

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



Amplificador Chopper

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta

YAZMIN ROMERO VASQUEZ

Ensenada, Baja California, Agosto del 2011.

Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Amplificador Chopper

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

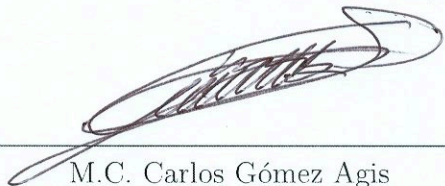
Presenta

Yazmin Romero Vasquez

Aprobada por:



Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas
Director de Tesis



M.C. Carlos Gómez Agis
Miembro del Comité



M.C. Humberto Cervantes De Ávila
Miembro del Comité

Ensenada, Baja California, Agosto del 2011.

Resumen de la tesis de **Yazmin Romero Vasquez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México, Agosto del 2011.

Amplificador Chopper

Resumen Aprobado por:



Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas
Director de Tesis

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un amplificador “chopper” concebido para recuperar la información procedente de un sensor óptico de humedad de suelo basado en el principio de reflexión de una señal de excitación luminosa aplicada a una muestra de suelo con diferentes niveles de humedad. Se describe ampliamente el principio de operación del amplificador “chopper” y las ventajas que hacen de ésta configuración la más apropiada para recuperar la señal del sensor mencionado. Para verificar el desempeño del amplificador “chopper” se realizaron pruebas en laboratorio con señales de entrada conocidas, así como con un sensor óptico de humedad y se logró recuperar la señal de información deseada. Como parte complementaria del trabajo se desarrolló una interfaz gráfica tanto para la adquisición de datos y caracterización del sensor en forma automática, como para el manejo de múltiples instrumentos de forma centralizada a través de la interfaz GPIB (General Purpose Interface Bus) y una computadora personal.

Palabras Clave: *Ruido 1/f, Detección síncrona, Amplificador chopper*

**ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo
De tesis de grado de Maestro en ingeniería**

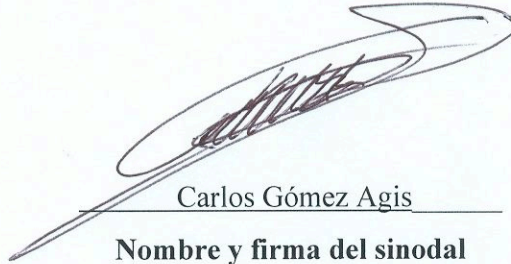
Dr. Juan Ivan Nieto Hipólito
Coordinador de Posgrado
Facultad de Ingeniería-Ensenada
P R E S E N T E

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el C. Yazmin Romero Vasquez para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ingeniería, me permito comunicarle que he dado mi voto aprobatorio, sobre el trabajo titulado:

“ Amplificador Chopper ”

Esperando reciba la presente de conformidad, quedo de Usted.

Ensenada, B.C. a día 23 del mes de Junio del 2011



Carlos Gómez Agis
Nombre y firma del sinodal

c.c.p expediente

**ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo
De tesis de grado de Maestro en ingeniería**

Dr. Juan Ivan Nieto Hipólito
Coordinador de Posgrado
Facultad de Ingeniería-Ensenada
P R E S E N T E

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el C. Yazmin Romero Vasquez para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ingeniería, me permito comunicarle que he dado mi voto aprobatorio, sobre el trabajo titulado:

“ Amplificador Chopper ”

Esperando reciba la presente de conformidad, quedo de Usted.

Ensenada, B.C. a día 23 del mes de Junio del 2011



Miguel Enrique Martínez Rosas

Nombre y firma del Director de Tesis

c.c.p expediente

**ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo
De tesis de grado de Maestro en ingeniería**

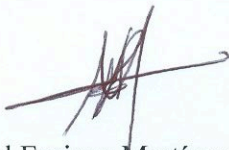
Dr. Juan Ivan Nieto Hipólito
Coordinador de Posgrado
Facultad de Ingeniería-Ensenada
P R E S E N T E

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el C. Yazmin Romero Vasquez para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ingeniería, me permito comunicarle que he dado mi voto aprobatorio, sobre el trabajo titulado:

“ Amplificador Chopper ”

Esperando reciba la presente de conformidad, quedo de Usted.

Ensenada, B.C. a día 23 del mes de Junio del 2011



Miguel Enrique Martínez Rosas

Nombre y firma del sinodal

c.c.p expediente

**ASUNTO: Voto aprobatorio sobre trabajo
De tesis de grado de Maestro en ingeniería**

Dr. Juan Ivan Nieto Hipólito
Coordinador de Posgrado
Facultad de Ingeniería-Ensenada
P R E S E N T E

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el C. Yazmin Romero Vasquez para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de Maestro en Ingeniería, me permito comunicarle que he dado mi voto aprobatorio, sobre el trabajo titulado:

“ Amplificador Chopper ”

Esperando reciba la presente de conformidad, quedo de Usted.

Ensenada, B.C. a día 23 del mes de Junio del 2011



Humberto Cervantes De Ávila

Nombre y firma del sinodal

c.c.p expediente

Resumen de la tesis de **Yazmin Romero Vasquez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México, Agosto del 2011.

Amplificador Chopper

Resumen Aprobado por:

Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas
Director de Tesis

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un amplificador “chopper” concebido para recuperar la información procedente de un sensor óptico de humedad de suelo basado en el principio de reflexión de una señal de excitación luminosa aplicada a una muestra de suelo con diferentes niveles de humedad. Se describe ampliamente el principio de operación del amplificador “chopper” y las ventajas que hacen de ésta configuración la más apropiada para recuperar la señal del sensor mencionado. Para verificar el desempeño del amplificador “chopper” se realizaron pruebas en laboratorio con señales de entrada conocidas, así como con un sensor óptico de humedad y se logró recuperar la señal de información deseada. Como parte complementaria del trabajo se desarrolló una interfaz gráfica tanto para la adquisición de datos y caracterización del sensor en forma automática, como para el manejo de múltiples instrumentos de forma centralizada a través de la interfaz GPIB (General Purpose Interface Bus) y una computadora personal.

Palabras Clave: *Ruido 1/f, Detección síncrona, Amplificador chopper*

Dedicatoria

A mi Dios, que día a día renueva mis fuerzas.

