickness Monitor” [23], conocido como el método de impedancia acústica [22], el cual se detalla en la ecuación (2.1)

$$E_c = F_G \cdot \frac{D_q}{D_f} \cdot N_q \cdot \frac{Z_f}{f \cdot \pi \cdot Z_q} \cdot \tan^{-1} \left\{ \frac{Z_q}{Z_f} \cdot \tan \left[\pi \cdot \left(1 - \frac{f}{f_q} \right) \right] \right\}, \quad (0.1)$$

donde E_c es el espesor de la capa en nm , F_G es el factor geométrico (Tooling), D_q es la densidad del cuarzo ($2,66 \text{ g/cm}^3$), D_f es la densidad del material depositado ($2,7 \text{ g/cm}^3$ para aluminio), N_q es la constante de frecuencia del cuarzo ($1,668 \times 10^{12} \text{ Hz} \cdot nm$), Z_f es la impedancia acústica de la capa depositada ($8,17 \times 10^5 \text{ g/cm}^2 \cdot s$ para el aluminio), Z_q es la impedancia acústica del cuarzo ($8,834 \times 10^5 \text{ g/cm}^2 \cdot s$), f_q es la frecuencia del cristal sin cargar en Hz y f es la frecuencia del cristal cargado en Hz .

La impedancia acústica de un material Z_f , representa a la resistencia que éste opone a la propagación de ondas mecánicas por el mismo. Este valor puede estimarse mediante la expresión $Z_f = D_f \cdot v_f$, donde v_f es la velocidad del sonido en el material.

El factor geométrico F_G , permite realizar correcciones sobre la ecuación (0.1). Éste, contempla la disposición espacial del cristal respecto a la del sustrato y la sección del cristal sobre la cual se deposita material (área expuesta). Como puede apreciarse, el espesor es proporcional a este factor, y consecuentemente lo es su incerteza asociada; por tal motivo es de suma importancia conocer el valor de F_G .

De la ecuación (0.1), se desprende que la medición de espesor es indirecta, y se obtiene a partir de la medición directa de la frecuencia. Por tal motivo, en este trabajo, se considera que el error en la medición de frecuencia, está asociado a la resolución del equipo, y partiendo de esto se obtiene la incerteza inherente al valor del espesor estimado. Cabe destacar que, el valor de dicha resolución es un parámetro constante del equipo, mientras que la incerteza asociada al espesor, depende tanto del factor geométrico como de las características del material depositado.

Con el fin de asistir la comprensión de la ecuación (0.1) resulta de interés analizar el comportamiento del valor de espesor E_c en función de la frecuencia f en dos situaciones posibles: primero al variar F_G depositando un único material (aluminio) y después variando el material depositado, manteniendo F_G unitario.

En la Figura 2.6 se muestra una familia de curvas de espesor en función de la frecuencia, utilizando aluminio como material depositado, variando el factor geométrico en un rango de 0,2 – 2 y la frecuencia en un rango de 6 – 5,35 MHz, correspondiente a la vida útil del cristal. A su vez se incluye una línea recta punteada, para facilitar la apreciación de la concavidad presente en las curvas. Como es de esperarse, las curvas son decrecientes ya que, al depositar material sobre el cristal, disminuye la frecuencia característica del mismo. Se aprecia que al aumentar F_G se extiende el espesor máximo medible, al costo de un incremento proporcional en su incerteza. Finalmente es posible considerar un comportamiento lineal a tramos cuando se mantiene constante el material empleado en la deposición.

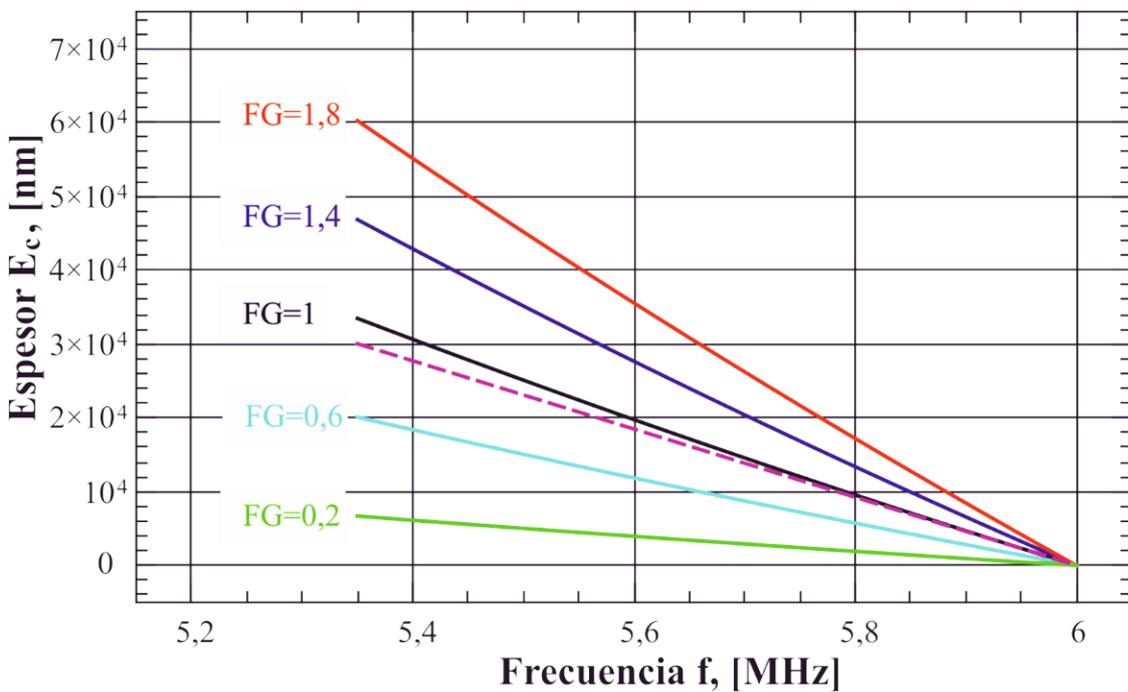


Figura 2.6. Espesor en función de la frecuencia. Esta familia de curvas utiliza aluminio como material depositado, variando el factor geométrico en el rango 0,2 – 2. Se aprecia una recta punteada violeta para contrastar la concavidad presente en la familia de curvas.

En la Figura 2.7, se muestra una familia de curvas de espesor en función de la frecuencia, variando el material depositado y considerando un factor geométrico unitario. En este caso, se utilizaron como materiales típicos el aluminio (Al), grafito (C), plata (Ag) y oro (Au), utilizando en todos los casos un factor geométrico unitario. Puede observarse

que la concavidad de la función, depende fuertemente del material depositado y que también se ve afectado el espesor máximo medible, manteniéndose la misma incerteza en la medición de espesor para todos los casos. Además, se aprecia cómo ante pequeñas variaciones de frecuencia, es posible considerar un comportamiento lineal, lo cual sugiere la posibilidad de la aplicar modelos de estimación lineal a tramos. Sin embargo, se utiliza la ecuación (0.1) debido a que ofrece un mejor ajuste y en la actualidad se utiliza en diversos equipos comerciales.

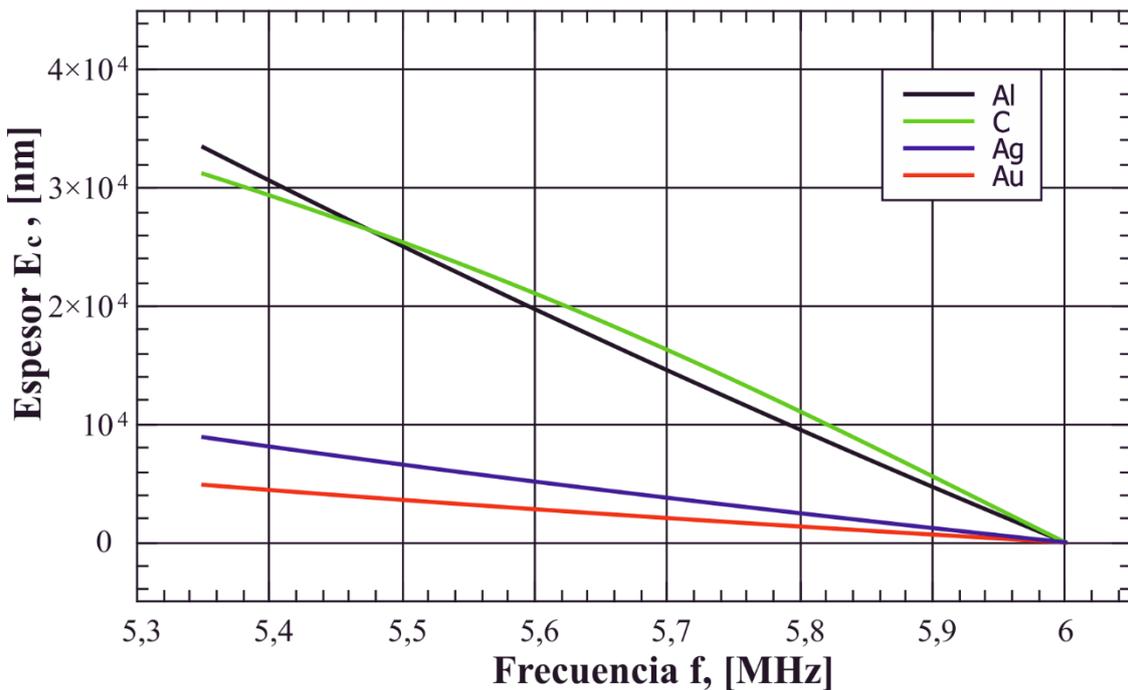


Figura 2.7. Espesor en función de la frecuencia. Esta familia de curvas utiliza una serie de materiales depositados, manteniendo un factor geométrico unitario.

2.3 Factor geométrico

El factor geométrico FG (Tooling) contempla la disposición espacial del cristal de medición y a su sección expuesta, respecto al sustrato con referencia al punto de evaporación del material. Este factor, afecta directamente tanto a la medición de espesor, como a la incerteza del equipo, con lo cual resulta crucial definirlo para cada cámara de deposición particular.

El factor geométrico se estima únicamente de forma experimental siguiendo un proceso iterativo utilizando la ecuación (2.2) [24].

$$FG = FG_i \cdot \left(\frac{E_v}{E_x} \right), \quad (0.2)$$

donde FG es el factor geométrico final, FG_i representa el factor geométrico inicial (considerado unitario en la primera iteración), E_v es el valor verdadero del espesor en el sustrato y E_x es el espesor medido por el instrumento ensayado.

Capítulo 3 - Diseño del sistema

En el siguiente capítulo se explica cómo está compuesto el monitor de espesor. En la sección 3.1 se divide al instrumento en cuatro etapas, relacionadas con el tratamiento de la señal de entrada, procesamiento, adaptación y envío de datos. El sistema se completa en la sección 3.2, donde se explica la interfaz de usuario y las tareas que lleva a cabo.

En la *Figura 3.1* se muestra un diagrama en bloques de las etapas que componen al sistema y su interacción.

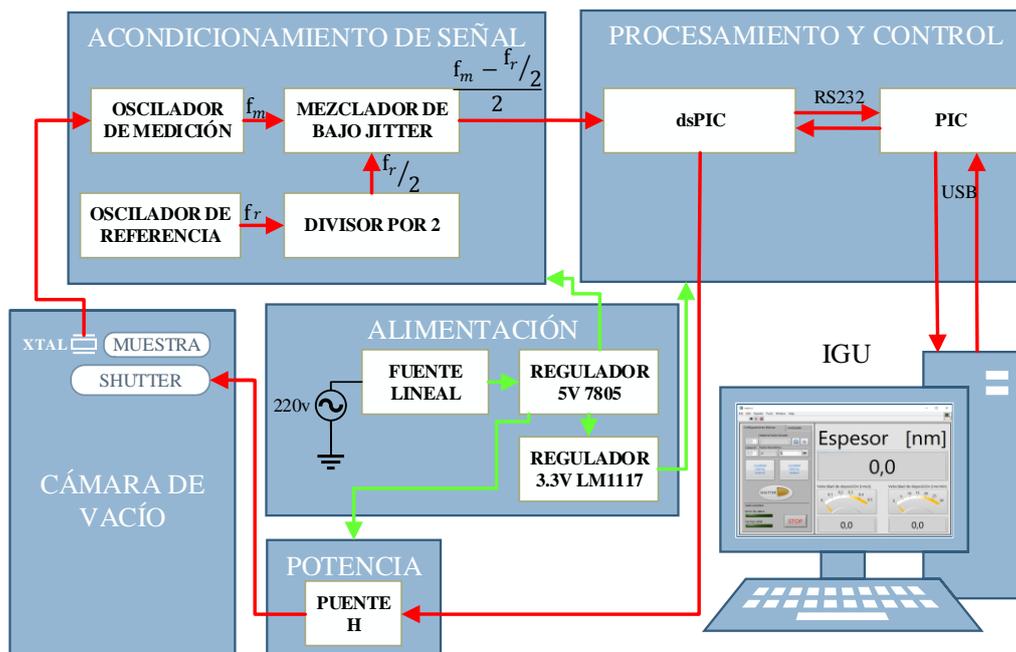


Figura 3.1. Esquema general de todas las etapas que componen al monitor de espesor y su interacción. Los bloques azules representan las distintas etapas, las flechas rojas indican el flujo de las señales entre las etapas y las flechas verdes indican el flujo de alimentación.

Se observa que la señal proveniente desde el oscilador de medición, gobernado por el cristal de medición, se adapta en la etapa de acondicionamiento de señal. La frecuencia de la señal acondicionada, se computa en la etapa de procesamiento y control; esta etapa también se ocupa del procesamiento de la información, del control de la etapa de potencia y de mantener la comunicación con la interfaz gráfica de usuario (IGU). La etapa de potencia se ocupa de accionar el shutter. Finalmente, la etapa de alimentación se encarga de generar los valores de tensión requeridos para el funcionamiento de las etapas de acondicionamiento de señal, potencia y procesamiento y control.

3.1 Etapas de alimentación, potencia, acondicionamiento, procesamiento y control.

3.1.1 Etapa de alimentación

Para el diseño de la etapa de alimentación, se establece la necesidad de una fuente estable, de bajo ripple, de manera que se atenúen los efectos del ruido en las etapas siguientes. La misma debe generar valores de tensión de salida de 5 V y de 3,3 V.

Bajo estos requisitos, se optó por la utilización de una fuente lineal, para evitar la inducción del ruido inherente a la regulación switching. A su vez, se utilizaron capacitores de desacople a tierra en las entradas de alimentación de todos los circuitos integrados, para filtrar los posibles ruidos inducidos en las señales de alimentación. Los valores y disposición de estos capacitores, se diseñaron en función de las recomendaciones de Microchip, para el dsPIC (modelo dsPIC33EP512GP502) [25], utilizado en la etapa de procesamiento y control (ver *Figura 3.1*).

En la *Figura 3.1* puede apreciarse el diagrama en bloques de la etapa de alimentación. Esta etapa utiliza una fuente lineal que transforma la tensión de fase de $220 V_{\text{rms}}$ (corriente alterna), en una tensión de 9 V (corriente continua). La tensión de salida de la fuente lineal, se utiliza como entrada en un regulador 7805. Éste, genera una tensión de salida de 5 V con una corriente máxima de 1,5 A. De manera análoga, la tensión de 5 V se utiliza como entrada para un regulador LM1117, el cual genera una tensión regulada de 3,3 V con una corriente máxima de 800 mA. La tensión de 5 V se utiliza para alimentar las etapas de potencia y de acondicionamiento de señal, mientras que la tensión de 3,3 V se utiliza para alimentar la etapa de procesamiento y control.

3.1.2 Etapa de acondicionamiento de señal

La etapa de acondicionamiento de señal, es una de las más importantes del equipo, ya que es la que se ocupa de acondicionar la señal para que posteriormente pueda ser procesada. Recapitulando sobre las menciones de la sección 2.2.2, es en esta etapa donde se debe diseñar el circuito oscilador que complementa al cristal de medición, considerando como requisito principal, que pueda adaptarse a las variaciones de frecuencia del

crystal, de manera que presente una oscilación estable durante su vida útil. Este requerimiento, implica que no puedan utilizarse los circuitos osciladores convencionales.

En esta etapa, también se diseña el circuito oscilador de referencia, que suele realizarse utilizando un cristal de referencia (ver sección 2.4). Los requerimientos de este circuito incluyen que se pueda generar una frecuencia estable en el rango de 5 – 5,5 MHz, y sea robusto frente a la variación de las condiciones de medición, en especial respecto a la temperatura.

Finalmente, debe diseñarse un circuito mezclador, que, como se presenta en la sección 2.4, debe generar una frecuencia de salida que esté relacionada con la diferencia de las frecuencias de medición y de referencia. A su vez se requiere que disponga de una salida digital de bajo Jitter.

