DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL DE UNA ESTACIÓN DE ESPECTROSCOPÍA, IMPLEMENTADO EN LABVIEW.

Diana Carolina Yermanos Fómeque
María Angélica Velandia Durán

Proyecto Curricular De Ingeniería Electrónica
Facultad de Ingeniería
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá D.C.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL DE UNA ESTACIÓN DE ESPECTROSCOPÍA, IMPLEMENTADO EN LABVIEW.

Trabajo de Grado
Para optar el título de Ingeniero Electrónico

Autores:
Diana Carolina YermanosFómeque
María Angélica Velandia Durán

Directores

Ingeniera Diana Marcela Ovalle Martínez, PhD
Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicaciones en Señales - IDEAS
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Físico Luís Camilo Jiménez Borrego
Grupo de Películas Delgadas y Nanofotónica
Pontificia Universidad Javeriana

Proyecto Curricular De Ingeniería Electrónica
Facultad de Ingeniería
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá D.C.

_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____

Nota de aceptación

_____
Ing. Cesar Perdomo
Jurado 1

_____
Ing. Hugo Aya
Jurado 2

_____
Ing. Diana Marcela Ovalle Martínez, PhD
Director 1

_____
Físico Luís Camilo Jiménez Borrego
Director 2

DEDICATORIA

A mi familia por el apoyo incondicional a pesar de los altibajos y las dificultades, su aliento y confianza siempre estuvo depositada en mis decisiones.
A mi hermana que es mi guía y mi mejor amiga por estar ahí siempre para celebrar cada momento y enseñarme.
A nuestros compañeros de carrera que en cada peldaño estuvieron dispuestos a enseñarnos y a compartir sus conocimientos y a todos aquellos que arrancaron este largo camino pero hoy no nos acompañan porque su apoyo, sus enseñanzas y su testimonio nos alentaron a cumplir nuestras metas.
A María por enseñarme tantas cosas durante estos años, transmitirme su forma brillante de resolver los problemas y regalarme su amistad. El camino resulto mas largo de lo que esperamos pero hoy somos mas fuertes y aunque cueste creerlo pacientes.

Diana Carolina Yermanos Fomeque

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy tanto en mi educación como la vida, por sus ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan pero mas que nada por su amor. A mis directores por su motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales, por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de nuestra formación profesional. A mis amigos, por compartir los buenos y malos momentos en este proceso. A mis hermanas que siempre han creído en mí y me han apoyado en todo momento.
A mis sobrinas para que puedan ver un ejemplo a seguir en mi. A Dave por ser un aliento en todo momento. A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis. ¡Gracias!

A todos los que permitieron que todos nuestros esfuerzos se materializaran en este documento, a nuestros Directores y a nuestros Mentores.

Maria Angelica Velandia Duran

Índice general

Capítulo 1 14
Reconocimiento de equipos 14
Elementos de un banco de espectroscopía 14
Configuración de elipsometría espectroscópica 14
1.1 Láser 15
1.2 Polarizadores 16
1.3 Sensor 17
Detector 17
1.4 Elementos banco óptico Grupo de Películas Delgadasy Nanofotónica de la Pontificia Universidad Javeriana(GPD&NF_PUJ) 20
Nanaposicionador NanoMax301 TS 20
Moto actuador DRV001 21
Nanorotador NR360S 21
Tarjeta de adquisición de datos USB 6211 22
Capítulo 2 26
Sistema de Supervisión 26
2.1 Almacenamiento de respaldo en base de datos Access 27
2.2 Escritura en archivo Excel .xlsx 28
Capítulo 3 29
Sistema de Control y automatización 29
3.1 Proceso de medida. 29
Modos de operación 29
3.2 Modo manual 30
3.3 Posicionamiento a referencia Home 30
3.4 Rutina Home 30
3.5 Rutinas de movimiento 31
Motores paso 33
Constitución 33
Principio de funcionamiento 33
3.6 Modo automático 36
Rutina Barrido automático 36
3.7 Rutina de barrido para muestreo 39

3.8 Método del Gradiente o descenso 45
Capítulo 4 49
Posicionamiento 49
Capítulo 5 51
Muestreo y adquisición de datos 51
5.1 Muestreo 51
5.2 Teoremas del Muestreo Uniforme de Señales 51
5.3 Submuestreo 54
5.4 Conversor análogo digital 54
5.5 Frecuencia de medida 55
5.6 Filtros 56
5.7 Filtro FIR 57
5.8 Comparación entre filtros FIR e IIR 57
5.9 Consideraciones filtro FIR 58
5.10 Método de las ventanas 59
Capítulo 6 62
Desarrollo experimental 62
6.1 Implementación filtro FIR y promedio móvil 62
6.2 Ventana Hanning 63
6.3 Ventana Blackman-Harris 65
6.4 Ventana Blackmam 66
6.5 Ventana triangular 66
6.6 Ventana rectangular 68
Capítulo 7 70
Resultados 70
Conclusiones 76
Bibliografía 78

Índice de figuras

Figura 1. Elementos Básicos en una estación de elipsometría (Fuente óptica (laser), polarizador, muestra, monocromador y detector) (HernándezJiménezÁlvarez, 2008) 15
Figura 2. Diagrama de componentes, trayectoria del haz de radiación y variaciones lineales y angulares. (Hernández JiménezÁlvarez, 2008) 15
Figura 3. Láser CSP196 16
Figura 4. Polarizador Glan-Taylor de Thorlabs. 16
Figura 5. Proceso de polarización de un haz de luz 17
Figura 6.PDA100A 18
Figura 7.Nanomax301 TS 20
Figura 8.Moto actuador DRV001 21
Figura 9. Nanorotador NR360S 21
Figura 10.Tarjeta de adquisición de datos NI USB6211 22
Figura 11. Descripción en diagrama de bloques de la tarjeta de adquisición de datos USB 6211. (National Instruments m. , 2016) 23
Figura 12. Nanorotador NR360S 24
Figura 13. Estación real GPD&NF_PUJ vista superior. 24
Figura 14. Estación real GPD&NF_PUJvista lateral 25
Figura 15. Módulo de recepción y adquisición de tensión relativa con tarjeta USB6211 26
Figura 16. Panel de Supervisión posición actual laser, muestra y detector; con opción de almacenamiento en Excel. 27
Figura 17. Diagrama de bloques VI escritura archivo excel. 28
Figura 18. Configuración del Sub VI de rutina posicionamiento Home. 30
Figura 19. Vista en diagrama de bloques Sub VI MoveHome 31
Figura 20. Diagrama de flujo secuencia movimiento ascendente 32
Figura 21. Diagrama de flujo secuencia movimiento descendente 32
Figura 22. Sub Vis para movimiento de pasos finos. 35
Figura 23. Movimiento Detector en pasos finos. 35
Figura 24. Diagrama de bloques para determinar la velocidad de los nanorotadores. 36
Figura 25. Sección encargada del barrido automático (a) 38
Figura 26. Sección encargada del barrido automático (b) 38
Figura 27. Control en la rutina de barrido automático para detener el VI principal 38
Figura 28. Panel frontal modo manual. 39
Figura 29. Panel frontal modo automático. 39
Figura 30. Descripción lógica general de rutina para muestreo 41
Figura 31. Diagrama de bloques rutina de muestreo 41
Figura 32. Panel de control rutina de muestreo 42
Figura 33.Intensidad Vs ángulo del láser, para un barrido alrededor de 30º, primera medición. 43
Figura 34. Intensidad Vs ángulo del láser, para un barrido alrededor de 30º, segunda medición. 43
Figura 35. Intensidad Vs ángulo del láser, para un barrido alrededor de 30º, tercera medición. 44
Figura 36. Intensidad Vs ángulo del láser, para un barrido alrededor de 40º 44

Figura 37. Diagrama de control, implementación del método ascenso por el gradiente..... 47
Figura 38. Spot del láser en el detector. 48
Figura 39. Distribución del haz láser. 48
Figura 40. Diagrama de flujo para rutina de calibración 50
Figura 41. Muestreo instantáneo en el dominio del tiempo. (Briceño Márquez, 2012) 52
Figura 42. Reconstrucción de la señal mediante la interpolación con la señal sinc. (Briceño Márquez, 2012) 53
Figura 43. Comparación de espectros de la señal original y la muestreada. 54
Figura 44. Curva de transferencia de un CAD con cuantificación uniforme. Los puntos de decisión se sitúan en la mitad de cada intervalo de cuantización. (Ramírez Leyva, 2016).. 55
Figura 45. Señal digital. (National Instruments, 2016) 56
Figura 46. Transformada de Fourier du un único armónico en el origen. 58
Figura 47. Configuración de filtro para la señal del detector. 61
Figura 48. Manejo de la señal filtrada. 61
Figura 49. Señal capturada con DAQ USB6211 62
Figura 50. Respuesta del filtro a la ventana Hanningfs=500 y fh=12,2 63
Figura 51. Respuesta del filtro a la ventana Hanningfs=100 y fh=12,2 63
Figura 52. Respuesta del filtro a la ventana Hanningfs= 100 y fh=5 64
Figura 53. Respuesta del filtro a la ventana Hanningfs=100 y fh=7 64
Figura 54. Respuesta del filtro a la ventana Blackman-Harris fs=500 y fh=12,2 65
Figura 55. Respuesta del filtro a la ventana blackman-harrisfs=30 y fh=5 65
Figura 56. Respuesta del filtro a la ventana blackmanfs=30 y fh=5 66
Figura 57. Respuesta del filtro a la ventana triangular fs= 500 y fh =12.5 67
Figura 58. Respuesta del filtro a la ventana triangular fs=25 y fh=12.5 67
Figura 59. Respuesta del filtro a la ventana triangular fs = 25y fh = 10 67
Figura 60. Respuesta del filtro a la ventana rectangular fs = 12.5 y fh = 500 68
Figura 61. Respuesta del filtro a la ventana rectangular fs = 12.5 y fh = 400 68
Figura 62. Respuesta del filtro a la ventana rectangular fs = 12.5 y fh = 300 69
Figura 63. Respuesta en la zona estable del filtro a la ventana rectangular fs = 12.5 y fh = 500 69
Figura 64. Películas empleadas para la medición del ángulo de Brewster. 70
Figura 65. Ángulo de Brewster para vidrio. 71
Figura 66. Ángulo de Brewster para película 1. 72
Figura 67. Ángulo de Brewster para película 3. 73
Figura 68. Ángulo de Brewster para película 4. 74
Figura 69. Ángulo de Brewster para película 5. 75
Figura 70. Espectro electromagnético a partir de teoría ondulatoria de Maxwell, la cuantización de Einstein y fuentes de radiación. (Jiménez B) 81
Figura 71. Transmitancia de un haz de radiación en un cuerpo(Brunatti & Martín, 2015) . 83
Figura 72. Espectro electromagnético en longitudes de onda en m y frecuencia en Hz. (Hernandez & Jimenez Alvarez, 2008) 85
Figura 73. Onda interactuando con una interfaz plana 87
Figura 74. Capa de transición entre dos regiones con propiedades definidas 90
Figura 75. Capa de transición vista en el plano x,y,z. 91
Figura 76. Representación plano (x,y,z) de la región de transición con sus diferenciales. .. 93
Figura 77. Vista de Nodo de invocación en diagrama de bloques. 96
Figura 78. Vista de propertynode en diagrama de bloques 97

Figura 79. Vista de RegisterEventCallBack en diagrama de bloques 97
Figura 80. Vista de RegisterEventRefnum en diagrama de bloques 98
Figura 81. Visualizacion de Genereal error Handlercusndo ocurre un error..... 99
Figura 82. Visualización de error en panel frontal. 99
Figura 83.Selección control ActiveX panel frontal 101
Figura 84. Vista de control ActiveX generico en panel frontal. 101
Figura 85. Asignación Numero serial en diagrama de bloques. 102
Figura 86. Vista en panel frontal de control ActiveX detector 102
Figura 87. Método StartCtrl en diagrama de bloques 103
Figura 88. Esquema de entrada y salida función Bundle. 103
Figura 89. Esquema de entrada y salida función Unbundle. 104
Figura 90. Creacion de clúster objeto. 104
Figura 91. Vista en panel frontal del clúster y sus elementos. 104
Figura 92. Ventana de edición apariencia Sub VI. 105
Figura 93. Vista de configuración de parámetros en APTUser. 105
Figura 94. Vista en diagrama de bloques método SetHomeParams. 106
Figura 95. Sub VI´S para asignación de parámetros iníciales nano rotadores 107
Figura 96. Descripcion atributos StageAxis para detector. 108
Figura 97. Vista de configuración de parámetros en APTUser. 108
Figura 98. Vista en diagrama de bloques método SetStageAxisInfo 108
Figura 99. Sub VI para asignación de parámetros Iníciales Detector. 109
Figura 100. Esquema de entrada y salida función generateoccurrence. 109
Figura 101. Esquema de entrada y salida función Set occurrence. 109
Figura 102. Esquema de entrada y salida función Waitoccurrence. 110
Figura 103. Sub VI método MoveAbsolute 110
Figura 104. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método MoveAbsoluteEx. 110
Figura105.Sub VI MétodoStopImmediate 111
Figura 106. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método StopImmediate 111
Figura 107. Sub VI método MoveAbsolute 112
Figura 108. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método MoveAbsoluteEx 112
Figura 109..MetodoMovJog 113
Figura 110. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método MoveJog 113
Figura 111. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método SetVelDYM 114
Figura 112. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método SetVelParams 114

Índice de tablas

Tabla 1. Características CPS196 16
Tabla 2. Características CPS196 18
Tabla 3. Características NanoMax301 20
Tabla 4. Características DRV001 21
Tabla 5. Características Nanorotador NR360S 22
Tabla 6. Características DAQ USB 6211. (National Instruments m. 2016) 23
Tabla 7. Valores de salida respecto a posicionamiento de motores. 37
Tabla 8. Criterio de parada rutina automática. 37
Tabla 9. Tabla de frecuencias de corte según ventana, con una frecuencia de 500 Hz 60
Tabla 10. Tabla que relaciona la Intensidad en Voltios para para diferentes Fh y Fs , usando una ventana Hannig 63
Tabla 11. Tabla que relaciona la Intensidad en Voltios para para diferentes Fh y Fs , usando una ventana Blacknan-Harris 65
Tabla 12. Tabla que relaciona la Intensidad en Voltios para para diferentes Fh y Fs , usando una ventana Blacknan 66
Tabla 13. Tabla que relaciona la Intensidad en Voltios para para diferentes Fh y Fs , usando una ventana triangular 66
Tabla 14. Tabla que relaciona la Intensidad en Voltios para para diferentes Fh y Fs , usando una ventana rectangular 68
Tabla 15.. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para una película de vidrio. 70
Tabla 16. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para la película 2. 71
Tabla 17. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para la película 3 con polarizador. 72
Tabla 18. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para la película 3 sin polarizador. 73
Tabla 19. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para la película 4 sin polarizador. 73
Tabla 20. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para la película 5 con polarizador. 75
Tabla 21. Números seriales nano rotadores y detector. 102
Tabla 22. Tabla de relación entre la posición deseada, según la relación de ángulos de Snell y la posición en la que tenía la máxima intensidad para verificar el error de posición del sistema. 117

Introducción

Dentro de las técnicas modernas que permiten la caracterización de propiedades ópticas de materiales en forma de películas delgadas está la elipsometría espectroscópica. En la cual se aprovecha los cambios de estado de polarización de la luz, una vez que esta incide y es reflejada sobre la superficie de la muestra de interés. Dicho proceso permite a través de los patrones de reflexión, obtener la extinción en ángulo de Brewster[1] que permite detectar presencia de plasmones, hallar constantes y/o parámetros ópticos, morfológicos y mecánicos, como índice de refracción, espesor en películas transparentes, rugosidad, entre otras.

En la actualidad, el uso de esta técnica ofrece mejoras significativas en las mediciones de propiedades ópticas en áreas como la nanotecnología, optoelectrónica y biotecnología, en especial en la caracterización, estudio y desarrollo de biosensores y materiales nanocompuestos; así como dieléctricos, polímeros y elementos fotoresistentes en electrónica transparente y fotónica.

Estas son las áreas de interés para la investigación y desarrollos del Grupo de Películas Delgadas y Nanofotónica de la Pontificia Universidad Javeriana (GPD&NF_PUJ), que actualmente cuenta con un banco óptico de reflectometría de ángulo variable UV, VIS e NIR, que permite medir patrones de en el rango visible e infrarrojo cercano. La estación ha sido implementada para medición del patrón de reflexión con microposicionamiento a partir de nanoposicionadores lineales y de rotación, con resoluciones del orden de 20 nanómetros y de un segundo, respectivamente, que permiten medir con varias configuraciones geométricas y de retroalimentación electrónica.

Para los desarrollos anteriores, en el presente trabajo se diseñó e implementó un sistema de supervisión y control dedicado a comunicar e intercomunicar un arreglo de dispositivos y de componentes de nanoposicionamiento con sus respectivas interfaces control y comunicación de fábrica, que permita a través de una interfaz con el usuario obtener patrones de reflexión e interferencia sobre superficies e interfaces de arreglos en capas delgadas y nanoestructurados, de materiales dieléctricos, semiconductores y conductores, inorgánicos y orgánicos. Esto permite la caracterización y desarrollo de nanoestructurados y dispositivos de interés, requeridos por Grupo de Películas Delgadas y Nanofotónica de la Pontificia Universidad Javeriana (GPD&NF_PUJ), para obtener una resolución en el orden de los nanómetros, la supervisión constante de variables como la intensidad del patrón de reflexión y el ángulo de Brewster y el control sobre el posicionamiento tanto de la muestra como del haz de luz que incide sobre ella, haciendo que el equipo pueda trabajar de manera autónoma cuando sólo se especifique la cantidad de muestras y la varianza del ángulo para efectuar el barrido.

Para lograr lo anterior, se diseñó e implementó un sistema de supervisión y control enLabVIEW usando la herramienta tecnológica ActiveX implementada en los equipos de

[1] También denominado ángulo de polarización, ya que a partir de un haz no polarizado incidente sobre una superficie se genera un haz reflejado polarizado y perpendicular al plano de incidencia.

Thorlabs, lo cual permitió generar una solución económica y confiable que permite también adquirir conocimiento adicional sobre la estructura de estos módulos.

Debe tenerse en cuenta que los recursos empleados en este trabajo como software, módulos de manejo y adquisición de datos (DAQ USB6211) se ciñen a los recursos dispuestos por el GPD&NF_PUJ en su banco de espectroscopia.

Adicionalmente, se desarrolló la documentación de las mediciones realizadas con el sistema inicial, es decir, en lazo abierto como soporte para las mediciones del sistema final en lazo cerrado; dentro de las cuales se contempló el patrón de interferencia de radiación reflejada y el ángulo de Brewster anteriormente mencionados, así como el patrón de reflexión de luz monocromática polarizada sobre diversas superficies generadas a partir de la interacción de conductores, aislantes y el aire.

Planteamiento del problema

La espectroscopía es el estudio del espectro generado por la emisión o la absorción de radiación electromagnética, la cual es característica única para la identificación de elementos según la longitud de onda con la que se presenta este fenómeno. Esto llevó al Grupo de Películas Delgadas y Nanofotónica de la Pontificia Universidad Javeriana (GPD&NF_PUJ), a desarrollar la línea de investigación de espectroscopía en el rango UV, VIS y NIR. El GPD&NF_PUJ, cuenta con un banco óptico dedicado al estudio de las propiedades ópticas, morfológicas y plasmónicas en películas, interfaces, arreglos de nanoestructurados, de materiales dieléctricos, semiconductores, conductores, inorgánicos y orgánicos, en especial transparentes y conductoras de óxidos y nitruros de In, Sn, Zn, Ti, permitiendo la medición de características como la intensidad, la frecuencia y el estado de polarización del patrón de interferencia de la radiación monocromática UV, VIS y NIR, reflejada y/o transmitida, con ángulo de incidencia variable en las interfaces y superficies de las películas conductoras, semiconductoras y dieléctricas de interés, para caracterizar el espectro de absorción y reflexión. El banco para elipsometríaUV VIS NIR, para transmisión y reflexión, cuenta con un arreglo de dispositivos Thorlabs compuestos de: (i) nanoposicionadores lineales, basados en motores electromagnéticos de micropasos, motores piezo, sensores de posicionamiento piezo para control de posición, que permiten paso de 50 nm, (ii) de nanorotadores basados en motores electromagnéticos de micropasos, sensores de posicionamiento piezo para control de posición que permiten paso angular de 1 segundo, (iii) de goniómetro basado en motor piezo y control piezo que permite paso de 1 segundo, (iv) de diodos láser en 650 nm y 808-980 nm, (v) de fotodiodos de Si copara VIS y InAsGa para NIR asistidos con amplificadores, (vi) de polarizadores Glan Taylor.

Este proyecto, buscó primordialmente el alcance a especificaciones que superen los resultados obtenidos anteriormente dentro de esta misma línea. Con las necesidades, condiciones anteriores y los recursos con los que actualmente cuenta el GPD&NF_PUJ, tanto en software como equipos de movimiento y captura de señal, se busca determinar: (I) ¿Cuáles son las condiciones, características y desarrollos necesarios para implementar un sistema que permita la supervisión, el control y la comunicación electrónica del usuario con el banco, basado para su funcionamiento en nanoposicionadores lineales y de rotación Thorlabs, en sensores de posicionamiento, fuentes láser y fotodiodos Thorlabs, tecnología ActiveX, software de Thorlabs de los componentes, software LabVIEW, tarjetas de National Instruments (NI) USB6211 y en componentes auxiliares de apoyo electrónico?. (II) ¿Cuáles son las características y desarrollos del sistema que permita en el banco la programación de la medición como el desplazamiento y la rotación de componentes en pasos de 50 nm y 1 segundo de arco? (III) ¿Cuáles son las características y desarrollos para obtener (i) la medición relativa de intensidad del patrón de interferencia de la radiación reflejada? (ii) la medición del ángulo de Brewster a partir de la medición en tiempo real de intensidad relativa del patrón de interferencia de la radiación reflejada?, (iii) la medición del ángulo de extinción de la intensidad del patrón de interferencia de la radiación reflejada, para interfaces en película dieléctrico conductor. (IV) ¿Cuáles son las características y desarrollos del sistema para obtener las constantes ópticas y mecánicas a partir de las mediciones en tiempo real del ángulo de Brewster y del ángulo de extinción de la intensidad del patrón de interferencia de la radiación reflejada?

En este sentido se hace necesario realizar un estudio base que permita identificar las herramientas para comprender el procedimiento de medida del patrón de interferencia de intensidad reflejado de un haz de laser polarizado linealmente que incide sobre una superficie de un cuerpo solido puro, recubierto con capa o multicapa; además de la obtención del patrón de reflexión de luz monocromática polarizada sobre diversas superficies.

Atendiendo los resultados de mediciones previas sobre el banco, se contemplan las principales dificultades en la medición, y por tanto se quiere determinar: (i) ¿Cómo reportar en tiempo real las mediciones de baja intensidad en el ángulo de Brewster y en el ángulo de extinción, en donde la responsividad del fotodiodo lleva a generar señales del orden de milivoltios, llevando a los errores relativos más altos de la medición? De lo anterior (ii) ¿Cómo se puede determinar y establecer electrónicamente el nivel de disparo o trigger que sincronice lo más óptimo posible la medición de la intensidad del patrón de reflexión con la posición lineal y/o angular de los nanoposicionadores lineales y angulares? Debido al ancho y dispersión del haz laser y al ancho de la ventana de detección del fotodiodo (iii) ¿Cómo se puede determinar electrónicamente la mejor alineación y enfoque del haz laser sobre el detector para la medición de la intensidad del patrón de reflexión para las diferentes nanoposiciones lineales y angulares?

Aunque se pueden obtener diferentes tipos de errores causados por diversos aspectos, principalmente se distinguen al observar los resultados de estudios previos, errores sistemáticos por las posiciones de los equipos y errores aleatorios producidos en general por el ruido que se une a la señal captada, del material, del medio por el que el haz es transmitido y la influencia de la luz propia del lugar. Por tal motivo, se requiere una medida muy aproximada a la realidad, que tenga en cuenta las limitaciones de los instrumentos, y permita un barrido en su máxima resolución para obtener las constantes ópticas deseadas al realimentar el sistema. Considerando que hasta el momento los estudios realizados se han efectuado empleando el sistema en lazo abierto alcanzado valores del orden de los micropasos haciendo que el equipo sea subutilizado. Así pues, se plantean ciertos interrogantes adicionales respecto a los requerimientos y las características del sistema como, ¿Cuáles son las condiciones para determinar los alcances del barrido angular deseado al implementar una realimentación y control mediante software?, ¿Cuáles son las condiciones que permiten mejorar la estabilidad del sistema y el aprovechamiento de los recursos?

Justificación

Justificación académica

El proyecto curricular de Ingeniería Electrónica de La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, exige la elaboración de un trabajo de grado que justifique los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de la carrera profesional. Por tanto, realizar este trabajo permitirá demostrar los conocimientos adquiridos durante la misma, afianzarlos, despejar dudas, incentivar a la investigación y la formulación de soluciones orientadas hacia ciertas problemáticas específicas. Para cumplir con este requisito, este proyecto pretende realizar el estudio del banco de elipsometría perteneciente al Grupo de Películas delgadas y Nanofotónica de la Pontificia Universidad Javeriana, con el propósito de implementar un sistema de supervisión y control electrónico a partir de interfaces LabVIEW, ActiveX, tarjetas de adquisición National Instruments (NI) y equipos de nanorotación y detección de Thorlabs, con las que cuenta el GPD&NF_PUJ, El desarrollo del mismo estará orientado a cubrir los requerimientos de dicho grupo para mejorar el desempeño del banco en la caracterización de películas delgadas con los rangos de resolución establecidos y con el valor agregado del conocimiento detallado de los equipos, al desarrollar el sistema de control de manera autónoma; teniendo en cuenta que las opciones que brinda el mercado presentan la estación como una caja negra donde el acceso a la información sobre su funcionamiento y componentes es hermético y limitado. En la implementación se requiere el desarrollo de programas computacionales que permitan la comunicación con herramientas como ActiveX, para establecer la conexión y ejercer la acción de control entre LabVIEW y los equipos de Thorlabs, evidenciando una vez más el carácter del proyecto.

Justificación técnica

La implementación del sistema de supervisión y controlmediante la herramienta LabVIEW aumentará la resolución de las cantidades medidas por cada uno de los componentes del banco óptico, en especial la de los nanorotadores, y mejorará la exactitud en las medidas de ángulo de Brewster e intensidad de haz reflejado, aprovechando todo el rendimiento que el equipo ofrece. Adicionalmente, se facilitará la toma de datos para la caracterización de distintos materiales y su correspondiente validación a través de estudios posteriores una vez que el sistema sea autónomo. Todo esto, teniendo en cuenta que este desarrollo se hará con los equipos actuales con los que cuenta el GPD&NF_PUJ.

Justificación económica

La implementación del sistema de control a partir de los elementos disponibles por el fabricante Thorlabs, involucra la adquisición de tres módulos (T-Cube Strain Gauge Reader) con un costo comercial aproximado de $1’149.857 cada uno y un módulo T-Cube ControllerHub valorado en $100.000, los cuales hacen referencia a las galgas

extensiométricas y a la unidad de alimentación y comunicación. Igualmente se debe contemplar el costo de licenciamiento del software LabVIEW que es aproximadamente $2´300.000 para la adquisición y manejo de los datos. El desarrollo este proyecto involucra únicamente la adquisición del software LabVIEW y su licencia con el que se realiza la realimentación del sistema y manejo de datos para el cumplimiento de los requerimientos impuestos; el costo de la estación será aproximado a los $33’000.000 frente a equipos comerciales de sus características oscilan alrededor de los $100’000.000.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de supervisión y control para una estación de espectroscopía UV, VIS y NIR empleando nanoposicionadores Thorlabs y una interfaz basada en LabVIEW, que permita medir el patrón de radiación reflejado sobre interfaces dieléctricas, conductoras y semiconductoras, en presencia de plasmones.

Objetivos específicos

• Examinar los equipos empleados en la estación de espectroscopía para llevar a cabo un reconocimiento de sus características con el propósito de establecer los protocolos de comunicación pertinentes para la conexión de la misma con el entorno LabVIEW y posteriormente realizar distintas mediciones sobre diversas películas delgadas.

• Diseñar e implementar un sistema de supervisión para la estación de espectroscopía basado en la herramienta ActiveX para la comunicación entre los equipos de Thorlabs y bajo la plataforma LabVIEW para una estación de espectroscopía que permita medir la intensidad y frecuencia del patrón de reflexión de radiación UV, VIS y NIR sobre interfaces dieléctricas, conductoras y semiconductoras.

• Diseñar e implementar el sistema de control para la estación de espectroscopía donde se permita establecer el tamaño y la cantidad de pasos para los nanorrotadores, así como el ángulo de incidencia del láser fijando un inicio y un fin para el posicionamiento de la muestra a través de LabVIEW.

• Establecer la posición de inicio más adecuada de acuerdo a los criterios del Grupo de Películas Delgadas y Nanofotónica de la Pontificia Universidad Javeriana con el fin de determinar el ángulo mínimo de inicio y el máximo de finalización en las mediciones para el láser, así como la altura del detector.

• Proponer un criterio de acuerdo a las mediciones de cantidades del presente trabajo que permita el mejor manejo posible de la señal de voltaje obtenida a partir del haz reflejado; teniendo en cuenta los niveles que alcanza, así como las fluctuaciones producidas por el ruido propio del ambiente, la sensibilidad del instrumento y las características de muestreo de la tarjeta de adquisición de datos a emplear.

Capítulo 1

Reconocimiento de equipos

Elementos de un banco de espectroscopía

Teniendo en cuenta que la configuración de un elipsómetro básico está constituida por fuentes de luz, polarizadores, muestras, detectores, existen un gran número de formas en el que una medida de elipsometría puede ser realizada. La principal diferencia entre las diferentes configuraciones de elipsómetros ocurre en la sección que polariza el rayo de entrada y resuelve el estado de la polarización del rayo reflejado. Cualquiera sea la configuración de un elipsómetro ésta puede ser implementada en un espectroscopio, con ángulo de incidencia variable. En este capítulo se hablará de los recursos con los que se cuentan en el banco de elipsometría del GPD&NF_PUJ y con los cuales se desarrolla este trabajo como son equipos de movimiento lineal y rotacional, software, tarjeta de adquisición de datos, fuente de luz, polarizador y sensores. Detalles técnicos apéndice A.

Configuración de elipsometría espectroscópica

La elipsometría espectroscópica es una técnica óptica últimamente popularizada que mide cambios en el estado de polarización de la luz reflejada desde una superficie de muestra. La sensibilidad y precisión de la técnica establecen los estándares para la caracterización de películas delgadas.

Las grandes dificultades que ha tenido es el poder enfocar el sistema a spots muy pequeños para la muestra. La técnica de elipsometría, en la cual se basa este trabajo consiste en incidir un haz luz colimada con un estado de polarización conocida sobre unas películas delgadas, en donde se usa una fuente monocromática, haz láser.

Posteriormente se polariza este láser por medio de un elemento óptico, conocido como polarizador, a una forma lineal. En este caso se emplea un elipsómetro de anulación, que consiste en girar las lentes que modifican tanto el ángulo del polarizador como el del analizador hasta encontrar un nulo.

Los elementos principales requeridos para la caracterización de películas delgadas a través de la técnica elipsometría son los siguientes.