A mis padres Eva y José por darme la vida, por estar conmigo en los buenos momentos y por apoyarme siempre en los momentos difíciles dándome palabras de aliento y brindándome sus consejos y enseñanzas para enfrentar la vida y salir adelante.

A mis hermanas Eva y Bibiana, por su cariño y apoyo incondicional.

A mis sobrinos Fidel y José Marcos, que con sus sonrisas, travesuras, abrazos y cariño me dan la fortaleza para alcanzar mis metas.

Agradecimiento Especial

Agradezco especialmente a mi director de tesis, el Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas por brindarme su amistad, apoyo, pláticas amenas, consejos, conocimiento, paciencia y estar siempre disponible en los momentos que lo necesité, por protegerme como a una hija, por la confianza depositada en mí para formar parte de su grupo de trabajo y aportar un granito de arena a un gran proyecto, muchísimas gracias.

A la M.C. Jana Juracy Soares de Johnson, por su apoyo, consejos, amistad, ayuda tanto emocional como académica y permitirme compartir su alegría.

Gracias por ser una parte importante en mi vida los quiero mucho a los dos.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento:

A mis sinodales M.C. Humberto Cervantes de Avila y M.C. Carlos Gómez Agis, por sus consejos, críticas y apoyo durante el desarrollo de esta tesis.

A mis compañeros de maestría y amigos: Rogelio Reyes, Daniel Amador, Antonio Gomez, Ismael Capuchin, Aram Hawa, Fausto Abundiz, Miguel Murillo, Luis Rodriguez, Kuotaro Sanay, Luis Leon y Aaron Olmos, por su ayuda, horas de desvelo que compartimos para salir adelante juntos y su amistad incondicional.

A Daniel Everardo Amador Bartolini y Luis Ramon Siero Gonzales, por su amistad, apoyo y aportar una parte importante a mi vida.

A mis amigos, Odin Meling, Norma Morgan, Rigoberto Sanchez, Ismael Capuchin, Guillermo Alejandro Sanches, José Maria Gonzales, Anahi Perez, Ignacio Espinoza, Dora Gonzales, Samuel Ibarra, Jesusita Martinez, Patricia Samaniego, Omar Peralta, Jorge Quiroz y Giovanni Martin, por su amistad y los buenos momentos.

A Maria Luisa Reyes Torres, Eliud Gil Mares, Anita Rivera González y Martha Vega, así como a la Administradora de la Facultad Lina Adriana Meza por su atenciones, amabilidad y disposición para ayudarme.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado y a la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño (FIAD) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) por las facilidades otorgadas para la realización de éste trabajo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivo General	2
1.3. Objetivos específicos	3
1.4. Secuencia de la tesis	3
2. Antecedentes	4
2.1. Relación Agua-Suelo-Planta	5
2.2. Suelo	6
2.2.1. Flujo de agua en el suelo	6
2.2.2. Permeabilidad del suelo al agua	7
2.2.3. Textura del suelo	7
2.2.4. Medida de temperatura del suelo	8
2.2.5. Termómetros de contacto	9
2.2.6. Termómetros de no contacto	9
2.2.7. Absorción de los nutrientes	10
2.2.8. Sistemas de riego	10
2.3. Sensores	12
2.3.1. Tipos de sensores de humedad del suelo	13
2.3.2. Clasificación de los sensores ópticos	14
2.4. Sistema de detección síncrona	18
2.4.1. Teorema de muestreo	18
2.5. Ruido	23
2.6. Métodos empleados para recuperar señales muy débiles y de muy baja frecuencia	25
2.6.1. Amplificador Lock-in:	25
2.7. Descripción de un sistema simple de medición aplicando el amplificador Lock-in.	28
2.7.1. Teoría del Amplificador Chopper	32
3. Diseño del amplificador chopper	39
3.0.2. Amplificador Chopper	40
3.1. Detección síncrona en base a una fuente pulsada	41

3.1.1.	Fuente pulsada	42
3.1.2.	Descripción del amplificador chopper diseñado	43
3.1.3.	Sistema de adquisición automático	46
3.1.4.	Interfaz gráfica	46
4.	Pruebas y resultados	54
4.1.	Caracterización del Amplificador Chopper	54
4.1.1.	Señales de prueba	54
4.1.2.	Suma de señales	55
4.1.3.	Muestreo (desplazamiento en frecuencia)	56
4.1.4.	Eliminación de CD y Amplificación	57
4.1.5.	Recuperación de la señal de información	60
4.1.6.	Resultado con sensor óptico	60
5.	Conclusiones Generales	63
5.1.	Conclusiones	63
5.2.	Aportaciones	63
5.3.	Trabajo a futuro	64

Índice de figuras

2.1. Diagrama para la determinación de la textura de los suelos.	8
2.2. Señal de información en los dominios del tiempo (izquierda) y la frecuencia (derecha).	19
2.3. Tren de impulsos de muestreo.	19
2.4. Señal de información muestreada en los dominios del tiempo (izquierda) y la frecuencia (derecha).	19
2.5. Transformada de Fourier de $f(t)$	20
2.6. Transformada de Fourier de $f_s(t) = f(t)p_T(t)$	20
2.7. Función de respuesta en frecuencia del filtro ideal pasa baja con un ancho de banda B	20
2.8. Reconstrucción de $f(t)$ a partir de $f_s(t) = f(t)p_T(t)$	21
2.9. Generación de PAM con muestreo natural (por compuerta).	21
2.10. Demodulación de una señal PAM con muestreo natural.	23
2.11. Amplificador lock-in.	28
2.12. Señal inmersa en Ruido.	29
2.13. Efecto filtro pasa-bajas.	29
2.14. Efecto filtro pasa-banda.	30
2.15. Amplificador sintonizado.	30
2.16. Amplificador sintonizado como filtro pasa-banda.	31
2.17. Amplificador sintonizado como filtro pasa-banda con amplificador operacional.	32
2.18. Señal de referencia desfasada 90°	33
2.19. Señal de referencia desfasada 180°	33
2.20. Señal de referencia desfasada 270°	34
2.21. Señal inmersa en Ruido.	34
2.22. Señal Muestreada.	35
2.23. Señal Modulada.	35
2.24. Señal Modulada Amplificada.	36
2.25. Señal Amplificada, con un nivel de c.d. recuperado.	36
2.26. Filtro pasa-banda tipo RC.	37
2.27. Filtro pasa-banda.	37
2.28. Señal Filtrada.	37