En la *Figura 3.1* se muestra un esquema en bloque de la etapa de acondicionamiento de señal. Como puede observarse, se emplean dos osciladores, uno de referencia y uno de medición. Cabe mencionar que, debido a la disponibilidad de materiales se optó por utilizar un cristal de 10,7 MHz en el oscilador de referencia en conjunto con un divisor de frecuencia por dos, para generar la señal de referencia requerida. A su vez, la implementación de este divisor, tiene como ventaja adicional que divide a la mitad las posibles variaciones de frecuencia que pueda presentar el oscilador de referencia respecto a su frecuencia fundamental, haciéndolo más robusto en este aspecto.

A continuación, se desarrollan las estrategias y circuitos utilizados para la implementación de esta etapa.

El oscilador de medición utilizado, es un oscilador basado en compuertas lógicas NAND, cuyas ventajas principales son, tener una salida digital (señal cuadrada entre 0 V y 5 V), ser estable, y ser apto para un rango de frecuencias de [2 – 12] MHz [26]. En la *Figura 3.2* se observa el esquema del oscilador de medición. Las resistencias R1 y R2 cumplen la función de estabilizar las compuertas NAND respecto a la temperatura, lo que facilita al cristal la oscilación en su frecuencia característica; típicamente, ambas resistencias tienen el mismo valor y suelen ser de 560 Ω . El capacitor C1 tiene por función desacoplar la componente de corriente continua y debe tener una impedancia de 0,1 Ω o menor en la frecuencia de operación. Finalmente, el modo de conexión del cristal es en serie, por lo que su resistencia debe ser baja; en este sentido, los cristales de corte AT son

los adecuados para la implementación del circuito, y además oscilan con un ciclo de trabajo (duty) cercano al 50%.

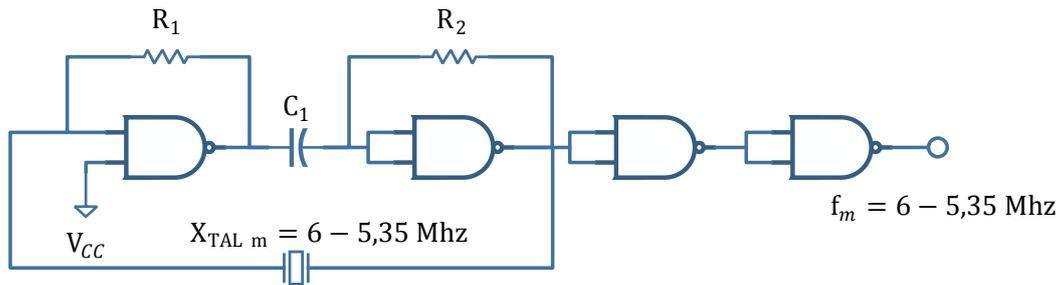


Figura 3.2. Oscilador de medición compuesto por compuertas NAND. El oscilador es capaz de mantener una oscilación estable al variar la frecuencia característica del cristal $X_{TAL m}$.

El oscilador de comparación respeta el circuito expuesto en la Figura 3.2. El cristal que se utiliza en este caso es de 10,7 MHz. El bloque correspondiente al divisor de frecuencia por dos, se implementa con un flip-flop tipo D. En la Figura 3.3 puede observarse el circuito del oscilador de comparación en conjunto con el divisor. Puede apreciarse que la frecuencia de la señal de salida es de 5,35 MHz.

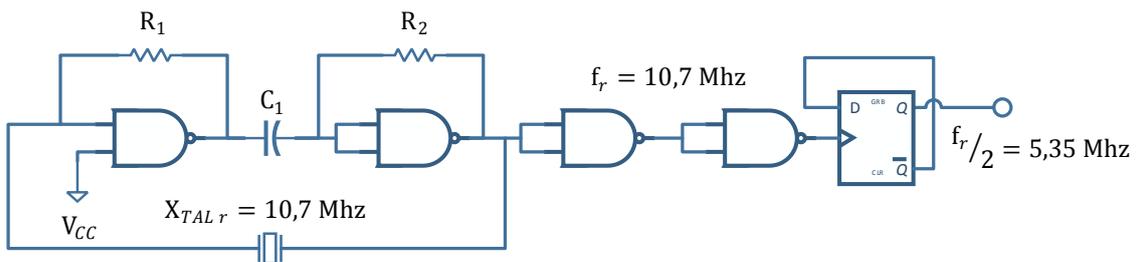


Figura 3.3. Oscilador de comparación y divisor por dos. Como puede apreciarse la frecuencia de la señal de salida corresponde a la mitad de la frecuencia del cristal $X_{TAL r}$.

El mezclador de bajo Jitter (glitch), se implementa con el circuito esquemático de la Figura 3.4, también puede observarse un diagrama temporal de las señales en distintos puntos del circuito [27].

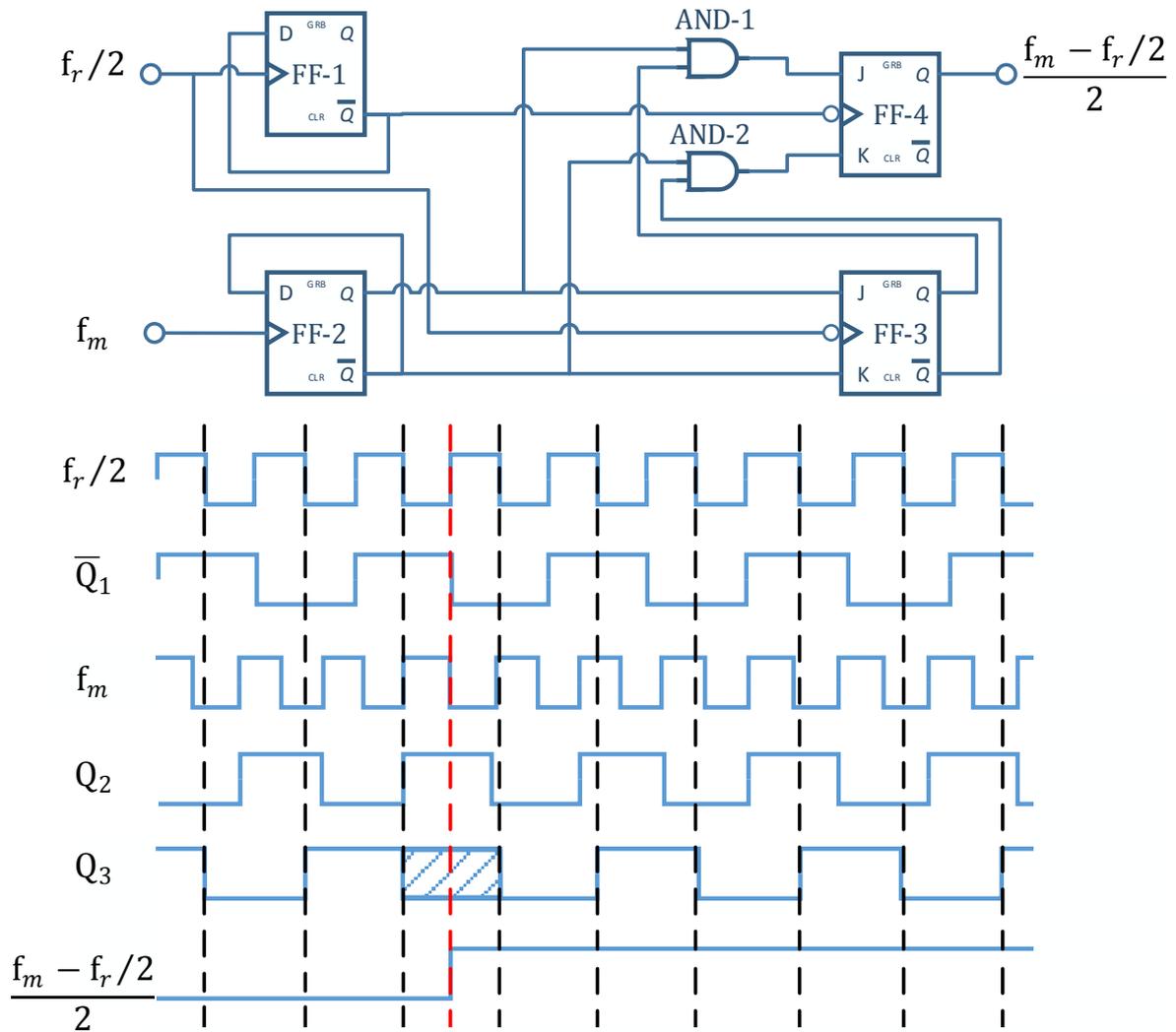


Figura 3.4. Mezclador de bajo Jitter con la forma de las señales en distintos puntos del circuito. Como puede apreciarse, la frecuencia de la señal de salida corresponde a la mitad de la resta entre las frecuencias de las señales $f_r/2$ y f_m . El sombreado en la señal Q_3 corresponde a la única ambigüedad que puede presentarse en el circuito, cuando las señales tienen Jitter, aunque no genera errores sustanciales en la medición de frecuencia. Puede apreciarse la condición de transición para la salida, indicada por la línea roja de la figura.

Este circuito previene los errores en la mezcla de señales implementando dos FF-D (disparados por flancos ascendentes) y dos FF-JK (disparados por flancos descendentes) en conjunto con compuertas tipo AND.

La frecuencia de referencia de 5,35 MHz " $f_r/2$ " se conecta directamente a las entradas de clock de los "FF-1" y "FF-3" mientras que la señal del cristal (en principio 6 MHz) se conecta directamente al clock del "FF-2". La señal " \bar{Q}_1 ", cambia su estado en

todos los flancos ascendentes de " $f_r/2$ " y por lo tanto, tiene la mitad de su frecuencia. Análogamente, la señal " Q_2 " cambia su estado con los flancos ascendentes de la señal " f_m " y también tiene la mitad de su frecuencia.

Se aprecia como los flancos descendentes de la señal " $f_r/2$ " rigen el comportamiento del "FF-3", sincronizando la señal " Q_2 " respecto a los mismos, es decir, la señal " Q_3 " copia el estado de " Q_2 " en cada flanco descendiente de la señal " $f_r/2$ ". Puede notarse que, como " $f_r/2$ " rige el comportamiento de las señales " $\overline{Q_1}$ " (con flancos ascendentes) y " Q_3 " (con flancos descendentes), dado que " $\overline{Q_1}$ " tiene la mitad de la frecuencia que " $f_r/2$ ", entonces los flancos de " Q_3 " siempre se producen un cuarto de ciclo antes que los de " $\overline{Q_1}$ ".

Las señales " Q_2 " y " Q_3 " gobiernan el comportamiento de la compuerta "AND-1", que a su vez controla la entrada "J" (set) del "FF-4". Lo mismo sucede con las señales " $\overline{Q_2}$ " y " $\overline{Q_3}$ ", con la "AND-2" y la entrada "K" (reset) del mismo flip-flop. El clock del "FF-4", se rige por los flancos descendentes de la señal " $\overline{Q_1}$ ". De aquí, se desprende que, se tiene un flanco ascendente en la salida " Q_4 ", cuando " Q_2 " y " Q_3 " estén en un "1" lógico y se produce un flanco descendente en la señal " $\overline{Q_1}$ ". Análogamente, para que se produzca un flanco negativo en la salida, " Q_2 " y " Q_3 " deben estar en un estado "0" lógico cuando se produce un flanco descendente en la señal " $\overline{Q_1}$ ". Cualquier otra combinación posible entre los estados " Q_2 " y " Q_3 ", genera que tanto la entrada "J" como la "K" del "FF-4" permanezcan en "0" cuando se produce un flanco descendente en la señal " $\overline{Q_1}$ ", por lo que la señal de salida permanece en el estado que tenía antes de dicho flanco.

En este caso, como la frecuencia de " f_m " es mayor que la de " $f_r/2$ ", " Q_2 " va a tomar el estado "1" antes que la señal " Q_3 " y cuando se produzca el próximo flanco descendente en la señal " $f_r/2$ ", " Q_3 " adopta el mismo estado; dado estos eventos, cuando se produzca el próximo flanco descendente de la señal " $\overline{Q_1}$ ", la salida cambia del estado "0" al estado "1". Esta situación se da en la línea temporal indicada en rojo, y para el entendimiento, debe considerarse que la región sombreada se encuentra en un estado definido por un "1" lógico.

Partiendo de que la salida acaba de realizar un flanco ascendente, si en el siguiente flanco descendente de " $\overline{Q_1}$ ", la señal " Q_3 " está en "0" debido a la presencia de Jitter en la señal " $f_r/2$ ", la salida permanece en "1", a menos que la distorsión en la fase de " f_m "

sea suficiente como para producir que “ Q_2 ” adopte el estado “0” en ese instante, lo que implica que el cambio de fase de “ Q_2 ” ascienda a un valor de un cuarto de ciclo.

Entonces, las condiciones prácticas para la operación de este restador exigen que el nivel de Jitter en cada señal de entrada no supere el cuarto de ciclo. Bajo estas condiciones, la performance del mismo da como resultado una salida libre de Jitter, aun cuando las señales de entrada tengan valores de frecuencia similares.

La única ambigüedad posible de este circuito, puede producirse en una situación como la que se presenta sombreada en el gráfico. En este caso, si existiera un nivel de Jitter en la señal “ $f_r/2$ ”, el área sombreada podría estar tanto en el estado “0” (si se produce un flanco temprano) o “1” (si se produce un flanco tardío). En este caso, podría darse que el flanco ascendente de la salida se retrase un periodo completo de la señal “ $\overline{Q_1}$ ”. Esto produce que el periodo anterior tenga mayor duración, y disminuye la duración del periodo siguiente, por lo que, no se produciría un error sustancial en la medición de su frecuencia, si esta se mide haciendo la adquisición de varios periodos.

3.1.3 Etapa de procesamiento y control

La etapa de procesamiento y control se puede observar en la *Figura 3.1*. En esta etapa, se mide la frecuencia a la señal que proviene de la etapa de acondicionamiento de señal. El encargado de medir esta frecuencia es un dsPIC33EP512GP502 (dsPIC) [28], que, dentro de sus características destacadas, tiene un clock de 70 MIPS (millones de instrucciones por segundo) y posee dos contadores de 32-bits, que pueden utilizarse como base de tiempo o como contador de pulsos externos, entre otras funcionalidades. Por otra parte, el PIC18F14K50 (PIC) [29], se utiliza como una interfaz bidireccional RS232-USB, para mantener la comunicación entre el dsPIC y la IGU, es decir, se ocupa de retransmitir la información en los dos sentidos de la comunicación. El dsPIC es el encargado del procesamiento de la información y control de la etapa de potencia.

La programación del dsPIC y del PIC se realizó con el software MPLABX [30], con los compiladores de la familia XC [31], utilizando xc16 y xc8 respectivamente.

En la *Figura 3.5* se observa un diagrama de flujo de la función que realiza la adquisición de datos crudos, indicando el procedimiento lógico utilizado para la medición de frecuencia, el cual se controla utilizando las banderas pertenecientes a los registros de

interrupciones. Se utilizan los dos contadores de 32-bits disponibles en el dsPIC. Uno se utiliza para contar la cantidad de flancos ascendentes en un pin de entrada (señal de entrada), mientras que el restante se ocupa de llevar la base de tiempo de la medición, en función del clock interno de 70MIPS. La estrategia utilizada para medir frecuencia, se basa en computar la cantidad de pulsos durante una ventana de tiempo predefinida en 500 ms (ventana de conteo). Para mejorar la resolución de la medición, se incorpora una etapa de sincronismo, que consiste en almacenar el tiempo que se demora en registrar el primer flanco, luego de iniciar la ventana de conteo, y almacenar el tiempo en el que se registra el último flanco, luego de finalizar la ventana de conteo. Los valores de la cantidad de pulsos que se obtuvieron y el tiempo de medición, se envían a la IGU para hacer los cálculos de frecuencia medida y de espesor.