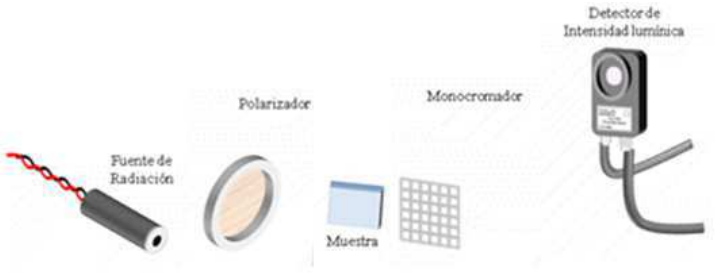


Figura 1. Elementos Básicos en una estación de elipsometría (Fuente óptica (laser), polarizador, muestra, monocromador y detector) (HernándezJiménezÁlvarez, 2008)

La disposición de estos equipos es conforme al siguiente esquema:

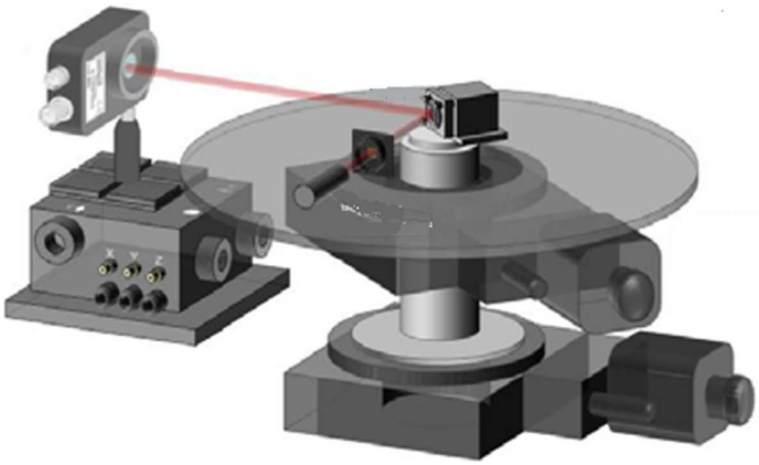


Figura 2. Diagrama de componentes, trayectoria del haz de radiación y variaciones lineales y angulares. (Hernández &JiménezÁlvarez, 2008)

1.1 Láser

Las fuentes de luz más usados en la elipsometría son el láser y la lámpara de arco. En este trabajo se hablará del láser ya que es el elemento con el cual se desarrollará las mediciones prácticas debido a las condiciones en las cuales se captura la señal.

El láser alta intensidad de salida y posee, en su mayoría, una sola dirección en su espacio de propagación. En el ángulo de Brewster, las muestras exhiben un mínimo en la reflectancia p-polarizada. Un láser tiene la facultad de tener una única longitud de onda.

En el banco del grupo de películas delgadas y nanofotónica de la Pontificia Universidad Javeriana se cuenta con un láser CPS196, como el que se muestra en laFigura 3, y cuyas características están en laTabla 1.



Figura 3. Láser CSP196

Característica	CPS196
Longitud de onda	Típica: 635 nm Max: 640 nm
Rango focal mínimo	50 mm
Divergencia del haz	Con colimador 0.6 mrad sin colimador 1.8 mrad
Diámetro haz	Enfocado a 400 mm (75x300)um Haz colimado (2.45x 0.54)um
Apertura clara	4 mm
Corriente de operación	55 mA
Voltaje de operación referenciado a tierra	Min -4.5V Typ -5 V Max -5.5V

Tabla 1. Características CPS196

1.2 Polarizadores

Un polarizador es un elemento óptico el cuál convierte un haz de luz de cualquier estado de polarización (no polarizado, parcialmente polarizado, linealmente polarizado, o elípticamente polarizado) en un haz de luz con un único estado de polarización. La mayoría de los polarizadores son transmisores, por lo que al pasar el haz de luz a través de este se produce una transmisión del haz de luz polarizada linealmente.



Figura 4. Polarizador Glan-Taylor de Thorlabs.

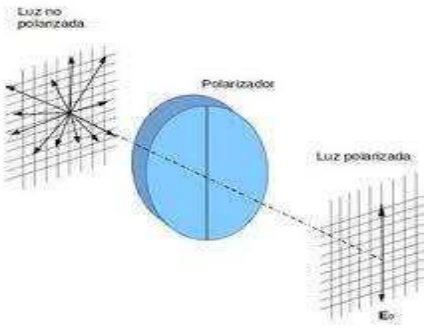


Figura 5. Proceso de polarización de un haz de luz.

Esto quiere decir que al pasar el haz de luz través de un polarizador lineal, se extingue su componente de campo eléctrico perpendicular al eje óptico. La relación de las componentes de campo eléctrico paralela y perpendicular del haz de luz transmitida luego de la transmisión a través del polarizador está definida como la relación de extinción del polarizador, y es una medida de la calidad del polarizador dado. Las relaciones de extinción típicas para los polarizadores ópticos son del orden 10^6 o mayores. Esto quiere decir que independientemente del estado de polarización que tiene la luz cuando entra al polarizador, la luz que emerge del mismo se polariza con la componente de campo eléctrico a lo largo del eje óptico del polarizador. Si la luz que incide está polarizada perpendicularmente a la dirección del polarizador, ninguna parte de la luz atraviesa el mismo. La longitud de onda del polarizador empleado en este corresponde a los 635nm.

1.3 Sensor

Un sensor ideal es aquel que para producir su señal de salida no disminuye la energía de la señal de entrada, es decir no modifica la variable de medida, pero en la práctica esto no se da, por lo que es importante que el transductor consuma la menor energía de la señal de entrada para que altere en lo menos posible el fenómeno físico estudiado.

Convertir la señal en señales eléctricas da la ventaja de extraer poca energía del sistema para medir una variable, esto porque las señales eléctricas pueden ser fácilmente amplificadas y que existen gran variedad de dispositivos eléctricos para acondicionar o modificar las señales eléctricas, además de considerar la facilidad con que estas se pueden transmitir, almacenar, registrar, procesar y presentar.

Detector

El detector en el banco óptico representa la etapa de sensado en el que la señal física es convertida de un tipo a otro; es decir convierte una magnitud en otra que resulte más apta para el análisis de un fenómeno físico.

Existen tres tipos fundamentales de detectores ópticos los cuales son empleados para medidas elipsométricas estos son los tubos fotomultiplicadores, fotodiodos

semiconductores y arreglos CCD (dispositivos de carga-acople). Los tubos fotomultiplicadores fueron usados por varios años como detectores primarios. Sin embargo, estos requieren fuentes de alto-voltaje y tienen una no linealidad importante. Los tubos fotomultiplicadores pueden también exhibir una sensibilidad significativa a la polarización y los fotodiodos semiconductores tienen ventajas importantes, como el bajo costo, son muy lineales, en un rango de niveles de intensidad muy amplio.

Los detectores más comunes para aplicaciones VIS-UV son los fotodiodos de silicio, mientras detectores de Indio, Galio, Arsénico (InGaAs) y Mercurio, Cadmio, Teluro (HgCdTe) son a menudo usados para aplicaciones NIR y FTIR, respectivamente. Los detectores de fotodiodos también pueden ser fabricados en arreglos, los cuales son de particular importancia para la construcción de elipsómetros de producción donde la velocidad de muestreo es importante. Esto permite detectar múltiples longitudes de onda simultáneamente, en vez que secuencialmente.

Un arreglo CCD es un tipo específico de arreglo de detectores de semiconductores el cual está empezando a convertirse en el más popular, para aplicaciones de espectroscopía. Arreglos CCD han sido extensivamente usados en aplicaciones de imágenes en el pasado; pero no son populares para aplicaciones de elipsometría debido a sus problemas en la correcta interpretación de las señales que provienen de elementos detectores. Avances en las técnicas de diseño y moldeamiento de CCD para datos que provienen de arreglos CCD han permitido un incremento en su popularidad para detectores de elipsometría.

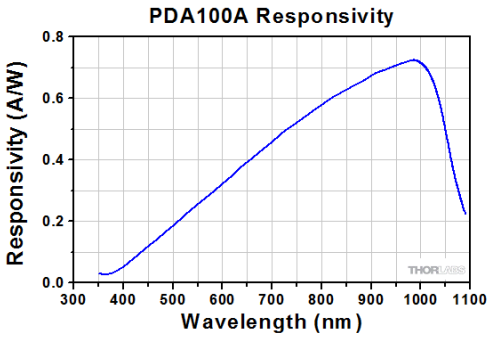
Particularmente se cuenta con un detector amplificador PDA100A Figura 6; cuyo amplificador corresponde a un amplificador de transimpedancia para convertir el muestreo de una intensidad relativa a una salida de tensión relativa. Por consiguiente de ahora en adelante la salida del sistema estará entendida en niveles de tensión.



Figura 6.PDA100A

Característica	PDA100A
Elemento	Si
Rango longitud de onda	340-1100 nm
Área activa	100mm2 (10mm x 10 mm)
Ganancia	8 x 10 dB paso
Rango de ancho de banda	DC- 2,4 MHz

Tabla 2. Características CPS196



Gráfica 1. Respuesta de PDA100A contra longitud de onda

Características

- Exactitud

Se refiere a que tan cerca del valor real se encuentra el valor medido. En términos estadístico, la exactitud está relacionada con el sesgo de una estimación. Cuanto menor es el sesgo más exacto es una estimación.

- Precisión

Precisión se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos en mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión. Una medida común de la variabilidad es la desviación estándar de las mediciones y la precisión se puede estimar como una función de ella.

- Repetibilidad

Diferencia entre varias medidas realizadas en las mismas condiciones de material y de medio ambiente por el mismo operador en un periodo de tiempo corto. Las medidas se efectúan por desplazamiento de la punta y regreso a la posición inicial de manera homogénea. Valor expresado generalmente en micras.

- Resolución

Resolución, se refiere al número de bits empleados para representar en un medio discreto una señal.

1.4 Elementos banco óptico Grupo de Películas Delgadasy Nanofotónica de la Pontificia Universidad Javeriana(GPD&NF_PUJ)

Adicional a la configuraciónbásica descrita con anterioridad, el banco entregado por GPD&NF_PUJ cuenta con elementos adicionales que son dos nanorotadores NR360S, un nanoposicionador nanoMAX301 TS con 3 ejes de movimiento y una tarjeta de adquisición de datos National Instruments USB6211.

Nanaposicionador NanoMax301 TS

Es un motor piezo eléctrico con movimiento lineal en tres ejes x, y,z que puede ser accionado por un actuador diferencial DRV001 para efectuar movimientos en un rango más fino con las configuraciones necesarias, en este caso particular el movimiento está asociado únicamente al eje Z.



Figura 7.Nanomax301 TS

Característica	Nanomax301
Movimiento grueso máximo	4 mm
movimiento fino	300 um
Rango de tensión	0-75 V
Rango de ancho de banda	DC- 2,4 MHz

Tabla 3. Características NanoMax301

Moto actuador DRV001



Figura 8.Moto actuador DRV001

Característica	DRV001
Rango de viaje	8 mm
Rango de velocidad	40.0 µm/s a 4 mm/s
Corriente de fase nominal	1 A
Resistencia de fase	4.6 Ω
Inductancia de fase	0.6 mH

Tabla 4. Características DRV001

Nanorotador NR360S

Nanorotador con rodamientos de precisión compacta para no generar una estructura muy voluminosa; en la estructura actual es utilizado para dirigir el movimiento del disco en el que se ubica el láser y el disco central que sostiene el porta muestras.

Tiene una resolución de segundo y soporta 50 kg de carga.



Figura 9. Nanorotador NR360S

Característica	NR360S
Giro	360°
Rango de velocidad	50°/ s con controlador
Aceleración	80°/ s/s con controlador
Corriente de fase nominal	1 A
Resistencia de fase	4.6 Ω
Inductancia de fase	4.6 mH

Tabla 5. Características Nanorotador NR360S

Tarjeta de adquisición de datos USB 6211

La tarjeta de adquisición de datos USB 6211 es un módulo multifuncional de alta velocidad de la serie M que mezcla las características de un controlador de sistema NI-STC 2, amplificador NI-PGIA 2 y tecnología de calibración NI-MCal con las facilidades del sistema Hi-Speed USB que permite el desarrollo de aplicaciones de prueba automatizada, control de procesos y medidas de sensor. (National Instruments m. , 2016)

En especial esta tarjeta está diseñada para aplicaciones móviles o de poco espacio dada su facilidad de instalación, permite la transferencia de datos bidireccional a alta velocidad mediante el bus USB NI SignalStreaming. (National Instruments m., 2016)



Figura 10.Tarjeta de adquisición de datos NI USB6211

Característica	Descripción
Entrada analógica	8 canales diferenciales y 16 single ended
Resolución ADC	16 bits
Frecuencia de muestreo	250 $\frac{kS}{s}$ máximo
Resolución de tiempo	$50nS$
Acople de entrada	DC
Rango de entrada	±0.2 V, ±1 V, ±5 V, ±10 V

Tabla 6. Características DAQ USB 6211. (National Instruments m. 2016)

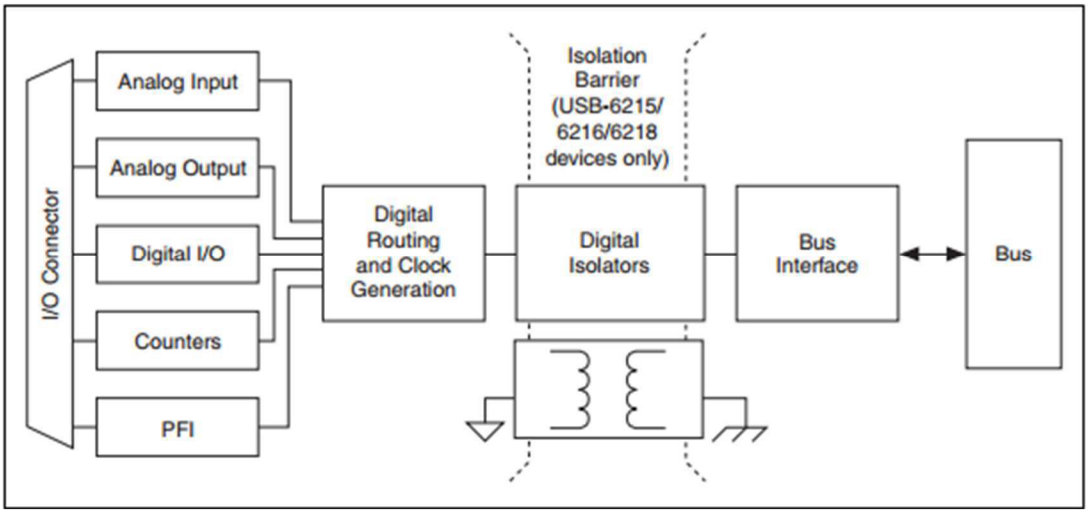


Figura 11. Descripción en diagrama de bloques de la tarjeta de adquisición de datos USB 6211. (National Instruments m. , 2016)

Tomando como referencia (National Instruments m. , 2016), se sabe que DAQ-STC2 implementa una máquina digital de alto rendimiento. Algunas de sus características claves son:

- Muestreo y conversores flexibles para sus entradas y salidas analógicas .
- Variedad de modos de disparo.
- Generación y envío de señales de temporización interna y externa
- Dos módulos de contador/temporizador de 32 bits flexibles con compuerta de hardware.

La disposición de los equipos con sus respectivas referencias puede identificarse en la siguiente imagen.

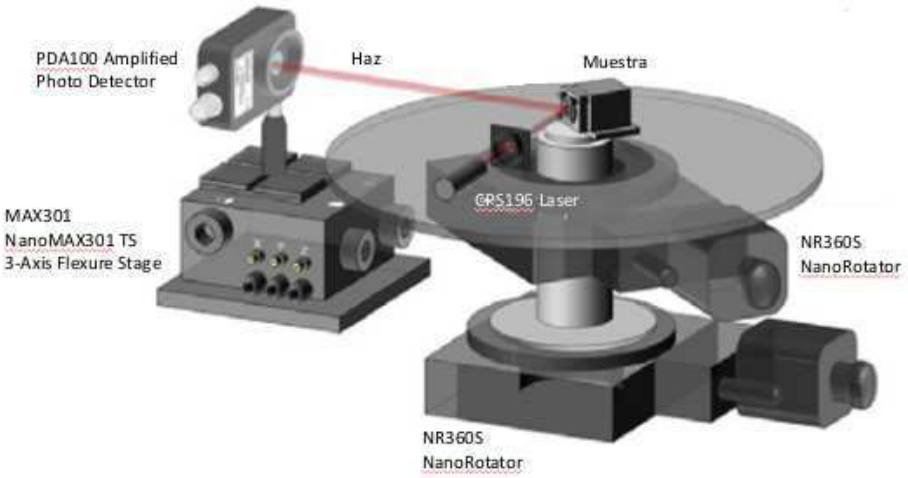


Figura 12. Nanorotador NR360S

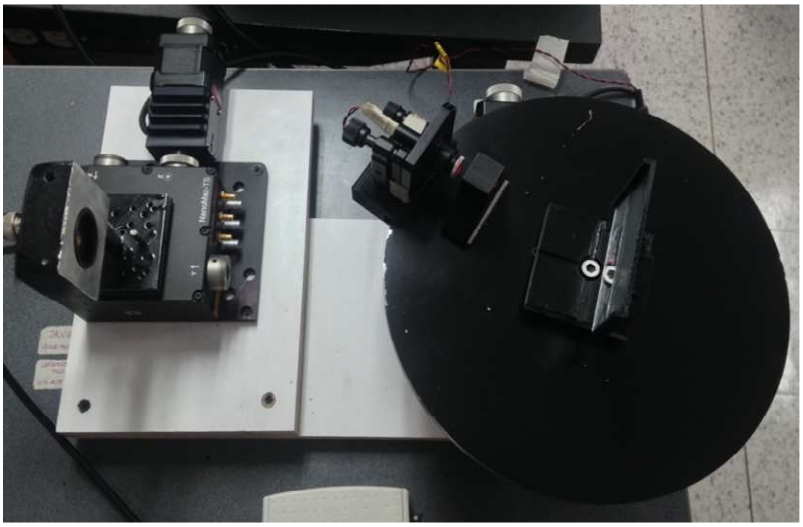


Figura 13. Estación real GPD&NF_PUJ vista superior.

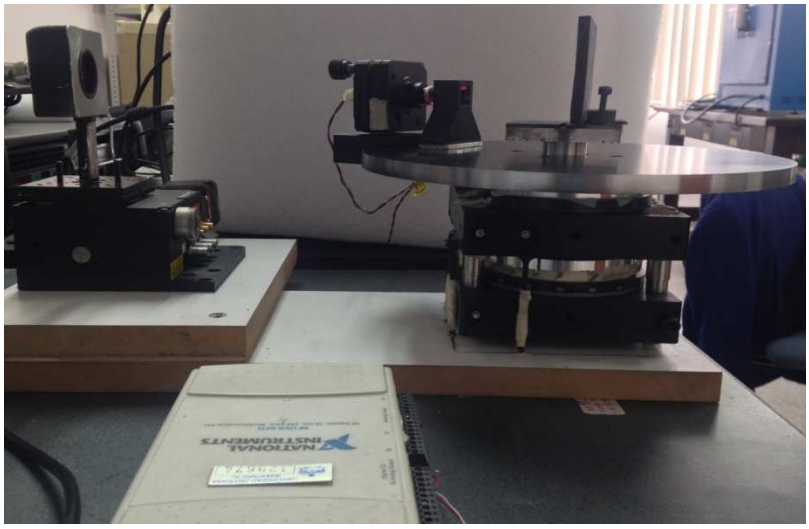


Figura 14. Estación real GPD&NF_PUJvista lateral

Capítulo 2

Sistema de Supervisión

La implementación del sistema de supervisión del presente capítulo y de control descrito en el capítulo 3, son etapas posteriores al desarrollo del sistema de conexión y comunicación hardware-software (LabVIEW) en el que se utilizan terminologías propias de la tecnología ActiveX y LabVIEW como uso de ocurrencias, contenedores y eventos; toda la configuración y definiciones se encuentran en el Apéndice B.

El interés principal es la supervisión en tiempo real de la señal de tensión relativa que es entregada por el detector y captada por la tarjeta de adquisición de datos USB6211, para ello se implementa un módulo de recepción que inicialmente no tiene un filtrado mayor al que por defecto implementa la tarjeta.

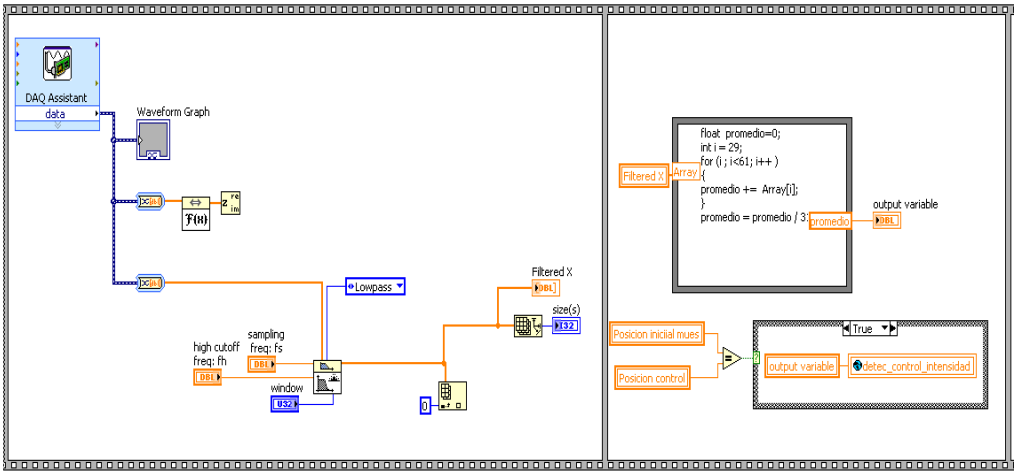


Figura 15. Módulo de recepción y adquisición de tensión relativa con tarjeta USB6211

Se diseña un panel de visualización que en la parte superior permite monitorear de manera continua la posición angular de la muestra y el láser y la posición vertical del detector como se muestra a continuación:

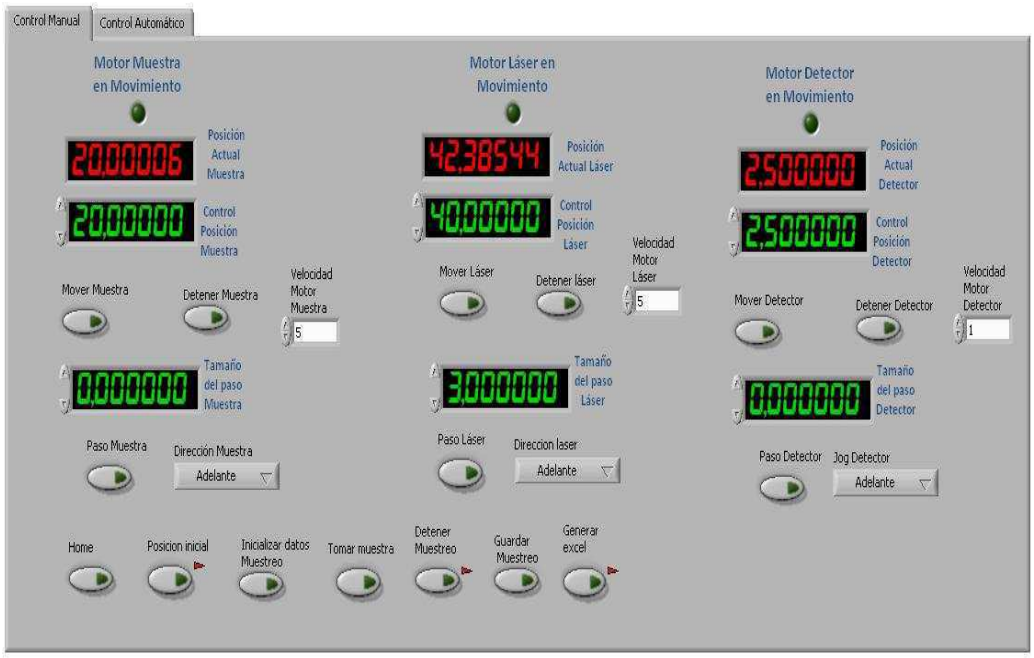


Figura 16. Panel de Supervisión posición actual laser, muestra y detector; con opción de almacenamiento en Excel.

Para el respaldo de la información se define una estructura básica de la información que consolida la posición en ángulo de la muestra, posición en ángulo de mayor intensidad para el láser y el valor de intensidad en términos de voltaje relativo para cada uno de los recorridos que el usuario programe o efectúe de manera manual.

Así mismo se presentan dos opciones de almacenamiento y supervisión que son:

2.1 Almacenamiento de respaldo en base de datos Access

Con la implementación de funciones adicionales que permiten modificar el número de pasos y con la acción del sistema de control fue conveniente la implementación de un sistema de respaldo y almacenamiento en base de datos que en el caso de una eventual falla eléctrica tenga el respaldo de la información, que en este caso de conformidad a la versión del software y teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento realmente es liviana se utilizó como motor de base de datos Access.

La conexión de Access con LabVIEW se realizó a través de un usuario DNS con el estándar ODBC, para esto se configuró en el panel de control del sistema el driver de tipo Microsoft Access con la extensión .mdb de la base de datos creada previamente en el entorno de Microsoft Access.

Adicionalmente se crea un SubVi guardar en base de datos, que contiene la sentencia SQL y la conexión adicional para el almacenamiento de la información que es leída y tomada como consolidado de cada punto de manera automática.

2.2 Escritura en archivo Excel .xlsx

Una vez se termine el barrido en cada punto, el usuario tiene la opción de seleccionar en la parte inferior del panel botón guardar muestra y luego de consecutivas mediciones la opción generar Excel para rutinas de movimiento manuales, en un caso automático la información será almacenada sin intervención alguna.

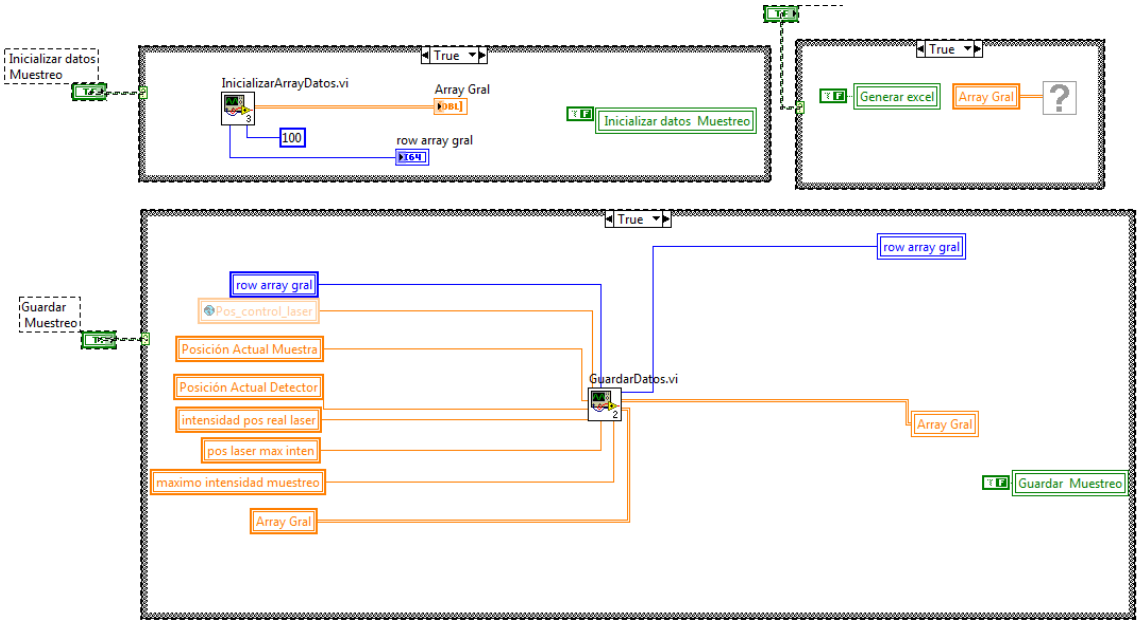


Figura 17. Diagrama de bloques VI escritura archivo excel.

Capítulo 3

Sistema de Control y automatización

El sistema de control y automatización comprende la interpretación de la rutina básica de medida, el ajuste de cada una de las características de los nanorotadores y el nanoposicionador como velocidad, dirección de movimiento, tamaño de paso fino y rutinas de arranque y parada; así como la determinación del criterio de para optimizar el barrido alrededor de un punto detectar la máxima tensión relativa para un punto dado, teniendo en cuenta las distribución del spot del láser.

3.1 Proceso de medida.

En la fase inicial de proyecto se procede a estudiar el proceso de medida y los criterios utilizados para la caracterización de las películas; de este estudio se obtiene la siguiente descripción verbal del proceso efectuado.

1. El usuario ubica la película en el posa muestras
2. Se hace incidir directamente el láser sobre la muestra y mediante el uso de patrones de medida se busca que al incidir este sobre la muestra, el haz reflejado retorne hacia el láser.
3. Se alinea el láser con la ventana de detector buscando que todos estén a la misma altura.
4. Se realiza un barrido ubicando la muestra en una posición deseada, el láser en un ángulo que sea el doble respecto la muestra y se verifica que el haz reflejado caiga dentro de la ventana del detector.
5. Garantizado el haz en el detector mediante un osciloscopio se toma el valor estimado de la señal
6. Se realizan los pasos 4 y 5 cuantas veces sean requeridas por el usuario y en los ángulos que este considere pertinente.

A partir de esta descripción, se plantea la realización de dos rutinas de medida, una manual y otra automática cuyo criterio de elección es libre para el usuario.

Modos de operación

Como se mencionó se contemplan dos modos de operación, para los que se muestran las características disponibles para ser manipuladas o controladas por el usuario, como lo son la cantidad y el tamaño de pasos, la velocidad de giro de los motores y la dirección de dichos movimientos.

En la siguiente sección se hace una descripción de estos parámetros para cada uno de los modos.

3.2 Modo manual

En el modo manual el usuario de manera autónoma puede establecer las posiciones donde desea ubicar el láser y la muestra siempre y cuando respete el criterio del doble del ángulo del láser respecto a la muestra y el ángulo mínimo y máximo para obtener el efecto de reflexión.

Una vez determine las posiciones deseadas emplea una tarjeta de adquisición de datos para tomar el valor del haz reflejado.

Adicionalmente cuenta con la opción de realizar el posicionamiento inicial, que hace referencia a los pasos 2 y 3 del método actual descrito con anterioridad y la posibilidad de manipular las propiedades disponibles en el programa APTUser propio de los equipos Thorlabs pero desde el entorno proporcionado por LabVIEW.

3.3 Posicionamiento a referencia Home

Teniendo en cuenta las condiciones de la estación, antes de iniciar el posicionamiento es conveniente modificar algunos parámetros de los equipos con el propósito de cuidar el rango de movimiento en lo que se refiere al detector (4 mm) y alcanzar la mínima desviación o error en la referencia a cero tanto para el láser como para la muestra; por lo tanto se utilizan los métodos que dan acceso a estos parámetros, SetHomeParams y StageAxisInfo (Explicados en el Apéndice A).

3.4 Rutina Home

La rutina se crea en un Sub VI designado con el nombre MoveHome que es llamado una vez que los dispositivos han sido reconocidos e inicializados, su entrada es el clúster con el nombre del objeto y su salida se dirige hacia un anulador de registros para evitar la generación continua de registros y el consumo de memoria.

Debe tenerse en cuenta que el anulador debe ubicarse en una sección diferente a la de llamado del Sub VI para evitar anular el registro sin darle el tiempo necesario para completar el evento a los dispositivos.

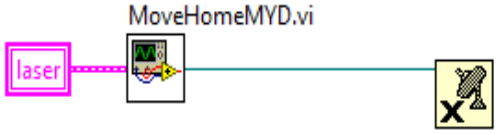


Figura 18. Configuración del Sub VI de rutina posicionamiento Home.