3.1. Sensor óptico para humedad de suelo.	40
3.2. Diagrama esquemático del Acoplador utilizado.	41
3.3. Esquema del circuito implementado para la generación del tren de impulsos.	43
3.4. Salidas de temporizador y Flip-Flop.	43
3.5. Diagrama esquemático completo del amplificador chopper empleado para la detección de la señal retrodispersada.	47
3.6. Recuperación de una señal eléctrica proporcional a la señal retrodispersada proveniente del sensor óptico.	48
3.7. Señal original con frecuencia de 3Hz.	48
3.8. Tren de impulsos con frecuencia de 687.71Hz.	48
3.9. Señales del circuito de defasamiento.	49
3.10. Circuito de defasamiento.	49
3.11. Operación de un circuito multicanalizador como interruptor.	49
3.12. Filtro RC pasa-bajas de primer orden.	50
3.13. Señal sin componente de CD, observe la similitud con una señal del tipo AM.	50
3.14. Amplificación de la señal sin componente de CD y con una frecuencia de operación (muestreo) mucho mayor a la señal de banda base.	50
3.15. Segunda operación de muestreo (equivalente a rectificación) y posterior demodulación (regreso a banda base) de la señal	51
3.16. Interfaz GPIB-USB.	51
3.17. Interfaz para modificar el osciloscopio por medio de la interfaz GPIB-USB.	52
3.18. Interfaz para graficar los datos adquiridos por medio de interfaz GPIB-USB.	53
4.1. Señal de información (trazo amarillo) y señal de ruido blanco (trazo azul) obtenidas con ayuda de un generador de funciones y un generador de forma de onda arbitraria respectivamente.	55
4.2. Amplificador no-inversor en configuración de sumador.	56
4.3. Señal de prueba generada (trazo azul) y señal de información con nivel de desbalance (trazo amarillo).	56
4.4. Señal de muestreo (trazo amarillo) y salida del multicanalizador analógico (trazo azul).	57
4.5. Señal de prueba muestreada.	58
4.6. Efecto del muestreo con el circuito MUX/DEMUX (trazo azul), para efectos de comparación se muestra también la señal de información con desbalance (trazo amarillo).	58
4.7. Señal promediada (trazo amarillo) y señal muestreada original (trazo azul).	59
4.8. Señal modulada amplificada 22 veces.	59
4.9. Señales original (trazo azul) y recuperada (trazo amarillo).	60

4.10. Señales recuperada del sensor óptico con ayuda del amplificador chopper diseñado.	61
4.11. Señal de temperatura de la muestra bajo prueba.	62

Índice de tablas

2.1. Ventajas y desventajas de algunos sistemas para monitorización de la humedad del suelo	15
2.2. Características de la reflectancia especular y difusa	16
3.1. Tabla logica del CI CD4052	45
3.2. Tabla logica del CI 74123	45

Capítulo 1

Introducción

En algunas áreas de la ciencia se requiere del estudio de señales de amplitud muy pequeña, las cuales son medidas en condiciones adversas ya que pueden estar enmascaradas por el ruido. Para la medición de este tipo de señales es necesaria la implementación de instrumentos que tengan la capacidad de eliminar o atenuar ese ruido indeseable, un ejemplo de ésta condición se encuentra en el área óptica, en donde se llevan a cabo diversos estudios sobre los fenómenos que produce o provoca la luz, en particular se puede mencionar el desarrollo de sensores de fibra óptica los cuales han tenido una gran aceptación al ofrecer muchas ventajas sobre los sistemas de sensado tradicionales, tales como: gran sensibilidad, capacidad para enviar y recibir señales a grandes distancias, pasividad eléctrica, etc., además de tener la capacidad de reducir problemas de medición en ambientes hostiles o peligrosos. En la actualidad, es posible medir una gran cantidad de variables físicas y químicas, mediante la tecnología de los sensores ópticos[Kuzin et al., 2001]. Por ejemplo, se encuentra el caso en donde se realiza la caracterización óptica de diversos materiales o la medición de humedad de suelo, en cuyos casos se debe medir una señal muy pequeña con variación en frecuencia del orden de minutos y cuya amplitud se ve afectada por encontrarse inmersas en un ruido del tipo $1/f$ conocido como ruido flicker[Vazquez,].

El ruido de flicker se caracteriza por que su valor es inversamente proporcional a la frecuencia de la señal que se observa; en consecuencia, en ocasiones, se le denomina ruido $1/f$ (uno dividido por f). Las causas del ruido de flicker no se comprenden bien; sin embargo, siempre existe y su presencia se reconoce por su dependencia de la frecuencia, siendo este significativo para frecuencias menores de 100 Hz. Para recuperar la información contenida en señales de muy baja amplitud y frecuencias menores a 100Hz, se emplean amplificadores troceadores, mejor conocidos como "chopper amplifiers" [Skoog et al., 2001].

Los amplificadores chopper son utilizados, entre otras cosas, para detectar y medir señales alternas de muy pequeña amplitud. Estos dispositivos permiten efectuar mediciones precisas aún cuando la señal de interés se encuentre superpuesta con fuentes

de ruido de amplitudes mucho mayores que ella. Estos dispositivos utilizan una técnica conocida como detección sensitiva de fase para aislar la componente de la señal de una determinada frecuencia y fase de referencia. Las señales de ruido a frecuencias distintas de la de referencia son rechazadas y por lo tanto no afectan la medición. [Bosyk et al., 2005].