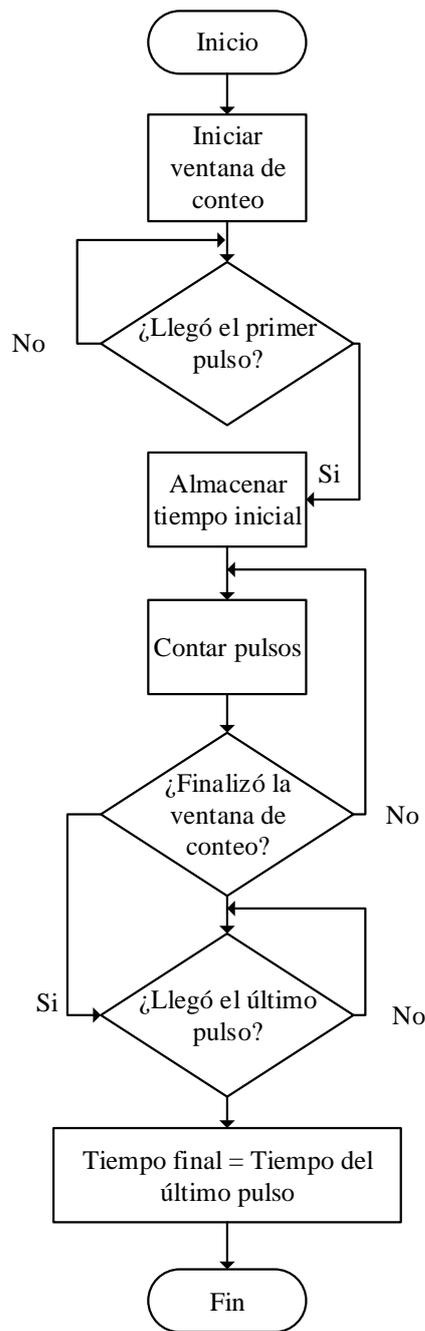


Figura 3.5. Diagrama de flujo de la función que realiza la adquisición de datos crudos, para ser procesados luego por la IGU.

En la Figura 3.6 se observa un ciclo completo de medición. Las líneas verticales punteadas, indican los eventos temporales de importancia. “ $\frac{f_m - f_r}{2}$,” representa la señal de entrada, cuya frecuencia se desea medir y “Clock” es la base de tiempo del dsPIC (70 MIPS). El proceso de medición empieza en “1”, donde se inicia la venta de conteo y se aguarda al primer flanco positivo en la señal de interés. Cuando éste llega, en el evento

“2” se almacena el tiempo de demora “ t_i ”, con respecto al inicio en “1”. Se observa, que puede existir un desfase desde el instante en el que se produce el flanco, hasta que se detecta en “ t_i ”. Este desfase está relacionado con las instrucciones que realiza el dsPIC para detectar este evento, y está acotado entre 0 – 12 ciclos de instrucción. Seguidamente, se contabilizan los flancos de entrada, hasta finalizar la ventana de conteo de duración “ t_c ”, en el evento “3”. En esta instancia, se espera a la llegada de un nuevo flanco, y en “4” se almacena el tiempo “ t_f ” que se demora desde que finaliza la ventana de conteo en “3”. Análogamente al caso anterior, también puede existir una demora desde que se produce el flanco, hasta que el dsPIC lo detecta, pero en este caso, la demora se encuentra acotada entre 0 – 4 ciclos de instrucción. La diferencia entre uno y otro, se debe a la cantidad de instrucciones ejecutadas en la programación, para controlar la llegada del último flanco. Cabe mencionar que el flanco que se detecta en “4”, no se suma a la cantidad de pulsos. De esta manera, puede observarse que, para este caso, se cuentan seis flancos, durante el tiempo de medición y coincide con la cantidad de ciclos que se producen entre los eventos “1” y “4”.

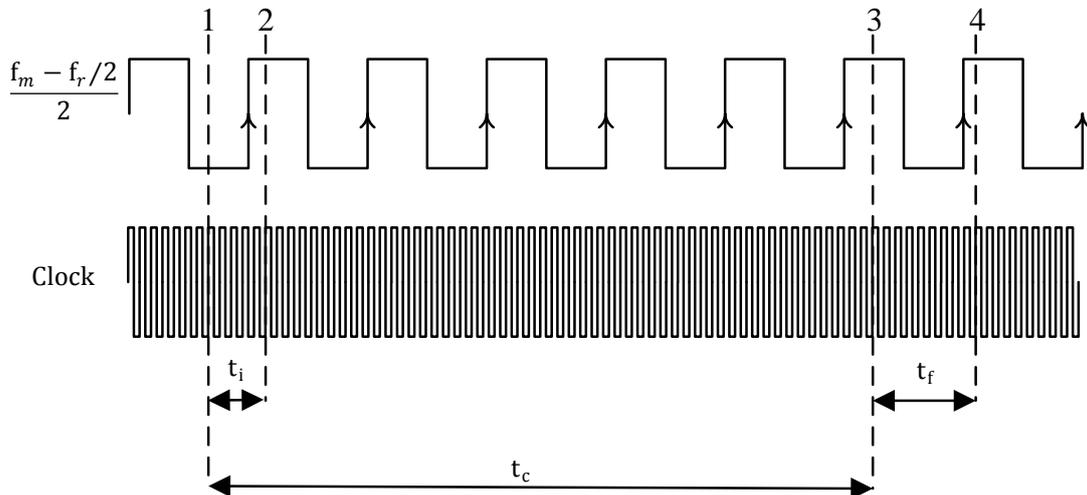


Figura 3.6. Ciclo de conteo. Los números 1, 2, 3 y 4 indican los eventos temporales destacados, $\frac{f_m - f_r}{2}$ representa la señal cuya frecuencia quiere determinarse.

Para calcular la frecuencia de la señal de entrada, se utiliza la ecuación (3.1).

$$f = \frac{N}{t_c - t_i + t_f}, \quad (0.3)$$

donde f es la frecuencia medida (Hz), N es el número de pulsos, t_c es el tiempo de duración de la ventana de conteo (500×10^{-3} seg), t_i es el tiempo de retraso del primer flanco (seg) y t_f es el tiempo de retraso del último flanco (seg).

Para determinar el error relativo máximo al medir frecuencia, partiendo de la ecuación (0.3), se puede apreciar que éste se debe a los desfasajes de t_i y t_f . Como ambos desfasajes son positivos, para encontrar la cota superior de frecuencia, la situación más desfavorable se produce cuando, t_i tiene un error de 12 ciclos de instrucción y t_f no tiene error. Si se tiene en cuenta la ecuación (3.2), Se puede plantear la cota de frecuencia máxima según la ecuación (3.3), donde se considera que los

$$N = fv \cdot t_{mr} = fv (t_c - t_{ir} + t_{fr}), \quad (0.4)$$

donde fv es la frecuencia real de la señal de entrada (Hz), t_{mr} es el tiempo real de medición (seg), t_{ir} es el tiempo real de retraso del primer flanco (seg) y t_{fr} es el tiempo real de retraso del último flanco (seg).

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{fv \cdot t_{mr}}{t_{mr} - \frac{12}{70 \times 10^6 \text{ Hz}}}, \quad (0.5)$$

donde $f_{m\acute{a}x}$ representa la cota de frecuencia máxima que puede medirse (Hz).

Para determinar la cota de frecuencia mínima, se considera que t_f tiene un error de cuatro ciclos de instrucción y t_i no tiene error, resultando la ecuación (3.4).

$$f_{min} = \frac{fv \cdot t_{mr}}{t_{mr} + \frac{4}{70 \times 10^6 \text{ Hz}}}, \quad (0.6)$$

donde f_{min} representa la cota de frecuencia mínima que puede medirse (Hz).

Finalmente el error relativo puede calcularse con la ecuación (3.5).

$$\frac{\Delta f}{fv} = t_{mr} \left(\frac{1}{t_{mr} - \frac{12}{70 \times 10^6 \text{ Hz}}} - \frac{1}{t_{mr} + \frac{4}{70 \times 10^6 \text{ Hz}}} \right). \quad (0.7)$$

Considerando las variaciones máximas que puede presentar t_{mr} en todo el rango de frecuencias que admite el cristal, se estima que el error relativo en este rango es de:

$$\frac{\Delta f}{fv} \cong 4,6 \times 10^{-7}.$$

Como puede apreciarse, la desviación máxima de frecuencia, se obtiene cuando el cristal es nuevo, ya que su frecuencia disminuye a lo largo de su vida útil. En esta situación, se mide la frecuencia de la señal de salida del mezclador, cuyo valor aproximado es de 325 KHz. Para determinar la resolución Δf_r , con la que se puede medir la frecuencia del cristal, se consideran variaciones simétricas alrededor del valor medio y el efecto del divisor de frecuencias por dos, obteniendo:

$$\Delta f_r \cong \pm 0,15 \text{ Hz}.$$

Esta resolución se traduce en una incerteza ΔE_c a la hora de determinar el espesor con la ecuación (0.1), que para el caso del aluminio y considerando factor geométrico unitario resulta:

$$\Delta E_{cr} \cong \pm 0,007 \text{ nm}.$$

Cabe resaltar la posibilidad de incurrir en errores al contabilizar los pulsos medidos N , generando una incerteza de cuantificación. Si bien el método de adquisición descrito previene este evento, en la práctica pueden producirse esporádicamente. Considerando que un único pulso que no se computa, es decir, se miden $N - 1$ pulsos, se produce una disminución en la frecuencia medida δf_i , que repercute según:

$$\delta f_i \cong \left| \frac{2 * [N - (N - 1)]}{t_c} \right| = \left| \frac{-2}{t_c} \right| = 4 \text{ Hz}.$$

Como puede apreciarse, esta disminución de frecuencia en 4 Hz depende únicamente de la duración de la ventana de conteo, disminuyendo el error a medida que ésta se extiende. Este valor, produce un aumento en el valor de espesor δE_{ci} , que para el aluminio resulta:

$$\delta E_{ci} \cong 0,18 \text{ nm}.$$

Idealmente, según lo explicado en el diagrama de flujo de la *Figura 3.5*, este efecto no debería producirse, sin embargo, en la práctica pueden manifestarse, pero se esperan que sean situaciones esporádicas que no afecten de manera trascendental a la medición.

3.1.4 Etapa de potencia

En la *Figura 3.1*, se observa que la etapa de potencia consta únicamente de un puente H [32]. Este circuito permite accionar el motor de un shutter para que gire en un sentido u otro. En la *Figura 3.7*, se aprecia un circuito esquemático del puente H implementado. Como puede observarse, éste consta de dos entradas “In1” e “In2”, que al aplicarle tensión sobre una u otra, permite que el motor gire en un sentido u otro. Esto se debe a que, al aplicarle tensión a la entrada “In1”, se polarizan los transistores Q6, Q2 y Q3, permitiendo que la corriente circule en el sentido VCC-Q2-M-Q3-GND, es decir, a través del motor de izquierda a derecha. Por otro lado, al aplicar tensión en la entrada “In2”, se polarizan los transistores Q5, Q1 y Q4, y en este caso, el sentido de circulación de la corriente es VCC-Q1-M-Q4-GND, es decir que la corriente circula a través del motor en el sentido de derecha a izquierda. La función de los diodos, es proteger a los transistores de las contra fem que produce el motor, disipando la energía que éste almacena en su bobinado.

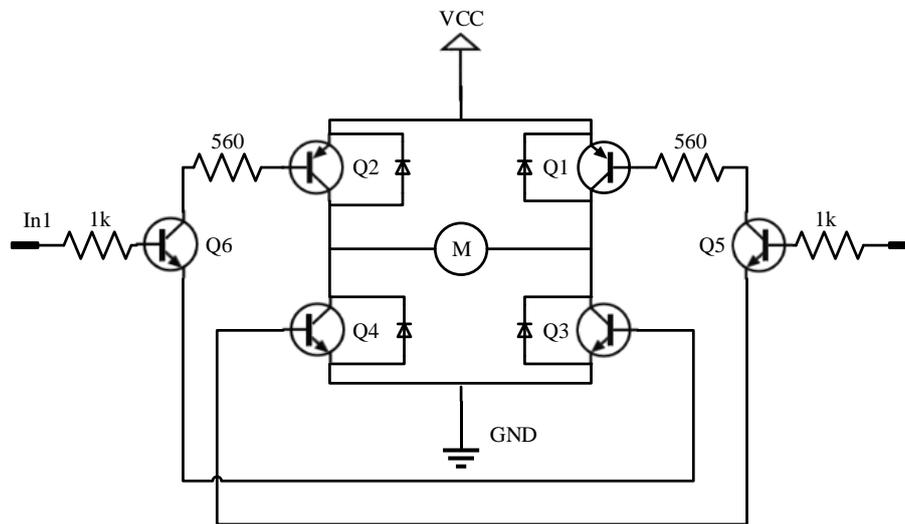


Figura 3.7. Puente H utilizado para el accionamiento del shutter. En este caso, el shutter se encuentra representado por el motor M. La tensión de VCC es de 5 V y las tensiones utilizadas para el control de los transistores (In1 e In2) son de 3,3 V.

El shutter es una obstrucción física entre el sustrato, y el filamento donde se encuentra el material a depositar. La función del shutter, es controlar a voluntad bajo qué condiciones de evaporación térmica se expone al sustrato (como puede ser la temperatura, la tasa de deposición, el tiempo de deposición, la presión de vacío, etc.). Generalmente,

al inicio del proceso de deposición, comienza a calentarse el filamento y el material empieza evaporarse de manera no uniforme; bajo estas condiciones, suele mantenerse el shutter cerrado. Una vez, que se alcanza una tasa de deposición uniforme y deseada, se procede a abrir el shutter para depositar el material sobre el sustrato; cuando se deposita durante el tiempo deseado, o se alcanza el espesor requerido, se cierra el shutter.

Actualmente, se encuentra implementada la etapa de potencia, permitiendo la adaptación de un shutter en la cámara de vacío a futuro. El shutter no se encuentra implementado, debido a las características constructivas de la tapa de la cámara de vacío empleada al momento de realizar los ensayos presentados en este informe.

3.2 Interfaz Gráfica de Usuario (IGU)

En la *Figura 3.8* se observa de la interfaz gráfica de usuario (IGU), generada con el software LABVIEW 2014 [33]. En esta imagen se muestra el indicador de espesor (A), los indicadores de la tasa de deposición (B), la pestaña de configuraciones básicas (C) y la pestaña de configuraciones avanzadas (D).



Figura 3.8. Interfaz gráfica de usuario (IGU). Se muestran los indicadores generales y las pestañas de configuraciones básicas y avanzadas.

En la *Figura 3.9*, se aprecia la pestaña de configuraciones básicas. La misma tiene un comando selector de material a depositar (A), indicado a su derecha en (B); posee un comando para seleccionar el material desde una base de datos (C), un comando que permite añadir un material a la base de datos (D). Se puede seleccionar entre distintas cámaras de vacío (E), indicando su factor geométrico en (F), que se lee desde la ruta de archivo (G). Dispone de un comando para la calibración de cristales nuevos (H) y para cristales usados (I). Tiene un botón de control on/off del shutter (J), indicadores de presencia de señal y error de datos (K) y un comando (L) para detener el programa.



Figura 3.9. Pestaña de configuraciones básicas de la IGU. Como se observa, posee indicadores y comandos de configuración y accionamiento básicos.

En la *Figura 3.10* se observa la pestaña de configuraciones avanzadas. En esta pestaña se encuentra la ruta de base de datos con las propiedades de los materiales a depositar (A), un indicador/selector de puerto COM utilizado (B), un comando para detectar el puerto COM automáticamente (C), un indicador/selector de frecuencia de referencia (D) correspondiente al oscilador de referencia, un indicador/selector de la frecuencia característica del cristal cuando está nuevo sin cargar (E), un Indicador/selector de espesor inicial (F) presente sobre cristales usados, un comando de almacenamiento de datos de medición (G), y ruta del archivo correspondiente (H) y finalmente un indicador de frecuencia medida “actual” (I).



Figura 3.10. Pestaña de configuraciones avanzadas de la IGU. Como se observa, posee indicadores y comandos de configuración avanzados.

Capítulo 4 – Validación del instrumento

Resulta esperable un estado transitorio, propio de todo instrumento de medición, asociado a la termalización y dinámica del equipo. Toda medición debe realizarse una vez transcurrido este lapso de tiempo, de manera que el equipo no presente fluctuaciones asociadas a dichos procesos, es decir, una vez alcanzado el estado estacionario.

En este capítulo, se explican y desarrollan todos los ensayos que permiten validar el correcto funcionamiento del equipo y obtener sus características. En la sección 4.1 se presentan los resultados de los distintos ensayos de estabilidad realizados sobre el sistema, y a partir de éstos se determina el tiempo de estabilización, la resolución en frecuencia, la incerteza del espesor, la repetitividad del equipo para mediciones sucesivas y las condiciones necesarias al momento de realizar las mediciones. En la sección 4.2 se detallan los ensayos de distintas deposiciones de aluminio y se determina experimentalmente el valor del factor geométrico.

4.1 Ensayos de estabilidad

En esta sección se realizan distintos ensayos de estabilidad. Se observa la tendencia de los valores de espesor obtenidos de los ensayos, en ambientes con temperatura controlada y no controlada. A su vez se estudia el comportamiento transitorio del sistema, y los tiempos de estabilización del mismo. Finalmente, se ensaya la repetitividad del sistema, es decir, que pueda estabilizarse en el mismo valor de espesor en distintas mediciones del mismo cristal, cuando no se carga material sobre el mismo. Todos los ensayos se realizan teniendo en cuenta los parámetros del aluminio para realizar el cálculo del espesor.