En el Sub VI se crea una ocurrencia que detiene la ejecución de la aplicación mientras no se complete el posicionamiento, para ello se designa un evento con el nombre de Home Complete.

Se utiliza un RegisterEventCallback en el que el tipo de evento a generar o el evento fuente es el método MoveHome y el registro del evento se envía a través del VI de referencia Home Complete.

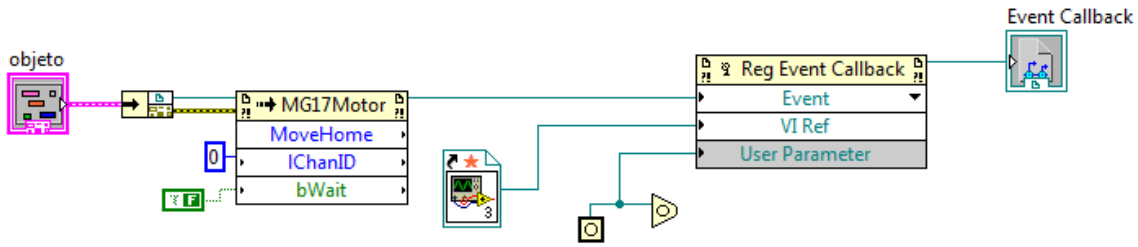


Figura 19. Vista en diagrama de bloques Sub VI MoveHome

3.5 Rutinas de movimiento

Dado los 360° de movimiento para los nanorotadores del láser y la muestra, es posible seleccionar una posición inicial y final para el movimiento que en gran medida depende de los ángulos mínimo y máximo de reflexión, por lo tanto el usuario está en la completa libertad de ubicar los equipos dentro del rango mencionado y realizar movimiento de manera ascendente cuando se establece una posición inicial menor que la final y descendentes en el caso contrario.

Movimiento Ascendente y Descendente Nanoposicionadores

Para la rutina de movimiento ascendente y descendente de los nanos rotadores se cargan los valores de posición actual como posición inicial y posición final, se efectúa una comparación entre estas para determinar si el movimiento se realizó hasta la posición deseada y por lo tanto debe ordenarse el estado de parada. La lógica implementada para los movimientos se describe a partir de los diagramas de flujos para cada secuencia.

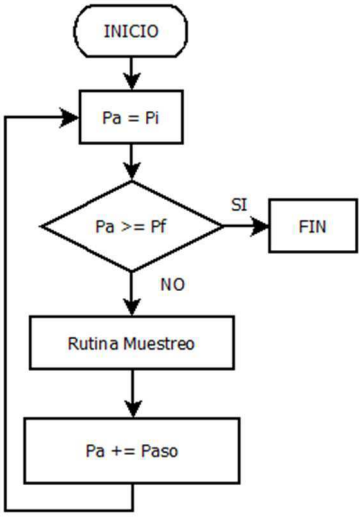


Figura 20. Diagrama de flujo secuencia movimiento ascendente

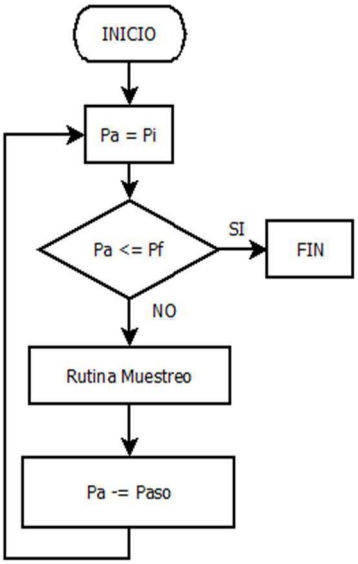


Figura 21. Diagrama de flujo secuencia movimiento descendente

Los métodos de movimiento y parada se crean en Sub VI independientes bajo el nombre de MoveAbsoluteEx y StopImmediate correspondientemente, los parámetros de entrada al Sub VI y a los métodos se muestran a continuación.

Dado que el tanto los nanorotadores como el nanoposicionador son motores de paso es necesario identificar algunas características que nos permitan tener una noción más clara cuando quiera ejercer algún tipo de control sobre estos.

Motores paso

Un motor paso gira un determinado ángulo de forma incremental al aplicarle una tensión, transformando los impulsos eléctricos en movimientos de giro controlados, lo que le permite realizar desplazamientos angulares fijos muy precisos. Este tipo de motores son ideales cuando lo que se busca es un posicionamiento con un elevado grado de exactitud y/o muy buena regulación de velocidad.

Constitución

Un motor de paso está constituido principalmente por dos partes, un estator que es la parte fija construida a base de cavidades en las que van depositadas las bobinas y un rotor que es la parte móvil construida mediante un imán permanente. Este conjunto va montado sobre un eje soportado por dos cojinetes que le permitan girar libremente.

La precisión y repetitividad que presentan esta clase de motores lo habilitan para trabajar en sistemas abiertos sin realimentación.

Principio de funcionamiento

Los motores en general basan su funcionamiento en las fuerzas ejercidas por un campo electromagnético y creadas al hacer circular una corriente eléctrica a través de una o varias bobinas. Si dicha bobina, generalmente circular denominada estator, se mantiene en una posición mecánica fija y en su interior, bajo la influencia del campo electromagnético, se coloca otra bobina, llamada rotor, recorrida por una corriente y capaz de girar sobre su eje.
Al excitar el estator, se crearan polos, provocando la variación del campo magnético formado.

La respuesta del rotor será seguir el movimiento de dicho campo tendiendo a buscar la posición de equilibrio magnético.

Cuando el rotor alcanza esta posición de equilibrio, el estator cambia la orientación la orientación de sus polos y se tratará de buscar la nueva posición de equilibrio. Manteniendo dicha situación de manera continua, se conseguirá un movimiento giratorio y continuo del rotor, produciéndose de este modo el giro del eje del motor, y a la vez la transformación de una energía eléctrica en otra mecánica.
Al número de grados que gira el rotor cuando efectúa un cambio de polaridad en las bobinas del estator se le denomina ángulo de paso.

Existe la posibilidad de conseguir una rotación de medio paso con el control eléctrico apropiado, aunque el giro se hará con menor precisión. Los motores son fabricados para trabajar en un rango de frecuencias determinado por el fabricante, y rebasado dicho rango, provocaremos la perdida de sincronización.

Los motores paso a paso, se controlan por el cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas que lo forman:

- Controlar el desplazamiento del rotor en función de las tensiones que se aplican a las bobinas, con lo que podemos conseguir desplazamientos adelante y atrás.
- Controlar el número de pasos por vuelta.
- Controlar la velocidad del motor

Además estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición (si una o más de sus bobinas está energizada) o bien totalmente libres (si no circula corriente por ninguna de sus bobinas).

Lo más importante de un motor es saber el tipo de motor que es, la potencia, el número de pasos, el par de fuerza, la tensión de alimentación y poco más si son motores sencillos.

Con la descripción técnica, se procede a implementar un control en tamaño y cantidad de pasos.

Control tamaño y cantidad de pasos

Conforme a las necesidades del Grupo de Películas Delgadas y Nanofotónica de la Pontificia Universidad Javeriana, el primer requerimiento es determinar el tamaño y la cantidad de pasos que los nanorotadores puede efectuar teniendo en cuenta sus características; esto con la intención de lograr la máxima resolución posible por lo que se plantea la realización de pasos de hasta 50 nm o 0.001°.

Bajo este criterio, el usuario cuenta en el panel frontal con un control numérico para cada uno de los elementos es decir, laser, muestra y detector que le permite escoger el tamaño del paso desde un valor de 0.0001° y un menú desplegable que le permite seleccionar la dirección del movimiento ya sea hacia adelante o hacia atrás. Una vez configurados estos parámetros debe pulsar el botón de paso muestra, paso detector o paso láser para generar el movimiento.

Para la obtención de estos pasos cortos se crean dos Sub VI's independientes que contienen los métodos MoveJog y StepJog, los parámetros de entrada al Sub VI y a los métodos se muestran a continuación.

Movimiento nanorotadores en pasos finos

La secuencia implementada para cada uno de los motores se muestra en laFigura 22.

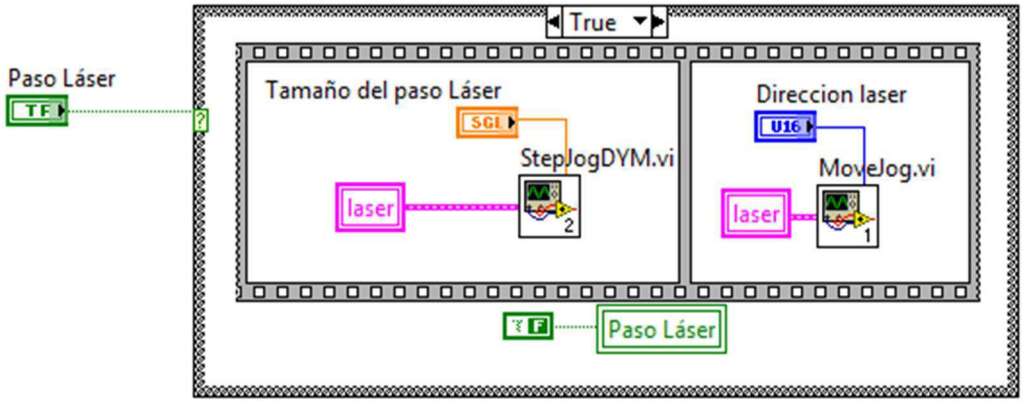


Figura 22. Sub Vis para movimiento de pasos finos.

Movimiento detector en pasos finos

Cabe aclarar que para el caso del detector debe cuidarse los límites de movimiento, evitando que este sobrepase los 4 mm por lo tanto la implementación de la secuencia para el control de pasos en este caso es antecedida por una comparación que garantiza que ese valor se encuentra dentro del rango posible, de lo contrario el movimiento no se ejecuta como se observa a continuación.

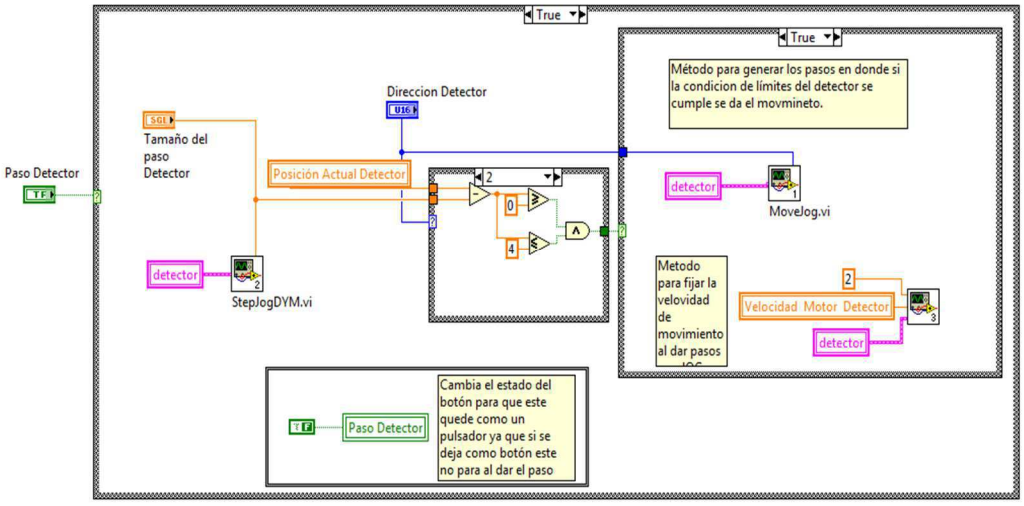


Figura 23. Movimiento Detector en pasos finos.

Control velocidad de motores

Por defecto la velocidad de los motores láser y muestra es de 5 pero esta puede ser ajustada hasta 10, el usuario cuenta con un control numérico en cada motor que modifica dicha propiedad. Para esto se crea un Sub VI con el nombre SetVel que contiene el método SetVelParams. Apéndice A.



Figura 24. Diagrama de bloques para determinar la velocidad de los nanorotadores.

Para el detector la velocidad, determinada con el sub Vi SetVel (Apéndice A) por defecto es 1 y su velocidad máxima es 2.

3.6 Modo automático

El modo automático da mayor libertad de estudio ya que permite al usuario implementar un barrido sobre la muestra y al final ver los resultados sin necesidad de realizar el proceso paso a paso.

De acuerdo a esto, el usuario determina la posición de inicio, la posición final y el tamaño de pasos a realizar entre esas dos posiciones. De manera adicional está en la libertad de seleccionar el número de muestras por paso teniendo en cuenta los rango propuestos.

Las posiciones de inicio y final para este modo se entienden como los ángulos de inicio y fin para la muestra ya que guardando el criterio del doble del ángulo, el movimiento del láser es inmediatamente definido. Respecto al tamaño del paso, esta magnitud puede ser incremental o en decremento dependiendo de la relación que exista entre el ángulo de inicio y fin.

El número de muestras será la cantidad de valores de haz reflejado que se desea obtener para cada ángulo.

Rutina Barrido automático

La rutina de barrido automático recibe los parámetros de posición inicial, final y tamaño de paso y dado que estos son de libre elección para el usuario, debe verificarse la posición actual de cada motor antes de que un barrido automático sea inicializado, por consiguiente se diseña un esquema de comparación que le permite al motor ubicarse en la posición inicial cuando ésta no coincida con la que actualmente muestra.

Posición inicial contra posición final	Valor de salida
Posición inicial > Posición Final	1
Posición inicial < Posición Final	0
Posición inicial = Posición Final	3

Tabla 7. Valores de salida respecto a posicionamiento de motores.

Cuando el usuario pulsa el botón iniciar barrido automático se ejecuta la siguiente secuencia:

1. Ubica motor muestra en posición inicial y motor láser es ubicado en el doble de esta posición.

2. Actualiza posiciones en los dos motores y pregunta por la condición evaluada en la tabla anterior.

3. Dependiendo del valor obtenido en el numeral 2, se ordena el movimiento ascendente o descendente.

La secuencia termina una vez se llegue a la posición final es decir, posición final = posición actual muestra o cuando el botón de detener automático sea accionado por el usuario, por lo tanto es necesario evaluar constantemente estas condiciones, para construir el criterio de parada según la siguiente tabla de verdad.

Posición final =! Posición actual muestra	Estado botón detener	Salida (Orden de movimiento)
V	V	F
V	F	V
F	V	F
F	F	F

Tabla 8. Criterio de parada rutina automática.

Es decir que el movimiento debe continuar en el único caso en que no se haya alcanzado la posición final y el botón detener automático siga sin ser activado por el usuario.

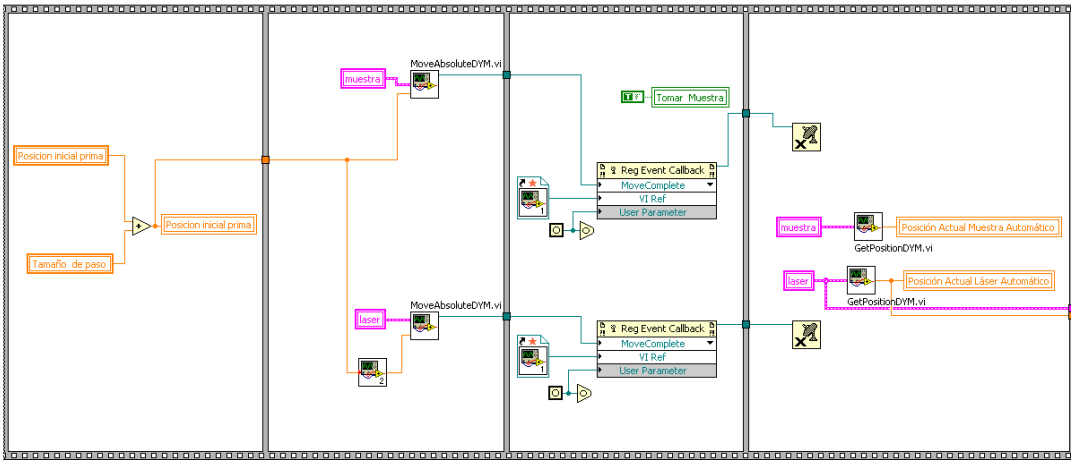


Figura 25. Sección encargada del barrido automático (a)

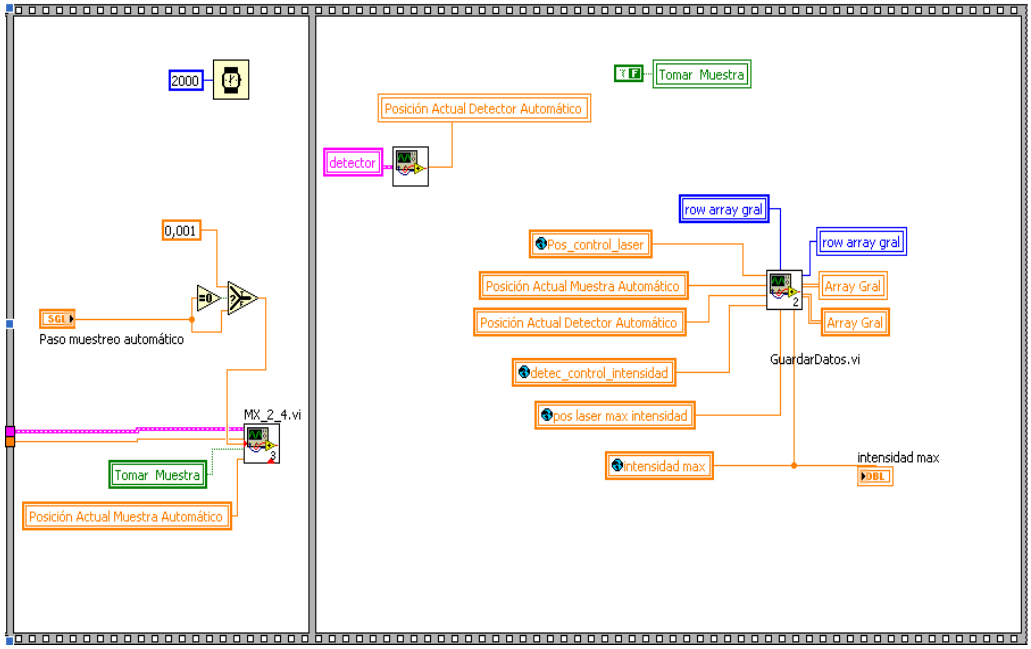


Figura 26. Sección encargada del barrido automático (b)

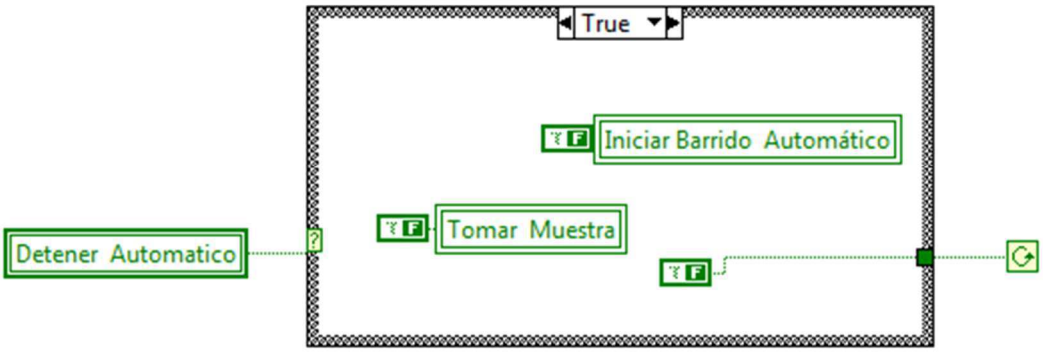


Figura 27. Control en la rutina de barrido automático para detener el VI principal

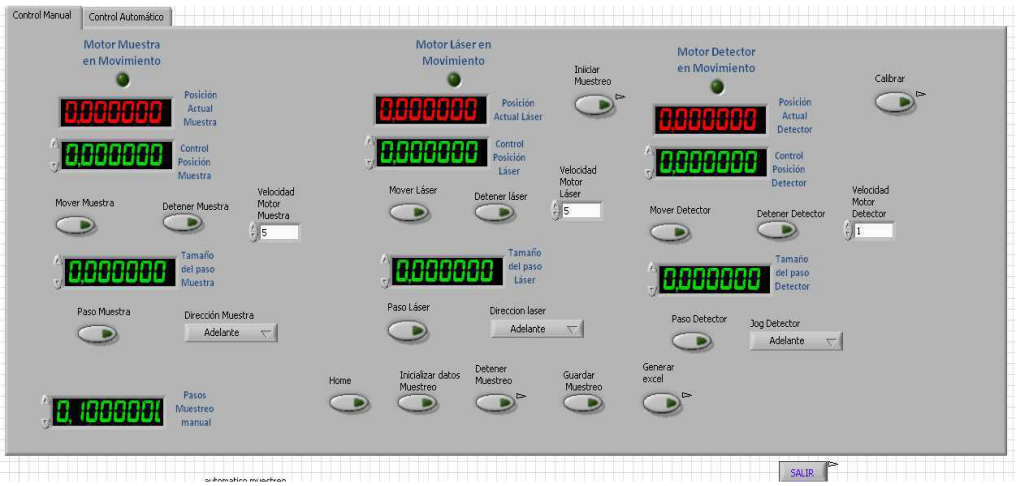


Figura 28. Panel frontal modo manual.

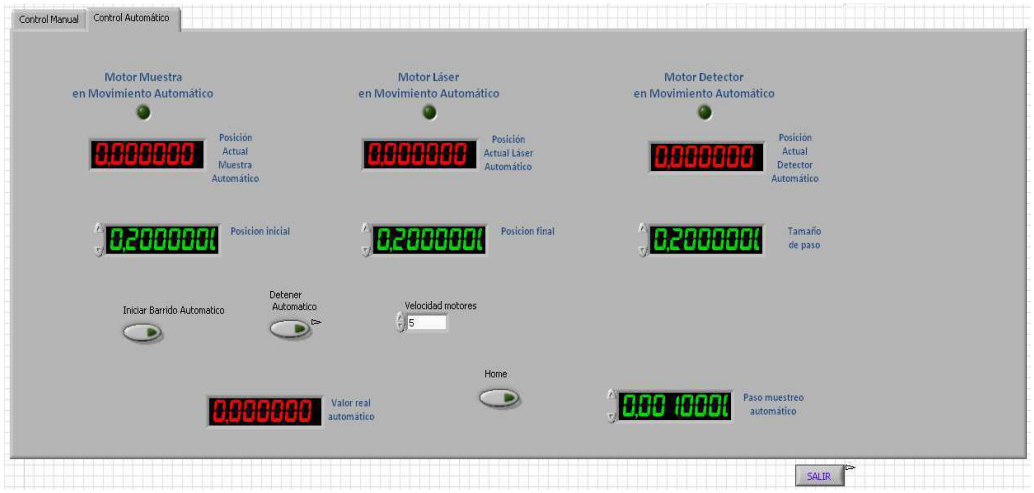


Figura 29. Panel frontal modo automático.

3.7 Rutina de barrido para muestreo

El método de barrido para el muestreo es implementado una vez que se alcanza la posición deseada por el usuario, consta de la realización de un barrido ascendente y descendente alrededor de cada punto de acuerdo al spot del láser y a la ventana de captura del detector.

Con el barrido se aprovecha la máxima resolución de los equipos y se determinan los verdaderos valores de posiciones para los nanorotadores, es usual que se presenten valores

de offset, es decir que no sea exacta la relación angular del doble donde se pueda tomar el valor de la señal.

La siguiente tabla hace referencia a las diferentes medidas que se realizan alrededor de un punto, desplazando únicamente el motor del láser y la variación de la señal detectada con el propósito de seleccionar y justificar la ventana óptima para la realización del barrido.

Posicion Laser (°)	Intensidad (V)
24,2	4,5
24,3	4,26
24,4	2,09
24,5	0,1
24,39996	3,57
24,39889	3,58
24,39783	3,64
24,39676	3,64
24,3957	3,67
24,39463	3,75
24,39357	3,81
24,3925	3,87
24,39144	3,92
24,39037	3,94
24,38931	3,97
24,3882	3,98
24,38717	3,98
24,38611	4,02
24,38504	4,02
24,38398	4,01
24,38291	4,02
24,38185	4,02
24,38078	4,04

Tabla 7. Intensidad alrededor del ángulo 24° para el láser

En la anterior tabla se observa que los niveles de intensidad detectada por la tarjeta de adquisición son significativos en una ventana de +- 0.2” por encima y debajo del punto de posicionamiento.

La implementación de la rutina de muestreo se realiza a través de un Sub VI denominado muestreo MX para el cual los parámetros de entrada corresponden a un valor de posición actual del láser y el tamaño o la cantidad de pasos establecidos por el usuario. Con estos datos y la ventana de captura definida en la tabla anterior se implementa la secuencia del diagrama de flujo.

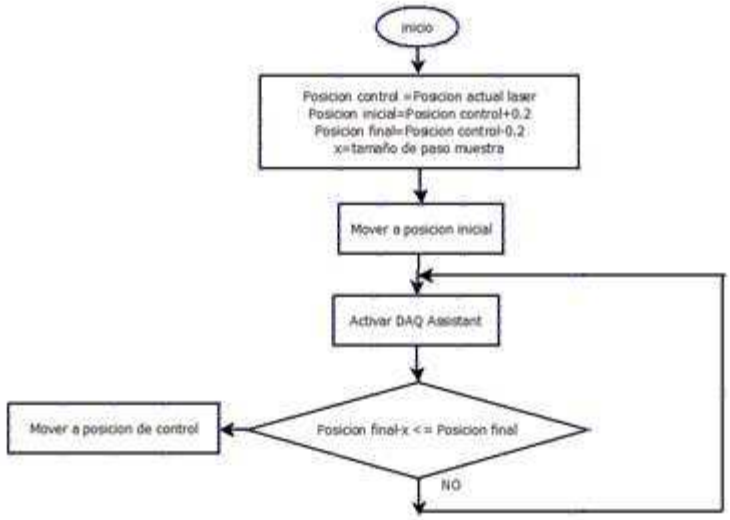


Figura 30. Descripción lógica general de rutina para muestreo

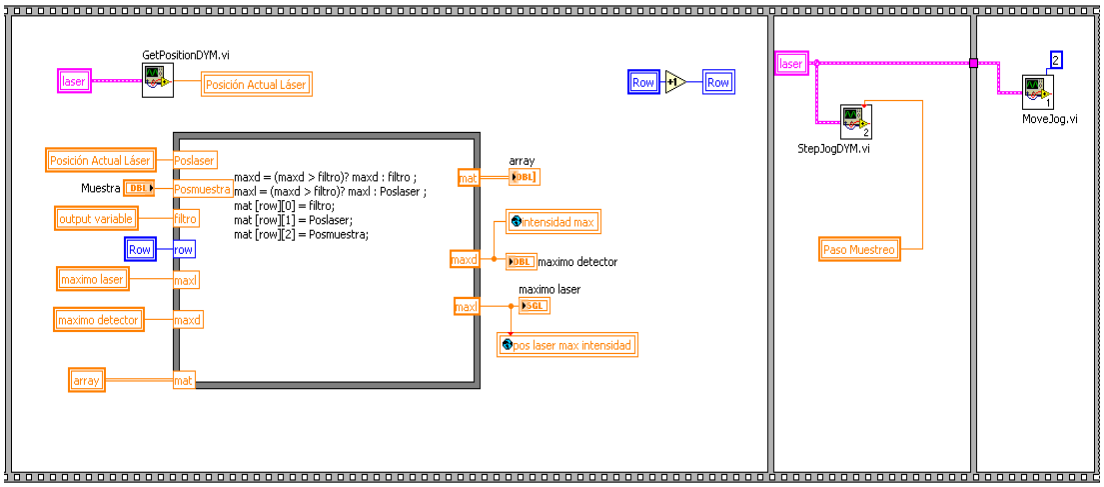


Figura 31. Diagrama de bloques rutina de muestreo

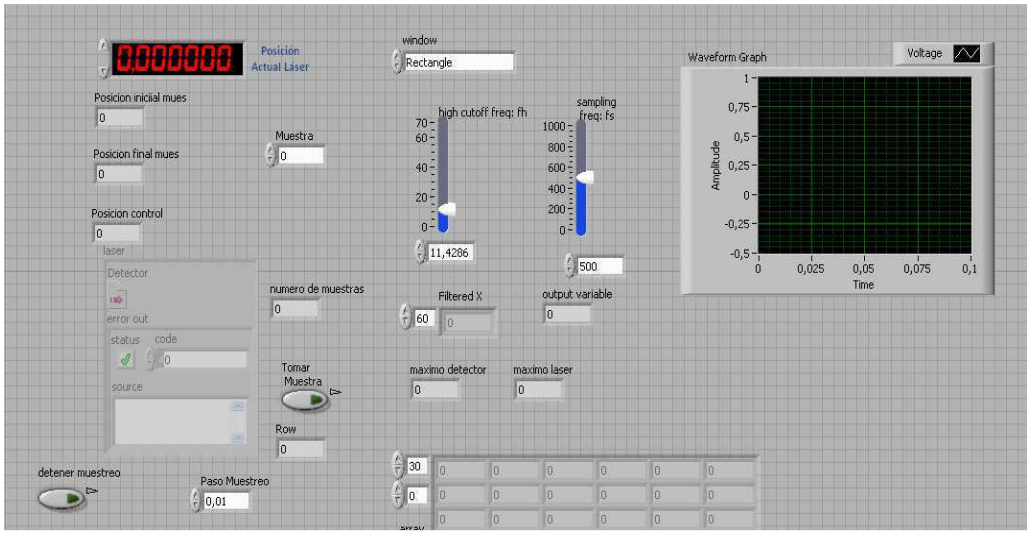


Figura 32. Panel de control rutina de muestreo

Con la implementación de la rutina de muestreo en la que se estableció una ventana fija de observación, se identificó que a pesar de alcanzar valores de intensidad representativos en cada punto, la ventana visual es insuficiente para ángulos de láser superiores a 30°, esto debido a un error proporcional propio de la estación, si deseaba realizarse un barrido no podía restringirse al sistema a un comportamiento estático que junto al error proporcional del instrumento iba a generar la selección errónea de máximos locales y no globales.

Para entender el comportamiento se tomaron barridos de muestreo en diferentes tramos y alrededor de diferentes puntos con el detector ubicado a 3 mm, describiendo el siguiente comportamiento:

Para un punto con ángulo de muestra 15°- ángulo láser 30°, la distribución de intensidad vs ángulo de láser con tres barridos distintos es:

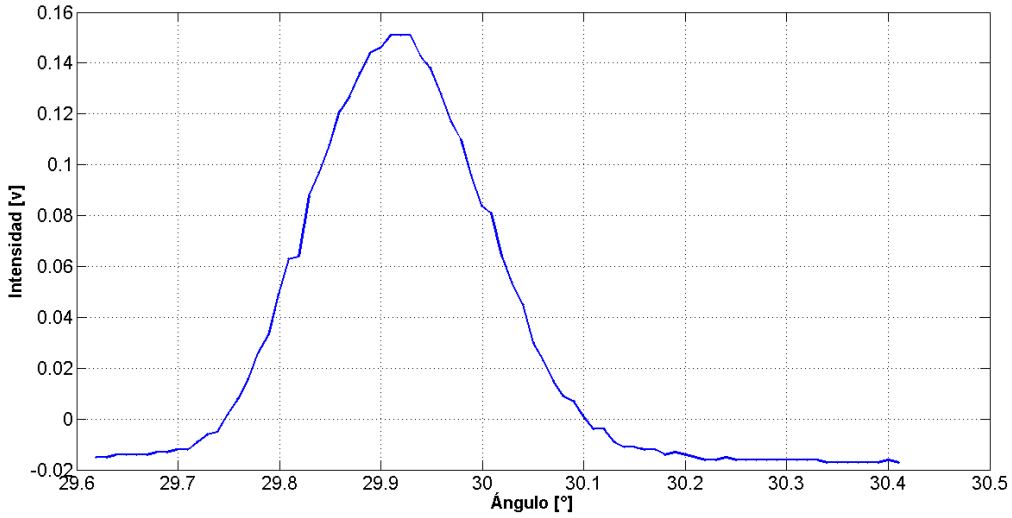


Figura 33.Intensidad Vs ángulo del láser, para un barrido alrededor de 30º, primera medición.