1.1. Justificación

Actualmente, en el Laboratorio de Comunicaciones Ópticas de la FIAD, el cuerpo académico de Comunicaciones e Instrumentación Electrónica trabaja con un sensor de humedad de suelo para aplicaciones agrícolas. En general, los sensores son dispositivos que permiten medir variables de magnitud acotada y convertirlas a señales eléctricas, para poder interpretar y manipular la información. En este caso, la señal que se desea medir proviene de un sensor óptico para aplicación agrícola basado en señales luminosas retrodispersadas, por lo que su detección no puede realizarse con los instrumentos típicos (osciloscopio ó multímetro) debido a las restricciones impuestas por la amplitud y la frecuencia de la señal. Debido a que la señal generada posee una amplitud y frecuencia muy pequeñas, con un alto nivel de desbalance (offset) se introduce una gran cantidad de ruido, ya que como se mencionó el ruido a baja frecuencia depende de la relación de $1/f$, y la señal de interés es medida a ultrabaja frecuencia (esta señal varía muy lentamente, su periodo es del orden de minutos). Por otro lado, una frecuencia de corte tan baja para el filtro requeriría la utilización de componentes con valores poco prácticos. En el caso de que se pudiera filtrar la señal y eliminar el nivel de desbalance, al tratar de amplificarla con ayuda de un amplificador convencional, sus componentes generarían de nuevo un nivel de desbalance y se tendría de nuevo la componente de CD (corriente directa). Para recuperar la señal, por lo tanto, se requiere de técnicas especiales de detección, tales como las proporcionadas por un amplificador tipo lock-in o mejor aún de un amplificador chopper.

El amplificador chopper es un amplificador que permite recuperar señales muy pequeñas en amplitud y cercanas a CD. El proceso que realiza el amplificador chopper es muestrear la señal y después amplificarla, es decir, permite amplificar las variaciones de la señal deseada, independientemente de su nivel de desbalance, amplitud y variación lenta. La utilización del amplificador chopper permitirá, en este caso, realizar la medición de la señal retrodispersada para evaluar el nivel de humedad del suelo y por lo tanto posibilita el sensor óptico de humedad de suelo basado en la técnica de amplificación chopper.

1.2. Objetivo General

Desarrollar un sistema de amplificación para una señal retrodispersada proveniente de un sensor óptico con el fin de medir humedad del suelo en aplicaciones agrícolas,

utilizando la técnica de amplificación chopper.

1.3. Objetivos específicos

- *Diseñar y construir un amplificador chopper que permita medir señales de amplitud muy pequeñas que se encuentren inmersas en ruido.*
- *Implementar el sistema en un circuito impreso.*
- *Integrar el circuito impreso de amplificador chopper al sensor óptico de humedad de suelo que se encuentra en el laboratorio de la FIAD.*

1.4. Secuencia de la tesis

Este trabajo está dividido en los siguientes capítulos:

Capítulo 1 En éste capítulo se da una breve introducción del trabajo de tesis, se indica la justificación y los objetivos tanto general como específicos y la secuencia del trabajo.

Capítulo 2 En el capítulo 2 se presenta el marco teórico, incluyendo definiciones y la descripción detallada de las señales bajo estudio, así como las etapas que constituyen un sistema generico de amplificación basado en la técnica de detección síncrona.

Capítulo 3 En el capítulo 3 se describe el diseño e implementación del amplificador desarrollado, se incluye la información considerada para la construcción física del sistema y el tipo de señales obtenidas en cada etapa.

Capítulo 4 En éste capítulo se presentan los resultados obtenidos en la aplicación práctica del amplificador desarrollado, se indican las condiciones en que fueron realizadas las mediciones y se da una interpretación de las mismas.

Capítulo 5 Finalmente, en este capítulo se dan las conclusiones del trabajo.

Capítulo 2

Antecedentes

En la actualidad, una de las problemáticas que se presentan a nivel mundial es la escasez de agua, y la región de Valle de Guadalupe no es la excepción, en esta zona ubicada a las afueras de Ensenada, Baja California se tienen hectáreas de cultivos vitivinícolas, las cuales deben ser irrigados frecuentemente ya que, el riego es una operación agrícola, que sirve para satisfacer las necesidades de agua en las plantas. Para los agricultores el riego es un requisito indispensable que, junto con la aplicación de fertilizantes, el control de las malas hierbas y las plagas destructivas, las labores de cultivo y un drenaje apropiado, le permitirán lograr buenas cosechas. El riego no tiene resultados por sí solo, sino que afecta, favorablemente o desfavorablemente, a las otras operaciones. Por ejemplo, el riego puede funcionar en armonía con el sistema de drenaje, para proporcionar un suelo húmedo y aireado, ideal para las raíces de las plantas, o bien, puede sobrecargar el sistema de drenaje y, a la larga, destruirlo. De modo similar, el agua aplicada correctamente hace que los nutrientes estén al alcance de las plantas, mientras que el agua aplicada en exceso se lleva los nutrientes del suelo.

En muchos países, las tierras agrícolas se encuentran muy alejadas de las fuentes de agua, por lo que el transporte del agua requiere obras de ingeniería enormes y costosas, sin embargo, los medios de transporte solo son importantes en lo que se refiere al modo en que afecta la disponibilidad, el costo y la calidad del agua, y el punto hasta el que su presencia física obstaculiza las labores de labranza.

El riego es necesario en un clima seco; pero es preciso definir lo que se entiende por clima seco. Se considera que es un clima en el que las lluvias naturales no son suficientes para satisfacer las necesidades de agua las plantas, durante todo el año o parte de él. Hay muchas zonas desiertas en el mundo, donde la tierra es potencialmente fértil; pero casi no llueve. Por supuesto, el riego es indispensable para la agricultura en esos lugares; pero hay otros climas en los que el riego no es esencial, aunque puede servir para fines útiles. Hay regiones con estaciones secas en las que el riego hace que se extienda el periodo de crecimiento, incrementando la gama de los cultivos posibles o mejorando los rendimientos de los ya existentes, y otras con las lluvias inciertas, en las que el riego sirve como garantía de que no se perderán las cosechas [Withers and Vipond, 1978].