4.1.1 Criterio de estabilidad

Se considera que una medición de espesor alcanzó un valor estable, cuando presenta variaciones de espesor en un rango acotado, menor a 1 nm durante un lapso máximo de una hora. En el caso de la medición de frecuencia, corresponde el mismo criterio, pero el rango adoptado es 20 Hz, valor que se corresponde con la variación de espesor de 1

nm, considerando un factor geométrico unitario cuando el material utilizado es el aluminio.

4.1.2 Resultados

En la *Figura 4.1* se muestra una medición de espesor en función del tiempo para un espesor nulo. La medición se realizó durante aproximadamente 7 horas, en un ambiente con la temperatura controlada entre 24 y 25 °C. La dinámica del sistema presentó un transitorio de aproximadamente 15 min. Una vez alcanzado el estado estacionario, el espesor varió entre los valores de 0,24 nm y -0,24 nm. Simultáneamente, se midieron las tensiones de alimentación, obteniendo inicialmente valores de 5 V y 3,3 V, los cuales alcanzaron su valor mínimo en 4,98 V y 3,29 V.

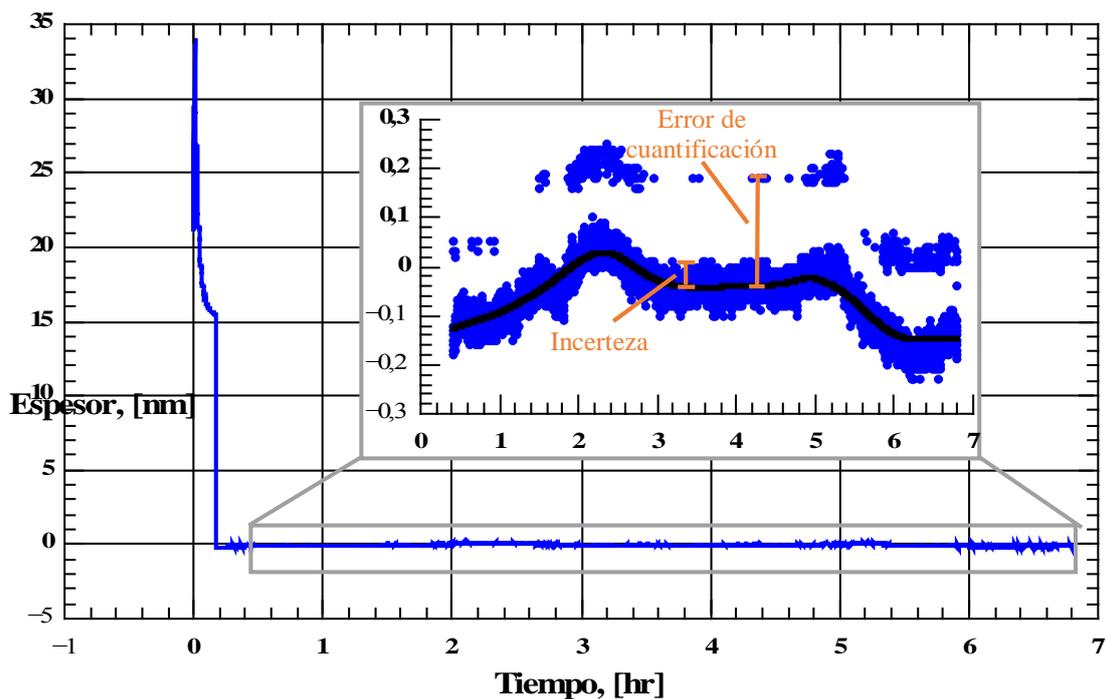


Figura 4.1. Medición de espesor en función del tiempo para espesor nulo. Se observan las cotas correspondientes a los errores asociadas a la cuantificación y a la incerteza de espesor (asociadas a la resolución de frecuencia). La curva negra, representa la tendencia de la medición, y se infiere que su variación responde a la deriva térmica. Como puede apreciarse, el espesor alcanza su valor estable en aproximadamente 15 min. La medición se llevó a cabo en un ambiente cuya temperatura se mantuvo controlada entre 24 y 25 °C.

De estos resultados, se conjetura que las variaciones de tensión no afectan de manera considerable la incerteza del equipo. Del gráfico puede medirse la incerteza experimental ΔE_{cr} , asociada a la resolución de frecuencia; obteniendo para el aluminio considerando factor geométrico unitario:

$$\Delta E_{cr} \cong \pm 0,05 \text{ nm.}$$

Esta incerteza implica una resolución en frecuencia Δf_r :

$$\Delta f_r \cong \pm 1 \text{ Hz.}$$

A partir del gráfico, puede extraerse el aumento de espesor δE_{ci} , asociado a la incerteza de cuantificación, siendo:

$$\delta E_{ci} \cong 0,22 \text{ nm.}$$

Este valor corresponde a una disminución en la frecuencia δf_i dada por:

$$\delta f_i \cong 4,8 \text{ Hz.}$$

En la *Tabla 4.1*, se muestra un cuadro comparativo entre los valores obtenidos analítica y experimentalmente.

| | Valores analíticos | Valores experimentales |
|---|------------------------|------------------------|
| Resolución en frecuencia Δf_r | $\pm 0,15 \text{ Hz}$ | $\pm 1 \text{ Hz}$ |
| Incerteza de espesor ΔE_{cr} | $\pm 0,007 \text{ nm}$ | $\pm 0,05 \text{ nm}$ |
| Disminución de frecuencia (cuantificación) δf_i | 4 Hz | $4,8 \text{ Hz}$ |
| Aumento de espesor δE_{ci} | $0,18 \text{ nm}$ | $0,22 \text{ nm}$ |

Tabla 4.1. Comparativa entre estimaciones de incertezas teóricas y resultados experimentales.

Las diferencias que existen respecto a los valores calculados en el capítulo 3, se atribuyen a que, al realizar estos cálculos, se supusieron todos los valores de frecuencias perfectamente estables e inalterables. Aquí la aproximación es más realista, dado que, tanto en los osciladores, como en el mezclador de bajo Jitter, las señales poseen distorsión de fase acotada, pero no nula.

Se puede conjeturar que las oscilaciones en la curva de tendencia (negra), se explican a partir de las variaciones en la temperatura del ambiente durante la medición. A causa de esta hipótesis, se procede a realizar una medición de estabilidad extendida con una amplitud térmica mayor.

En la *Figura 4.2* puede observarse una medición de espesor en función del tiempo, en un ambiente cuya temperatura varió desde 32 a 12 °C. Comparando con la *Figura 4.1*, puede apreciarse que, si bien los tiempos de estabilización son similares, la variación de espesor, en este caso es mayor. Este efecto se atribuye a la variación de la temperatura ambiente. El espesor, luego de alcanzar la estabilización (15 min aproximadamente), se mantuvo acotado entre los valores de 0,65 y -0,65 nm, durante las 15 horas en las que se realizó el ensayo.

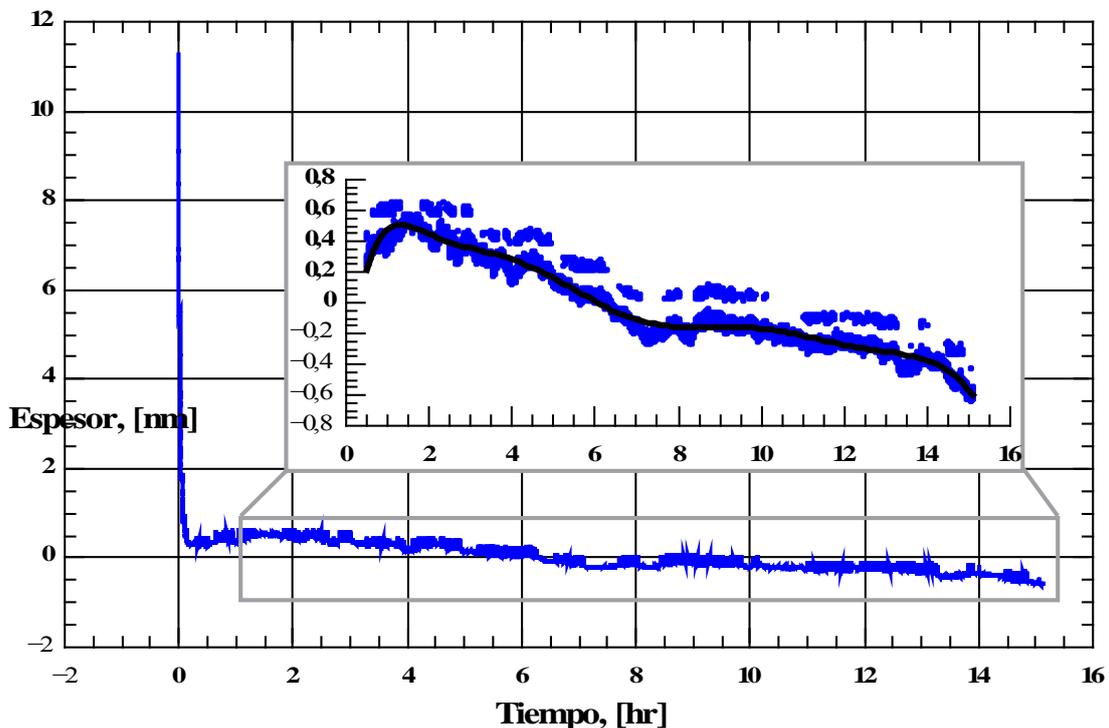


Figura 4.2. Medición de espesor en función del tiempo para espesor nulo. Como puede apreciarse, la duración del ensayo fue de aproximadamente 15 horas. La medición se llevó a cabo en un ambiente donde la temperatura varió desde 32 a 12 °C.

De la *Figura 4.1* y de la *Figura 4.2*, puede inferirse la importancia de realizar los ensayos en un entorno donde las condiciones de temperatura ambiente se mantengan

estables durante toda la medición. A su vez, se conjetura que el tiempo de estabilización “ T_s ”, necesario para realizar cada medición, resulta:

$$T_s = 20 \text{ min}$$

En la *Figura 4.3* se observa una medición de espesor en función del tiempo con interrupciones. En este caso, la medición consistió en alcanzar la estabilidad del sistema, luego apagar y encender el equipo instantáneamente, obteniendo así, la primera curva (azul). Seguidamente, se procedió a apagar el equipo durante dos minutos aproximadamente; al encenderlo nuevamente, se midió la segunda curva (roja). Repitiendo el proceso, con el equipo apagado durante tres minutos, se obtuvo la última curva (negra). Se puede observar, que, para un cristal, bajo condiciones similares de temperatura ambiente, el sistema se estabiliza en el mismo valor de espesor inicial.

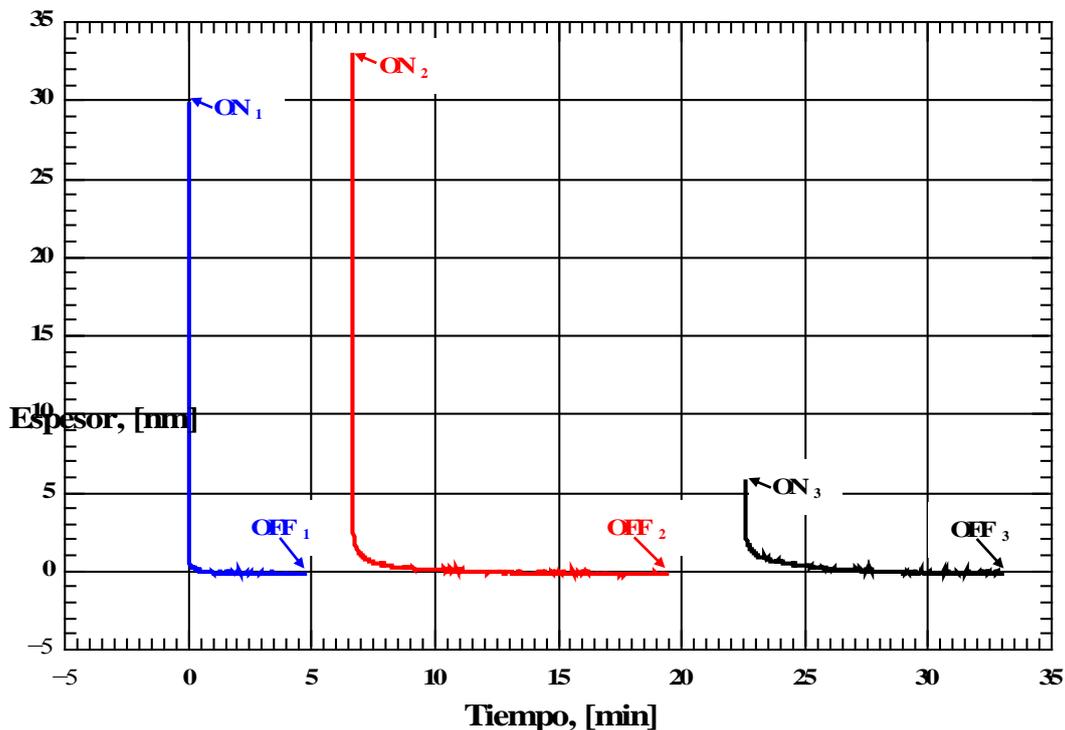


Figura 4.3. Espesor en función del tiempo para espesor nulo, con interrupciones entre mediciones. Como puede observarse, se midió el mismo cristal, desde su encendido, tres veces en distintos instantes de tiempo.

Puede apreciarse que los tiempos de estabilización son menores, esto se debe a que el equipo no realizaba la medición desde un arranque en frío, por lo que los efectos de termalización no influyen de la misma manera; si se observa una respuesta similar, por

lo que se puede inferir que además de los efectos de termalización, también existen efectos asociados a la respuesta transitoria del sistema.

4.2 Ensayo de espesores depositados

Las mediciones de espesor depositado se realizaron de manera *off-line*, es decir luego de finalizada cada deposición. Se utilizó esta metodología dado que no se contaba con una cámara de vacío que permita el conexionado a través de contactos eléctricos estancos que permitan mantener el vacío requerido dentro de la cámara. La metodología consistió en depositar una capa delgada de aluminio sobre un sustrato, con el cristal de medición expuesto a la deposición. Para esto, se diseñó el soporte de prueba de la *Figura 4.4*, el cual en su cara inferior posee un spot de 6,5 mm.

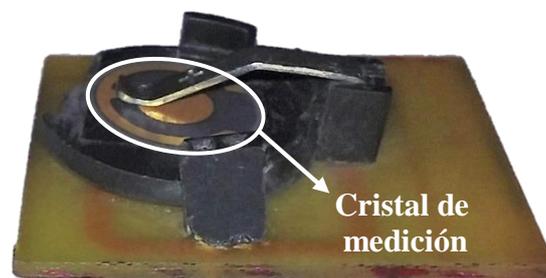


Figura 4.4. Soporte de prueba utilizado para realizar las deposiciones. En la cara inferior posee un spot 6,5 mm.

Con el fin de realizar las deposiciones se fabricó un porta-sustrato, con la posibilidad de incluir el soporte de prueba en el mismo. Éste se observa en la *Figura 4.5* junto con un sustrato y el cristal, luego de una deposición.

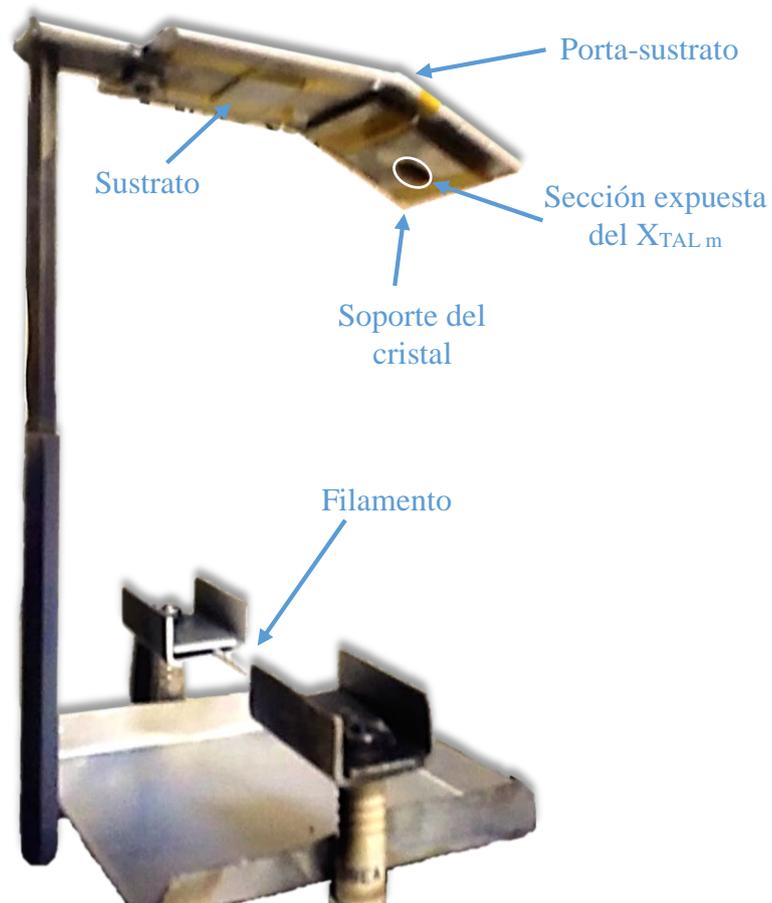


Figura 4.5. Porta-sustrato utilizado para la deposición. Se observa el sistema de deposición montado.