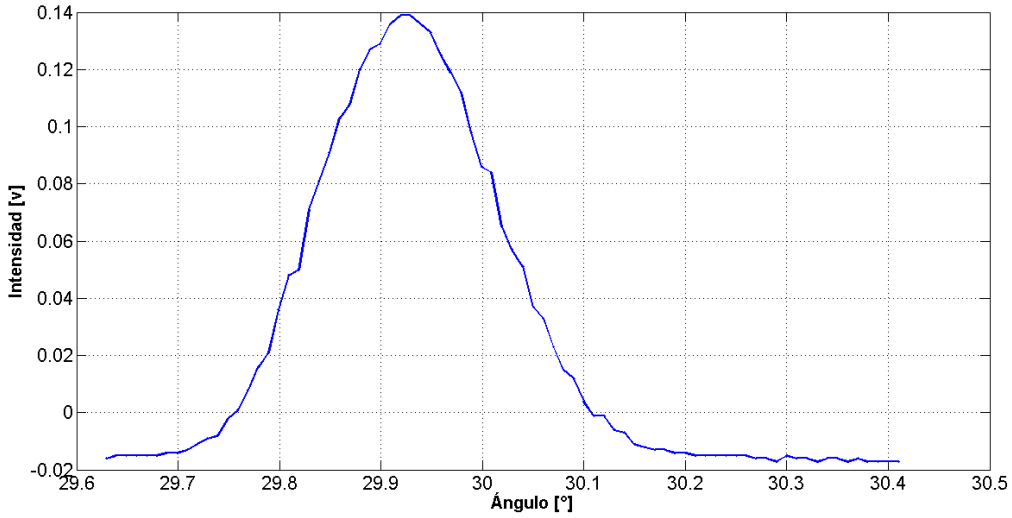


Figura 34. Intensidad Vs ángulo del láser, para un barrido alrededor de 30º, segunda medición.

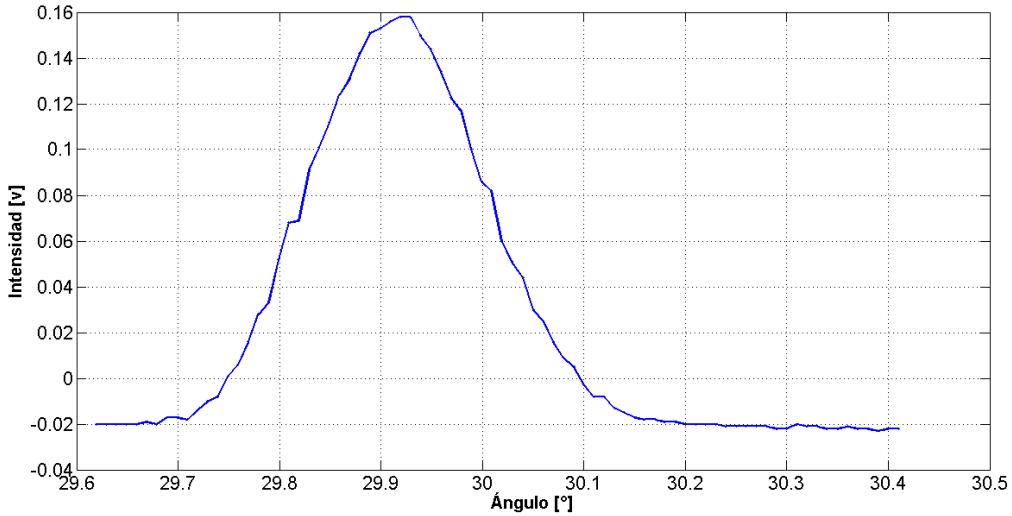


Figura 35. Intensidad Vs ángulo del láser, para un barrido alrededor de 30º, tercera medición.

En los tres casos se mantuvo el mismo comportamiento y el valor de intensidad máximo fue de 1.5 V con el ángulo láser de 29.929°. Adicionalmente el ancho de la ventana muestreada no interfirió en el comportamiento de la señal.

Las gráficas anteriores, de barrido alrededor de 30º muestran un comportamiento en forma de campana, en él puede identificarse un punto máximo o máximo global para una señal limpia que ya ha sido filtrada.

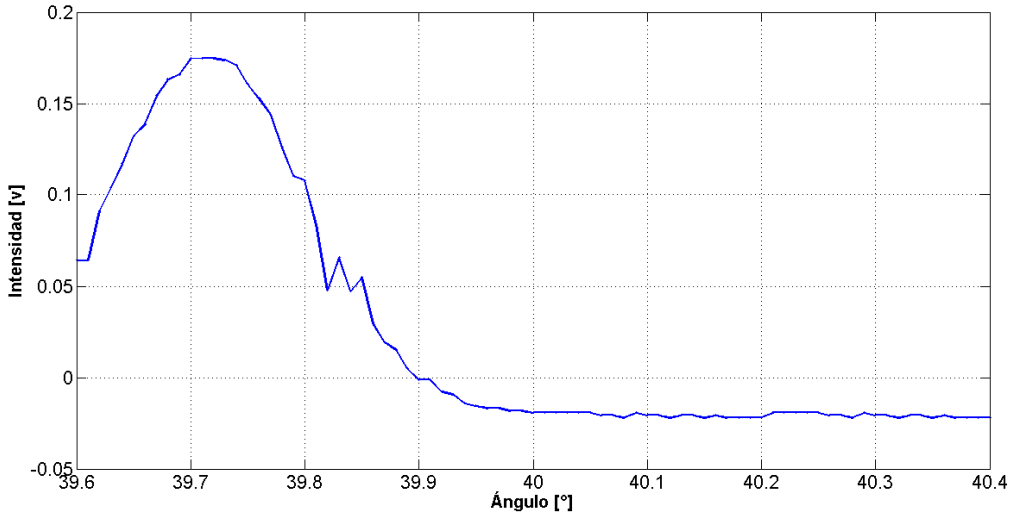


Figura 36. Intensidad Vs ángulo del láser, para un barrido alrededor de 40º

Para puntos superiores la distribución en forma de campana se mantiene, aunque tras distintos barridos se evidenció que el máximo valor se alcanza sobre el borde de la ventana visual, como se observa en la Figura 36Figura 36. Intensidad Vs ángulo del láser, para un barrido alrededor de 40º, corroborando que para posiciones superiores a 30º el haz reflejado no estaba centrado en la ventana del detector.

Siguiendo esta distribución y este comportamiento se modifica la rutina de muestreo partiendo de un criterio de optimización e implementando el método numérico de descenso por gradiente.

3.8 Método del Gradiente o descenso

En la optimización es frecuente el uso de métodos numéricos que permitan describir el comportamiento de las funciones, determinar valores máximos y mínimos que identifiquen la mejor solución para un problema con base a distintas variables ajustables.

Los métodos numéricos pueden agruparse en tres grupos: primer orden, segundo orden y Cuasi-Newtonianos. Para este caso particular nos referimos al método del gradiente que hace parte de los métodos de primer orden.

Para una función $f(x)$, se entiende por óptimo el punto donde la curva es plana, es decir el valor de x donde la primera derivada de la función $f_0\,(x)$ es cero; para determinar si el óptimo es máximo o mínimo se evalúa la segunda derivada, si $f"(x) < 0$ el punto es un máximo, de lo contrario es un mínimo.

Suponiendo entonces que la función $f(x)$ es diferenciable se pueden tener en cuenta las siguientes definiciones y sustento matemático que describe el método de descenso y ascenso por gradiente. (Gonzalo &Hernández Oliva, 2006)

Definición 1: Sea $f: R^n \rightarrow R$ diferenciable. La derivada direccional de la función f en la dirección $d \in R^n$ está dada por:

$$Df(x;\, d) = \nabla f(x)^t d \qquad (49)$$

Para obtener la dirección de *máximo descenso* de la función f en un punto $x \in R^n$ tal que $\nabla f(x) = 0$, se debe resolver el problema:

$$min_{d \in R^n}\, \nabla f(x)^t d \qquad (50)$$

Donde

$$\| d \|^2 = 1 \tag{51}$$

La solución de este problema es

$$d = -\frac{\nabla f(x)}{\| \nabla f(x) \|} \tag{52}$$

Y por lo tanto la dirección de máximo descenso de la función f es

$$d = -\nabla f(x) \tag{53}$$

Definición 2: El vector $d \in R^n$ es una dirección de descenso de f, función diferenciable, en el punto $x \in R^n$ si:

$$\nabla f(x)^t \cdot d < 0 \iff -(\nabla f(x))^t \cdot d > 0 \tag{54}$$

A través del método del gradiente, se busca definir una sucesión de puntos que tenga la dirección de máximo descenso de la función f. (Gonzalo & Hérnandez Oliva, 2006)

En el caso particular, la sucesión de puntos nombrada en la **Definición 2** será utilizada para la búsqueda en dirección de máximo ascenso de la función sobre el sistema discreto teniendo como entrada la intensidad para una par de ángulos láser-muestra.

Las principales consideraciones de diseño son las siguientes:

Paso de la derivada: Se define un paso fijo de 0.1° como paso de derivada de la función de acuerdo a la resolución de los nanorotadores con la que se imita el efecto de derivación sobre la curva.

Alpha: Asume inicialmente un valor para la constante (alpha) de α= 0.8, teniendo en cuenta que debe cuidarse la estabilidad del sistema y evitar el excesivo número de iteraciones.

Así pues, la rutina de gradiente ascendente sigue la siguiente lógica para cada par de ángulos laser-muestra, (se tomará como ejemplo el punto 15°-30°):

- Ubicar los nanorotadores en las posiciones deseadas, para la muestra un ángulo de 15° y para el láser un ángulo de 30°, (el láser se ubica al doble del ángulo escogido para la muestra). Esta será denominada como la posición inicial x_0.

- Medir intensidad en el punto inicial denotada como I_0

- Para simular el efecto de la derivada se realiza un incremento sobre el ángulo del láser de 0.1 ° (tomado como paso de la derivada) y se ubica el láser en dicha posición denominada x_f.

- Medir la intensidad en el punto x_f y definirla como I_f.

- Calcular el paso de control que indicara la dirección en la que debe realizarse el siguiente movimiento conforme al valor de las intensidades en los puntos $x_0 y_0$; la magnitud determinará qué tan lejos se encuentra del punto máximo. La relación entre la diferencia de intensidades y el paso de la derivada se conoce como paso de control, es decir:

$$Pasocontrol = \frac{I_f - I_0}{Pasocderivada} \quad (55)$$

- E iterar hasta hallar un máximo local con la siguiente fórmula:

$$Xn = x_f - \frac{Pasoderivada}{2} + \alpha Pasocontrol \quad (56)$$

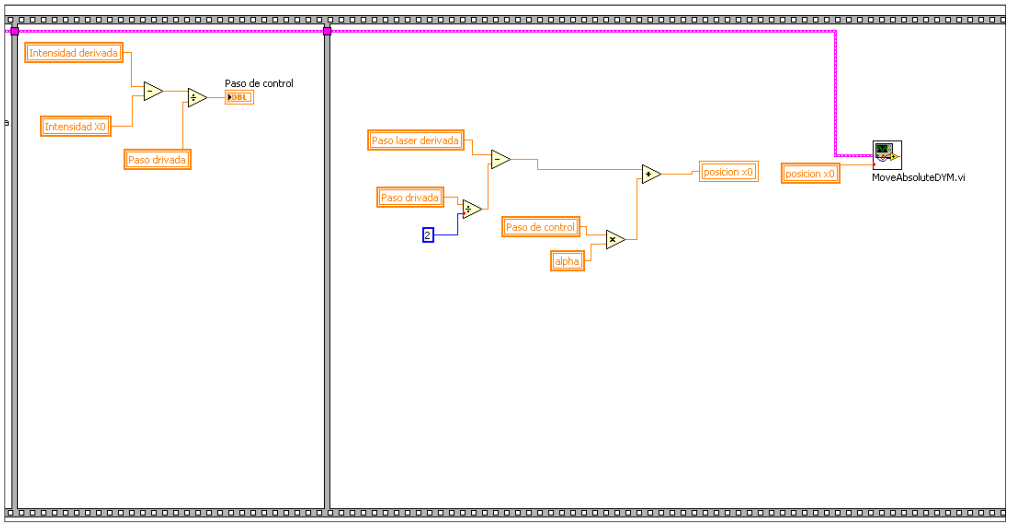


Figura 37. Diagrama de control, implementación del método ascenso por el gradiente.



Figura 38. Spot del láser en el detector.

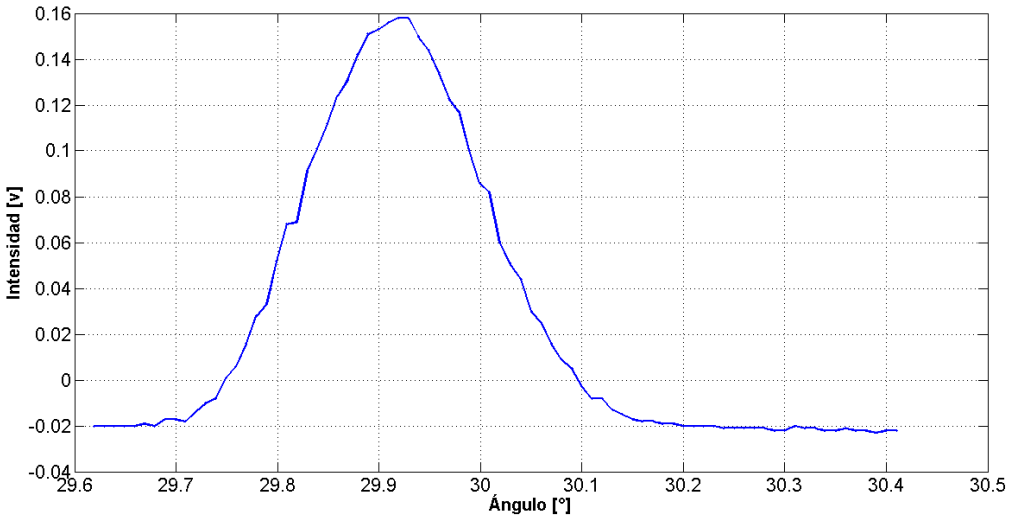


Figura 39. Distribución del haz láser.

Capítulo 4

Posicionamiento

1.1 Rutina de calibración

Para garantizar que las medidas a realizar sean oportunas y se lleven a cabo en los puntos de mayor incidencia, se hace vital la determinación de la posición óptima para que el detector reciba la mayor porción del haz reflejado y efectivamente esta no deba modificarse en todo el proceso.
Es importante tener en cuenta que la activación de esta rutina en el modo manual es de libre elección para el usuario.

Para esto se utiliza la siguiente rutina de calibración:

- Desplazar equipos al ángulo mínimo de reflexión que de acuerdo a la experiencia previa de toma de muestras con la estación sin automatizar corresponde al ángulo mínimo donde se observa incidencia del láser sobre la muestra, es decir, 15° para la muestra y por consiguiente 30° para el láser.

- De la misma manera se identificó un ángulo máximo de incidencia de 80° para el láser en el que aun el haz reflejado llega al detector.

- Ubicar el detector en 0 mm y activar la tarjeta de adquisición de datos DAQ para capturar el nivel de intensidad.

- Realizar un barrido vertical de 0-4 mm para el detector.

- Incrementar la posición de la muestra y láser con saltos de 5° hasta alcanzar 30° y 60° respectivamente. Para cada uno de las posiciones repetir el numeral 3.

- Una vez terminado el proceso se obtiene el valor de máxima intensidad en el DAQ y la posición que registró el detector en ese instante para ubicarlo en dicha posición.

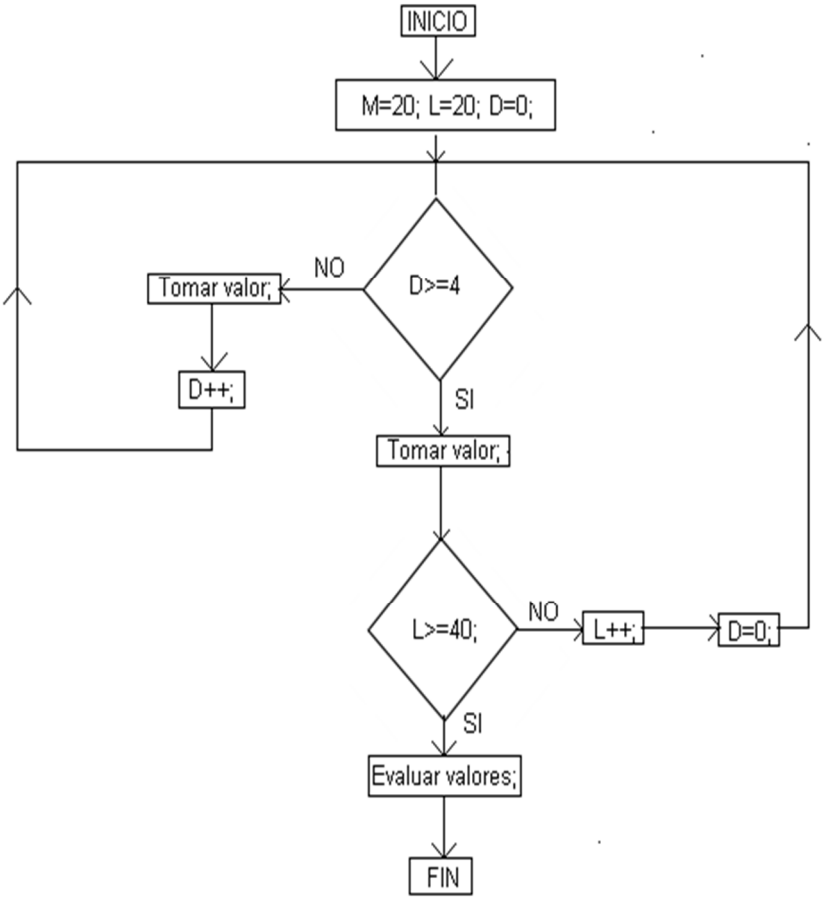


Figura 40. Diagrama de flujo para rutina de calibración

El proceso de calibración para el detector se realiza debido a que en trabajos posteriores el usuario debía ajustar manualmente con cada medida la posición vertical del detector con movimientos ascendentes y descendentes que le impedían establecer en ocasiones una única posición.

La implementación de la rutina de calibración se realiza a través de un Sub VI para el cual los parámetros de entrada corresponden al clúster del detector, muestra y laser así como el botón de activación; con estos datos se implementa la secuencia del diagrama de flujo y se obtiene como parámetro de salida al Sub VI la posición calibrada del detector

.

Capítulo 5

Muestreo y adquisición de datos

5.1 Muestreo

Bajo ciertas condiciones una señal continua en el tiempo puede especificarse completamente y recuperarse a partir del conocimiento de sus valores instantáneos o muestras tomadas a intervalos de tiempo uniformes. Mucha de la importancia de la Teoría del Muestreo radica en que ella constituye un enlace o puente entre señales continuas y señales discretas representando señales continuas mediante señales discretas. (Briceño Márquez, 2012)

La teoría del muestreo se puede resumir en algunos teoremas que introducen y desarrollan el concepto de muestreo y el proceso de reconstitución de una señal continua a partir de sus muestras. Estos conceptos son la base del procesamiento y transmisión digital de señales. (Briceño Márquez, 2012)

5.2 Teoremas del Muestreo Uniforme de Señales

No es necesario transmitir toda la información asociada a una señal ya que muchos de los sistemas de modulación utilizan el hecho de que una señal de banda limitada puede transmitirse sin distorsión si se muestrea la señal periódicamente y se transmiten esos valores o muestras. Para este trabajo de grado, por su naturaleza solo se consideran señales reales continuas, monovalentes y limitadas en frecuencia o en el tiempo. (Briceño Márquez, 2012)

Teorema No 1. Teorema del Muestreo de Shannon

"Una señal x(t) pasabajo cuya frecuencia máxima es f_m, se puede especificar unívocamente por sus valores o muestras $x(nT_s)$, con $n = 0, \pm 1, \pm 2, ...$, tomados en una serie de instantes discretos, llamados "instantes o puntos de muestra, separados cada: (Briceño Márquez, 2012)

$$T_s = \frac{1}{f_s} \text{segundos, donde } f_s \geq 2\, f_m \text{".}$$

En este contexto, f_s es la frecuencia de muestreo o "Frecuencia de Shannon" y T_s el "Intervalo de Muestreo". La frecuencia mínima de muestreo, para la cual se verifica que $f_s = 2\, f_m$, denominada "Frecuencia de Nyquist", y el intervalo T_s correspondiente, "Intervalo de Nyquist". (Briceño Márquez, 2012)

Sea entonces $x(t)$ una señal continua pasabajo de banda limitada f_m que puede contener información, cuya transformada de Fourier o espectro es $X(f)$. Una señal muestreada se puede considerar como el producto de la señal continua por un tren de impulsos unitarios, denominado "señal muestradora". (Briceño Márquez, 2012)

$$x_s(t) = x(t) \cdot \sum_{n=\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \qquad (36)$$

Este tipo de muestreo se conoce con el nombre de "Muestreo Ideal o Muestreo Instantáneo". El espectro $X_s(f)$ de $x_s(t)$ es

$$X_s(f) = f_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_s) \qquad (37)$$

Vemos que $X_s\,(f)$ representa un espectro periódico formado por el desplazamiento de $X(f)$ a las frecuencias $\pm\, nf_s$, y con un factor de escala fs, como se muestra en laFigura 41.

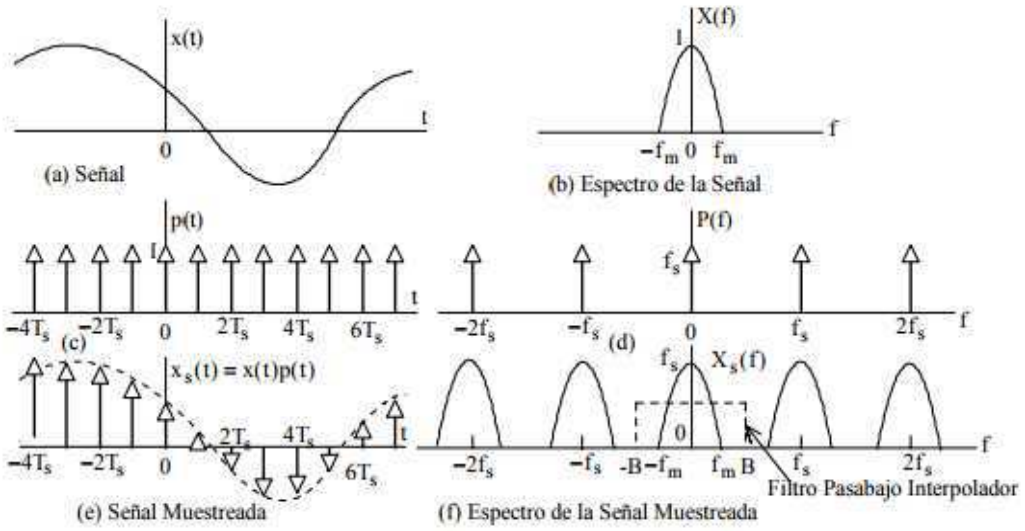


Figura 41. Muestreo instantáneo en el dominio del tiempo. (Briceño Márquez, 2012)

El espectro original de $x(t)$ aparece centrado en el origen y podrá ser recuperado con un filtro pasabajo mientras no se produzca solapamiento con los espectros adyacentes, lo cual se verifica si $f_s \geq 2f_m$.

Teorema No 2. Recuperación o Interpolación de la Señal

Este teorema trata la reconstrucción de la señal original a partir de su versión muestreada. Para la recuperación de $x(t)$, la señal muestreada $x_s(t)$ se hace pasar por un filtro ideal pasabajo de ancho de banda B y ganancia T_s. En el cual debe cumplirse que

$$f_m \leq B \leq f_s - f_m \quad (38)$$

Sea $x_r(t) = x_s(t) * h(t)$ la salida recobrada con el filtro, entonces

$$x_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s)\delta(t - nT_s) * 2BT_s sinc[2B(t - t_0)] \quad (39)$$

De donde

$$x_r(t) = 2BT_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s) sinc[2B(t - t_0 - nT_s)] \quad (40)$$

Esta expresión indica que hay que tomar cada muestra y multiplicarla por una función sinc(..) centrada en el instante de ocurrencia de la muestra y sumar los términos resultantes. Esto es exactamente lo que sucede cuando las muestras se pasan por un filtro pasabajo ideal de ancho de banda B tal que $f_m \leq B \leq f_s - f_m$.

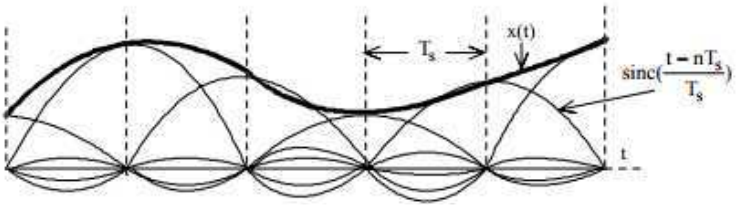


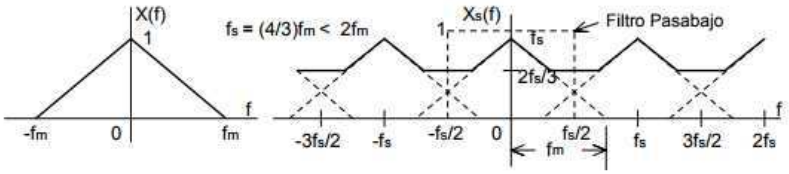
Figura 42. Reconstrucción de la señal mediante la interpolación con la señal sinc. (Briceño Márquez, 2012)

Nótese en la Figura 42 que cada muestra produce una señal sinc(..), la cual es cero en los otros puntos de muestra excepto en el propio. (Briceño Márquez, 2012). Por lo que la señal reconstruida toma los valores de la señal original en las muestras

Vemos entonces que si $f_s > 2f_m$ y $B = f_s / 2$ entonces la señal reconstruida será exactamente igual a original.

5.3 Submuestreo

Para observar los efectos del submuestreo, es decir, el muestreo por debajo de la frecuencia de Nyquist, consideremos una señal $x(t)$ cuyo espectro $X(f)$, como se muestra en laFigura 43.



Espectro de $x(t)$ b. Espectro de la señal muestreada $x_s(t)$

Figura 43. Comparación de espectros de la señal original y la muestreada.

Supongamos ahora que $f_s = (\frac{4}{3})f_m < 2f_m$ y se utiliza un filtro pasabajo interpolador de ancho de banda $B = f_s/2$. En este caso el espectro de la señal muestreada tiene la forma mostrada en (b). Al realizar la antitransformada podemos corroborar que ya no se tiene la misma forma que la señal original. (Briceño Márquez, 2012)

5.4 Conversor análogo digital

La salida de los sensores, que permiten a un equipo electrónico interaccionar con el entorno, es normalmente una señal analógica, continua en el tiempo. En consecuencia, esta información debe convertirse a binaria con el fin de adaptarla a los circuitos procesadores y de presentación. Un convertidor analógico-digital (CAD) es un circuito electrónico integrado cuya salida es la palabra digital resultado de convertir la señal analógica de entrada. La conversión a digital se realiza en dos fases: cuantificación y codificación. Durante la primera se muestrea la entrada y a cada valor analógico obtenido se asigna un valor o estado, que depende del número de bits del CAD. El valor cuantificado se codifica en binario en una palabra digital, cuyo número de bits depende de las líneas de salida del CAD. En la práctica, el proceso de conversión está sujeto a numerosas limitaciones resultado de los procesos de fabricación. Las más relevantes son el tiempo de conversión y la finitud del número de estados de salida. La conversión involucra un tiempo y, en consecuencia, supone una incertidumbre que limita la velocidad máxima de la entrada. Los valores discretos del proceso de cuantificación llevan consigo un error y una limitación de resolución del circuito. La elección del CAD en un diseño electrónico dependerá de la adaptación de sus rasgos a los requerimientos de la aplicación. (González de la Rosa , 2016)

Principios operativos de los CADs.

En un CAD de N bits hay 2^N estados de salida y su resolución (porción más pequeña de señal que produce un cambio apreciable en la salida) se expresa como $1 / 2^N$ (una parte en

el número de estados). El CAD es un dispositivo no lineal, por lo que no tiene sentido la consideración de función transferencia. Su relación entrada-salida viene dada por una característica escalonada. (González de la Rosa , 2016)

Resolución: Con frecuencia la resolución se expresa a partir del margen de entrada del convertidor para definir el intervalo de cuantización o espacio de 1 LSB (LeastSignificant Bit; bit menos significativo). Donde está dada como la relación en el cambio de voltaje en la salida que se produce como consecuencia de un cambio de 1 LSB en la entrada analógica (LSBLeastSignificat Bit)

$$1LSB = q = \frac{V_{FS}}{2^N - 1} \quad (41)$$

N: es el número de bits
VFS = Voltaje a escala completa

El error de cuantización está en el rango de 0 a q Para reducir el error de cuantización hay que aumentar el número de bits. (Ramírez Leyva, 2016)

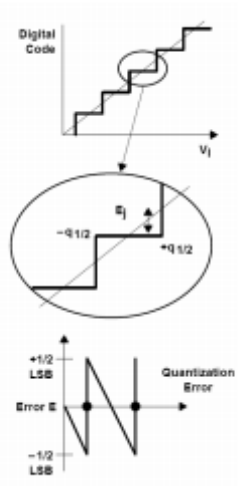


Figura 44. Curva de transferencia de un CAD con cuantificación uniforme. Los puntos de decisión se sitúan en la mitad de cada intervalo de cuantización. (Ramírez Leyva, 2016)

5.5 Frecuencia de medida

La frecuencia es la tasa de recurrencia de un evento repetitivo, cíclico o periódico. Se puede invertir el periodo de la señal para obtener la frecuencia. Para obtener la frecuencia en una señal digital, el periodo es directamente el tiempo entre flancos de subida, o entre flancos de bajada. (National Instruments, 2016)

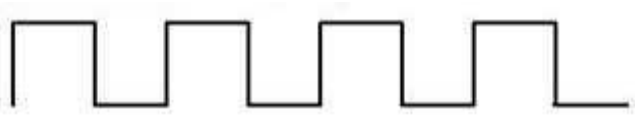


Figura 45. Señal digital. (National Instruments, 2016)

Cuando el tiempo entre flancos de subida o de bajada varia ligeramente, se realiza el promedio sobre un gran número de muestras y así poder determinar la frecuencia. (National Instruments, 2016)

5.6 Filtros

La implementación de filtros permite cambiar selectivamente las características y forma de onda de una señal que se encuentra en presencia de ruido, atenuando las componentes de señales combinadas a través de un sistema y mejorando su calidad. (Briceño Márquez, 2012)

En el caso de los filtros digitales, el sistema hace referencia a un algoritmo implementado en hardware o software que al actuar sobre las diferentes muestras de una señal digital genera otra señal digital de salida. Generalmente suelen preferirse los filtros digitales sobre los analógicos por los siguientes motivos:

- Los filtros digitales permiten una respuesta de fase exactamente lineal, lo que los filtros analógicos no, son invariantes con las condiciones ambientales lo que elimina la necesidad de calibrarlos periódicamente. Si el filtro se implementa utilizando un procesador programable la respuesta en frecuencia de un filtro digital puede ajustarse a voluntad (filtrado adaptivo). (Briceño Márquez, 2012)

- Las señales filtradas y sin filtrar pueden almacenarse para uso o análisis posterior. La precisión con que un filtro digital verifica las especificaciones de diseño está limitada solamente por la longitud de palabra (bits) utilizada para representar los coeficientes del filtro y ejecutar las operaciones aritméticas; con los filtros analógicos es difícil lograr atenuaciones que excedan los 60 o 70 dB en la banda de rechazo (utilizando componentes convencionales).