Si existe un exceso de humedad, o una insuficiencia de agua en el suelo, el creci-

miento del cultivo será retardado y en el peor de los casos el cultivo se perderá. La irrigación es un medio artificial usado para agregar humedad al suelo con el fin de prevenir deficiencias, así mismo un uso excesivo de la irrigación creará problemas de exceso de humedad. El método de irrigación más comúnmente usado por los agricultores es el de la programación de acuerdo al calendario (número de días pasados desde el último riego). Como es definido comúnmente, la humedad aprovechable es aquella que es retenida en los suelos en un rango de presiones negativas que van desde un tercio de bar ó 33.33 kPa (capacidad de campo) hasta 15bars ó 1500kPa (punto de marchitez permanente). Sin embargo la humedad disponible dentro de este rango de presiones puede variar dependiendo de la textura del suelo. Por lo tanto, el tipo de suelo puede en gran parte influenciar la práctica del riego. El porcentaje de agua encontrado en un suelo al punto de marchitez permanente es usualmente la mitad del porcentaje de agua que se encuentra a capacidad de campo, pero es mucho mayor que el agua contenida en un suelo cuando éste es secado al aire.

Cuando la humedad residual en un suelo esté por debajo del 50 al 70% de la humedad considerada como aprovechable y aproximándose al valor de punto de marchitez permanente, el suministro limitado del agua jugará un papel muy importante en retardar el crecimiento de la planta. Lo anterior resulta en un mayor “esfuerzo” de la planta para obtener agua debido a la influencia de las deficiencias de humedad en el suelo (deficiencia hídrica), ocasionando así cambios en el proceso fisiológico de la planta. Si las deficiencias hídricas ocurren durante las etapas críticas del crecimiento de la planta, tales como la floración y la maduración del fruto (los estados “críticos” pueden variar entre diferentes variedades de la misma especie así como entre diferentes especies de plantas), la producción del cultivo puede ser severamente reducida. Si la planta sufre una deficiencia hídrica a un valor muy próximo del punto de marchitez permanente, es probable que ya no se recobre y muera [Garcia Casillas and Briones Sánchez, 2007].

La medición de contenido de agua en el suelo es la forma más directa y confiable de determinar el contenido de agua que hay almacenado en el perfil del suelo en un momento dado, tiene una importancia fundamental para el riego; con el fin de poder establecer la frecuencia de riego (cuando regar) y la carga de agua a reponer en el suelo durante el riego (cuánto regar). En condiciones de campo se requiere una medida directa del contenido de agua, o alternativamente la medición de un índice del contenido de agua [Guarovich, 1985]. Una forma de realizar la medición de humedad contenida en el suelo, es utilizando sensores, esto con el fin de obtener datos sobre el contenido de agua en el suelo y así se tenga un control sobre el riego en los sembradíos.

2.1. Relación Agua-Suelo-Planta

Las relaciones entre el agua, el suelo y las plantas que son de particular importancia en la agricultura de riego incluyen: la capacidad del suelo para retener agua y perma-

necer bien drenado, las características del flujo del agua en los suelos, las propiedades físicas del suelo (incluyendo el contenido de materia orgánica, profundidad de suelo, textura del suelo y la estructura del suelo), y las propiedades químicas del suelo incluyendo la concentración de sales solubles y nutrientes debido al movimiento, uso y evaporación del agua localizada en el suelo. El conocimiento de todas esas relaciones y cómo se relacionan entre sí es de gran importancia para todos aquellos que desean mejorar las actividades de la irrigación con el fin de obtener el mejor y más eficiente uso del agua.

2.2. Suelo

El suelo es un sistema de gran complejidad, constituido por material sólido, líquido y gaseoso. La fase sólida, puede ser mineral y orgánica; la porción mineral es un conjunto de partículas de varios tamaños, formas y estructura química, y la porción orgánica incluye residuos vegetales o animales en diferentes estados de descomposición, así como organismos químicos en plena actividad. La fase líquida es el agua, que llena total o parcialmente los espacios libres entre las partículas de suelo y que varía en su composición química y en su facilidad de movimiento. La fase gaseosa o de vapor ocupa el espacio poroso entre las partículas del suelo que no está lleno de agua; su composición varía ampliamente en intervalos de tiempo relativamente cortos.

El suelo y el agua son recursos fundamentales del ambiente natural y de la agricultura. El aumento de la población humana y la consiguiente presión sobre estos recursos a motivado su escasez o ha llevado a su abuso en muchas partes del mundo. La necesidad de manejarlos en forma eficiente es una de las tareas vitales en este tiempo. Entre los fenómenos más importantes relacionados con el suelo se encuentran los de naturaleza netamente física, asociados con propiedades que dependen de las interacciones entre las partículas sólidas y el líquido presente en el espacio poroso. Por esta razón, se ha hecho fundamental profundizar y difundir el conocimiento de las propiedades y el comportamiento del sistema suelo-agua en relación con sus condiciones climatológicas, el crecimiento de las plantas y el ciclo hidrológico [Guarovich, 1985].

2.2.1. Flujo de agua en el suelo

Cuando la variable tiempo interviene en las relaciones entre agua y el suelo sobreviene un proceso dinámico, llamado flujo de agua en el suelo, que se desarrolla incesantemente y con velocidades y direcciones variables entre diferentes puntos del perfil del suelo.

Entre los principales procesos de flujo de agua en el suelo debe destacarse: la infiltración o flujo de agua al perfil del suelo, la redistribución del agua entre puntos diferentes del perfil, el drenaje o paso del agua bajo la zona radicular, la evaporación o pérdida de agua en forma de vapor hacia afuera del perfil del suelo y por último el

movimiento de agua desde el suelo hacia las raíces de las plantas. todos estos procesos , que actúan en forma simultánea o secuencial, determinan el contenido de agua en un punto del suelo en un instante dado; normalmente esa condición no representa una situación de equilibrio. El conocimiento de las velocidades de flujo de cada uno de los procesos mencionados y la resultante de éstos constituyen la evaluación de la economía de agua en el suelo llamada también "balance hidrológico del suelo"[Guarovich, 1985].

2.2.2. Permeabilidad del suelo al agua

En la agricultura, la permeabilidad del suelo al agua es un factor importante que permite determinar los tiempos de irrigación del cultivo, ya que esta es la velocidad de infiltración del suelo o capacidad que este tiene de absorción de agua. La permeabilidad varía de un lugar a otro influenciado por la textura, estructura y grado de compactación del suelo. El grado de la intercomunicación de los macroporos del suelo tiene un efecto determinante sobre la velocidad de infiltración del mismo, esta infiltración puede expresarse como:

Infiltración instantánea o velocidad de infiltración (VI).- Es la velocidad con la que el suelo absorbe agua en un intervalo de tiempo dado, esta se mide en cm/h y decrece con el tiempo hasta hacerse aproximadamente constante.