Una vez finalizada la deposición, se retiró el soporte de la cámara, y se conectó al equipo para obtener la medición (*Figura 4.6*). En la *Figura 4.6* también puede observarse la disposición de las placas de potencia, alimentación, acondicionamiento de señal y de procesamiento y control. Se realizó cada medición contemplando el tiempo de estabilización requerido por el equipo, con la finalidad de garantizar su validez.

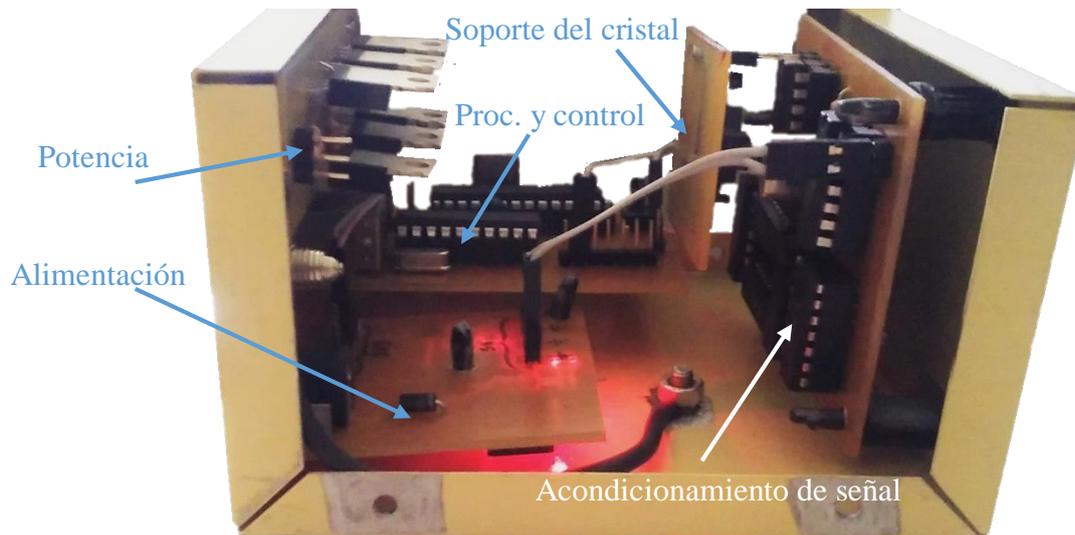


Figura 4.6. Soporte y cristal conectados en el equipo para la medición. También se indican las placas de alimentación, potencia acondicionamiento de señal y procesamiento y control.

El contraste de las mediciones del equipo se realizó empleando como patrón el espesor obtenido por evaluación de mediciones de transmitancia propias a través del método *Transfer Matrix* [34].

La metodología de calibración consistió en, medir el espesor de un conjunto de muestras considerando un factor geométrico unitario, para luego contrastar dichos valores respecto a los obtenidos mediante el método *Transfer Matrix*. A partir de estos resultados, se realiza una regresión lineal para determinar el factor geométrico experimental.

Estas mediciones, se realizaron con un grupo de cinco muestras, utilizando un único cristal en el cual se acumulan sucesivamente las capas depositadas en cada ensayo, las cuales pueden observarse en la *Figura 4.7*.

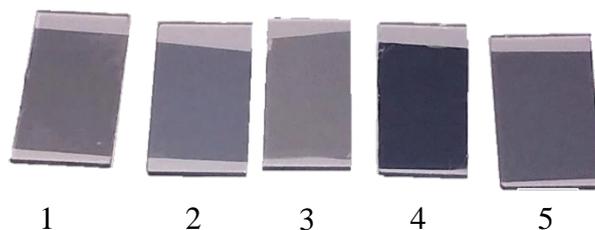


Figura 4.7. Grupo de muestras de aluminio depositadas sobre sustratos de vidrio. Se utilizan para calibrar y contrastar al equipo.

A continuación, se presentan en la *Figura 4.8* los espesores acumulados en el cristal medidos por transmitancia en función de los medidos por cristal en conjunto con la regresión lineal asociada a los mismos. A partir de su pendiente es posible estimar el factor geométrico de la cámara de vacío empleada según la ecuación (0.2).

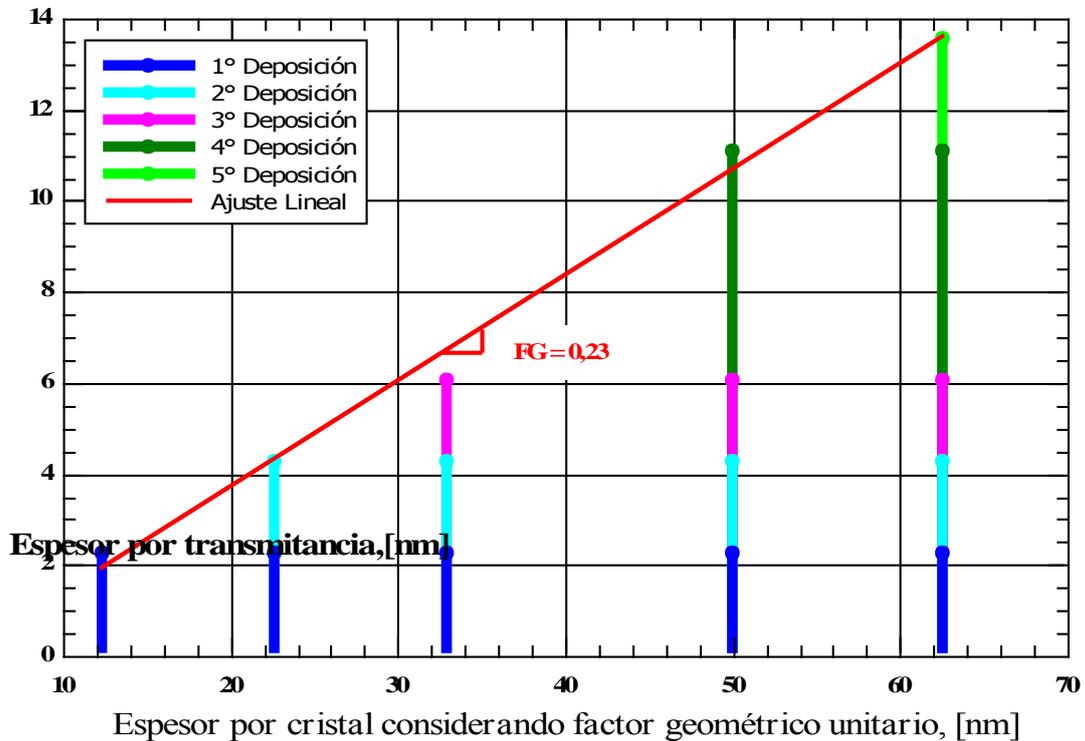


Figura 4.8. Recta de calibración del equipo, compuesta por cinco mediciones representadas en un gráfico de barras acumuladas, que permiten obtener el factor geométrico a partir de la pendiente de su recta de regresión (línea roja).

Como puede observarse, la tendencia responde a un modelo lineal. De la pendiente de la recta de regresión, se puede obtener el valor del factor geométrico resultando:

$$FG = 0,23 \pm 0,01$$

Finalmente, para obtener la incerteza del equipo, se multiplica el factor geométrico con la resolución obtenida anteriormente, resultando para deposiciones de aluminio:

$$\Delta E_{cr} = FG \cdot 0,05 \text{ nm} \cong 0,012 \text{ nm}$$

Se considera sólo este valor dado que las variaciones por cuantificación pueden ser eliminadas utilizando filtrado digital.

A partir de lo anterior se contrastan en la *Tabla 4.2* las características del monitor de espesor realizado respecto al modelo SQM-160, comercializado por la firma Inficon.

| | Monitor implementado | Inficon SQM-160 |
|---------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Resolución en frecuencia | ±1 Hz | ±0,3 Hz |
| Factor geométrico | 0,23 | 0,01 |
| Incerteza de espesor | ±0,012 nm | ±0,037 nm |

Tabla 4.2. Comparativa del monitor implementado vs Inficon SQM-160.

Como se muestra en la *Tabla 4.2* la incerteza de espesor obtenida es similar a las de un equipo comercial considerando que las mediciones deben realizarse bajo condiciones de temperatura estrictamente controladas. Cabe destacar que el fabricante Inficon, no especifica el material empleado al definir su incerteza de espesor.

Capítulo 5 - Conclusiones

En este trabajo, se ha implementado un monitor de espesor para llevar a cabo la medición de espesores depositados por evaporación térmica.

Se realizaron una serie de ensayos que permitieron caracterizar al equipo, dentro de los cuales se encuentran el de estabilidad, repetitividad y de medición de espesor de manera *off-line*, empleando aluminio como material depositado. Los ensayos de estabilidad permitieron establecer la incerteza de frecuencia, mientras que para establecer el factor geométrico del conjunto monitor/cámara de vacío, se realizaron mediciones de espesor de un conjunto de muestras. A su vez, se determinó el espesor de cada muestra empleando el método por transmitancia. Los datos recolectados, a partir de lo anterior, permiten determinar tanto la resolución en frecuencia como el factor geométrico del conjunto, conformado por la cámara de vacío, el porta-sustrato y el soporte del cristal; dichos valores afectan de manera directa la incerteza del monitor de espesor y permiten definir sus especificaciones finales.

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente se obtiene una resolución en frecuencia de 1 Hz y un factor geométrico de 0,23 para la cámara de vacío empleada, los cuales al aplicarlos en la ecuación de espesor resulta en una incerteza de 0,012 nm.

Al contrastar los resultados con respecto a las prestaciones de un equipo comercial se concluye que la relación costos-especificaciones favorece ampliamente a la propuesta del presente informe.

Se logró cumplir el objetivo, obteniendo como resultado un monitor de espesor con una resolución dentro del rango esperado. Se implementaron soluciones tecnológicas innovadoras, tales como el mezclador digital de bajo Jitter en conjunto con osciladores de rango amplio de oscilación. Los cuales representan soluciones de bajo costo y con una cantidad reducida de componentes que facilitan la implementación.

5.1 Trabajos futuros

A lo largo del desarrollo de esta tesis, y dado el nivel de desarrollo alcanzado, resulta posible determinar los siguientes trabajos a futuro:

- Diseño e implementación de un soporte porta-cristal solidario a un porta-sustrato que permita la implementación del equipo de manera *on-line*.
- Implementación de un control de errores de mayor complejidad que elimine los ruidos de cuantificación. Se recomienda investigar la aplicación de un filtro digital del tipo *Moving Average*.
- Implementar electrónica adicional en los osciladores para atenuar el nivel de Jitter presente en sus salidas. Se recomienda investigar la aplicación de PLL.
- Implementar electrónica adicional en el mezclador digital con el fin de atenuar los efectos del Jitter tanto en sus entradas como en su salida. Se recomienda investigar la aplicación de filtros de alta selectividad sintonizables.
- Incorporar la funcionalidad *stand-alone*, para permitir mediciones sin necesidad de utilizar una computadora. Se recomienda implementar un PIC adicional para la realización de los cálculos de espesor para no comprometer la medición.

Capítulo 6 – Referencias

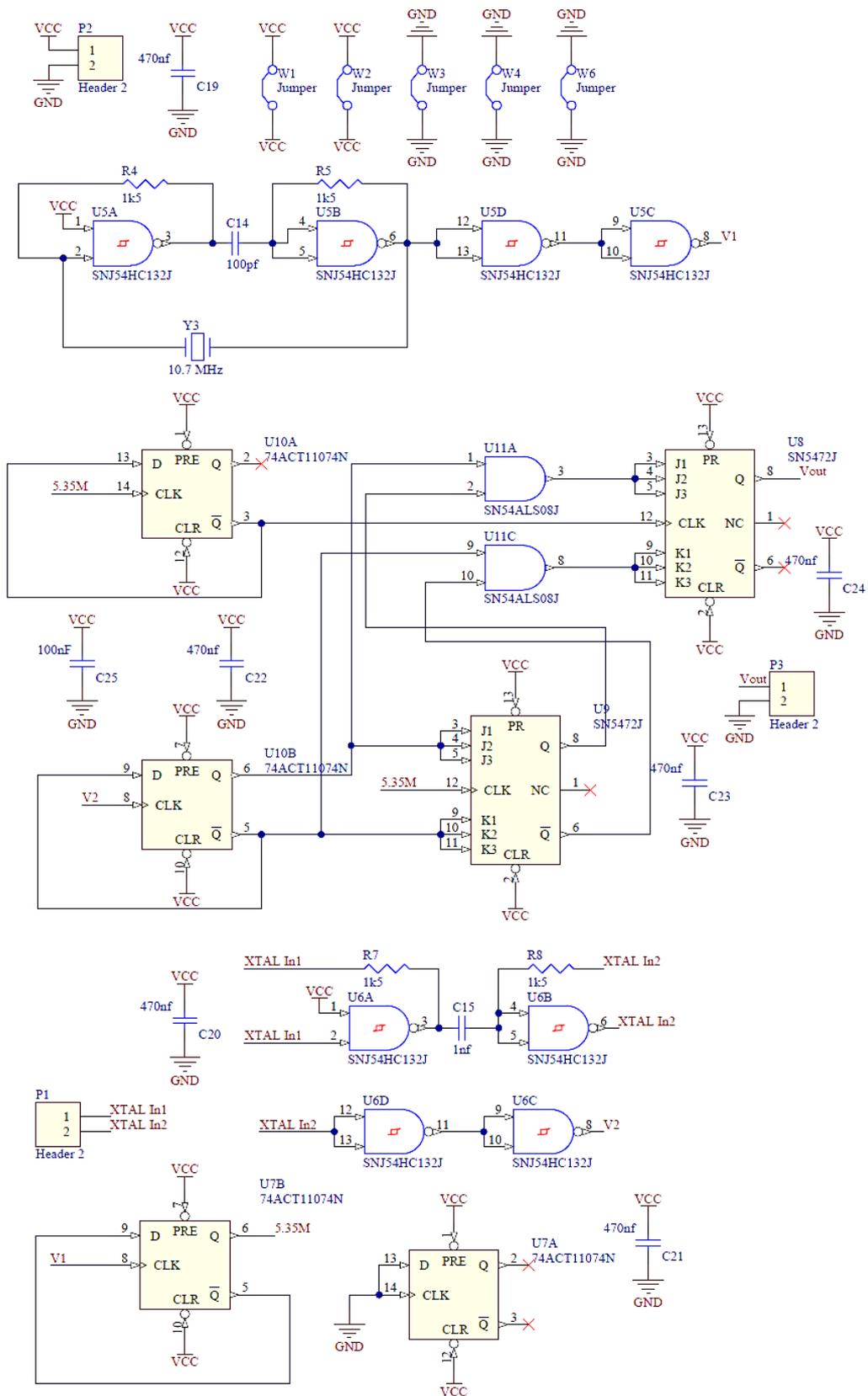
- [1] B. N. Clarence Hurd, «Control circuitry for quartz crystal deposition monitor». Estados Unidos Patente 5117192, 26 Mayo 1992.
- [2] E. P. a. A. S. L Callegaro, «Design note: Cheap control unit for quartz crystal thin film monitor,» IOP Publishing Ltd, Milano, 1994.
- [3] G. G. C.K. O’Sullivan, «Commercial quartz crystal microbalances – theory and applications,» ELSEVIER, Cork, Ireland, 1998.
- [4] W. H. Lawson, «A versatile thin film thickness monitor of high accuracy,» J. Sci. Instrum, Harlow, Essex, 1967.
- [5] S. K. C. &. N. N. D. K. Kaushikt, «Simple and inexpensive single-oscillation quartz crystal thin-film thickness monitor and growth-rate meter,» Physics Department, Dayanand College, Kurukshetra, India, 1986.
- [6] L. Shivalingappa, M. Srinivasan y S. Mohan, «Digital mixer for quartz crystal thickness monitor,» Elsevier Science Ltd, India, 1995.
- [7] Products Finishing, «Vacuum Deposition Processes,» [En línea]. Available: <http://www.pfonline.com/articles/vacuum-deposition-processes>. [Último acceso: 7 Diciembre 2015].
- [8] J. L. Vossen y W. Kern, «The cathodic arc plasma deposition of thin films,» de *Thin Film Processes II*, Londres, Academic Press, 1991, pp. 209-280.
- [9] J. Singh, F. Quli, D. E. Wolfe, J. T. Schriempf y J. Singh, «An Overview: Electron Beam-Physical Vapor Deposition Technology- Present and Future,» The Pennsylvania State University.
- [10] M. University, «Thin Film Deposition techniques Thermal Evaporation,» [En línea]. Available: http://www.sc.mahidol.ac.th/scpy/courses/scpy663/lecture3_evaporation.pdf. [Último acceso: 7 Diciembre 2015].