- El desempeño de los filtros digitales es repetible de unidad a unidad. Los filtros digitales pueden utilizarse a muy bajas frecuencias y pueden trabajar sobre un amplio rango de frecuencias simplemente cambiando la frecuencia de muestreo. (Briceño Márquez, 2012)

- Las limitaciones en frecuencia de los filtros digitales están asociadas a la frecuencia de Nyquist –que fija el ancho de banda útil que el filtro puede procesar– queda definida por el proceso de conversión (tiempos de conversión del conversor A/D y D/A), velocidad del

procesador, cantidad de operaciones a ejecutar por unidad de tiempo, etc. (Briceño Márquez, 2012)

5.7 Filtro FIR

Este tipo de filtro digital está caracterizado por su respuesta impulsiva es de duración finita y suele describirse como:

$$h[n], n = 0, 1, 2, \ldots \quad (45)$$

De forma tal que las señales de entrada y salida están relacionadas por la suma de convolución, según la ecuación

$$y[n] = N1 \sum k = 0\, h[k]x[n\, k]. \quad (46)$$

Mientras que la suma convolución puede ser una forma apropiada para implementar un filtro FIR, no es adecuada para los filtros IIR debido a que la respuesta impulsiva es muy larga (en teoría, infinitamente larga). Por ello, los filtros IIR se implementan con ecuaciones a diferencia que permiten calcular las muestras de salida en forma recursiva donde n = 0, 1, 2, . . . , y[1] = 0. El número N es el orden del filtro, y fija la cantidad de modos de la respuesta impulsiva. La relación entre los coeficientes a_i y b_i se obtiene aplicando la transformada Z a (7.3) y antitransformando. (Briceño Márquez, 2012)

El filtro IIR es sistema realimentado. En cambio, en el filtro FIR la salida y[n] sólo depende de los valores pasados de la entrada x[n]. Es evidente que, si en la ecuación de los filtros IIR los coeficientes a_i son nulos, se obtiene la suma convolución de los filtros FIR, pues hacer $a_i = 0$ anula los efectos de realimentación de las salidas pasadas. (Avilés Cruz & Rodríguez Rodríguez, 2003)

5.8 Comparación entre filtros FIR e IIR

La elección entre una implementación FIR e IIR depende de las ventajas relativas de cada uno de estos dos tipos de filtros y se realiza para mostrar la elección hecha para este trabajo y razones por las que se hace la elección.

- Los filtros FIR se pueden diseñar para tener una respuesta de fase estrictamente lineal (distorsión de fase nula), lo que es importante en muchas aplicaciones, como transmisión de datos, audio digital y procesamiento de imágenes. La respuesta de fase de

filtros IIR no es lineal, en especial en cercanías de la zona de transición. (Avilés Cruz & Rodríguez Rodríguez, 2003)

- Los filtros FIR implementados de forma no recursiva, por ejemplo aplicando, son inherentemente estables. En cambio, la estabilidad de los filtros IIR siempre debe comprobarse, ya que son sistemas realimentados. Los efectos causados por la implementación con aritmética de punto fijo, tales como los errores de cuantización de los coeficientes y los errores por redondeo en las operaciones aritméticas, son mucho más severos en los filtros IIR que en los FIR. (Avilés Cruz & Rodríguez Rodríguez, 2003)

- Para satisfacer unas especificaciones dadas los filtros FIR necesitan un mayor número de coeficientes que los filtros IIR, sobre todo si las bandas de transición son estrechas. En consecuencia, los requerimientos de memoria, el número de operaciones y los tiempos de procesamiento son mayores para los FIR que para los IIR. Sin embargo, la posibilidad de implementar los FIR mediante la técnica de convolución rápida usando FFT permite aumentar significativamente la eficiencia de las implementaciones. (Avilés Cruz & Rodríguez Rodríguez, 2003)

De las características detalladas arriba puede esbozarse una guía tentativa para elegir entre una implementación FIR o IIR: Si los únicos requerimientos importantes son bandas de transición estrechas (filtros con cortes muy abruptos) y eficiencia de cómputo, se prefieren filtros IIR pues necesitan un número de coeficientes mucho menor que un filtro FIR equivalente (especialmente si se eligen características frecuenciales elípticas o de Cauer). Si el número de coeficientes del filtro no es muy elevado (por ejemplo, si las bandas de transición no son muy abruptas), y en particular, si se desea muy poca o ninguna distorsión de fase, se suele elegir filtros FIR. Los procesadores digitales modernos (DSP) están optimizados para implementar este tipo de filtros, y algunos se han diseñado específicamente con esa finalidad (por ejemplo, el DSP56200 de Motorola, o el INMOS A100). Sin embargo, en un campo tan dinámico como éste la capacidad y el desempeño de los componentes varían rápidamente. (Avilés Cruz & Rodríguez Rodríguez, 2003)

5.9 Consideraciones filtro FIR

La señal obtenida con la tarjeta de adquisición USB 6211 tiene un comportamiento ondulatorio sobre un nivel DC de aproximadamente 0.6V, aunque presenta dichas variaciones prácticamente representa un nivel DC, por lo tanto para el análisis y determinación de filtro apropiado se espera que al aplicar la transformada de Fourier la respuesta espectral presente un único armónico en el origen.

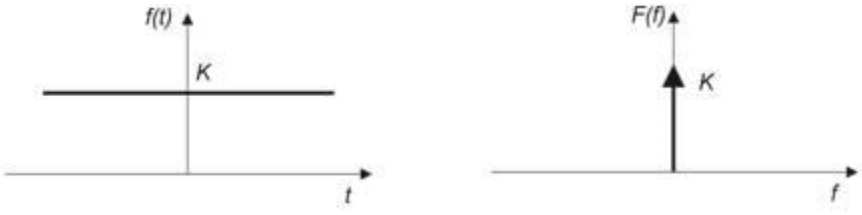


Figura 46. Transformada de Fourier du un único armónico en el origen.

Ya que la componente se encuentra en el origen se decide implementar un filtro pasa bajo que elimine los posibles armónicos resultantes del ruido que genera las oscilaciones en la señal.

5.10Método de las ventanas

Este trabajo de grado emplea la versión de LabVIEW 8.5 y aprovecha las ventajas de este software para el tratamiento de la señal, por tanto, se muestra el método de ventanas de fácil aplicación mediante esta herramienta.

Para tener un filtro FIR realizable se propone truncar $h(n)$ y retardarla hasta convertirla en causal.

La respuesta impulsional del filtro ideal pasa baja viene dada por:

$$h_i(n) = \{\frac{w_c}{\pi}\frac{sin(w_c n)}{w_c n} \quad n \neq 0 \frac{w_c}{\pi} \quad n = 0 \tag{47}$$

El método de las ventanas se basa en truncar la respuesta impulsional infinita de un filtro ideal. El procedimiento es el siguiente:

- Obtener la respuesta impulsional del filtro ideal que deseamos diseñar $h_i(n)$ (pasabaja, pasa-alta, etc.)

- Enventanar (truncar) dicha respuesta impulsional. $h(n) = h_i(n)\, w(n)$ es la respuesta impulsional de la ventana y $h_i(n)$ la respuesta del filtro ideal. La respuesta de la ventana debe ser de la forma.

$$w(n) = \{funcion\ simetrica \quad \frac{N-1}{2} \leq n \leq \frac{N+1}{2} 0 \quad en\ el\ resto \tag{48}$$

- Desplazar la respuesta impulsionalenventanada un número adecuado de muestras para hacerla causal. (también se puede desplazar la respuesta impulsional del filtro ideal previamente, para que la secuencia enventanada sea causal) (Avilés Cruz & Rodríguez Rodríguez, 2003)

Como el producto en el dominio del tiempo equivale a una convolución en el dominio de la frecuencia, se puede ver el efecto de aplicar una ventana sobre la respuesta frecuencial del filtro. Estudiando esta respuesta su puede querer mejorar el resultado del filtrado aumentando el número de muestras, sin embargo, el incremento de la longitud del filtro eleva su carga computacional. (Briceño Márquez, 2012)

Tipos de ventanas

El software empleado, LabVIEW, nos permite implementar el filtro FIR y usar diferentes tipos de ventanas. Lo que se hizo fue ubicar al sistema en un punto en el cual se estuviera recibiendo la señal deseada y se empezaron a cambiar el tipo de ventanas y su frecuencia de corte. (Avilés Cruz & Rodríguez Rodríguez, 2003)
Realizando esta tarea se tiene que para cada ventana la frecuencia de corte a usar, con una $fm = 500\ Hz$

Ventana	$fc\ (Hz)$
Rectangular	23
Gaussiana	25
Chebyshev	30
Kaiser	20
Welch	25
Parsen	39,2
Bohman	27,8
Hanning	32,12
Triángulo	29,28
Blackman	37,14

Tabla 9. Tabla de frecuencias de corte según ventana, con una frecuencia de 500 Hz

Realizamos este filtrado para evitar tener valores erróneos en la señal debido a ruidos propios del sensor ya que es muy sensible a los cambios en la luz y los errores que se puedan tener por el DAQ.

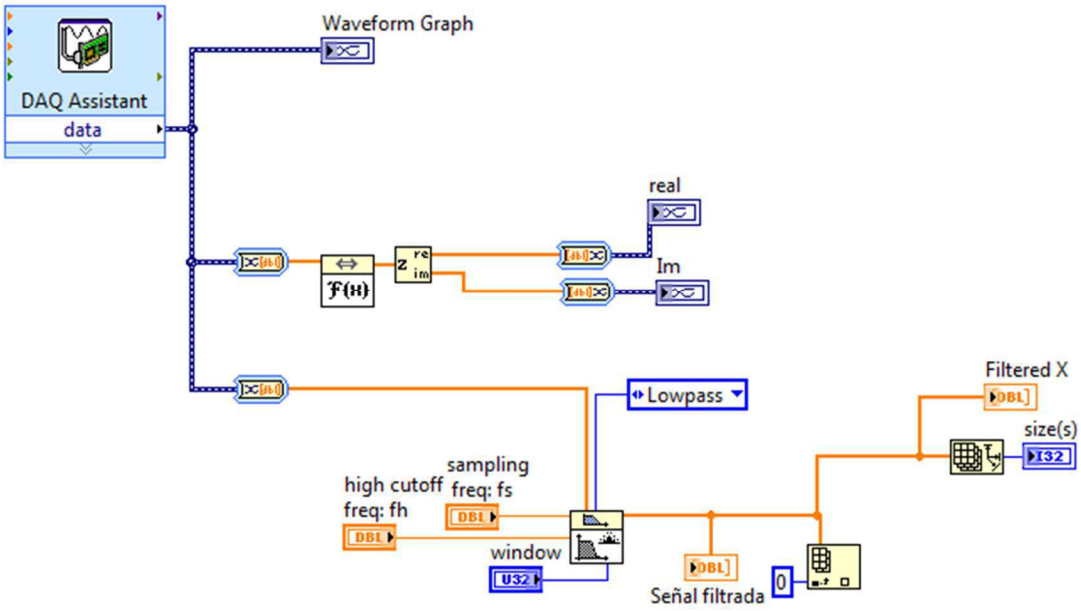


Figura 47. Configuración de filtro para la señal del detector.

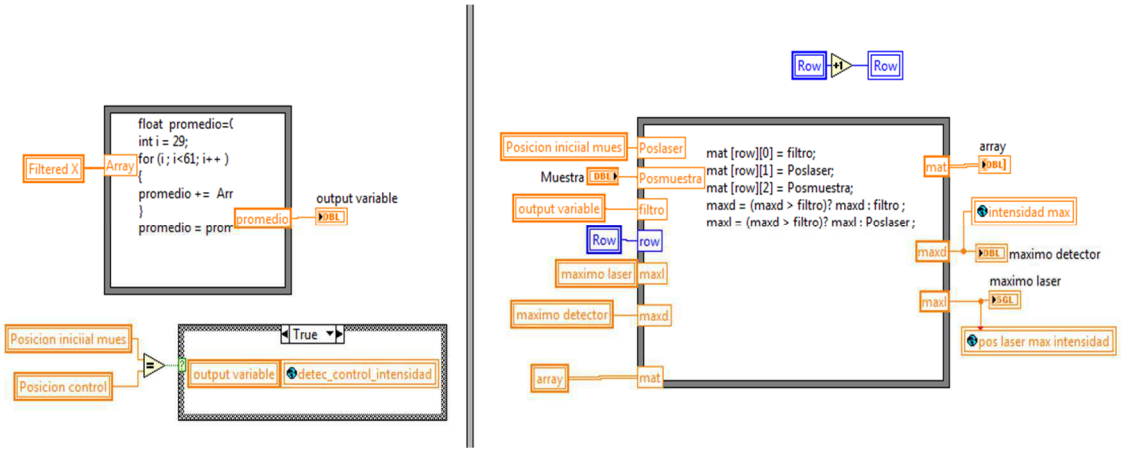


Figura 48. Manejo de la señal filtrada.

Como se observa una vez que se tiene la señal filtrada y debido al gran número de muestras que se obtienen de intensidades por configuración de ángulos, se procede a seleccionar el valor medio desde la muestra 30 hasta el final, se eliminan los 30 primeros valores ya que por la respuesta del filtro pasabajas se tiene una transciente propia del filtro hasta que este se estabiliza, así que estos valores son ignorados para que no afecten el valor real.

Este filtro se maneja con un gran número de muestras, a pesar de los costos computacionales que esto pueda ocasionar ya que al requerirse una precisión tan grande y tener valores de la señal muy fluctuantes, y más aún cuando se aplica la polarización al haz incidente hace que los niveles de intensidad sean tan bajos, es necesario admitir esta

situación sin que sea una situación difícil de llevar por el usuario final que no percibe esta diferencia de procesamiento que está en el orden de los ms.

Capítulo 6

Desarrollo experimental

6.1 Implementación filtro FIR y promedio móvil

La señal recibida por el detector y adquirida con la tarjeta USB6211 se procesa a través de un filtro FIR y posteriormente se emplea la técnica de promedio móvil para disminuir el rizado.

La señal de entrada tiene una magnitud variable entre (1.756 -1.773) V cuando no ha sido polarizada mostrando el siguiente comportamiento.

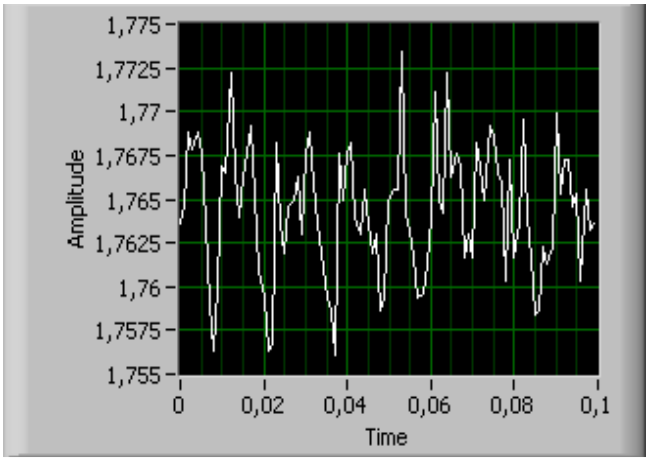


Figura 49. Señal capturada con DAQ USB6211

Aplicando la técnica de ventaneo para el diseño del filtro, se realizan diferentes configuraciones con cambios en frecuencia de muestreo y como etapa siguiente se calcula un promedio móvil que toma la porción de la señal con mayor estabilidad (aproximadamente desde la muestra 31 hasta la muestra 91) iterando sobre los distintos valores de intensidad y entregando un consolidado final.

Las variaciones en respuesta para cada una de las ventanas y el valor obtenido con el promedio móvil se muestran a continuación:

6.2 Ventana Hanning

Fh	Frecuencia de muestreo fs	Valor de la señal filtrada por ventaneo (V)	Valor del promedio móvil (V)
12,2	**500**	**1.03213**	**1.03282**
12,2	**100**	**1.74246**	**1.74479**
7	**100**	**1.7439**	**1.74239**
5	**100**	**1.56504**	**1.56824**

Tabla 10. Tabla que relaciona la Intensidad en Voltios para para diferentes Fh y Fs , usando una ventana Hannig

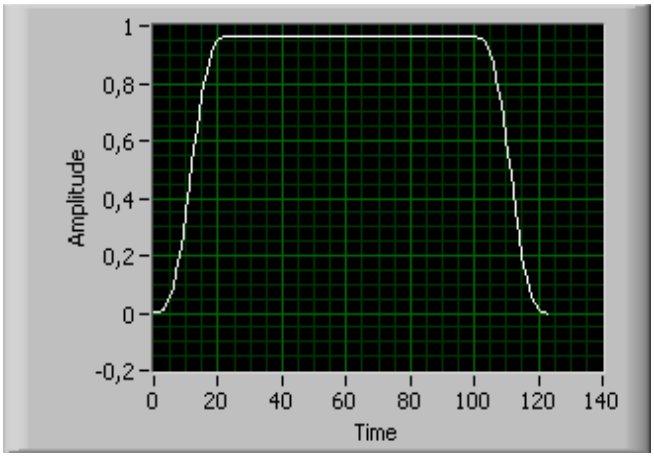


Figura 50. Respuesta del filtro a la ventana Hanningfs=500 y fh=12,2

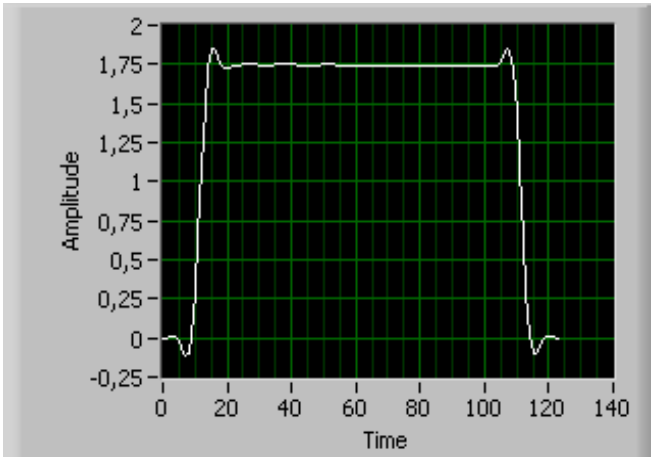


Figura 51. Respuesta del filtro a la ventana Hanningfs=100 y fh=12,2

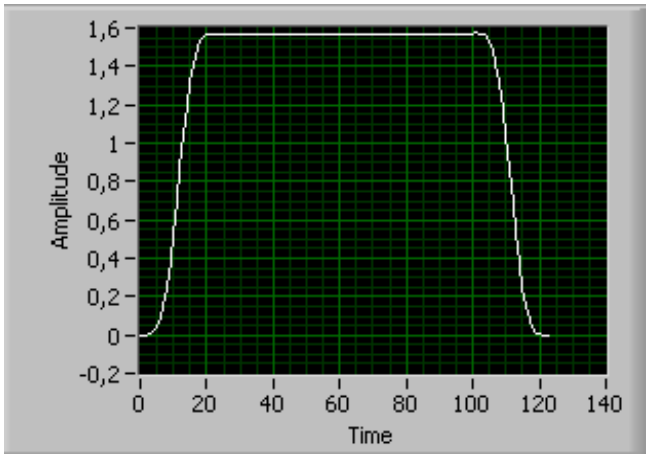


Figura 52. Respuesta del filtro a la ventana Hanningfs= 100 y fh=5

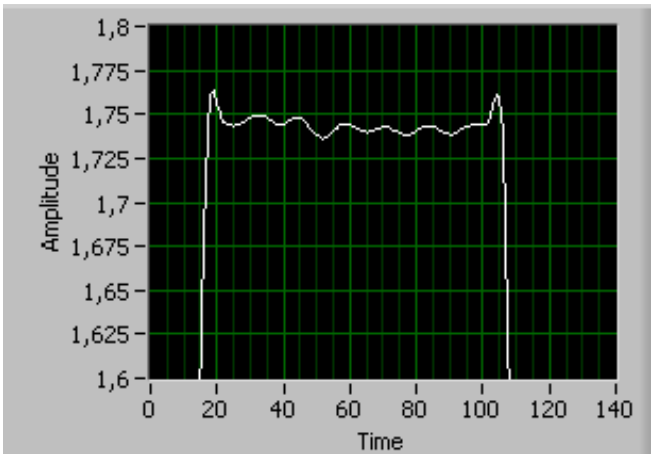


Figura 53. Respuesta del filtro a la ventana Hanningfs=100 y fh=7

La ventana Hamming se aprecia que el rizado de Gibbs es más protuberante y cuando este se quiere amortiguar se pierde amplitud de la señal.

6.3 Ventana Blackman-Harris

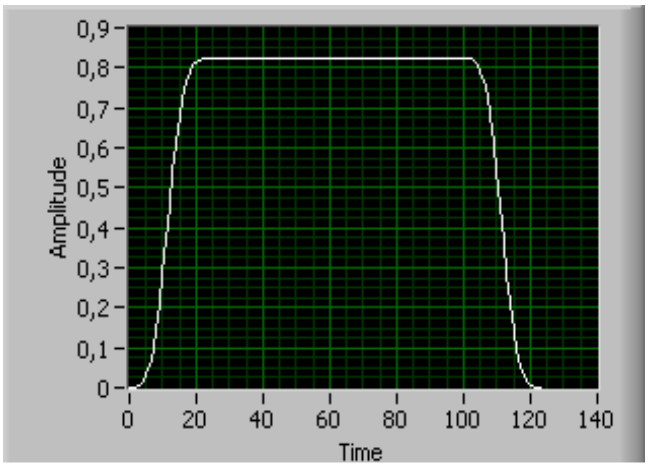


Figura 54. Respuesta del filtro a la ventana Blackman-Harris fs=500 y fh=12,2

Fh	Frecuencia muestro fs	Valor de la señal filtrada por ventaneo (V)	Valor del promedio móvil(V)
12,2	**500**	**0.82318**	**0.82358**
5	**30**	**1.7284**	**1.73038**

Tabla 11. Tabla que relaciona la Intensidad en Voltios para para diferentes Fh y Fs , usando una ventana Blacknan-Harris

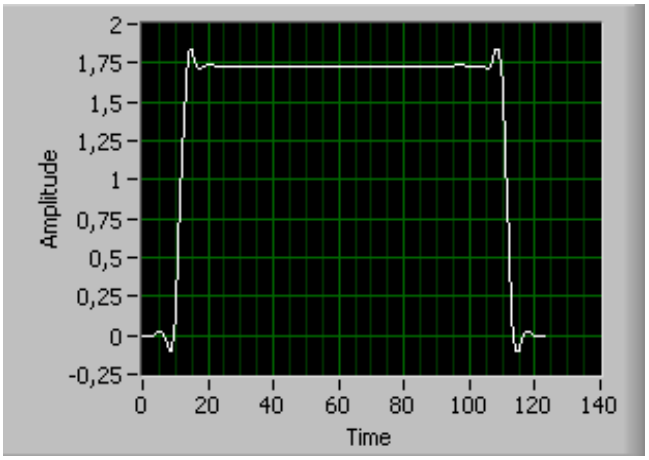


Figura 55. Respuesta del filtro a la ventana blackman-harrisfs=30 y fh=5

La frecuencia de corte es muy baja por lo que el filtrado de la misma no es muy efectivo, haciendo que igual las oscilaciones que se presentan tengan variaciones en amplitud aun considerables.

6.4 Ventana Blackmam

Fh	Frecuencia muestro fs	Valor de la señal filtrada por ventaneo (V)	Valor del promedio móvil (V)
5	**30**	**1.73874**	**1.73895**

Tabla 12. Tabla que relaciona la Intensidad en Voltios para para diferentes Fh y Fs , usando una ventana Blacknan

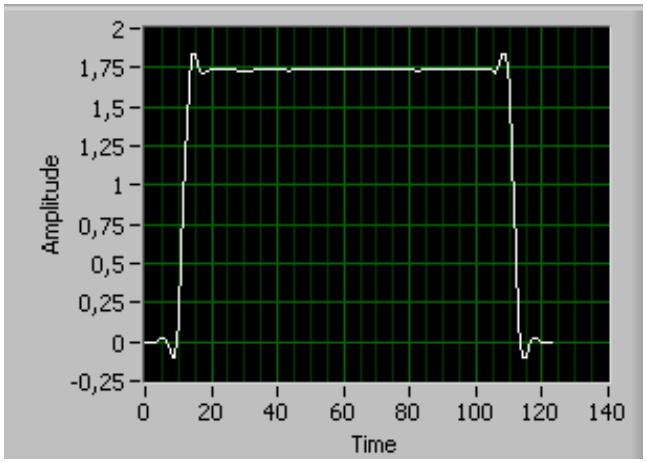


Figura 56. Respuesta del filtro a la ventana blackmanfs=30 y fh=5

Al igual que la anterior ventana, se debe determinar una frecuencia de corte muy baja por lo que las variaciones de amplitud no nos entregaron un buen resultado.

6.5 Ventana triangular

Fh	Frecuencia de muestreo fs	Valor de la señal filtrada por ventaneo (V)	Valor del promedio móvil (V)
12,5	**500**	**0.94781**	**0.94765**
12,5	**25**	**1.70966**	**1.70964**
10	**25**	**1.70497**	**1.70013**

Tabla 13. Tabla que relaciona la Intensidad en Voltios para para diferentes Fh y Fs , usando una ventana triangular

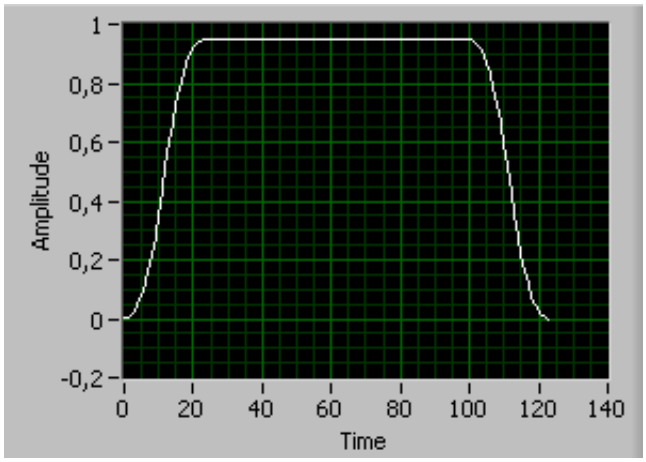


Figura 57. Respuesta del filtro a la ventana triangular fs= 500 y fh =12.5

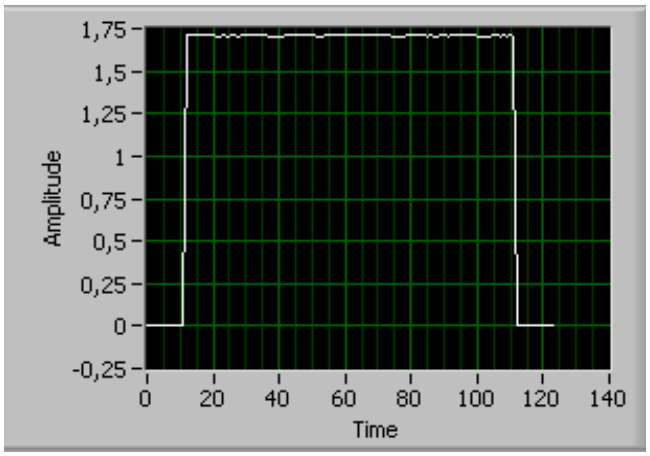


Figura 58. Respuesta del filtro a la ventana triangular fs=25 y fh=12.5

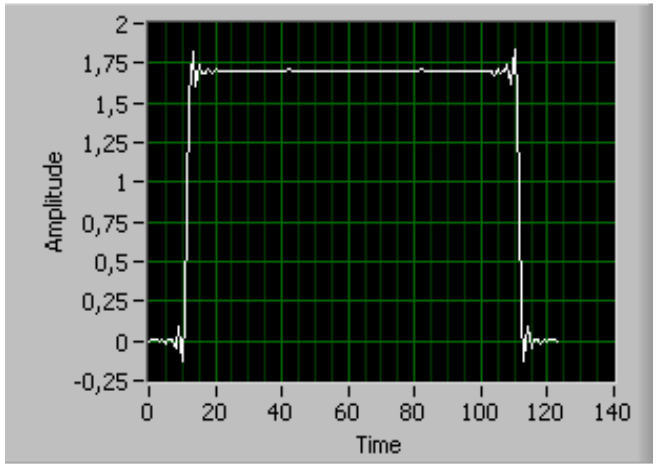


Figura 59. Respuesta del filtro a la ventana triangular fs = 25y fh = 10

6.6 Ventana rectangular

Fh	Frecuencia de muestreo fs	Valor de la señal filtrada por ventaneo(V)	Valor del promedio móvil(V)
12,5	**500**	**1.7**	**1.70964**
12,5	**400**	**2.1952**	**2.1895**
12,5	**300**	**1.7**	**1.70964**

Tabla 14. Tabla que relaciona la Intensidad en Voltios para para diferentes Fh y Fs , usando una ventana rectangular

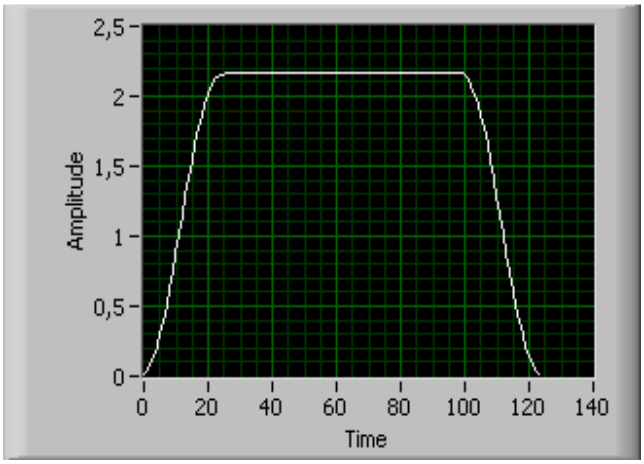


Figura 60. Respuesta del filtro a la ventana rectangular fs = 12.5 y fh = 500

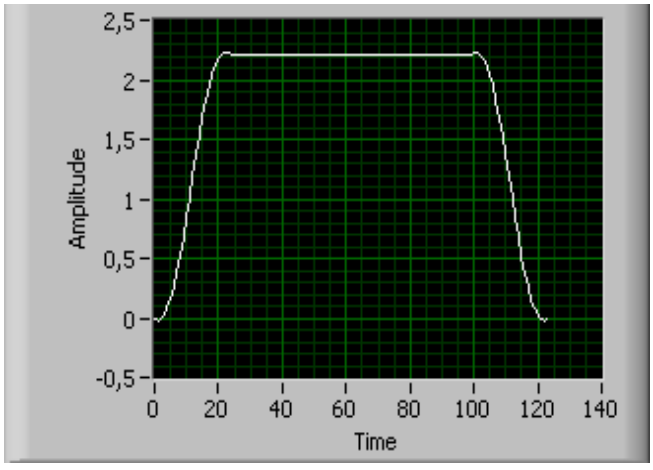


Figura 61. Respuesta del filtro a la ventana rectangular fs = 12.5 y fh = 400

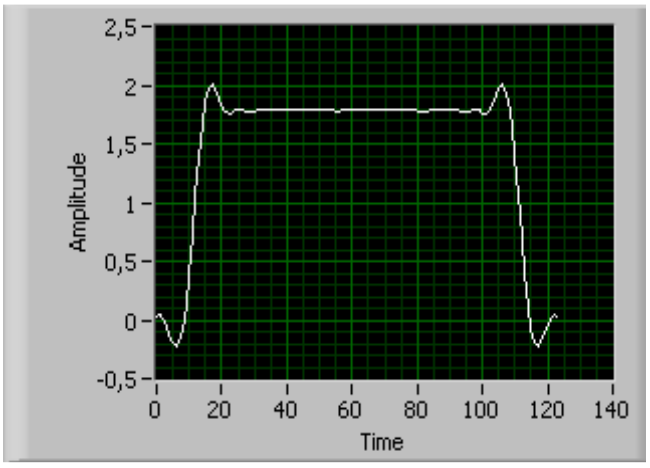


Figura 62. Respuesta del filtro a la ventana rectangular fs = 12.5 y fh = 300

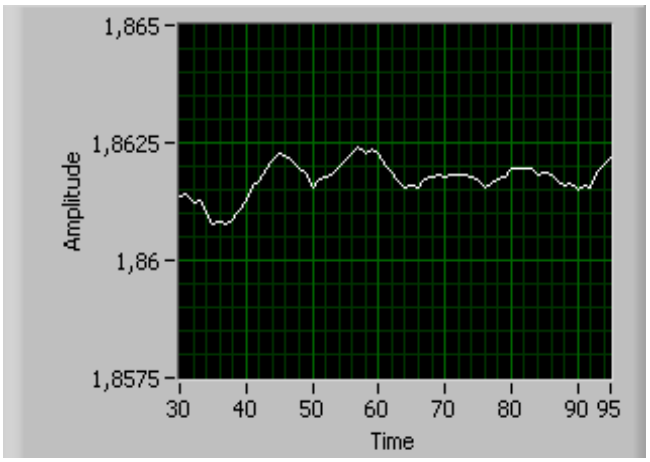


Figura 63. Respuesta en la zona estable del filtro a la ventana rectangular fs = 12.5 y fh = 500

Finalmente la ventana seleccionada es la rectangular, ya que en esta el fenómeno de Gibbs no es predominante, se logra una estabilidad en amplitud para los valores finales que junto con el método del promedio móvil, nos entrega una medida más cercana a un nivel DC como se muestra en la Figura 63

Capítulo 7

Resultados

Se realizaron mediciones sobre 4 superficies aislantes y conductoras entre ellas vidrio y tres tipos de películas delgadas. Para el barrido se utilizó el polarizador Los resultados del barrido hacen parte de la siguiente sección.