Infiltración acumulativa (LA).- Es la lámina(agua) acumulada (cm) a través del tiempo y aumenta con el tiempo. También se le conoce como penetración.

Infiltración media (IM).- Es la velocidad de infiltración en cm/h correspondiente a determinado tiempo acumulativo, decrece con el tiempo.

Infiltración básica (IB).- Es el valor de VI cuando ésta se hace aproximadamente constante, se expresa en cm/h y generalmente se considera que se ha llegado a la infiltración básica cuando el decremento en la VI es del 10 % en una hora. En suelos de alta permeabilidad al agua, resulta inútil agregar una IB, ya que generalmente el riego termina antes que la IB haya sido alcanzada[Torres Ruiz, 1989].

2.2.3. Textura del suelo

La textura del suelo es un índice de la proporción relativa de los diferentes grupos de partículas minerales, éstos grupos o fracciones de suelo se forman de acuerdo con el tamaño de las partículas minerales. La textura de suelo es una de las determinaciones de laboratorio que se hacen más comúnmente. El método más generalizado para hacer la medición de la textura del suelo en el laboratorio es hidrómetro de Bouyoucos.

El metodo de Bouyoucos se basa en la Ley de Stockes y consiste en calcular la cantidad de sólido en suspensión a de determinados intervalos de tiempo; la densidad se mide con un densímetro conocido como hidrómetro de Bouyoucos. La Ley de Stockes,

se refiere a la velocidad de caída de una esfera dentro de un fluido; consiste en tomar una muestra de la suspensión a una profundidad determinada y circular la cantidad de sólido, evaporando el agua y pesando el residuo [Valverde Conejo, 2007]. Generalmente los resultados que reporta el laboratorio incluyen la clase textural, en caso de no ser así, con los porcentajes reportados de arena, limo y arcilla se debe clasificar el suelo como se muestra la Figura 2.1.

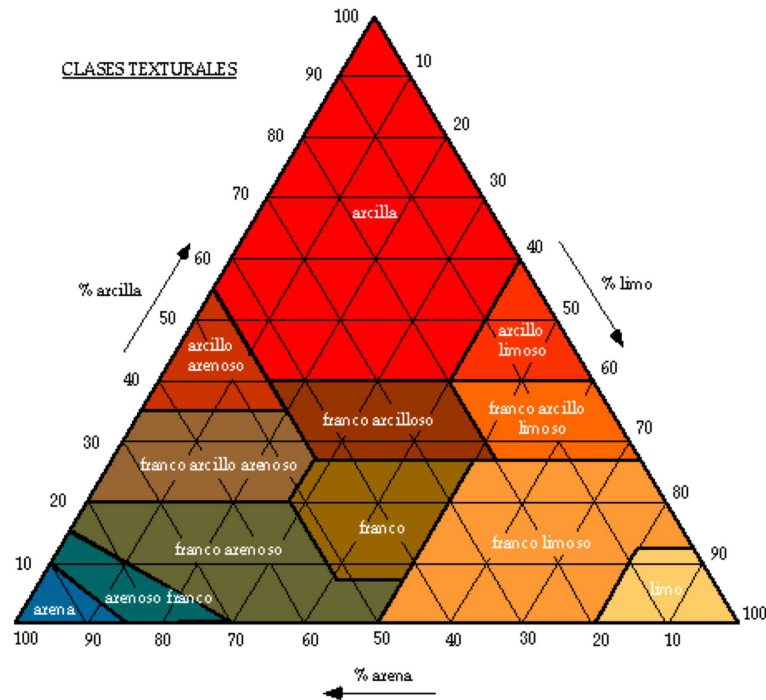


Figura 2.1: Diagrama para la determinación de la textura de los suelos.

En el campo, la textura se puede apreciar al tacto. La estimación de la textura al tacto se hace para ubicar una muestra en un grupo textural aproximado y posteriormente, se verifica en el laboratorio la clase textural correspondiente [Torres Ruiz, 1989].

2.2.4. Medida de temperatura del suelo

Para crecer satisfactoriamente las plantas deben alcanzar tal economía de agua que la demanda a la que están sujetas sea balanceada con la oferta disponible, el problema reside en que la demanda evaporativa de la atmósfera, la cual es proporcional a la temperatura del suelo, es casi continua, mientras que la lluvia o el riego ocurren ocasionalmente o de forma irregular. Para sobrevivir durante los períodos secos entre lluvias o entre riegos, la planta debe estar capacitada para hacer uso del agua contenida y retenida en el espacio poroso del suelo.

La temperatura del suelo no sólo depende de la temperatura de la atmósfera, sino de la proporción entre las cantidades de aire y de agua en el suelo y del intercambio de aire. Suelos saturados de agua se mantienen fríos. Suelos con una buena proporción de agua y una adecuada aireación alcanzan más rápidamente una temperatura suficientemente alta, para estimular la germinación de las semillas y el crecimiento de la planta[Graetz, 1982].

La temperatura del suelo es una función del tiempo y del punto considerado. Para medir la temperatura del suelo se utilizan sensores de temperatura denominados termómetros de suelo o geotermómetros, estos pueden ser del tipo de contacto o no contacto.

2.2.5. Termómetros de contacto

Entre los termómetros de contacto se pueden mencionar los siguientes:

- Termómetro de expansión: utilizan líquido (mercurio o alcohol) en un tubo de cristal, son los termómetros estándar utilizados por los servicios meteorológicos.
- Termómetros bimetalicos: utilizan dos metales con diferente coeficiente de dilatación, generalmente se utilizan invar y bronce o invar y acero (invar también llamado FeNi36 o nivarox, es una aleación de hierro (64 %) y níquel (36 %) con muy poco carbono y algo de cromo). Cuando varía la temperatura se produce un cambio en el radio del elemento medidor que se transmite a un sistema de palancas que accionan un brazo indicador. La banda de registro va colocada sobre un tambor cilíndrico que contiene un mecanismo de relojería. Este gira una vuelta en 24 horas o en una semana según se seleccione. La escala está dividida de a 1°C. La amplitud es de -35 a 45°C y la precisión es de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.
- Termómetros de expansión de líquidos y gases: es ampliamente usado en las mediciones industriales de temperatura.
- Termómetros eléctricos o electrónicos: se basan en la variación de resistencia de un conductor o en la aparición de una tensión termoeléctrica.
- Termómetros para medidas continuas automatizadas:
 - De resistencia eléctrica.
 - De termopar: no requieren suministro externo de energía.
 - De termistor.