- [11] M. W. Hans-Ulrich Krebs, «Pulsed Laser Deposition (PLD) - a Versatile Thin Film Technique,» [En línea]. Available:
<http://pcgg.de/download/publication4.pdf>.
[Último acceso: 7 Diciembre 2015].
- [12] J. L. Vossen y W. Kern, «Sputter deposition processes,» de *Thin Film Processes II*, Londres, Academic Press, 1991, pp. 177-208.
- [13] Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, «Evaporación,» [En línea]. Available: <http://www.icmm.csic.es/fis/espa/evaporacion.html>.
[Último acceso: 21 Noviembre 2015].
- [14] Científicos Aficionados, «Evaporación,» [En línea]. Available:
<http://www.cientificosaficionados.com/evaporacion/evaporacion.html>.
[Último acceso: 21 Noviembre 2015].
- [15] F. Melero Gutiérrez, «Principios de Piezoelectricidad,» 2010. [En línea]. Available: http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod_ense/revista/pdf/Numero_28/Francisco_Gutierrez_1.pdf.
[Último acceso: 21 Noviembre 2015].
- [16] A. Raouf, «Minimize Frequency Drift In Crystals,» [En línea]. Available: <http://electronicdesign.com/analog/minimize-frequency-drift-crystals>.
[Último acceso: 7 Diciembre 2015].
- [17] Kurt J. Lesker, «Standard 6 MHz Crystals,» [En línea]. Available:https://www.lesker.com/newweb/process_instruments/processequipment_crystal_s_6mhz.cfm.
[Último acceso: 22 Noviembre 2015].
- [18] Inficon, «Quartz Monitor Crystals,» [En línea]. Available: <http://webshop.inficon.com/en-us/Product/Detail/QCM-Crystals?path=Products%2FQuartzMonitorCrystals>.
[Último acceso: 22 Noviembre 2015].
- [19] Ing. Oscar M. Santa Cruz, «Osciladores de Onda Senoidal,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/Electronica>

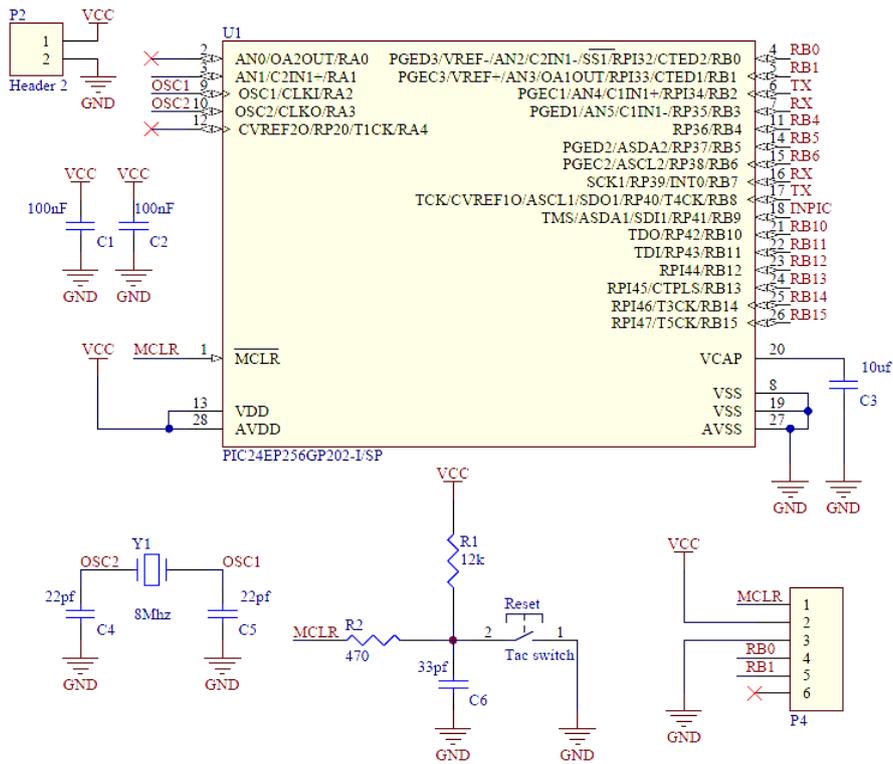
- AplicadaIII/Aplicada/Cap01Osciladores1parte.pdf.
[Último acceso: 7 Diciembre 2015].
- [20] F. Miyara, «Osciladores Senoidales,» 2004. [En línea].
Available: <http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/oscilad.pdf>.
[Último acceso: 7 Diciembre 2015].
- [21] Ing. Oscar M. Santa Cruz, «Osciladores de Onda Senoidal,» 2010. [En línea].
Available: <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/Aplicada/Cap01Osciladores1parte.pdf>.
[Último acceso: 7 Diciembre 2015].
- [22] ThinkSRS, «Quartz Crystal Microbalance,» [En línea].
Available: <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/QCMTheoryapp.pdf>.
[Último acceso: 22 Noviembre 2015].
- [23] Boc Edwards, «Instruction Manual FTM7 Film Thickness Monitor,» 1997.
- [24] Inficon, «SQM-160 Multi-Film Rate/Thickness Monitor,» 2011.
- [25] Microchip, «dsPIC33EPXXXGP50X,dsPIC33EPXXXMC20X/50X and PIC24EPXXXGP/MC20X,» 2013, pp. 29-30.
- [26] Euroquartz, «Oscillator Circuits: Application notes,» [En línea].
Available: <http://www.euroquartz.co.uk/portals/0/pdf/application-notes.pdf>.
[Último acceso: 13 Noviembre 2015].
- [27] M. E. Frerking y R. W. Berquist, «Deglitched digital mixer circuit». Estados Unidos Patente US5053651 A, 1 Octubre 1991.
- [28] Microchip, «dsPIC33EPXXXGP50X,dsPIC33EPXXXMC20X/50X and PIC24EPXXXGP/MC20X Datasheet,» 2013.
- [29] Microchip, «PIC18F13K50/14K50 Datasheet,» 2009.

- [30] Microchip, «MPLABX IDE,» [En línea].
Available: <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/mplabx/>.
[Último acceso: 24 Noviembre 2015].
- [31] Microchip, «MPLAB XC Compilers,» [En línea].
Available: <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/devtools/mplabxc/home.html>.
[Último acceso: 24 Noviembre 2015].
- [32] B. Jordan, «Brief H-Bridge Theory of Operation,» [En línea].
Available: <http://www.dprg.org/tutorials/1998-04a/>.
[Último acceso: 7 Diciembre 2015].
- [33] National Instruments, «Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW,» [En línea]. Available: <http://www.ni.com/labview/esa/>.
[Último acceso: 25 Noviembre 2015].
- [34] D. M. Topasna y G. A. Topasna, «Numerical modeling of thin film optical filters,» Department of Physics and Astronomy Virginia Military Institute, Lexington, VA, [En línea].
Available: https://spie.org/etop/2009/etop2009_10.5.43.pdf.
[Último acceso: 8 Febrero 2016].

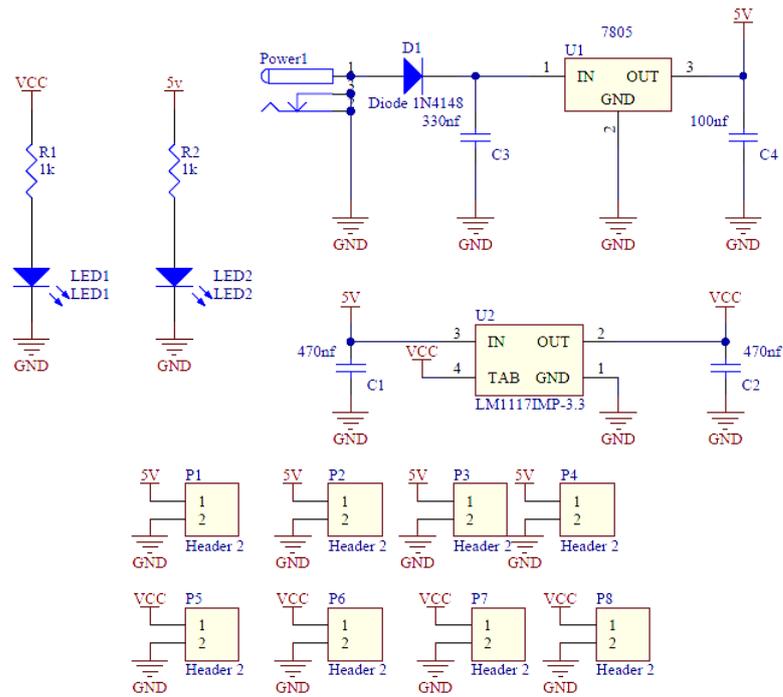
Anexo I - Circuitos



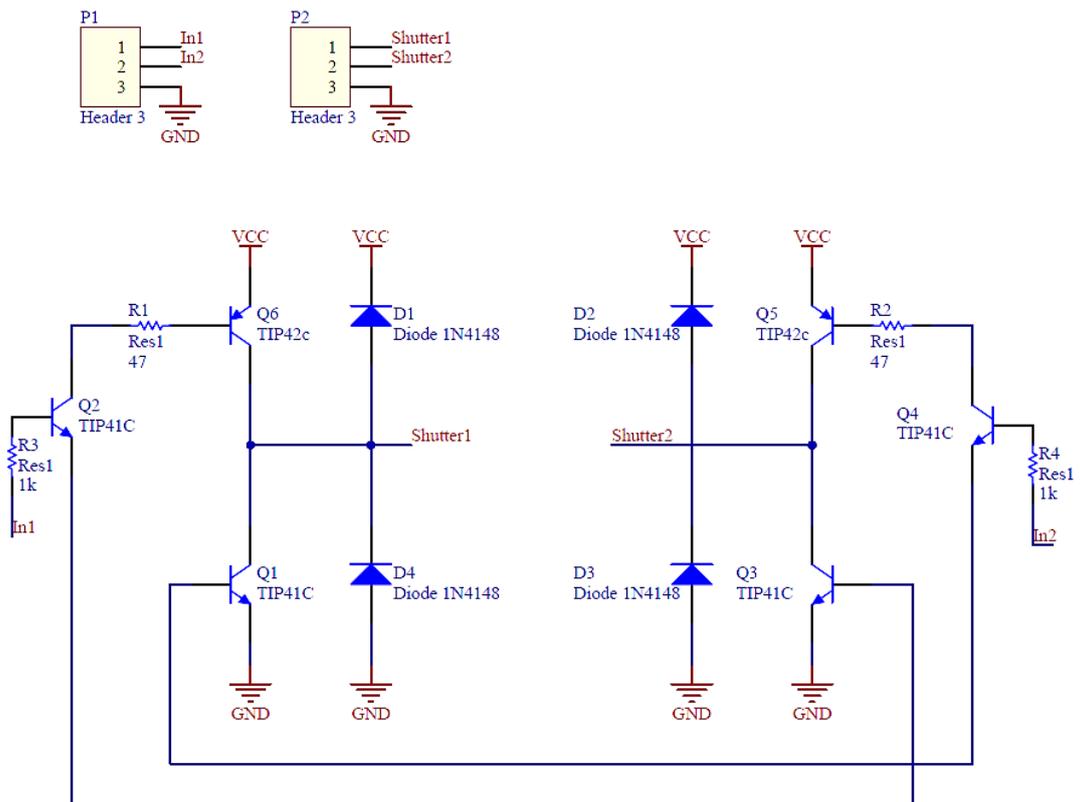
Esquemático 1.1. Etapa de acondicionamiento de señal.



Esquemático 1.2. Etapa de procesamiento y control.



Esquemático 1.3. Etapa de Alimentación.

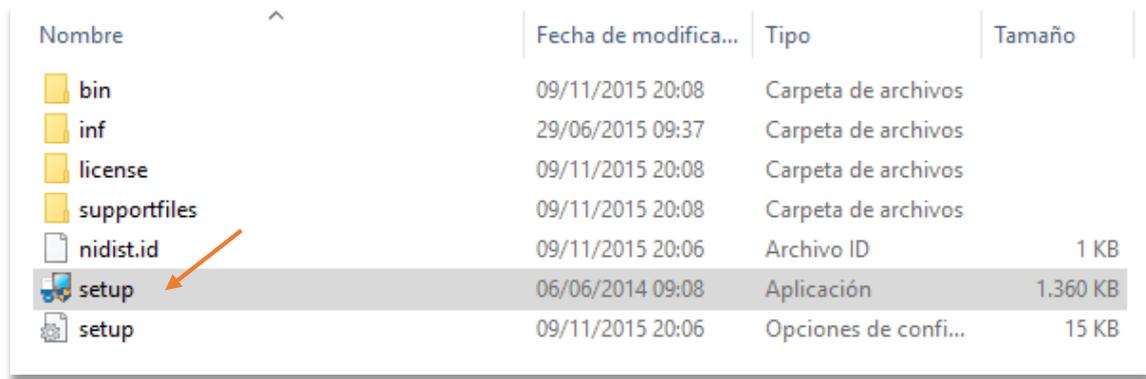


Esquemático 1.4. Etapa de potencia.

Anexo II - Instructivo de instalación IGU y complementos necesarios

Este instructivo, detalla los pasos a seguir para una correcta instalación de la interfaz gráfica de usuario (IGU) del monitor de espesor, realizada en la plataforma NI LabView 2014.

Para instalar la IGU, debe ejecutar el archivo “setup.exe” en el directorio “Monitor de espesor”, tal como se indica en la *Figura N° 1*.



| Nombre | Fecha de modifica... | Tipo | Tamaño |
|--------------|----------------------|----------------------|----------|
| bin | 09/11/2015 20:08 | Carpeta de archivos | |
| inf | 29/06/2015 09:37 | Carpeta de archivos | |
| license | 09/11/2015 20:08 | Carpeta de archivos | |
| supportfiles | 09/11/2015 20:08 | Carpeta de archivos | |
| nidist.id | 09/11/2015 20:06 | Archivo ID | 1 KB |
| setup | 06/06/2014 09:08 | Aplicación | 1.360 KB |
| setup | 09/11/2015 20:06 | Opciones de confi... | 15 KB |

Figura N° 1. Lista de carpeta y archivos contenidos dentro de la carpeta del instalador de la IGU. Para comenzar con la instalación debe ejecutarse el archivo "setup.exe".

Al ejecutar el instalador, debe mostrarse una ventana de espera (*Figura N° 2*).

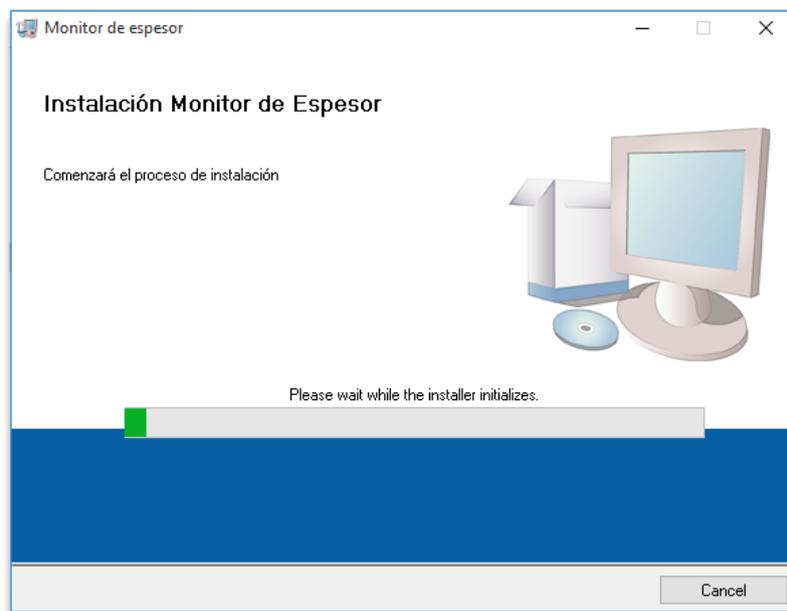


Figura N° 2. Ventana de espera del instalador.