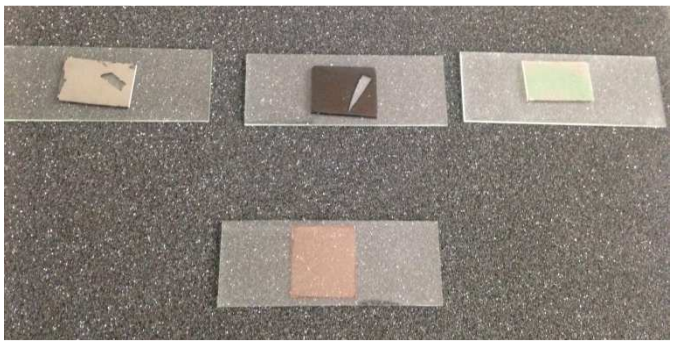


Figura 64. Películas empleadas para la medición del ángulo de Brewster.

Vidrio

Ángulo laser (°)	Ángulo Muestra (°)	Intensidad máxima (V)
30,0001000	14,9999000	0,4765970
34,0001000	17,0000000	0,3437710
37,8939000	18,9999000	0,4461860
42,0482000	21,0000000	0,0290779
43,0550000	21,5000000	0,0198730
45,7395000	23,0001000	0,0117857
47,8501000	24,0000000	0,4767670
48,8500000	24,5001000	0,5523990
49,8557000	25,0000000	0,5523990
50,9758000	25,5000000	0,5866650
57,5000000	28,9999300	0,5955620
61,4104000	31,0000200	0,6056110
65,3439000	32,9999000	0,6449360
69,3526000	34,9999900	0,6661440
73,2559000	37,0000800	0,6991080
77,1885000	38,9999600	0,7237390
81,1620000	41,0000500	0,8384180
85,3020000	42,9999300	0,8799430

Tabla 15.. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para una película de vidrio.

Con un barrido de 15° a 43° para la muestra, y uno más pequeño alrededor de los ángulos de láser con menor intensidad, se obtiene como punto mínimo 45,7395°.

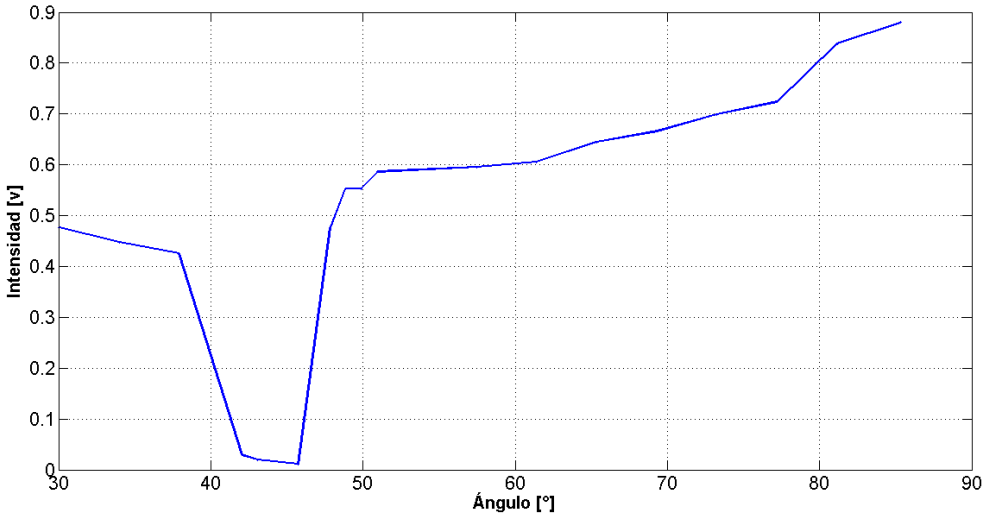


Figura 65. Ángulo de Brewster para vidrio.

Película 2

Ángulo laser (°)	Ángulo Muestra (°)	Intensidad máxima (V)
30,0516000	14,9999000	1,6573600
34,0407000	17,0000000	1,2177300
36,2359000	18,5000000	1,0901300
38,0781000	18,9999000	0,5928730
38,1405000	19,4999800	0,5665510
39,1914000	19,9999900	0,4672100
39,2980000	20,0020000	0,4234500
39,3450000	20,2120000	0,4217000
39,3490000	20,2343000	0,3451000
39,4350000	20,3067000	0,4672100
41,0316000	20,4999000	0,5517860
41,8760000	20,7749000	0,5917860
42,0316000	21,0000000	0,6177670
46,0307000	23,0001000	0,7507810
49,9999000	24,9999700	1,0987000
53,9999000	27,0001000	1,0987000

Tabla 16. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para la película 2.

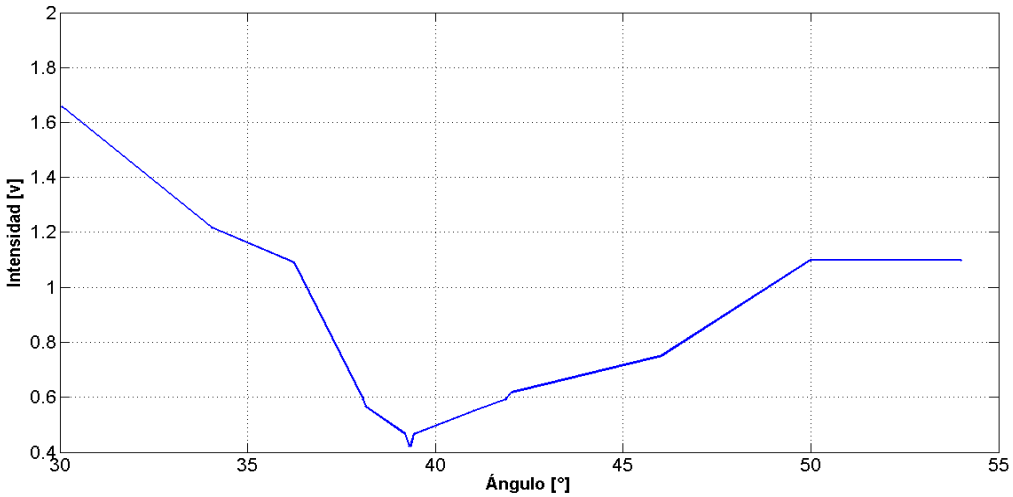


Figura 66. Ángulo de Brewster para película 1.

Con un barrido de 15° a 27° para la muestra, y uno más pequeño alrededor de los ángulos de láser con menor intensidad, se obtiene como punto mínimo 39,349°. Particularmente esta película presenta un efecto de corte en el haz reflejado en dos porciones verticales equidistantes que requerían el ajuste de altura del detector.

Película 3

Ángulo laser (°)	Ángulo Muestra (°)	Intensidad máxima (V)
30,1929000	14,9999000	1,2135600
32,1929000	14,9999000	1,2297560
34,1169000	17,0000000	1,2214100
36,1094000	18,0000000	0,7860740
36,6142000	18,2499000	0,5299090
37,0930000	18,5000000	0,3520000
37,2730000	18,5563500	0,4290000
37,3345000	18,5875000	0,4780000
38,0000000	18,9999000	0,7271260
39,0000000	19,5000000	0,9381230
39,9999000	20,0001000	0,9980280
42,0162000	21,0000000	1,1759300
43,0194000	21,5000000	1,1993300
46,0133400	23,0001000	1,2258100
47,0138000	23,5001000	1,2356000
48,0808000	23,5001000	1,1353000
49,9999000	25,0000000	0,8825610

Tabla 17. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para la película 3 con polarizador.

Con un barrido de 15° a 25° para la muestra, y uno más pequeño alrededor de los ángulos de láser con menor intensidad, se obtiene como punto mínimo 37,093°. Particularmente esta película presenta un efecto de corte en el haz reflejado en tres porciones verticales que requerían el ajuste de altura del detector.

En puntos próximos al ángulo de Brewster se mide la intensidad sin polarizador para demostrar el efecto directo sobre la intensidad de la señal, particularmente en el punto 36,61° láser y 18,24° el valor obtenido es de 2,618 V.

Ángulo laser (°)	Ángulo Muestra (°)	Intensidad máxima (V)
36,6174000	18,2499000	2,6184600

Tabla 18. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para la película 3 sin polarizador.

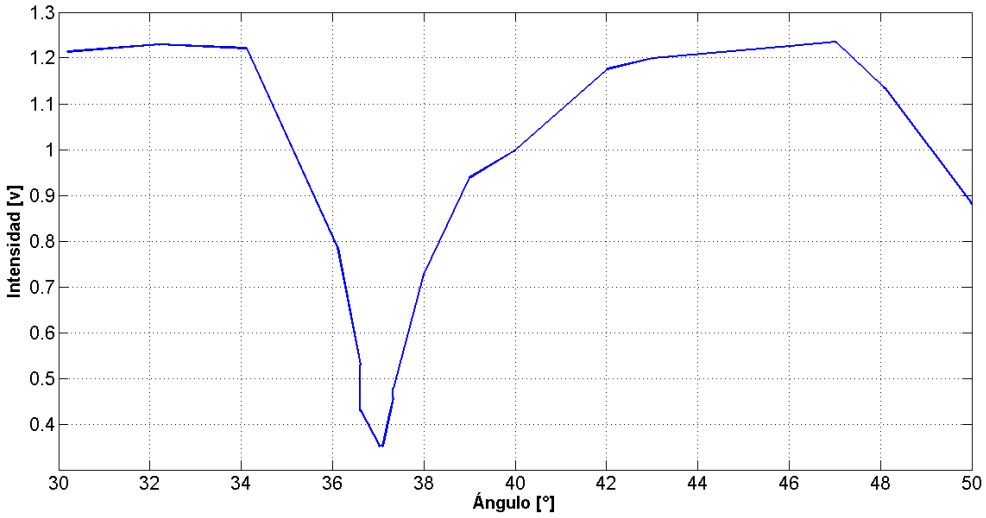


Figura 67. Ángulo de Brewster para película 3.

Ángulo laser (°)	Ángulo Muestra (°)	Intensidad máxima (V)
35,4918000	18,3500000	0,6232180

Tabla 19. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para la película 4 sin polarizador.

Con un barrido de 15° a 25° para la muestra, y uno más pequeño alrededor de los ángulos de láser con menor intensidad, se obtiene como punto mínimo 36,8476°.

Película 4

Ángulo laser (°)	Ángulo Muestra (°)	Intensidad máxima (V)
30,000100	14,999900	0,099137
31,320000	14,999900	0,102300
32,699900	17,000000	0,103020
33,000000	17,500000	0,098200
34,799900	18,000000	0,085525
35,349500	18,249900	0,082267
35,552000	18,350000	0,081530
35,800100	18,575000	0,080470
35,820000	18,643000	0,078600
36,847600	18,999000	0,039448
37,476000	19,340000	0,048255
37,755300	19,500000	0,055316
38,800100	20,000100	0,091101
40,650700	21,000000	0,107421
44,648600	23,000100	0,110235
48,747200	25,000000	0,112923

Tabla 17. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para la película 4 con polarizador.

En puntos próximos al ángulo de Brewster se mide la intensidad sin polarizador para demostrar el efecto directo sobre la intensidad de la señal, particularmente en el punto 35,4918° láser y 18,35° el valor obtenido es de 0,623 V.

Durante esta caracterización se realizan micropasos en una porción del barrido y el sistema responde adecuadamente a la resolución esperada, manteniendo coherencia entre los niveles de intensidad arrojados.

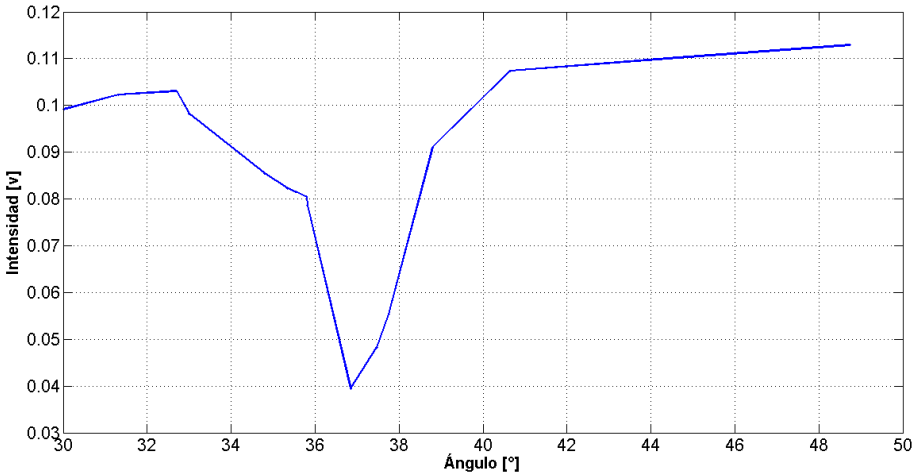


Figura 68. Ángulo de Brewster para película 4.

Película 5

Con un barrido de 15° a 25° para la muestra, y uno más pequeño alrededor de los ángulos de láser con menor intensidad, se obtiene como punto mínimo 39,523°.

El comportamiento de la señal durante la caracterización es más estable con respecto a las dos primeras películas, no se evidencia partición del haz.

Ángulo laser (°)	Ángulo Muestra (°)	Intensidad máxima (V)
30,0001000	14,9999000	1,9624700
31,0000000	15,5300000	2,1340000
32,3136000	16,0001000	2,2562200
34,3001000	17,0000000	2,1668800
36,2752000	18,0000000	1,7411400
37,7320000	18,7330000	1,5382000
38,2510000	18,9999000	1,1192600
38,5122000	19,1560000	0,5939000
39,5230000	19,5670000	0,1636770
40,2999000	20,0001000	0,2813220
41,7500000	19,2500000	0,5322000
42,2799000	21,0000000	2,0193100
46,2810000	23,0001000	2,3186400
50,2600000	25,0000000	2,3126400

Tabla 20. Tabla que relaciona la intensidad en voltios contra posiciones de ángulo y muestra para la película 5 con polarizador.

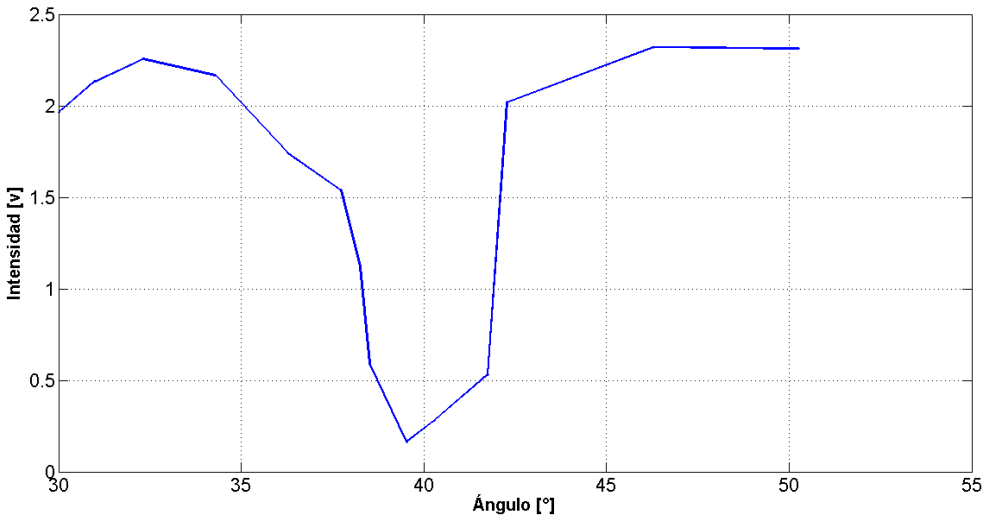


Figura 69. Ángulo de Brewster para película 5.

Conclusiones

El estudio de los equipos permitió el reconocimiento de estos bajo las distintas configuraciones de lazo abierto y cerrado que junto con los manuales de operación nos proporcionó un panorama general de las características eléctricas y mecánicas.

El estado inicial de la estación revelo la necesidad de acoplamiento entre las distintas fases y equipos involucrados en la rutina básica de medida, es decir, con trabajos anteriores se pudo constatar que la intervención humana, el uso de elementos de medida como osciloscopios analógicos, la inclinación y la falta de adherencia de los equipos interferían en la referencia del sistema limitando la obtención de resultados precisos y comparables. Por tal motivo la selección de LabVIEW 8.5 como entorno de desarrollo para el sistema de supervisión y control fue primordial debido a que los protocolos de conexión hardware-software están definidos de manera detallada a través de los controles ActiveX que permiten la fácil configuración de propiedades como manipulación de offset, variaciones en velocidad, tamaño de pasos y funciones básicas de arranque, parada y lectura de eventos.

Asimismo, factores como la luz ambiente, el color y aislamiento físico de los equipos son aspectos a considerar en la toma de medidas, dado el rango de longitudes de onda de trabajo (UV, VIS y NIR). Adicionalmente el ruido dado por el ambiente era comparable con las intensidades obtenidas como resultado de la polarización de la señal.

El sistema de control le da al usuario la libertad de manipular características como velocidad, tamaño de paso (resolución mínima de 0.001 grados), posición de nanorotadores y detector sin sobrepasar las restricciones eléctricas y mecánicas del sistema para evitar daños en los elementos. Es importante resaltar que dada la naturaleza del problema que tenía como objetivo la identificación de un punto máximo en intensidad para cada barrido se abordó como un problema de optimización y se optó por el uso de métodos numéricos (método del gradiente) que le permitieran al sistema realizar las iteraciones mínimas requeridas para alcanzar la posición adecuada, teniendo en cuenta factores como la ventana visual del detector y el spot del láser.

La posición adecuada para el inicio de una caracterización sugiere para la muestra un ángulo de partida mínimo de 15º, posición en la cual no se genera interferencia física entre los equipos, y como ángulo máximo 40º puesto que las mediciones para la mayoría de películas dadas por el Grupo de Películas Delgadas y Nanofotónica de la Pontificia Universidad Javeriana están muy por debajo de este valor, y para ángulos mayores la incidencia es casi paralela a la muestra.

La selección de una altura adecuada para el detector se logró a través de una rutina de calibración con la que se eliminó la manipulación del usuario en el sistema, y a partir de un barrido vertical (eje z) del detector se obtiene la altura con mayor intensidad que para cada punto en particular puede ser aprovechada en el barrido horizontal.

El uso de la tarjeta de adquisición de datos USB6211 con una resolución de 16 bits y frecuencia de muestreo, 250 kB / s facilitó la implementación de un filtro FIRpasabajo con

promedio móvil que elimino las fluctuaciones de la señal, logrando una única componente espectral de transiente pequeña e independiente de la entrada.

La supervisión continua de valores de intensidad vs ángulo de laser se garantizó para el usuario en los dos modos de operación básicos (manual y automático) con el propósito de generarle mayor flexibilidad en sus caracterizaciones y portabilidad sobre los resultados de cada barrido, debido a que al finalizar cada barrido se genera un archivo Excel disponible para análisis posteriores; con escritura simultánea en un base de datos de Access, que en presencia de un eventual fallo del sistema de alimentación permita llevar un registro detallado de los movimientos.

Bibliografía

1. ThrorLabs, http://www.thorlabs.com/Navigation.cfm; 20 de Enero de 2009.
2. Página del Grupo de Películas Delgadas del Departamento de Física de la Pontificia Universidad Javeriana, http://scienti.colciencias.gov.co:8081/ciencia.war/search/EnGrupoInvestigacion/xmlInfo.do?nro_id_grupo=0009105P1LNVZV, 20 de Enero de 2009.
3. A. Bohórquez S., R. A. Cáliz O., E. G. Murcia R., "Desarrollo de un sistema de polarimetría implementado con LabVIEW", Tesis Pontificia Universidad Javeriana, 2006.
4. Lajara Vizcaíno José y Pelegrí José, "LabVIEW Entorno gráfico de Programación", México D.F, México, Ed. Alfaomega, 2006.
5. Avilés Cruz, C., & Rodríguez Rodríguez, E. (2003). Análisis de señales. Azcapotzalco.
6. Briceño Márquez, J. (2012). Principios de las comunicaciones, Edición digital III. Mérida, Venezuela: ULA Facultad de Ingeniería Publicaciones.
7. Brunatti, C., & Martín, A. M. (25 de 02 de 2015). http://materias.fi.uba.ar/6305/download/Espectrofotometria.pdf.
8. Cabrera, J. M., López, F. J., & López, F. A. (2001). Óptica electromagnética Vol.I: Fundamentos. Pearson Addison-Wesley.
9. Costa Quintana, J., & López Aguilar, F. (2007). INTERACCIONELECTROMAGNETICA: TEORÍACLÁSICA. Reverte.
10. Documento, Propiedades ópticas . (s.f.). Recuperado el 22 de 03 de 2015, de http://www.tecnun.es/asignaturas/PFM_Mat/Prog/Opticasv2.pdf
11. Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2005). Sistemas de Control Moderno. Ed. Pearson Prentice Hall.
12. González de la Rosa , J. (22 de 10 de 2016). http://www2.uca.es/grup-invest/instrument_electro/ppjjgdr/Electronics_Instrum/Electronics_Instrum_Files/temas/T11_CAD.pdf.
13. Gonzalo, &Hernández Oliva, G. (2006). Métodos Clásicos de Optimización para Problemas No-lineales sin Restricciones.
14. Hernández, A. M., &JiménezÁlvarez, L. C. (2008). SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL DE UNA ESTACIÓN PARA ESPECTROSCOPÍA VIS. Bogotá.
15. Instruments, N. (s.f.). National Instruments. Recuperado el 22 de 03 de 2015, de http://www.ni.com/academic/students/learnlabview/esa/environment.html
16. Jiménez B, L. (s.f.). Notas de Física de Materiales.
17. Landau, L. D., &Lifshits, E. M. (1981). Electrodinámica de los medios continuos. Reverte.
18. Landau, L. D., &Lifshits, E. M. (1985). Mecánica de fluidos. Reverte.
19. National Instruments, t. (14 de 02 de 2016). http://www.ni.com/tutorial/7111/es/.
20. National Instruments, m. (25 de 10 de 2016). http://www.ni.com/pdf/manuals/375195c.pdf.

21. National Instruments, m. (20 de 08 de 2016). https://www.ni.com/pdf/manuals/371931f.pdf.
22. Pavia, D., Lampman, G., Kriz, G., &Vyvyan, J. (2009). Introduction to spectroscopy. Brooks cole.
23. Ramírez Leyva, F. (22 de 10 de 2016). http://www.utm.mx/~hugo/metrologia/Metro9.pdf.
24. Tompkins, H. G., &Irene, E. A. (2005). Handbook of ellipsometry. Norwich: Springer.
25. Zamorano, J. (s.f.). Universidad Complutense. Recuperado el 14 de 05 de 2016, de https://pendientedemigracion.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/TEA/tea_05.pdf

Apéndices

APÉNDICE A.

Conceptos Ópticos

EspectroscopíaUV VIS IR

Desde hace muchos años se han usado los colores de la radiación para reconocer e identificar las sustancias a partir de sus propiedades físicas y químicas.Con el desarrollo de la teoría electromagnética de Maxwell y de su carácter cuántico según Einstein, los colores se clasifican como el llamado espectro del “visible”, que son parte del conocido “espectro de radiación electromagnética ”conformando una pequeña región del espectro total hasta ahora identificado, el cual se estructura desde los de muy alta energía, los llamados rayos Gamma “γ”, rayos x “RX”, ultravioleta “UV”, el visible “VIS”, hasta las baja energías, infrarojo “IR”, microondas “MO”, ondas de radio y TV y radio frecuencias “RF”. En la gráfica de barras se muestra un acercamiento de los valores propios físico químicos asociados para clasificar la radiación, según su longitud de onda “l” y su frecuencia “v”, que se describirá y explicará más adelante,Figura 70(Jiménez B)

Al reemplazar el ojo humano por otros detectores artificiales de radiación se puede estudiar la absorción de sustancias, no solamente en la zona del espectro visible, sino también en ultravioleta e infrarrojo. Se denomina espectrofotometría a la medición de la cantidad de energía radiante que absorbe un sistema químico en función de la longitud de onda de la radiación, y a las mediciones a una determinada longitud de onda. La teoría ondulatoria de la luz propone la idea de que un haz de luz es un flujo de cuantos de energía llamados fotones; la luz de una cierta longitud de onda está asociada con los fotones, cada uno de los cuales posee una cantidad definida de energía.(Jiménez B).

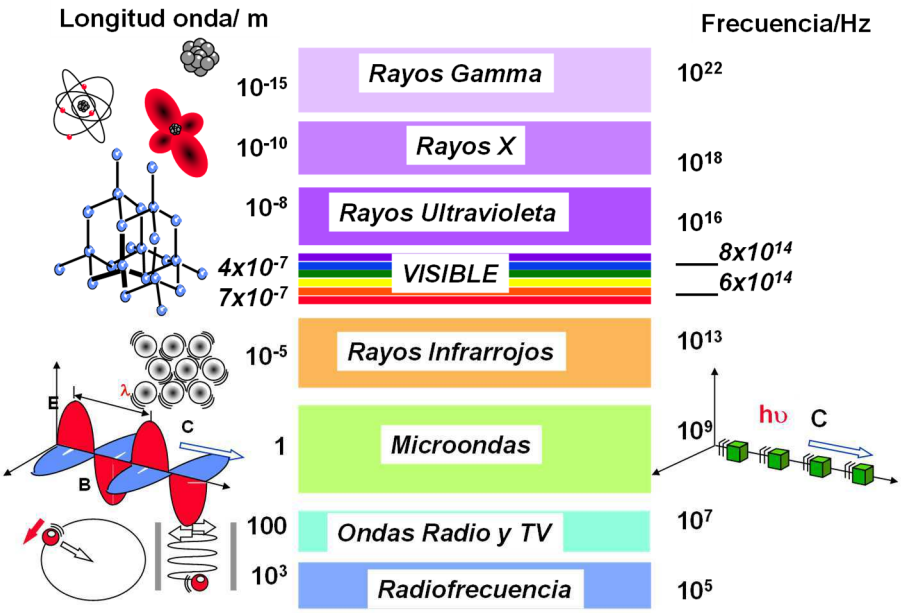


Figura 70. Espectro electromagnético a partir de teoría ondulatoria de Maxwell, la cuantización de Einstein y fuentes de radiación. (Jiménez B)

La espectroscopíaUV, VIS y NIR se basa en la teoría de la interacción entre la radiación electromagnética de la materia, mediante la medición de la absorción o emisión de energía radiante.(Jiménez B)

Su principal propósito es la detección de emisiones de radiación electromagnética, atribuida a los cambios de energía en las transiciones de los electrones de unos niveles atómicos a otros, a partir de ciertas longitudes de onda o frecuencias que se generan y se relacionan con estos cambios de energía en las transiciones, para emitir energía en forma de onda electromagnética y/o partículas de energía o cuantos de luz llamados fotones.(Jiménez B)

En el caso de los fotones de frecuencia "υ", asociados a su otra personalidad, la onda electromagnética de longitud de onda "λ", la energía "E_υ" del cuanto de energía esta dado como:

$$\Delta \boldsymbol{E} = \boldsymbol{h}.\boldsymbol{v} \qquad (1)$$

En caso de la interacción de la radiación con la materia, esta se basa en la interacción con los electrones de valencia, en las llamadas dispersión, esparcimiento, absorción, tansmitancia, y reflexión, en la cual la radiación se absorbe y se reemite por los electrones como antenas nanoscópicas en aproximación de energías continuas como ondas electromagnéticas o en aproximación de energía cuantizada como fotones. (Jiménez B) En el caso de fotones, en la absorción y la emisión, los cambios de energía "ΔE_e" de los electrones se relaciona con la energía "$E_\upsilon = h\upsilon$"de fotones emitidos o absorbidos como:

$$\Delta \boldsymbol{E_v} = \boldsymbol{hv} \qquad (2)$$

Este método proporciona información importante ya que las diferencias de energía entre estados cuánticos dependen de la composición elemental del material.(Brunatti & Martín, 2015)

$\boldsymbol{h}$: Constante de Planck
$\boldsymbol{v}$: Frecuencia del haz de luz
$\Delta \boldsymbol{E_v}$: Cambio de energía del electrones en la interacción

Este mecanismo determina la identificación del tipo de átomos, moléculas de la interacción, ya que el conjunto de valores propios "ΔEυ" posibles de producir, por un átomo o molécula, constituye un arreglo de números que permiten codificar el átomo o molécula para su identificación.(Jiménez B)

Transmitancia

Según Jiménez B,para las mediciones de la radiación electromagnética, se define el vector densidad de corriente "$\vec{\boldsymbol{J}}$" de energía de radiación electromagnética, que permite calcular la corriente de energía "i_U=dU/dt" de radiación que pasa a través de un elemento de área "$\vec{\boldsymbol{A}}$", o también llamado flujo "$\boldsymbol{\Phi_U = dU/dt}$", como:

$$i_U = \Phi_U = dU/dt = \vec{\boldsymbol{J}} \cdot \vec{\boldsymbol{A}} \quad (3)$$

En el modelo ondulatorio de Maxwell se define como el vector de Poynting "$\vec{\boldsymbol{S}}$", tal que:

$$\vec{J} = \vec{S} = (\vec{E} \times \vec{B})/\mu \quad (4)$$

Donde "$\vec{E}$" y "$\vec{B}$" son respectivamente los campos de radiación eléctrico y magnético mutuamente autoinducidos según la ecuaciones de Maxwell, y "μ" la permeabilidad magnética del medio de propagación de la radiación(Jiménez B). En el modelo cuántico de Einstein se define como:

$$\vec{J} = \eta h\nu \vec{c} \quad (5)$$

Donde "η" es la concentración volumétrica de fotones ($h\nu$), "$h = 6{,}6 * 10^{-34} J.s$" es la constante de Plank, "ν" es la frecuencia del fotón, "$\vec{c}$" es la velocidad de la luz y "$h\nu$" es la energía de cada fotón(Jiménez B). Para las mediciones se define la intensidad "I" de radiación como la magnitud del valor medio del vector densidad de corriente o del vector de Poynting:

$$I = \overline{|\vec{J}|} = \overline{|\vec{S}|} = E^2/2\mu = \eta h\nu c \quad (6)$$

En la interacción de la radiación con la materia, durante la dispersión, el esparcimiento, absorción, la transmitancia y la reflexión, el flujo de energía "Φ", se define en una sección

transversal del material de interacción de área "$\vec{A}$" y espesor "$\vec{s}$" y volumen "δV" (Jiménez B). Durante el flujo se define la transmitancia "T" como:

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad (7)$$

Donde "I_0"es la intensidad de radiación incidente a la sección de material de volumen "δV", e "I_t" es la transmitida a la salida del volumen de material de espesor "$\vec{s}$". La transmitancia también se puede expresar porcentualmente, como:

$$T\% = \frac{I_t}{I_0} \,.\, 100\ \% \quad (8)$$

Dependiendo del valor de T, el material se clasifica en transparente, opaco, traslucido o no transparente.