2.2.6. Termómetros de no contacto

En ésta categoría se encuentran los pirómetros ópticos.

- Pirómetros ópticos: este es ampliamente usado en medición de temperaturas en hornos industriales.

Las medidas en campo requieren una cuidadosa colocación del elemento sensor para lograr un contacto adecuado. La instalación se puede hacer a distintas profundidades, si bien para caracterizar el régimen de temperatura de suelo, la medida se ha normalizado a 50cm, ya que no se ve afectada por las oscilaciones diarias de temperatura, sino por el ciclo anual [Porta et al., 2003].

2.2.7. Absorción de los nutrientes

Las plantas pueden absorber los nutrientes a través de las raíces, los tallos y las hojas. Sin embargo, la mayor parte de los nutrientes es captada por las raíces. Los nutrientes entran a la planta sólo en forma de soluciones. La absorción más intensa de nutrientes se realiza a través de los pelos absorbentes. Las raíces viejas pierden la habilidad para absorber los nutrientes y sirven más bien para transportar los elementos hacia la parte alta de la planta.

Al penetrar en las capas del suelo, los finísimos pelos absorbentes entran en íntimo contacto con las partículas minerales y con el agua del suelo. En el agua se disuelven los nutrientes.

Los elementos requeridos por la planta entran por el intercambio que se realiza entre los pelos absorbentes, la solución y los minerales alrededor de ellos. Para compensar los elementos absorbidos, las raíces pequeñas exudan otros.

La intensidad de la absorción de los nutrientes es afectada por los siguientes factores [Graetz, 1982]:

- Presencia de aire fresco suficiente en los espacios del suelo. El aire es muy importante para el desarrollo y actividad de los pelos absorbentes, una labranza adecuada puede renovar el aire en el suelo.
- La humedad del suelo, la cual lleva los nutrientes en solución haciéndolos disponibles a la planta.
- La densidad y la distribución del sistema radicular, que determina las cantidades de nutrientes que pueden ser absorbidos.

2.2.8. Sistemas de riego

Existen distintos tipos de sistemas de riego, la elección del método de riego más conveniente para una situación dada es importante para conseguir los máximos beneficios. Si se emplea un método inadecuado se pueden producir fallas en el riego y posiblemente causar serios daños al suelo. El abuso del agua en el suelo puede ocasionar erosión del suelo, encharcamiento, acumulación de salinidad y un gasto inútil del capital invertido en la instalación del sistema de riego. Algunos sistemas típicos de riego son:

Riego por compartimiento Este método es el más simple y más usado en cultivos regados, consiste en llevar grandes corrientes de agua a parcelas niveladas rodeadas por pequeñas diques o malecones. El algodón, maíz, cereales, garbanzo, alfalfa, pasto y otros cultivos intensivos, así como huertos y plantaciones, se prestan bien a este sistema de riego, cuya principal desventaja es el alto costo de establecimiento en el terreno.

Riego por bordes Puede ser el método más eficaz para cultivos densos, como la alfalfa, los pastos y los cereales menores; también se utiliza en huertos y en viñedos. Este método utiliza diques paralelos que guían una lámina de agua en movimiento a medida que desciende por la pendiente. El terreno entre dos diques se llama tablar, banda, faja, o borde. Estas bandas pueden tener una anchura variable entre 3 a 30m y una longitud de 100 a 800m. La velocidad de infiltración del agua es de gran importancia, como el agua está descendiendo constantemente por los bordes, es preciso regular la velocidad mediante el control del volumen de la corriente para que el agua cubra el suelo durante el tiempo necesario para infiltrar uniformemente el perfil del suelo.

Riego por surcos Está particularmente diseñado para aquellos cultivos que quedan perjudicados si el tallo o cuello de la raíz están en contacto prolongado con el agua; los cultivos en hileras o escardados, como hortalizas, algodón, remolacha azucarera, maíz, papas y cultivos de semillas, se riegan por surcos. Una variante del sistema por surcos es el riego por corrugaciones o surcos pequeños usados con cultivos poco espaciados como cereales, alfalfa y pastos. Se utiliza a veces para cultivos en germinación sembrados a chorro continuo o al voleo (se trata de un método de siembra directo en el que se intenta que las semillas se distribuyan lo más uniformemente posible sobre todo el terreno).

Riego por desbordamiento natural o riego tendido Se usa principalmente para cultivos forrajeros perennes, que protegen el suelo contra la erosión hídrica, así como para cereales, este consiste básicamente en dejar escurrir el agua de un canal desde la parte alta del cultivo hacia los sectores más bajos.

Riego por aspersión Tiene grandes ventajas en suelos delgados o muy arenosos, o suelos con pendientes pronunciadas, y puede utilizarse en todos los cultivos, con este método el agua se aplica al suelo en forma de lluvia utilizando unos dispositivos de emisión de agua, denominados aspersores, que generan un chorro de agua pulverizada en gotas.

Riego por goteo Aunque se usa para especies cultivadas en condiciones muy variables, es particularmente beneficioso para viñedos jóvenes, para plantas perennes poco espaciadas como alcachofas o platanos y otros cultivos valiosos, y cuando el agua escasea o es muy salina. En este sistema el agua de riego es transportada a través de una extensa red de cañerías o tuberías plásticas hasta cada planta; el aparato que emite el agua en el suelo se denomina emisor por goteo. El sistema

de riego por goteo normalmente humedece solo una parte del volumen de suelo necesario para el crecimiento de las raíces; por lo tanto, el desarrollo del sistema radicular de un cultivo está limitado al área de humedad al rededor de cada emisor. No está claramente definido como afecta esto a la planta y a los rendimientos; a pesar de que los cultivos pueden crecer en un perfil de suelo parcialmente mojado, parece que existe un mínimo volumen de suelo necesario para un crecimiento óptimo; el tamaño de este volumen mojado es una función de descarga de los emisores, de la distancia de los emisores y de los tipos de suelo.