Seguidamente, se observa la ventana que permite seleccionar los directorios donde se instalarán los archivos del programa. Se recomienda utilizar los directorios por defecto y seleccionar “Next” para continuar con la instalación (*Figura N° 3*).

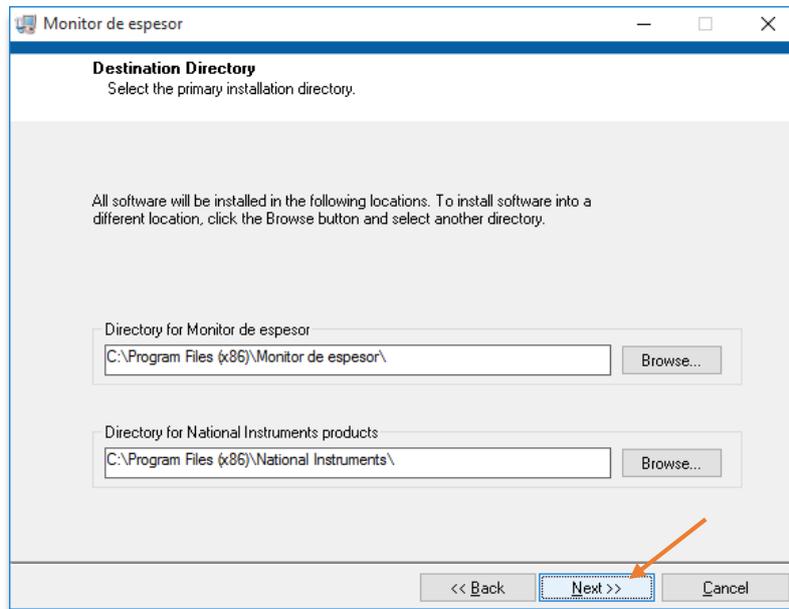


Figura N° 3. Ventana del instalador que permite seleccionar los directorios donde se instalarán los archivos del programa.

En la siguiente ventana (*Figura N° 4*), debe aceptar el contrato de licencia de software de National Instruments y seleccionar “Next” para continuar con la instalación.

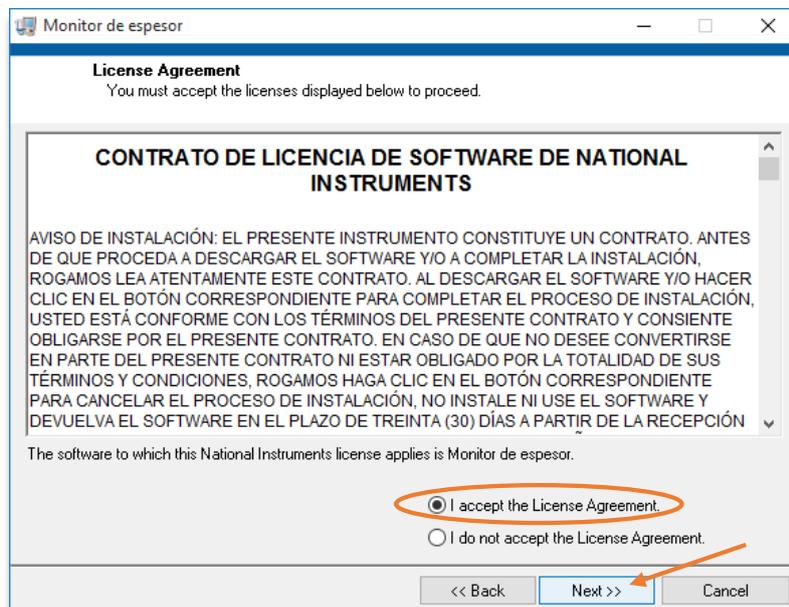


Figura N° 4. Ventana del instalador que solicita aceptar los términos y condiciones del contrato de licencia de software de National Instruments.

La siguiente ventana, informa los archivos que se instalarán en el equipo. Seleccionar “Next” para continuar.

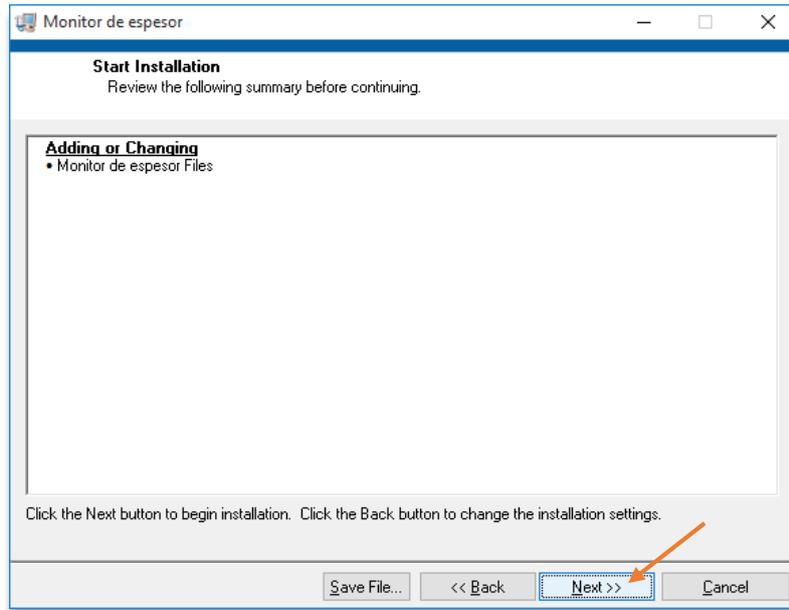


Figura N° 5. Ventana del instalador que informa los cambios a realizar en el equipo.

En esta instancia, comienza la instalación del programa. En la ventana de la Figura N° 6 , se puede observar la barra de progreso de instalación.

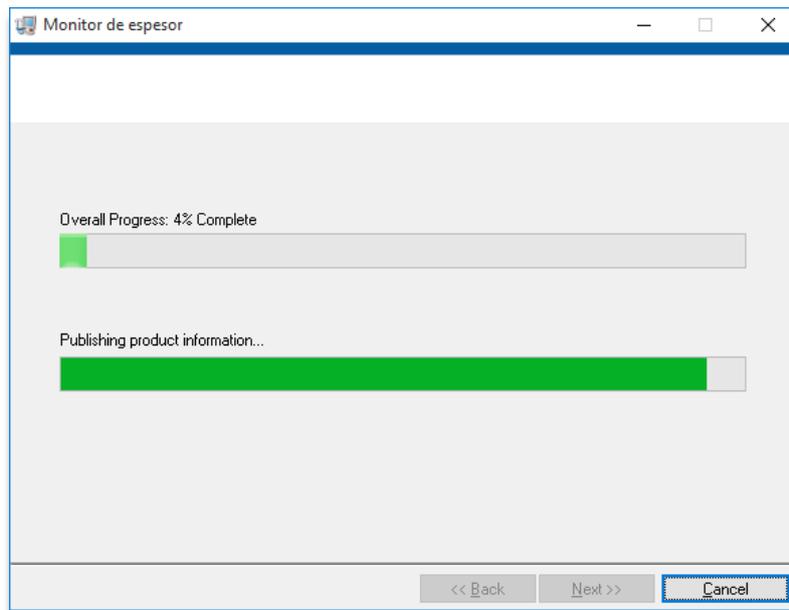


Figura N° 6. Ventana del instalador que indica el progreso de la instalación.

La ventana siguiente (*Figura N° 7*), muestra que el proceso de instalación está completo. Para finalizar, seleccionar “Next” y reiniciar el equipo.

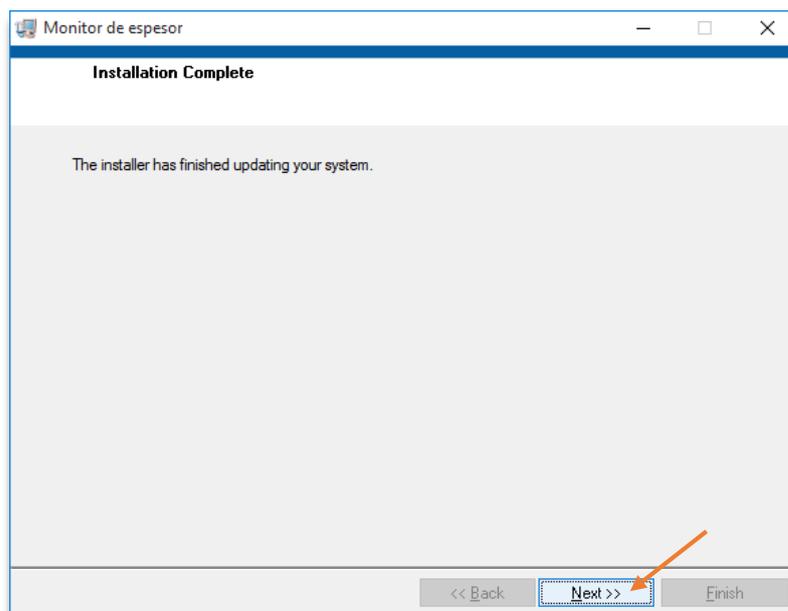


Figura N° 7. Última ventana del proceso de instalación. Seleccionar "Next" y reiniciar el equipo.

Una vez finalizado el proceso de instalación, en el escritorio debe mostrarse una carpeta llamada “Monitor de espesor” y dentro de ésta, se encuentra el acceso directo a la IGU.

Antes de ejecutar el programa, es necesario instalar el complemento NI VISA 5.2 o superior. Éste puede obtenerse de manera gratuita en <https://www.ni.com/visa>.

Al conectar por primera vez el equipo, se instalará su driver de manera automática. Si esto no sucede, puede instalarlo manualmente desde la carpeta “inf”, que se encuentra dentro de la carpeta “Monitor de espesor” (*Figura N° 8*). Para instalar el driver, debe seleccionar con el botón secundario del mouse el archivo “mchapcdc.inf” y elegir la opción “instalar” (*Figura N° 9*).

| Nombre | Fecha de modifica... | Tipo | Tamaño |
|--------------|----------------------|----------------------|----------|
| bin | 09/11/2015 20:08 | Carpeta de archivos | |
| inf | 18/11/2015 15:01 | Carpeta de archivos | |
| license | 09/11/2015 20:08 | Carpeta de archivos | |
| supportfiles | 09/11/2015 20:08 | Carpeta de archivos | |
| nidist.id | 09/11/2015 20:06 | Archivo ID | 1 KB |
| setup | 06/06/2014 09:08 | Aplicación | 1.360 KB |
| setup | 09/11/2015 20:06 | Opciones de confi... | 15 KB |

Figura N° 8. Ventana que indica la carpeta "inf" donde se encuentra el driver de equipo.

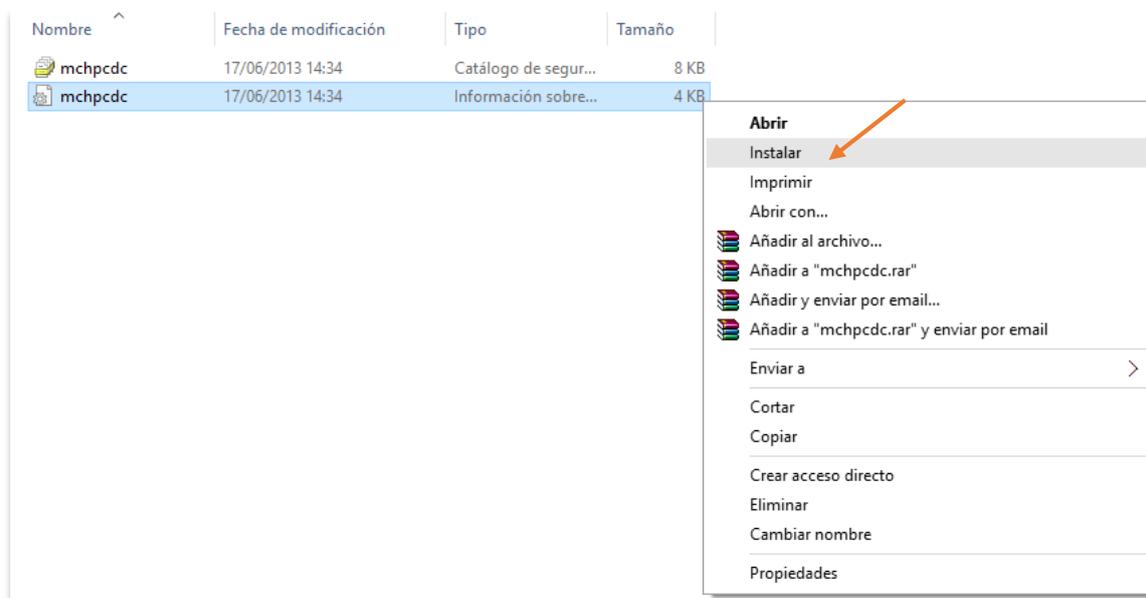


Figura N° 9. Ventana que indica como instalar el driver del equipo en caso de que el sistema no lo reconozca automáticamente.

Anexo III - Manual de operación

Este manual, detalla el procedimiento a seguir para obtener una medición de espesor *off-line*.

En primer lugar, debe colocarse un cristal en el soporte, para hacer la calibración inicial, tal como se muestra en la *Figura I*. Debe asegurarse, que una vez colocado, el cristal no se desplace de su posición original dado que en caso contrario se modifica la frecuencia de oscilación inicial.

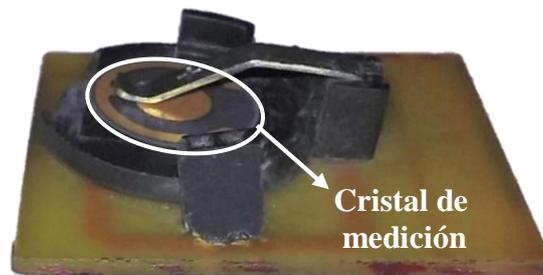


Figura I. Montaje del cristal en el soporte. Debe asegurarse que, durante todo el periodo de la medición, el cristal no se desplace de su posición inicial.

Seguidamente, se conecta el soporte a la placa de acondicionamiento de señal (ver *Figura II*) y se cierra el equipo para comenzar la medición.

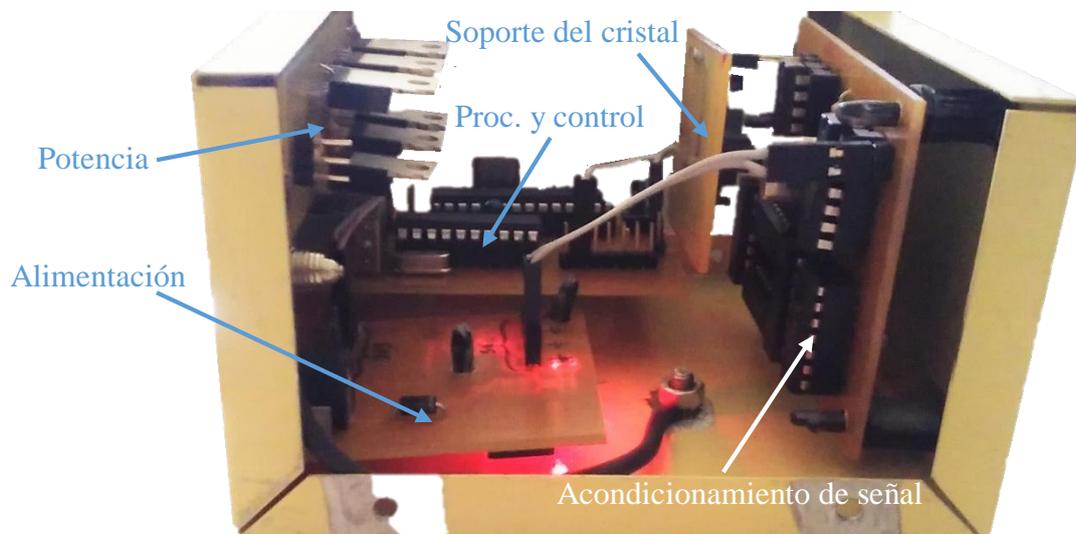


Figura II. Soporte y cristal conectados en el equipo para la medición. También se indican las placas de alimentación, potencia acondicionamiento de señal y procesamiento y control.

En esta instancia, debe conectarse la fuente de alimentación y las placas electrónicas para tener el equipo montado. Puede observarse el conexionado en la *Figura III*.