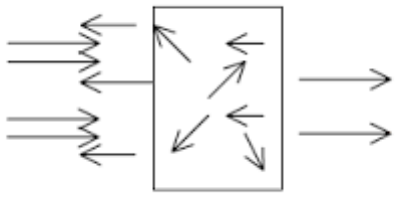


Figura 71. Transmitancia de un haz de radiación en un cuerpo(Brunatti & Martín, 2015)

LaFigura 71muestra un haz de radiación antes y después de haber pasado a través de una capa de área transversal "$\vec{A}$"y espesor "$\vec{s}$" de algún elemento. Como consecuencia de interacciones entre los fotones y las partículas absorbentes, la intensidad del haz es atenuada y podemos ver como este haz es redistribuido, a través de la dispersión y el esparcimiento.(Brunatti & Martín, 2015)

Absorbancia

Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo traslúcido, una parte de esta luz es absorbida por el cuerpo, y el haz de luz restante atraviesa dicho cuerpo. A mayor cantidad de luz absorbida, mayor será laabsorbancia del cuerpo, y menor cantidad de luz será transmitida por dicho cuerpo. Como se puede deducir, laabsorbancia y la transmitancia son dos aspectos del mismo fenómeno.(Brunatti & Martín, 2015) La absorbancia, a una determinadalongitud de onda lambda, se define como

$$A_\lambda = -\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (9)$$

Donde "I_a"es la intensidad de radiación absorbida en la sección de material de volumen "δV"

Como se ve en la representación de laFigura 71, ocurre reflexión en las interfaces: aire-pared, tanto como en la pared-solución. La atenuación del haz resultante es sustancial. Además, la atenuación de un haz puede ocurrir por dispersión de las moléculas grandes y a veces por absorción de las paredes del recipiente.

Reflactancia

Durante el flujo se define la reflactancia "R" como:

$$R = \frac{I_r}{I_0} \qquad (10)$$

Donde "I_r"es la intensidad de radiación reflejada en el área incidente de la sección de material de volumen "δV", y de espesor "$\vec{s}$".(Jiménez B) La Reflactancia también se puede expresar porcentualmente, como:

$$R\% = \frac{I_r}{I_0} \,.\, 100\ \% \qquad (11)$$

Dependiendo del valor de R, el material se clasifica en transparente, opaco, traslucido o no transparente.

Elipsometría y reflectometría

En ocasiones la elipsometría y la reflectometría se emplean para determinar constantes ópticas de un material. Para algunos materiales, propiedades como la porosidad, o el tamaño del grano de metal, pueden afectar sus constantes ópticas aunque los valores de las nuevas constantes serán similares al del material de interés. Para el tratamiento de las constantes ópticas, estas se asumen isotrópicas, pero para varios materiales, el índice de refracción es diferente en una dirección que en la otra. Para un solo cristal, esto puede ser determinado por los ejes del cristal. Para un material policristalino, esto puede ser determinado por la orientación de los cristales. La anisotropía juega un papel muy importante en el análisis óptico, sin embargo en muchos casos, el material se puede seguir analizando correctamente. (Brunatti & Martín, 2015)

Otro factor a tener en cuenta es la polarización de la luz, cuando una fuente de luz incandescente emite un fotón, su campo eléctrico se orienta en la dirección dada, el campo eléctrico del siguiente fotón se orientará en una dirección diferente, y en general se emitirán fotones con campos eléctricos orientados en todas las direcciones a este fenómeno se le conoce como luz no polarizada. Para polarizarla muy frecuentemente se hace pasar la luz a través de un elemento óptico el cual solamente permita el paso de la luz orientada en algún sentido en particular o tener una fuente de luz, que emita luz polarizada.(Pavia, Lampman, Kriz, & Vyvyan, 2009)

Mientras las fuentes de luz incandescentes son no polarizadas, la mayoría de los laser emiten luz que ser puede asumir como polarizada. La luz elípticamente polarizada se usa en elipsometría, siendo esta la razón para el nombre de elipsometría. La luz elípticamente polarizada se genera cuando dos luces linealmente polarizadas se reflejan desde una superficie bajo ciertas condiciones, la cantidad de elipticidad que se genera depende de la superficie (constantes ópticas, presencia de películas, etc.).(Ramírez Leyva, 2016)

Espectroscopía ultravioleta-visible

Este tipo de espectroscopía se conoce también como de absorción o reflectancia, ya que aprovecha las variaciones de color y sobre tonos presentadas en los compuestos químicos debido a las transiciones electrónicas originadas por la absorción de radiación que tiene ligar en la región visible de luz y sus alrededores, es decir ultravioleta cercano e infrarrojo cercano; correspondientes a longitudes de onda entre los 300 y 2500nm, donde se generan transiciones vibracionales debido a las grandes longitudes alcanzadas. Principalmente estos fenómenos permiten determinar los tipos de enlaces asociados a un compuesto a través de los picos de absorción generados, así como el análisis de semiconductores.(Hernandez & Jimenez Alvarez, 2008)

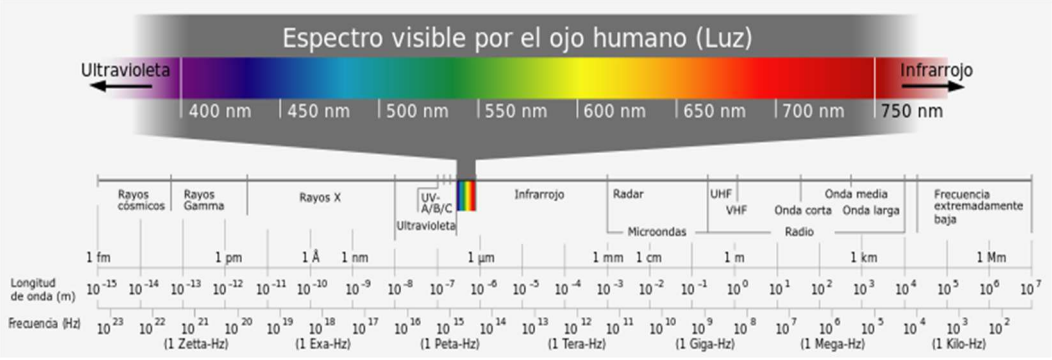


Figura 72. Espectro electromagnético en longitudes de onda en m y frecuencia en Hz. (Hernandez & Jimenez Alvarez, 2008)

Elipsometría

La elipsometría es una técnica de análisis óptica que aprovecha el cambio de estado de polarización de la luz incidente sobre un material. Para la determinación de espesores de películas delgadas, y constantes ópticas de materiales (índices de refracción, coeficiente de extinción). Donde se requiere conocer el estado de polarización del haz incidente.

La interacción luz-sólido se relaciona con el hecho de que parte de la luz es reflejada por el sólido por medio de las leyes de transmisión y reflexión de ondas planas.
Los coeficientes de Fresnel y la ley de Snell:(Documento, Propiedades ópticas)

$$R_p = \frac{R_p}{E_p} = \frac{N_1 Cos\phi_0 - N_0 Cos\phi_1}{N_1 Cos\phi_0 + N_0 Cos\phi_1} \quad (12)$$

Perpendicular al ángulo de incidencia:

$$R_s = \frac{R_s}{E_s} = \frac{N_0 Cos\phi_0 - N_1 Cos\phi_1}{N_0 Cos\phi_0 + N_1 Cos\phi_1} \quad (13)$$

Ley de Snell:

$$N_0 Sin\phi_0 = N_1 Sin\phi_1 \quad (14)$$

De esta manera es posible conocer la relación entre las constantes ópticas del material y la elipse resultante de la reflexión por medio de:

$$Tan\psi = \frac{|R_p|}{|R_s|} \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{R_p}{R_s} = Tan\psi e^{i\Delta} \quad (16)$$

$$\Delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (17)$$

Leyes de Reflexión y Refracción

Como se observa en laFigura 73, parte de la onda incidente es reflejada en la interfaz y la otra parte es transmitida dentro del material. El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, como se muestra.

La ley de refracción es un tanto más complicada y se puede describir a través de la ley de Snell.

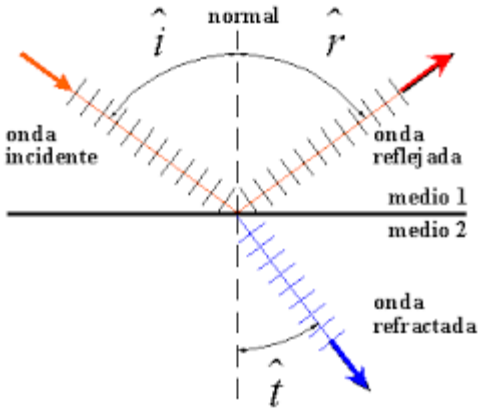


Figura 73. Onda interactuando con una interfaz plana

Plano de referencia

Para escribir el efecto de reflexión es necesario definir un plano de referencia. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**se muestra esquemáticamente una onda reflejada desde la superficie. El haz incidente y la dirección normal a la superficie definen el plano que es normal a la superficie y es llamado plano de incidencia. Se puede notar que el haz reflejado también hace parte del plano de incidencia. El ángulo de incidencia es el ángulo entre la normal y la onda incidente. El efecto de la reflexión depende del estado de la polarización de la luz incidente y el ángulo de incidencia.

Ecuaciones de Reflexión de Fresnel

La reflectancia, es la proporción de la intensidad de luz reflejada comparada con la luz incidente. Ésta cantidad es la que se mide con los diferentes equipos e instrumentos. Es importante mencionar que la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda y es necesario conocer la proporción de la amplitud de la onda reflejada en comparación con la onda incidente. (Costa Quintana & López Aguilar, 2007)

Cuando se considera una sola interfaz, esta proporción se llama el coeficiente de reflexión de Fresnel, y será diferente para las ondas-s (Ondas con polarización tal que se encuentran apuntando hacia afuera del plano de incidencia) y las ondas-p (Ondas con polarización tal que se encuentran apuntando de forma paralela al plano de incidencia).

Ángulo de Brewster

David Brewster fue quien postulo una ley cuantitativa para determinar el ángulo de polarización, quien luego de muchas mediciones con diversas superficies encontró que la tangente del ángulo de polarización es igual al índice de refracción y estableció que cuando un haz de luz es polarizado por reflexión la suma de los ángulos de incidencia y refracción

es un ángulo recto, es decir que para un cierto valor del ángulo de incidencia (aquél para el cual los rayos reflejado y refractado forman un ángulo de 90º) el factor de transmisión vale cero para la luz linealmente polarizada en la dirección paralela al plano de incidencia.(Hernandez & Jimenez Alvarez, 2008)

Por tanto cualquier superficie reflectante puede servir como polarizador lineal. El ángulo de Brewster de incidencia de la luz, viene dado por

$$\tan \emptyset_B = \frac{n_1}{n_2} \quad (18)$$

Donde n2 es el índice de refracción del segundo y n1 es el índice de refracción del primer medio.

Es decir

$$\cos \emptyset_2 = \sin \emptyset_B \quad (19)$$

Lo cual nos corrobora la existencia del ángulo recto entre el haz reflejado y el transmitido. Una característica del ángulo de Brewster para dieléctricos, es que en este ángulo de incidencia los cambios de fase de la onda-p en reflexión cambian abruptamente de 0 a 180°. El ángulo de Brewster es una función del índice de refracción, y como a su vez el índice de refracción es una función de la longitud de onda, el ángulo de Brewster es función de la longitud de onda. (Zamorano)

Conceptos Físicos

Fundamentos de campos electromagnéticos

Onda electromagnética

La descripción de la luz como una onda electromagnética fue dada por James Clerk Maxwell a través de 4 ecuaciones donde se propone una teoría que proporciona una conexión definida entre la luz y la electricidad. (Cabrera, López, & López, 2001)

Considerando tres dimensiones, trabajando con función circular, una solución que proviene de la ecuación de Maxwell es:

$$\vec{E}(\vec{r}t) = \overrightarrow{E_0} e^{(-\frac{j2\pi\tilde{N}}{\lambda}.\hat{q}.\vec{r})} e^{-j\omega t}) \quad (20)$$

Donde $\vec{r}$ es el vector posición, $\hat{q}$ es el vector unitario en la dirección de la propagación de onda,Ñes el índice complejo de refracción, ωes la frecuencia angular. Debido a la alta frecuencia angular, no se puede medir la amplitud del campo eléctrico directamente pero si se mide el flujo de energía debido a la radiación. La cantidad de energía que es transferida a través de la unidad de área, que es perpendicular a la dirección de propagación, es llamada la intensidad de la onda$I$ que es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda. (Cabrera, López, & López, 2001)

$$I \propto {E_0}^2 \quad (21)$$

En la reflectometría se emplea la intensidad de onda, en cambio en la elipsometría se utiliza la amplitud de onda. Aunque las ondas de luz pueden encontrarse en diferentes formas, normalmente se aplican las técnicas utilizando ondas planas.

Condiciones de frontera

Interpretar las reacciones y la física que se origina con la interacción entre dos materiales ya sean aislante –conductor o alguna de las cuatro posibilidades requiere en primera medida una base contundente y es allí cuando se acude a las ecuaciones de maxwell con las que se gestara una idea de la naturaleza del campo eléctrico y magnético.(Cabrera, López, & López, 2001)

Ecuaciones de maxwell para campo eléctrico

Las siguientes son las ecuaciones de maxwell en su forma diferencial y bajo las condiciones de vacío.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (22)$$

$$\vec{\nabla} x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (23)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (24)$$

$$\vec{\nabla} x \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (25)$$

Condiciones de frontera para campo eléctrico

Si se visualiza la interacción entre dos materiales con propiedades electromagnéticas definidas que pueden ser descritas por las ecuaciones de Maxwell, uno al lado del otro ubicados en una región 1 y 2 consecuentemente, donde surge una región pequeña intermedia denominada capa de transición (Figura 74) que varía en la medida en la que la proximidad de los materiales es mayor y por consiguiente podría suponerse que en algún instante tanto las condiciones y la naturaleza de cada medio para este caso referentes al campo eléctrico se vea perturbada por dicha interacción, de manera que al identificar estas variaciones suela denominárseles como condiciones de frontera. (Landau & Lifshits, 1981)

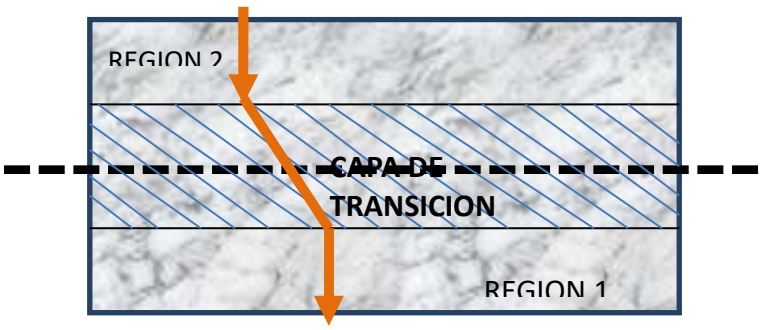


Figura 74. Capa de transición entre dos regiones con propiedades definidas

Ahora bien todo puede ser más claro si la capa de transicion se traslada a un plano x, y, z donde esta se asemeja a un cilindro de altura h paralelo al eje z segmentado por el plano x, y para obtener las dos regiones mencionadas y con una componente normal a la región 2 ($\hat{\boldsymbol{n}}_{\boldsymbol{2}}$) en dirección $\hat{\boldsymbol{k}}$, otra a la región 1 ($\hat{\boldsymbol{n}}_{\boldsymbol{1}}$) en dirección $-\hat{\boldsymbol{k}}$ y una normal al borde del cilindro ($\hat{\boldsymbol{n}}_{\boldsymbol{b}}$). De manera que habrá un flujo tanto en la cara superior como inferior y por los bordes.

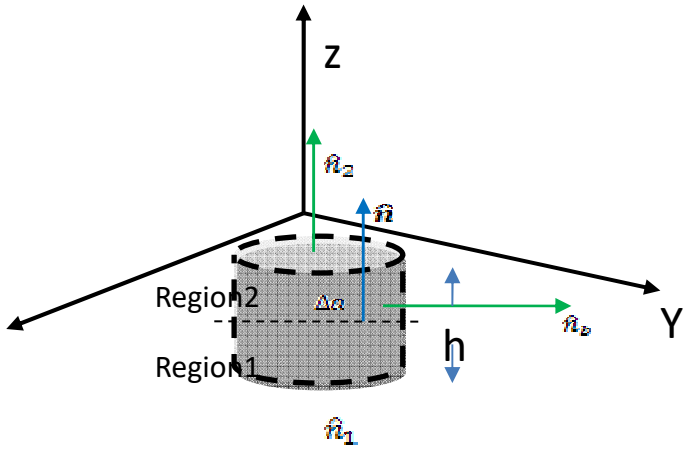


Figura 75. Capa de transición vista en el plano x,y,z.

Suponiendo un $\vec{\boldsymbol{E}}$ constante para toda la superficie cerrada debe asumirse un área muy pequeña $\Delta\boldsymbol{a}$ de tal manera que este puede ser descrito como la suma de las componentes para cada cara y los bordes (definida como b), es decir, de la siguiente manera:(Hernandez & Jimenez Alvarez, 2008)

$$\oint_{\boldsymbol{s}} \vec{\boldsymbol{E}} * \boldsymbol{d}\vec{\boldsymbol{a}} = \vec{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{1}} * \Delta\overrightarrow{\boldsymbol{a_1}} + \vec{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{2}} * \Delta\overrightarrow{\boldsymbol{a_2}} + \boldsymbol{b} \qquad (26)$$

Teniendo en cuenta que a la superficie puede asociársele una dirección a través de su vector normal es decir $\boldsymbol{d}\vec{\boldsymbol{a}} = \hat{\boldsymbol{n}} * \boldsymbol{\partial a}$y apoyándose en el teorema de la divergencia del campo eléctrico (relación de integral de una superficie con la integral de volumen de su divergencia), la anterior relación puede reescribirse como

$$\hat{\mathbf{n}} * \left(\vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{2}} - \vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{1}}\right)\Delta\mathbf{a} + \mathbf{b} = \int_{\mathbf{v}} \vec{\nabla} \cdot \vec{\mathbf{E}}\, \mathbf{dv} \qquad (27)$$

Donde el volumen de la superficie se expresa como su altura y la variación del área $\mathbf{h} * \Delta\mathbf{a}$y aprovechando el hecho de que $\hat{\mathbf{n}}$ es el vector normal a la superficie en general que conserva la misma dirección que $\hat{\mathrm{n}}_1$ y contraria a $\hat{\mathrm{n}}_2$.

$$\hat{\mathbf{n}}\left(\vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{2}} - \vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{1}}\right) * \Delta\mathbf{a} + \mathbf{b} = \int_{\mathbf{v}} \frac{\boldsymbol{\rho}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{0}}} \mathbf{h}\Delta\mathbf{a} = \frac{\Delta\mathbf{q}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{0}}} \quad (28)$$

Ahora bien, si el ancho de la capa de transición se hiciese más pequeño (con el propósito de acercarnos al modelo ideal) es decir que $\mathrm{h} \to 0$ y proporcionalmente b, cada vez más despreciables aun cuando la carga contenida se mantuviera constante en esta región.(Landau & Lifshits, 1981)

$$\hat{\mathbf{n}}\left(\vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{2}} - \vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{1}}\right) * \Delta\mathbf{a} + \mathbf{b} = \left(\lim_{\mathbf{h}\to\mathbf{0}} \frac{\boldsymbol{\rho}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{0}}} \mathbf{h}\right) \Delta\mathbf{a} \quad (29)$$

De manera que la componente normal del campo eléctrico para cada superficie puede expresarse como $\mathrm{E_n} = \hat{\mathrm{n}} * \mathrm{E}$ y la expresión adquiere la siguiente forma

$$\left(\mathbf{E_{n2}} - \mathbf{E_{n1}}\right) = \left(\lim_{\mathbf{h}\to\mathbf{0}} \frac{\boldsymbol{\rho}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{0}}} \mathbf{h}\right) \quad (30)$$

Como se mencionó al disminuir el ancho de la capa de transición la carga total contenida en el cilindro debía permanecer constante y a su vez tratarse como una carga superficial con una densidad σpor lo que es correcto hacer la siguiente asociación aprovechando el resultado obtenido en (1).

$$\left(\lim_{\mathbf{h}\to\mathbf{0}} \frac{\Delta\mathbf{q}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{0}}} \mathbf{h}\right) = \Delta\mathbf{q} \quad (31)$$

$$\left(\lim_{\mathbf{h}\to\mathbf{0}} \frac{\Delta\mathbf{q}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{0}}} \mathbf{h}\right) \Delta\mathbf{a} = \boldsymbol{\sigma}\Delta\mathbf{a} \quad (32)$$

$$\left(\lim_{\mathbf{h}\to\mathbf{0}} \frac{\Delta\mathbf{q}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{0}}} \mathbf{h}\right) = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{0}}} \quad (33)$$

Llegando así a la primera condición de frontera para las componentes normales del campo eléctrico de cada superficie cuando se complementa la expresión (2) con la (3).

$$\left(\mathbf{E_{n2}} - \mathbf{E_{n1}}\right) = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{0}}} \quad (34)$$

Con la cual se observa que solo existe una discontinuidad en estas componentes si y solo si existe una carga superficial sobre la superficie de separación entre las dos regiones.

Componentes tangenciales del campo eléctrico

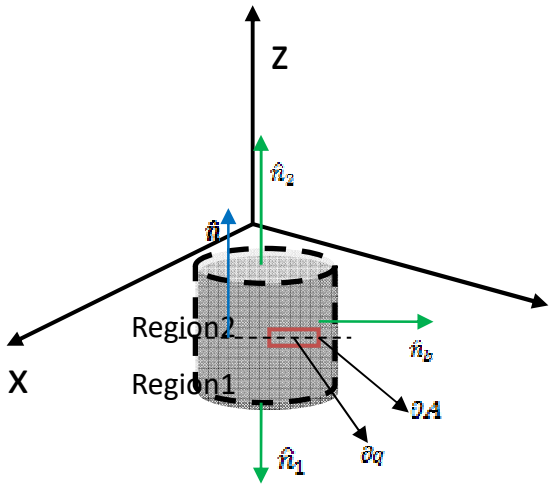


Figura 76. Representación plano (x,y,z) de la región de transición con sus diferenciales.

Partiendo del flujo descrito y seccionando una porción del área ∂A , se podrá aplicar la ley de Gauss de la siguiente manera

$$\oint_{\partial A} \mathbf{E} * \partial \mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{q}}{\boldsymbol{\varepsilon_0}} \qquad (35)$$

APÉNDICE B.

Software y protocolos de comunicación ActiveX - LabVIEW.

LabVIEW

LabVIEW es un entorno de desarrollo altamente productivo que permite la creación de aplicaciones superiores que interactúan con datos o señales del mundo real, ofrece una amplia variedad de herramientas en un solo ambiente, asegurando gran compatibilidad y permitiendo el fácil acople entre elementos.[2]

Se basa en un modelo de programación intuitiva y con diagrama de flujo de datos que ofrece una curva de aprendizaje corta respecto a la programación tradicional, teniendo en cuenta que los nodos (operaciones o funciones) operan los datos tan pronto como estén disponibles contraria a la forma secuencial de la mayoría de los lenguajes de programación. LabVIEW permite ver el "flujo" de datos a través de la aplicación gráfica con los cables de conexión de la salida de un nodo a la entrada de otro.

El beneficio práctico del enfoque gráfico es que pone más énfasis en los datos y las operaciones que se realizan con esto, también permite trabajar en un nivel más alto de abstracción, emplear prácticas de programación avanzadas como diseño orientado a objetos, la encapsulación, y el código de perfiles.

LabVIEW contiene un potente compilador de optimización que examina su diagrama de bloques y genera directamente el código máquina eficiente, evitando la penalización de rendimiento asociada con lenguajes interpretados o compilados. El compilador también puede identificar segmentos de código sin dependencias de datos y automáticamente divide su aplicación en múltiples hilos que se pueden ejecutar en paralelo en procesadores multi-núcleo, produciendo un análisis mucho más rápido y un control más sensible.

La combinación de trabajar con bloques de construcción de alto nivel y una mejor visibilidad de los resultados de la ejecución de su aplicación hace que el tiempo dedicado a rastrear errores en el código sea mucho más corto.
LabVIEW adapta su lenguaje de programación mediante la incorporación de cientos de funciones especializadas y algoritmos que no están normalmente incluidos en los lenguajes de programación de propósito general.

---

[2][Manual de descripción e introducción a LabVIEW, en línea]. [Consultado en Febrero 2016]. Disponible en http://www.ni.com/academic/students/learnlabview/esa/environment.htm

Activex

ActiveX es un conjunto de tecnologías de Microsoft que permite reutilizar código y enlazar programas individuales para satisfacer necesidades informáticas basado en las tecnologías de modelo de objetos componentes (ComponentObjectModel) COM, ActiveX es una extensión de una tecnología anterior conocida como OLE (ObjectLinking and Embedding).3

El uso de controles o el control directo e indirecto de una aplicación pueden llevarse a cabo a partir de algunas tecnologías que hacer parte de este conjunto tales como:

ActiveX Automation

ActiveX / COM se refiere al proceso de control de un programa desde otro a través de ActiveX de forma que uno actúa como cliente y el otro como servidor, estos dos son independientes entre sí pero comparten información.

El cliente se comunica con el objeto ActiveX que el servidor abre para permitir el intercambio de información y el acceso a las propiedades y métodos del objeto; donde las propiedades son atributos y los métodos son funciones que llevan a cabo una operación en objetos. Las facilidades son diversas ya que permite que otro programa pueda establecer o recuperar los atributos de un objeto y que otras aplicaciones pueden invocar métodos.

Controles y Contenedores

Los controles ActiveX, son componentes integrables dentro de contenedores de este mismo tipo que proporcionan un extenso número de propiedades, métodos y eventos. LabVIEW es un contenedor de ActiveX y se puede alojar con controles ActiveX.

Un evento es una notificación asíncrona que viaja directamente del control al contenedor ActiveX, de acuerdo a esto es correcto hablar de cuatro tipos de eventos:

- **Requestevent** o solicitud de evento: Ocurre una vez que el control pide permiso al contenedorpara realizar una acción.

- **Beforeevent**: es enviada por el control antes de realizar una acción.

[3]http://www.ni.com/white-paper/2983/en/

- **Afterevent:** Es enviada del control al contenedor indicando que una acción fue realizada como ocurre con un Click.

- **Do event:** Hace referencia al mensaje enviado desde contenedor al control dándole las instrucciones pertinentes para realizar una acción antes de que se ejecute una acción predeterminada.

Como se menciona ActiveX es una tecnología orientada a eventos que permite que un programa informe cuando ocurre algún evento para que otro/s programa/s pueden reaccionar. LabVIEW soporta el procesamiento de eventos a través de ActiveX por medio de la automatización y el embebimiento de controles ActiveX.

Funciones de automatización ActiveX

InvokeNode

Es utilizado para la invocación de métodos y acciones de referencia. Una acción de referencia empleada es el Refnum que permite asociar el objeto y los métodos que posee.

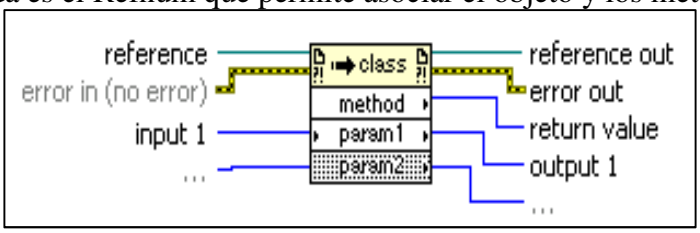


Figura 77. Vista de Nodo de invocación en diagrama de bloques.

Los atributos de este nodo son:

- **Input 1..n**: Hace referencia a las entradas necesarias para que el metodo del nodo de invocación pueda ser ejecutado.
- **Returnvalue**: Hacer referencia a los valores de salida del método invocado en el caso en que este deba retornar algún valor.
- **Output 1..n** :Hacer referencia a los atributos de salida del método invocado.

Cuando se tiene creado un objeto ActiveX puede asociársele un nodo de invocación. Una vez seleccionado el nodo, puede seleccionarse el método que se desee dependiendo del objeto creado, así mismo se desplegaran los parámetros necesarios.

PropertyNode

El propertynode se usa para acceder y modificar las propiedades de un objeto de referencia.

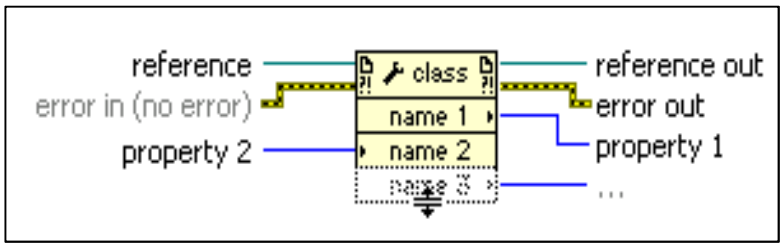


Figura 78. Vista de propertynode en diagrama de bloques

Los atributos de este nodo son:

- **Reference**: Es el número de referencia asociado al objeto cuyas propiedades se desean modificar, si la clase del nodo de propiedad es un VI no es necesario conectar esta entrada ya que adopta por defecto la clase del VI.
- **Poperty 2..n**: Hace referencia a las propiedades que se desean escribir.
- **Reference out**: Retorna la referencia sino se modifica
- **Property 1..n**: número de muestras que se quieren leer.

Register Event Callback (Not in Base Package)

Registra el llamado a un VI cuando un evento ocurre. Se usa para registrar y controlar eventos .NET y ActiveX. LabVIEW usa la entrada de referencia conectada para determinar los eventos que se quieren registrar.
Este se puede modificar para registrar multiples eventos de callbacks en una sola vez para el mismo objeto o para un objeto diferente.

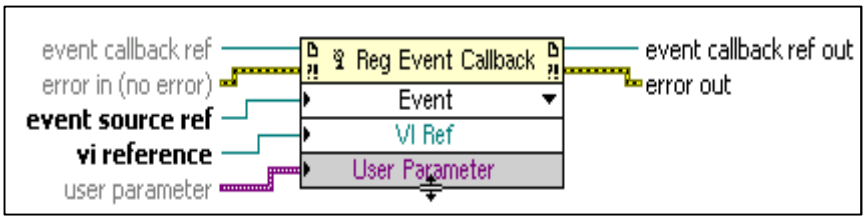


Figura 79. Vista de RegisterEventCallBack en diagrama de bloques

Los atributos de esta función son:

- **Eventcallbackref**: Recibe una referencia de un registro de un evento callback existente.