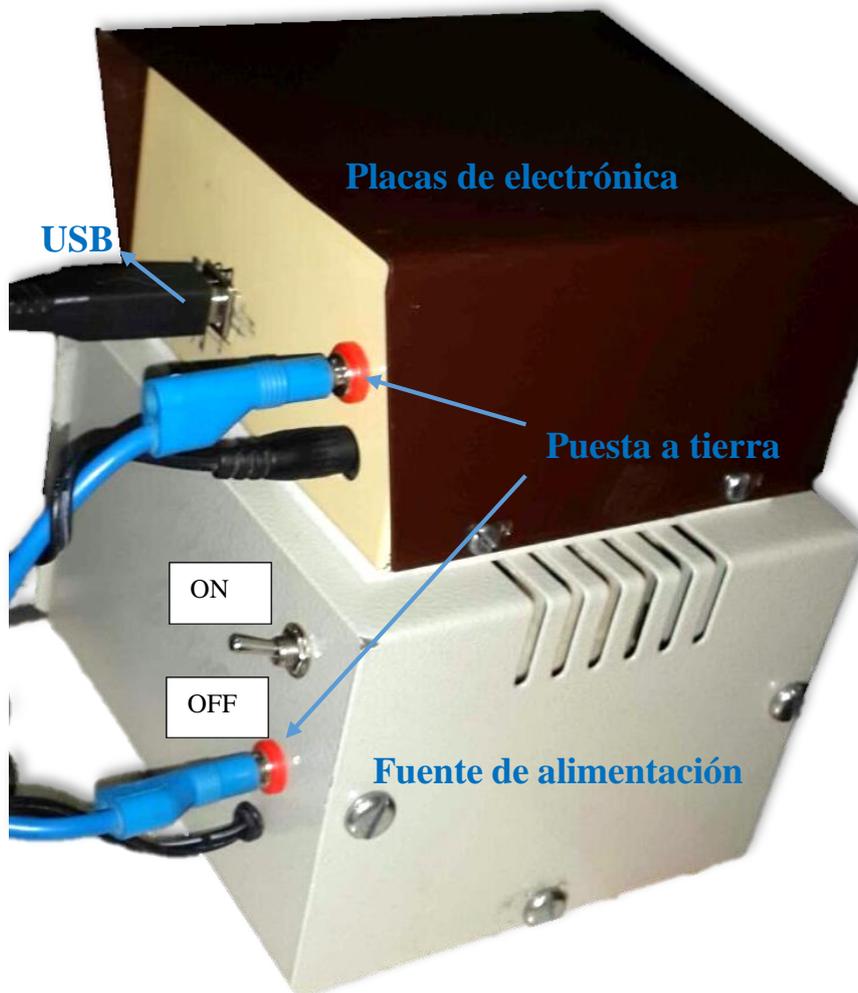


Figura III. Conexión de la fuente de alimentación y placas electrónicas. El puerto USB se conecta directamente a la computadora donde esté instalada la IGU.

Una vez montado el equipo, se procede a encenderlo. Se requiere un tiempo de estabilización en un arranque en frío de 20 min, que puede comenzar a computarse desde este instante.

Simultáneamente, puede abrirse el programa de la interfaz gráfica. Al inicio, éste nos solicita la ruta de dos archivos. En la *Figura IV* se observa la primera ventana, en la cual debe seleccionar la base de datos que contenga la tabla con las propiedades de los

materiales que se utilizan para las deposiciones. Este archivo puede encontrarse en la carpeta “data” dentro del directorio de instalación del programa.

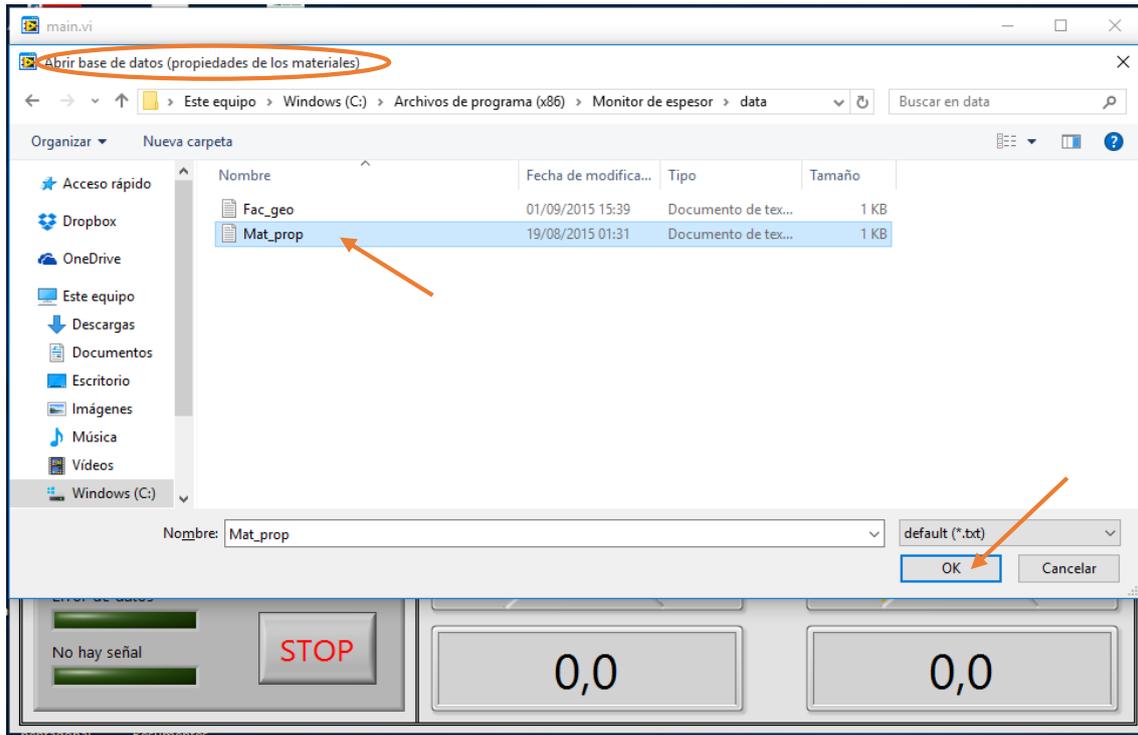


Figura IV. Primera ventana al inicio del programa. Esta solicita abrir el archivo que contiene las propiedades de los materiales.

En la *Figura V* se muestra la segunda ventana que solicita el archivo con la información de los factores geométricos de las distintas cámaras de vacío. Este archivo, puede encontrarse en la carpeta “data” dentro del directorio de instalación del programa.

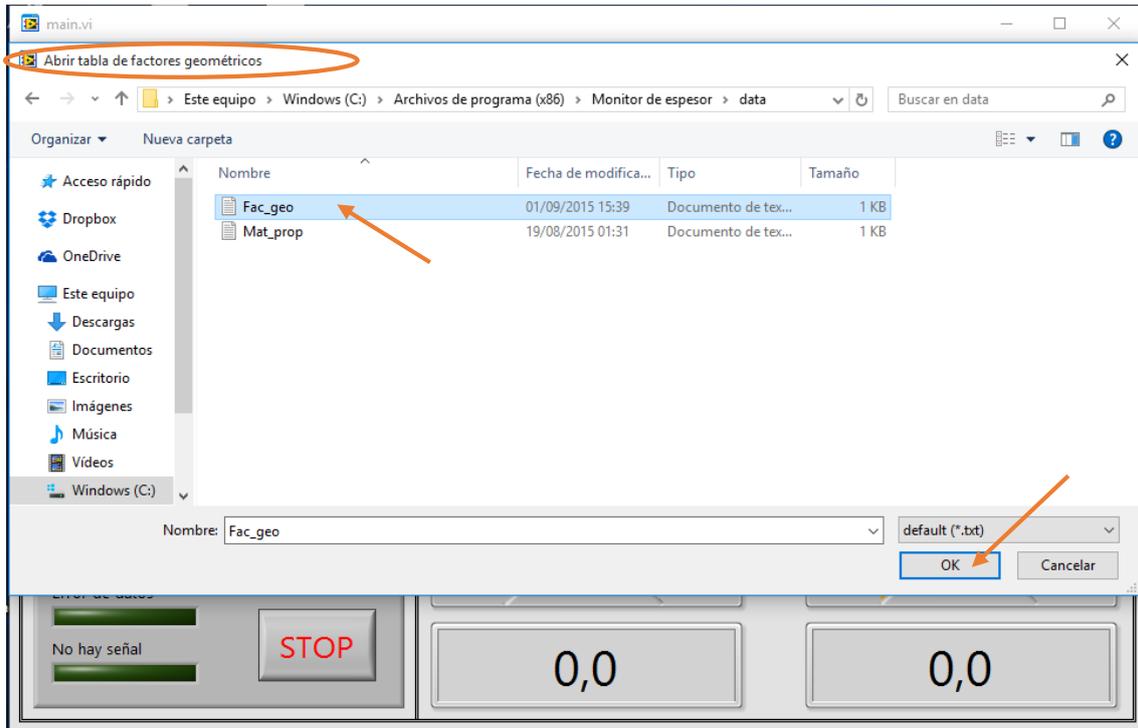


Figura V. Segunda ventana al inicio del programa. Esta solicita abrir el archivo que contiene los factores geométricos de las distintas cámaras de vacío.

Una vez inicializado, el programa observa su interfaz de usuario que tiene dos ventanas principales, la ventana de configuraciones básicas (Figura VI) y la ventana con configuraciones avanzadas (Figura VII).



Figura VI. Interfaz gráfica de usuario (IGU) del monitor de espesor con configuraciones básicas e indicadores.

Donde:

- A. Indicador de espesor.
- B. Indicadores de tasa de deposición.
- C. Selector de material a depositar.
- D. Indicador de material seleccionado.
- E. Seleccionar material desde base de datos.
- F. Añadir material a la base de datos.
- G. Selector de cámara de deposición e indicador de factor geométrico.
- H. Ruta de archivo de factores geométrico.
- I. Comando de calibración para cristales nuevos.
- J. Comando de calibración para cristales usados.
- K. Comando de control on/off del shutter.
- L. Indicadores de error de datos y de presencia de señal.



Figura VII. Interfaz gráfica de usuario (IGU) del monitor de espesor con configuraciones e indicadores avanzados.

Donde

- A. Ruta de base de datos con las propiedades de los materiales a depositar.
- B. Indicador/selector de puerto COM utilizado.
- C. Comando para detectar el puerto COM automáticamente.
- D. Indicador/selector de frecuencia de referencia, correspondiente al oscilador de referencia.
- E. Indicador/selector de la frecuencia natural del cristal (nuevo).
- F. Indicador/selector de espesor inicial, presente sobre cristales usados.
- G. Comando de almacenamiento de datos de medición, y ruta del archivo correspondiente.
- H. Indicador de frecuencia actual.

Para proseguir con la calibración, una vez que esté abierta la interfaz gráfica, debe seleccionarse el material a depositar (por defecto es aluminio), con los comando “C” o “E” de la Figura VI. Una vez transcurrido el tiempo de estabilización, se procede a presionar el comando de “calibración de cristal nuevo” o el comando “calibración de cristal usado”, según correspondan. Los mismos corresponden a las referencias “I” y “J” de la Figura VI, respectivamente.

Con el equipo calibrado, se retira el soporte (sin apagar el equipo) y se monta en el porta-sustrato para realizar la deposición (ver *Figura VIII*).

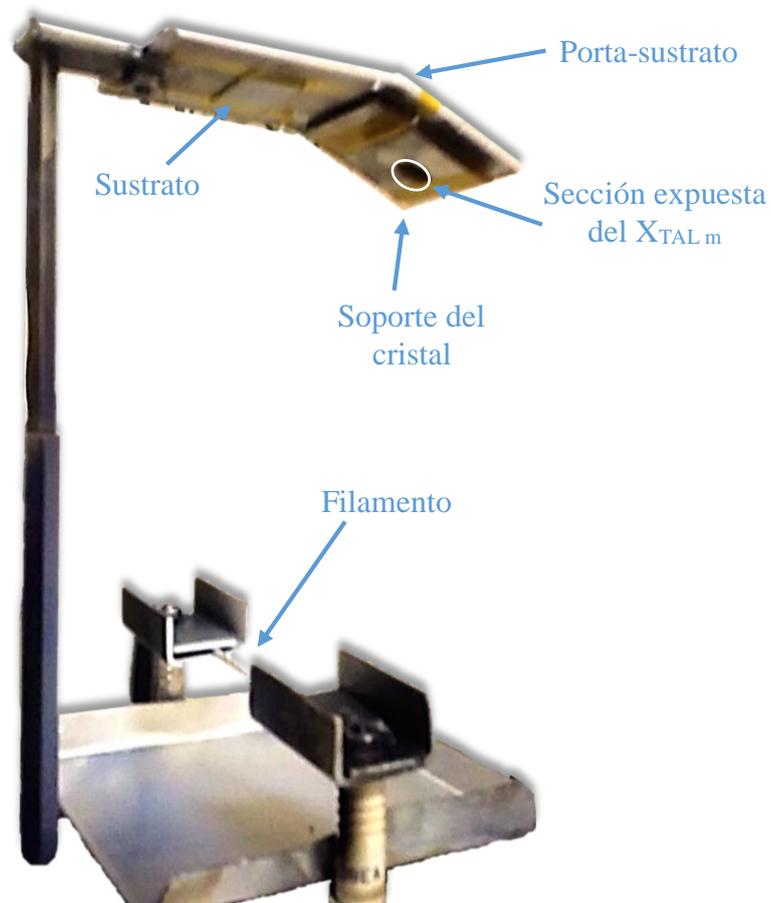


Figura VIII. Porta-sustrato utilizado para la deposición. Se observa el sistema de deposición montado.

Una vez finalizada la deposición, se retira el soporte y se vuelve a colocar en la placa de acondicionamiento de señal (ver *Figura II*), se cierra y atornilla la tapa y se espera a que transcurra el tiempo de estabilización (10 min, si el equipo se mantuvo encendido durante la deposición).

En la *Figura IX*, se muestra el sistema completo montado, indicando el valor de una medición una vez que transcurre el tiempo de estabilización.

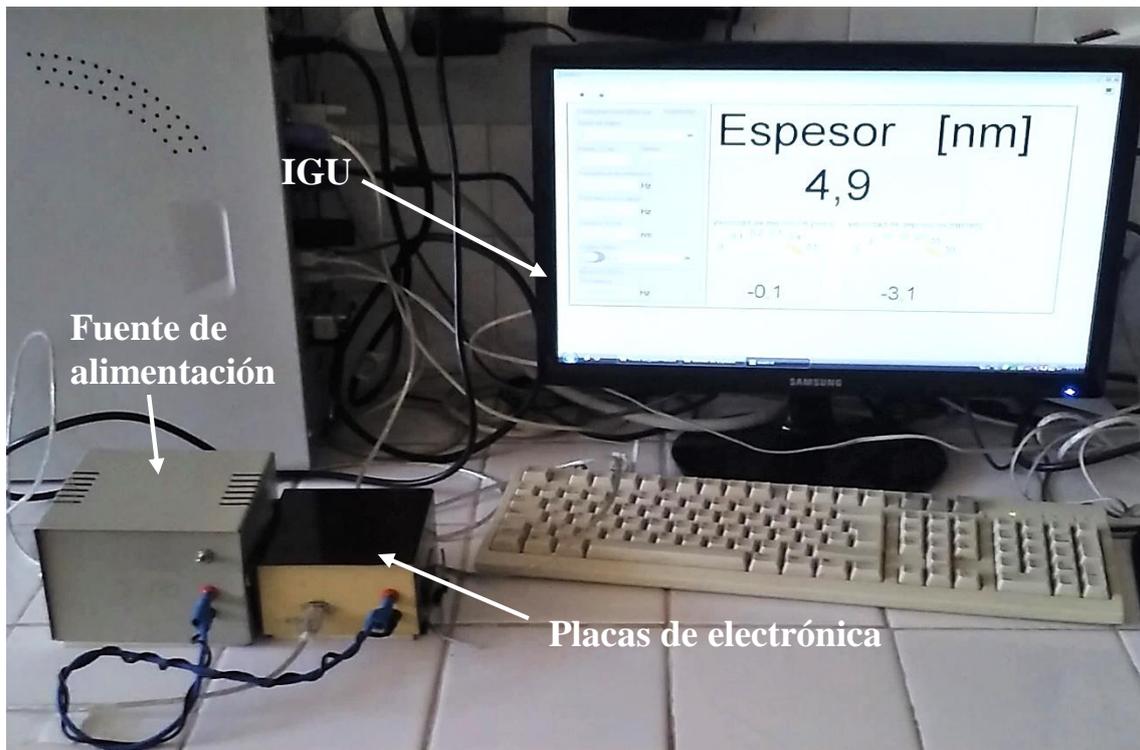


Figura IX. Sistema completo montado. Éste cuenta principalmente de tres cuerpos: fuente de alimentación, placas electrónicas e interfaz gráfica de usuario (IGU).