- **Eventsourceref**: Acepta un objeto .NET o una referncia de automatizacion ActiveX, permitiendo seleccionar el tipo de evento que se quiere generar.Este solo recibe referncia a objetos locales.
- **VI reference**: Es el VI referenciado al callback, este debe enviar la data del registro del callback.
- **Userparameter**: Contiene los datos que se le quieren pasar al VI callback cuando el objeto genera un evento.
- **Eventcallbackrefout**: Retorna una referencia a otro callback de registros.

Se usa para registrar unicamente eventos .NET and ActiveX, permitiendo el registro dinámico de eventos.

UnregisterForEvents

Anula el registro de todos los sucesos relacionados con el registro de un evento etiquetado con un Refnum cuando este ya no sea necesario, ya que en el caso en que no se realice se sigue generando una cola de acontecimientos cada vez que el bloque sea ejecutado consumiendo memoria.

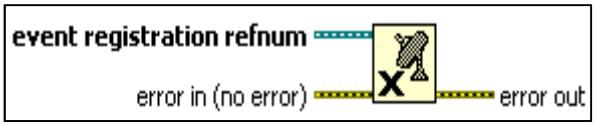


Figura 80. Vista de RegisterEventRefnum en diagrama de bloques

Los atributos de esta función son:

- **Eventregistrationrefnum**: Es una referencia a un registro de eventos existente.
- **Error in**: Describe las condiciones de error que se producen antes de que la función sea ejecute.
- **Error out**: Contiene información del error, si se produjo antes de su ejecución pasa directamente la información desde error in.

Errores

Error in

Hace referencia a una bandera que indica si existe alguna anomalía antes de que el nodo se ejecute por lo tanto si un error es detectado antes de ejecutarse el método no se ejecuta, su

valor por defecto es no error. Cabe anotar que si el error ocurre durante la ejecución, la descripción de dicho error puede visualizarse a través de General error Handler.

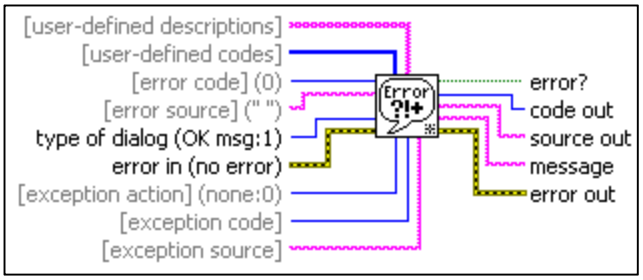


Figura 81. Visualizacion de Genereal error Handlercusndo ocurre un error.

Error out

Indica si al nodo de invocación le llega un error in o si ocurre un error durante su ejecución, este puede ser conectado a un "error in" de otro nodo de invocación.

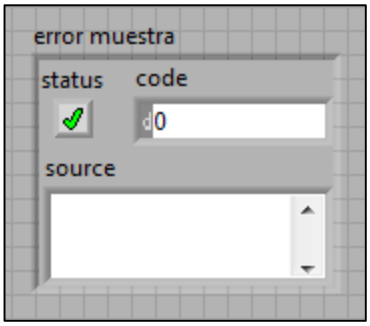


Figura 82. Visualización de error en panel frontal.

Los atributos de la señal de error out son:

- **Status**: Es un atributo booleano que visualmente se presenta como un checkmark (FALSE) si no hay error o es una advertencia y como unacheckmarkcross (TRUE) en el caso que si se presente error.
- **Code**: Es un atributo numérico que depende del status, si este es falso el código es ceroy si es true se muestra el código correspondiente del error.
- **Source**: Es un atributo de tipo string que describe el origen del error o la advertencia y en algunos casos el VI o la función que lo produce.

Integración LabVIEW y ActiveX

LabVIEW como servidor o cliente ActiveX puede interactuar con otros programas desdesu interfaz de programación. En este caso, LabVIEW actúa como el cliente y solicita información del servidor u otro programa. Así mismo, otros clientes ActiveX pueden interactuar con el servidor ActiveX de LabVIEW.

- LabVIEW como un cliente de Automatización

LabVIEW proporciona funciones en su API que le permiten actuar como cliente de automatización con cualquier servidor de automatización.

- LabVIEW como un servidor de automatización

Otros programas pueden interactuar con el servidor de automatización de LabVIEW utilizando la automatización de ActiveX. Se usa un cliente de automatización poniendo en marcha programación LabVIEW. Además, los ejecutables de LabVIEW pueden ser servidores de automatización ActiveX.

- LabVIEW como un contenedor ActiveX

LabVIEW puede incrustar cualquier control ActiveX, haciendo uso de las propiedades y métodos del control.

- ActiveX Eventos y LabVIEW

LabVIEW soporta eventos ActiveX a través de la automatización y controles ActiveX embebidos en contenedores.

ActiveX y Thorlabs

Control ActiveX y motor de paso

El ActiveX Control de nombre Motor permite al usuario controlar uno o más de los controladores de la serie APT. Para direccionar un controlador particular, cada unidad está programada de fábrica con un número único serial de 8 dígitos. Este serial es la clave de operación del software ATP y es usado para enumerar y comunicar independientemente múltiples unidades conectadas a un solo bus USB. Este número serial debe ser especificado usando la propiedad HWSerialNum antes de que el control ActiveX pueda comunicarse con la unidad de Hardware. Esto puede hacerse en el momento de diseño ó en el momento de ejecución. La apariencia del control ActiveX GUI (Graphicaluser interface) será cambiado al formato requerido cuando se ingrese el numero serial correspondiente.
Los métodos y propiedades del Control ActiveX Motor pueden usarse para realizar actividades como posicionar etapas a su posición de referencia, movimientos absolutos y relativos, cambiar los perfiles de velocidad etc. Con pocas excepciones, estos métodos son genéricos y aplican igualmente a unidades duales y simples.

Identificación Objeto ActiveX Nano rotadores y detector en LabVIEW

La creación del contenedor ActiveX en el panel frontal y la selección del objeto a través de la opción del menú desplegable Insert ActiveX Object permiten el reconocimiento de los tres equipos con la etiqueta de MG17Motor utilizado para interactuar con motores de tipo controlador de hardware y pone a su disposición los métodos y propiedades para su manipulación.

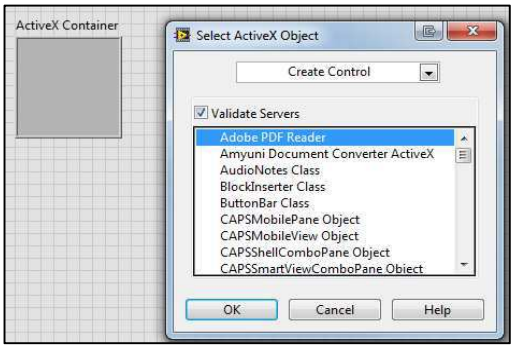


Figura 83.Selección control ActiveX panel frontal



Figura 84. Vista de control ActiveX generico en panel frontal.

Ya que la etiqueta de MG17Motor es genérica, debe usarse un PropertyNode que permita llevar a cabo el reconocimiento total del hardware y establecer comunicación con el controlador, En este se determinan las siguientes propiedades:

HWSerialNum

Propiedad que especifica el número de serie de la unidad de hardware que se asocia al control ActiveX mediante un dato de tipo entero largo de 32-bits el dispositivo a ser utilizado. Cada dispositivo es programado con un número único de serie de 8 dígitos.

Una vez asignado, el control ActiveX toma su apariencia y el número identificador puede verificarse en la parte superior derecha de cada contenedor.

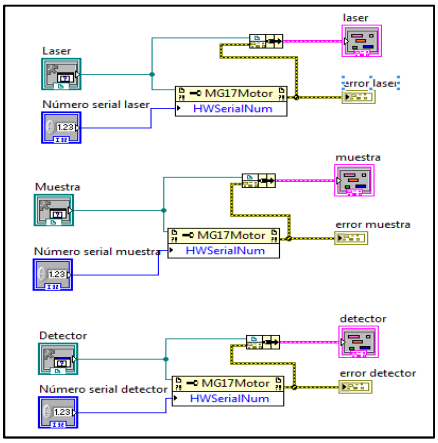


Figura 85. Asignación Numero serial en diagrama de bloques.



Figura 86. Vista en panel frontal de control ActiveX detector

En este caso los nano-rotadores serán designados como Láser, Muestra y Detector haciendo referencia a los dispositivos que deben mover y sus números de serie son:

Dispositivo	Número serial S/N
Detector	4081473
Laser	90816897
Muestra	90816898

Tabla 21. Números seriales nano rotadores y detector.

StartCtrl

Con el reconocimiento del control este método habilita la comunicación con el controlador de los motores en este caso el módulo BSC201 y carga de manera gráfica todas las funciones de cada dispositivo.

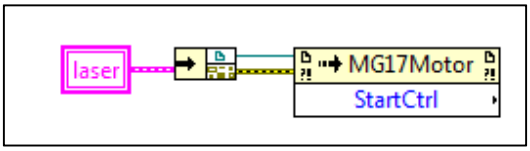


Figura 87. Método StartCtrl en diagrama de bloques

Cluster error y referencia

Para el propósito de la aplicación se crea un clúster que contiene dos elementos, el error y la referencia (laser, muestra y detector) con el fin de generalizar la estructura y utilizar una sola variable reconocida como objeto

La creación de clúster permite la agrupación de datos de diferentes tipos y la simplificación de los diagramas con la supresión de conexiones, para ellos se cuenta con una serie de funciones que permiten ensamblar, ordenar y modificar los clúster, a continuación se muestran algunas de ellas.

Bundle

Ensambla un clúster a partir de elementos individuales permitiendo cambiar los valores de cada elemento cuando este se encuentra conectado a una función específica

.

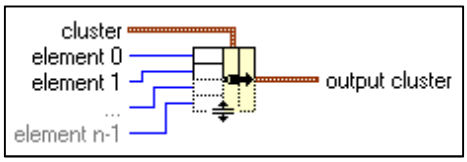


Figura 88. Esquema de entrada y salida función Bundle.

Unbundle

Separa un clúster en cada uno de sus elementos individuales en el mismo orden en que aparecen en la agrupación.

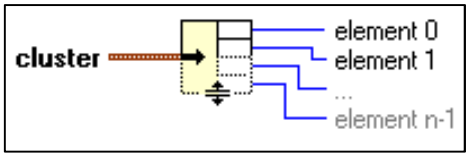


Figura 89. Esquema de entrada y salida función Unbundle.

Con las propiedades mencionadas, se construye el objeto global que toma la siguiente apariencia:

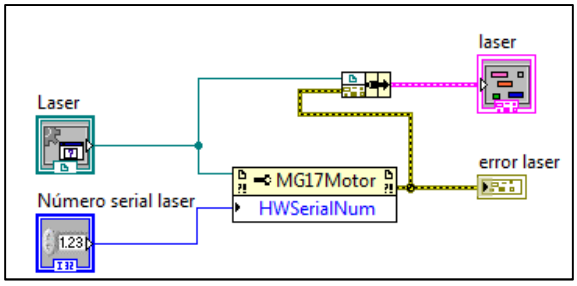


Figura 90. Creacion de clúster objeto.

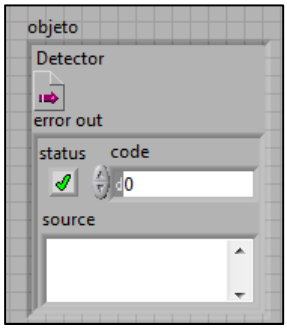


Figura 91. Vista en panel frontal del clúster y sus elementos**.**

Creación de Sub VI

Uno de los conceptos principales de la programación en LabVIEW es la modularidad, con la que se propone el uso de módulos o partes pequeñas que a su vez constituyen un objetivo global; para ellos se utilizan los Sub VI o subrutinas virtuales que pueden ser llamadas desde una aplicación principal.

Estos segmentos de programa otorgan un carácter jerárquico a las aplicaciones ya que como se menciona pueden ser llamados una y otra vez dentro de un programa e incluirse uno dentro de otro según se requiera para construir una estructura a manera de capaz.

La creación de estos módulos puede llevarse a cabo de dos maneras, la primera como un VI común que después puede incluirse desde el diagrama de bloques en el menú **Select VI** y adjuntando la ruta en la que se encuentra almacenado el archivo.

La segunda manera es seleccionando la porción de programa y dirigiéndose a **Edición, Crear Sub VI** se generará el archivo; es importante tener en cuenta las variables que se definirán como entradas y salidas, así como los tipos de datos.

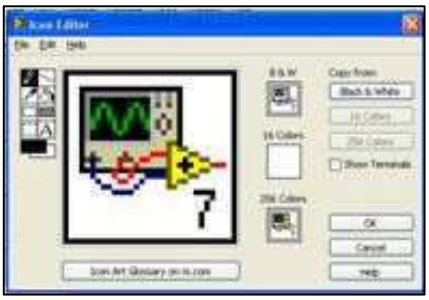


Figura 92. Ventana de edición apariencia Sub VI.

Una vez creado puede accederse a las diferentes propiedades para editar el orden de asignación de parámetros y la apariencia del panel conector.

Nota: Es importante resaltar que en adelante el uso de algunos métodos y propiedades de los dispositivos se generalizará a través de estos Sub VI, así como algunas rutinas que permitan el desarrollo completo del sistema de supervisión y control para la estación de espectroscopía.

SetHomeParams

Método LabVIEW que permite modificar los parámetros de referencia del sistema para los nano-rotadores como Velocidad, nivel de offset, canal de comunicación y dirección de movimiento.

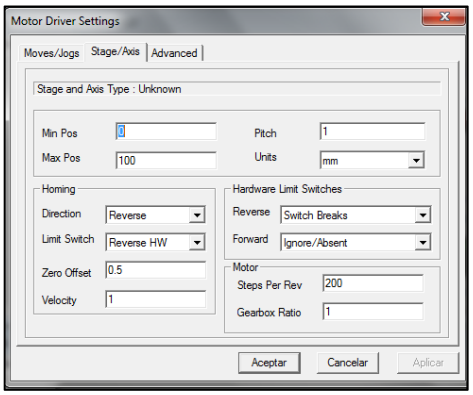


Figura 93. Vista de configuración de parámetros en APTUser.

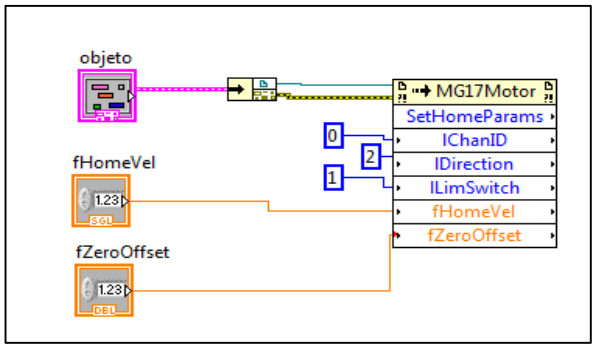


Figura 94. Vista en diagrama de bloques método SetHomeParams.

Los atributos de este método son:

- IChanID

Constante que representa el canal individual de comunicación con la unidad APT. Cuando la constante es 0 identifica el canal 1, cuando es 1 selecciona el canal dos en caso de unidades duales y 10 para la selección de ambos canales.

- IDirection

Este parámetro indica el sentido de dirección para el inicio ya sea hacia adelante (1) o hacia atrás (2).

- ILIMSwitch

Identifica el final de carrera asociado a la posición inicial en el caso de 1 como inversa y 4 hacia adelante.

- FHomeVel

Hace referencia a la velocidad a la que los motores se mueven durante su posicionamiento inicial.

- fZeroOffset

Hace referencia a la distancia en mm o grados del final de carrera desde la posición de inicio.

En el caso de la velocidad se configura inicialmente la misma velocidad para todos los dispositivos y el offset se asigna de 6 mm para el detector, 0.015 grados para el láser y 0.01 grados para la muestra de acuerdo a la desviación en grados que presentan los dos últimos respecto a la referencia cero.

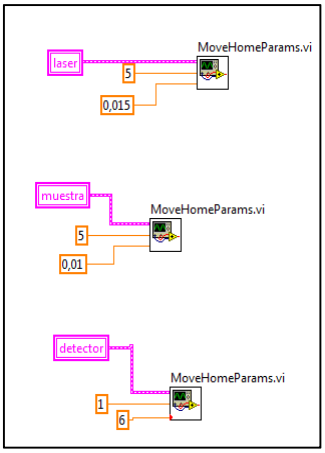


Figura 95. Sub VI´S para asignación de parámetros iníciales nano rotadores y detector en diagrama de bloques LabVIEW.

StageAxisInfo

Método que modifica características de la estación asociadas del detector como mínima posición, máxima posición, unidades y canal de comunicación.

Los atributos de este método son:

- IChanID

Constante que representa el canal individual de comunicación con la unidad APT. Cuando la constante es 0 identifica el canal 1, cuando es 1 selecciona el canal dos en caso de unidades duales y 10 para la selección de ambos canales.

- fMinPos

Representa la posición limite mínima

- fMaxPos

Representa la posición limite máxima

- IUnits

Hace referencia a las unidades ya sean en mm que se identifican con la constante (1) o grados como (2).

- fPitch

Hace referencia a la distancia en mm a recorrer por el tornillo de avance del motor por cada revolución.

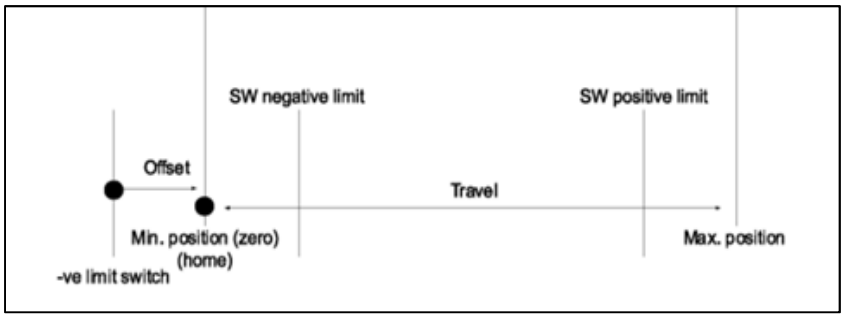


Figura 96. Descripcion atributos StageAxis para detector.

En este caso se incluyen los límites físicos de 4mm como posición máxima y las unidades codificadas en 1 para los mm.

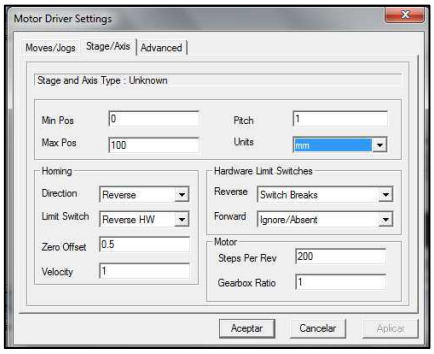


Figura 97. Vista de configuración de parámetros en APTUser.

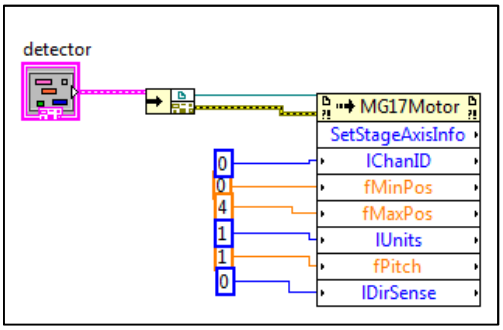


Figura 98. Vista en diagrama de bloques método SetStageAxisInfo

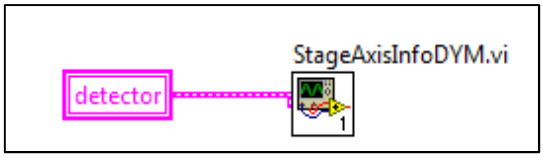


Figura 99. Sub VI para asignación de parámetros Iníciales Detector.

Ocurrencias y Eventos

El uso de ocurrencias o sucesos permite el control sobre procesos síncronos que se desarrollan dentro de una aplicación virtual VI o que hacen parte de ella y los eventos hacen referencia a las notificaciones de las actividades que se llevan a cabo en cada uno de estos procesos. Cabe resaltar que esto permite mejoras en el tiempo de ejecución del programa y la detección ágil de cambios en el mismo. El uso de eventos reduce el sondeo continuo de estados en los controles del panel frontal ya que se ejecuta un control específico cada vez que el usuario realiza una acción.

Para la creación de la ocurrencia, su inicialización y generación de tiempos de espera se utilizan las siguientes funciones:

- GenerateOccurrence

Genera un suceso que puede pasar a una espera de tiempo o ser inicializado.

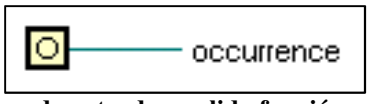


Figura 100. Esquema de entrada y salida función generateoccurrence.

- Set Occurrence

Inicializa la ocurrencia a la que es conectado, cambiando es estado de espera para los nodos que esperan la ocurrencia.



Figura 101. Esquema de entrada y salida función Set occurrence.

- WaitOccurrence

Espera a la función Set occurrence para que esta puede ser establecida.

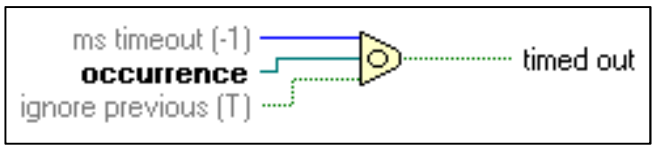


Figura 102. Esquema de entrada y salida función Waitoccurrence.

Sub VI MoveAbsolute

- Clúster

Objeto (laser, muestra), posición actual (laser, muestra).

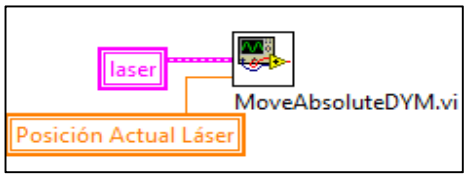


Figura 103. Sub VI método MoveAbsolute

MoveAbsoluteEx

Método que inicializa un movimiento absoluto con posiciones específicas.

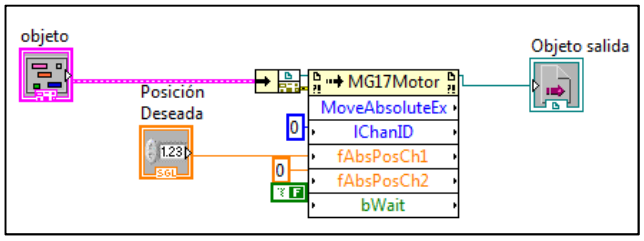


Figura 104. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método MoveAbsoluteEx.

Los atributos de este método son:

- IChanID

Constante que representa el canal individual de comunicación con la unidad APT. Cuando la constante es 0 identifica el canal 1, cuando es 1 selecciona el canal dos en caso de unidades duales y 10 para la selección de ambos canales.

- fAbsPosCh1

Este parámetro indica la posición a la que debe desplazarse el dispositivo cuando se utiliza el canal 1, en este caso el nombre de la variable es posición deseada.

- fAbsPosCh2

Este parámetro indica la posición a la que debe desplazarse el dispositivo cuando se utiliza el canal 2.

Sub VI StopImmediateDYM

Clúster objeto (laser, muestra, detector).

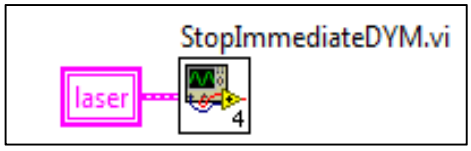


Figura105.Sub VI MétodoStopImmediate

StopImmediate

Método que detiene el movimiento del motor inmediatamente.

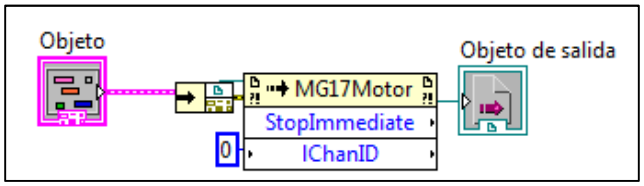


Figura 106. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método StopImmediate

El atributo de este método es:

- IChanID

Constante que representa el canal individual de comunicación con la unidad APT. Cuando la constante es 0 identifica el canal 1, cuando es 1 selecciona el canal dos en caso de unidades duales y 10 para la selección de ambos canales.

Sub VI StepJog

- Parámetros de entrada

Clúster objeto (laser, muestra, detector) y tamaño del paso (laser, muestra, detector).

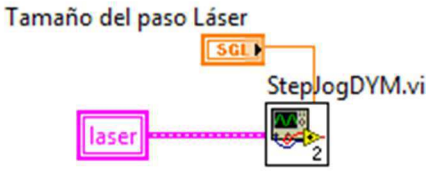


Figura 107. Sub VI método MoveAbsolute

SetJogStepSize

Método que inicializa el tamaño de paso corto a realizar.

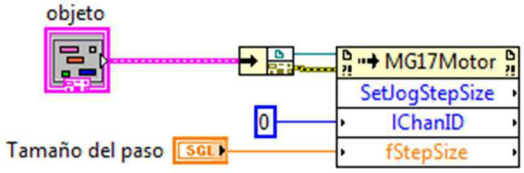


Figura 108. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método MoveAbsoluteEx

Los atributos de este método son:

- IChanID

Constante que representa el canal individual de comunicación con la unidad APT. Cuando la constante es 0 identifica el canal 1, cuando es 1 selecciona el canal dos en caso de unidades duales y 10 para la selección de ambos canales.

- fStepSize

Constante de tipo real que indica en grados el número de pasos a realizar.

Sub VI MoveJog

Parámetros de entrada

Clúster objeto (laser, muestra, detector) y dirección (laser, muestra, detector).



Figura 109..MetodoMovJog

MoveJog

Método que inicializa el movimiento de paso corto.

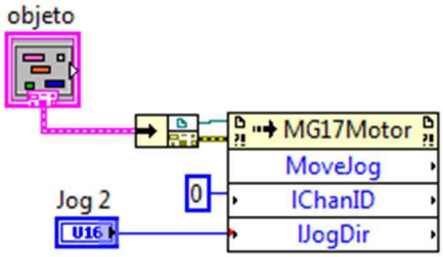


Figura 110. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método MoveJog

Los atributos de este método son:

- IChanID

Constante que representa el canal individual de comunicación con la unidad APT. Cuando la constante es 0 identifica el canal 1, cuando es 1 selecciona el canal dos en caso de unidades duales y 10 para la selección de ambos canales.

- IJogDir

Constante de tipo entero que indica la dirección del movimiento, de tal forma que “2” representa hacia atrás y “1” hacia adelante.

Sub VI SetVel

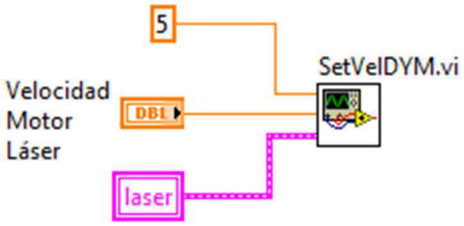


Figura 111. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método SetVelDYM

Parámetros de entrada

Clúster objeto (laser, muestra, detector). Velocidad Motor (laser, muestra, detector). Velocidad máxima

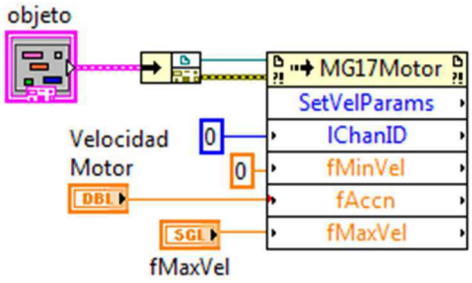


Figura 112. Vista en diagrama de bloques Sub VI Método SetVelParams

Los atributos de este método son:

- IChanID

Constante que representa el canal individual de comunicación con la unidad APT. Cuando la constante es 0 identifica el canal 1, cuando es 1 selecciona el canal dos en caso de unidades duales y 10 para la selección de ambos canales.

- fMinVel

Constante de tipo entero que representa el valor mínimo de velocidad.

- fAccn

Constante de tipo entero que hace referencia a la velocidad ingresada por el usuario.

- fMaxVel

Constante de tipo entero que representa el valor máximo de velocidad permitido para el dispositivo.

Anexos
Anexo 1

Tabla de relación entre la posición deseada, según la relación de ángulos de Snell y la posición en la que tenía la máxima intensidad para verificar el error de posición del sistema

ángulo láser (°)	ángulo muestra (°)	ángulo láser máxima intensidad (°)	Intensidad máxima (V)	error respecto a posición ideal
30.0001	14.9999	29.9507	1.5212	-0.0017
30.0001	14.9999	29.9886	1.8173	0.0363
30.0020	15.0010	29.9568	1.5579	0.0024
30.0039	15.0021	29.9502	1.5549	-0.0063
30.0061	15.0029	29.9609	1.6278	0.0027
30.0080	15.0040	29.9617	1.6405	0.0014
30.0101	15.0051	29.9585	1.6423	-0.0039
30.0101	15.0051	29.9839	1.8138	0.0215
30.0120	15.0059	29.9690	1.6908	0.0049
30.0139	15.0070	29.9826	1.8170	0.0164
30.0161	15.0080	29.9762	1.8262	0.0079
30.0180	15.0091	29.9877	1.8313	0.0173
30.0199	15.0100	29.9651	1.8572	-0.0070
30.0199	15.0100	29.9937	1.8144	0.0216
30.0220	15.0110	29.9896	1.8172	0.0154
30.0240	15.0121	29.9873	1.8098	0.0110
30.0261	15.0129	29.9873	1.8095	0.0093

30.0280	15.0140	29.9892	1.8075	0.0091
30.0299	15.0151	29.9911	1.8072	0.0089
30.0299	15.0151	30.0037	1.8152	0.0215
30.0320	15.0159	29.9943	1.8070	0.0104
30.0340	15.0170	30.0122	1.8063	0.0262
30.0361	15.0180	30.0101	1.8028	0.0220
30.0380	15.0191	30.0152	1.7999	0.0250
30.0399	15.0200	30.0118	1.7979	0.0199
30.0399	15.0200	30.0186	1.8191	0.0267
30.0421	15.0210	30.0129	1.7991	0.0189
30.0440	15.0221	30.0137	1.7987	0.0176
30.0461	15.0229	30.0148	1.7990	0.0170
30.0480	15.0240	30.0124	1.7987	0.0125
30.0499	15.0251	30.0154	1.7948	0.0134
30.0499	15.0251	30.0286	1.8227	0.0266
30.0521	15.0259	30.0122	1.7958	0.0085
30.0540	15.0270	30.0152	1.7962	0.0094
30.0561	15.0281	30.0131	1.7950	0.0052
30.0580	15.0289	30.0161	1.8001	0.0065
30.0600	15.0300	30.0212	1.7963	0.0095
30.0600	15.0300	30.0289	1.8213	0.0172
30.0621	15.0310	30.0212	1.7955	0.0074
30.0640	15.0321	30.0284	1.7907	0.0125
30.0659	15.0330	30.0325	1.7883	0.0149

30.0681	15.0340	30.0325	1.7874	0.0128
30.0700	15.0351	30.0418	1.7889	0.0201
30.0700	15.0351	30.0389	1.8203	0.0171
30.0721	15.0359	30.0440	1.7895	0.0205

Tabla 22. Tabla de relación entre la posición deseada, según la relación de ángulos de Snell y la posición en la que tenía la máxima intensidad para verificar el error de posición del sistema.