2.3. Sensores

El número de sensores disponibles para las distintas magnitudes físicas es tan elevado que no se puede proceder racionalmente a su estudio sin clasificarlos previamente de acuerdo con algún criterio. Si se clasifican según su aporte de energía, estos se pueden dividir en moduladores y generadores. En los sensores moduladores o activos, la energía de la señal de salida procede, en su mayor parte, de una fuente de energía auxiliar, la entrada solo controla la salida. En los sensores generadores o pasivos, en cambio, la energía de salida es suministrada por la entrada, este no necesita de una fuente externa.

Según la señal de salida, los sensores se clasifican en analógicos o digitales. En los sensores digitales, la salida varía en forma de saltos o pasos discretos. No requieren conversión A/D y la transmisión de su salida es más fácil. Tienen también mayor fidelidad y mayor fiabilidad, y muchas veces mayor exactitud, pero lamentablemente no hay modelos digitales para muchas de las magnitudes físicas de mayor interés.

En los analógicos la salida varía, a nivel macroscópico, de forma continua. la información está en la amplitud, si bien se suelen incluir en este grupo los sensores con salida en el dominio temporal. Si es en forma en frecuencia, se denominan, a veces, *casidigitales*, por la facilidad con que se puede convertir en una salida digital [Pallás Areny, 2007].

Las magnitudes a medir más frecuentes son :

- Posición, distancia, desplazamiento
- Velocidad
- Aceleración, vibración
- Temperatura
- Presión
- Caudal de flujo
- Nivel

- Fuerza
- Humedad

2.3.1. Tipos de sensores de humedad del suelo

Como se mencionó anteriormente, la humedad del suelo es un factor muy importante en la agricultura, esto es con el fin de tener un buen desarrollo de la planta y a su vez, tener un ahorro de agua en la irrigación de la misma. A continuación se mencionan algunos tipos de sensores que permiten realizar la medición de la humedad del suelo.

Sensores granulares de la matriz y bloques de yeso: Los bloques de yeso responden a los cambios de humedad del suelo de acuerdo a la profundidad en que éstos son colocados, estos miden la resistencia eléctrica entre dos círculos de malla de alambre que están conectados por un material poroso.

Sensores de constante dieléctrica del suelo: Estos sensores, miden los cambios en la constante dieléctrica del suelo, con un capacitor que consta de dos placas de un material conductor, que están separadas por una distancia corta (menos de 3.8 de pulgada). Se aplica un voltaje en un extremo de la placa y el material que esta entre las dos placas almacena cierto voltaje. Un medidor lee el voltaje conducido entre las placas. Cuando el material entre las placas es aire, el capacitor mide 1 (la constante dieléctrica del aire). La mayoría de los materiales del suelo, tales como la arena, arcilla y material orgánico poseen una constante dieléctrica de 2 a 4. El agua tiene la constante dieléctrica mas alta, que es de 78. Por lo tanto, los contenidos mas altos de agua en un sensor de capacitancia serían indicados por constantes dieléctricas con medidas mas altas. Como consecuencia, al medir los cambios en una constante dieléctrica, el contenido de agua se mide indirectamente.

Tensiómetro: El tensiómetro mide la tensión o la succión del agua del suelo. Este instrumento consiste de un tubo de plástico lleno de agua y herméticamente cerrado, equipado con un manómetro de vacío en la parte superior y una capsula de cerámica porosa en el extremo inferior, este funciona de la siguiente manera, cuando el tensiómetro es instalado en un suelo seco, la tensión de humedad que ejerce el suelo se transmite a través de los poros de la cerámica(el suelo trata de quitarle agua al tensiómetro) y se produce un vacío dentro del cuerpo del instrumento. Entre más seco éste el suelo, más vacío se produce dentro del tensiómetro, cuando se aplica un riego, ocurre un fenómeno contrario y el vacío dentro del cuerpo del instrumento disminuye.

Sondas de neutrones: La sonda de dispersión de neutrones es una técnica de prueba eficaz para medir el contenido total de agua en el suelo por volumen. Este aparato estima la cantidad de agua en un volumen de suelo al calcular la cantidad de hidrógeno presente.

Sensores ópticos: Un sensor óptico se basa en el aprovechamiento de la interacción entre la luz y la materia para determinar las propiedades de ésta. Una mejora de los dispositivos sensores, comprende la utilización de la fibra óptica como elemento de transmisión de la luz.

Algunas de las ventajas de los sensores ópticos se mencionan a continuación:

- Método de medición no destructivo ni invasivo
- Pueden ser controlados a distancia en lugares poco accesibles
- No tienen problemas de falso contacto
- No se oxidan
- No emiten radiaciones electromagnéticas

Debido a que la fibra plástica no conduce corriente y por lo tanto puede ser colocada también en ambientes en los que hay emisión de vapores o sustancias inflamables y explosivas, el cuerpo académico “Comunicaciones e Instrumentación Electrónica” de la FIAD, al cual está asociado éste trabajo se centra en el desarrollo de este tipo de sensores con el fin de explorar las ventajas de los mismos.

Debido a que entre cada sensor su complejidad varía considerablemente en función de los requisitos que se les impongan, esto hace que haya en el mercado una enorme variedad de dispositivos que responden al término genérico *sensor*. Esta pluralidad hace difícil realizar una única clasificación de los mismos. En la tabla 2.2 se exponen varios tipos de sensores entre ellos el sensor óptico.

2.3.2. Clasificación de los sensores ópticos

Como se menciona anteriormente, existe una variedad de sensores ópticos, los cuales pueden ser clasificados de distintas maneras, a continuación se tiene la clasificación de estos.

1. En función de la naturaleza del parámetro a cuantificar se dividen en:

Sensores químicos: Son los que responden a una especie química particular, como pH, iones, gases, etc. En este conjunto se incluyen, como grupo especial, los biosensores (dispositivos basados en el empleo de biomoléculas).

Sensores físicos: Son aquellos que determinan parámetros físicos, como temperatura, presión, espesor, tamaño de partícula, etc.

2. En función del tipo de interacción con el analito (especie química que puede ser identificada y cuantificada):

Sensores reversibles: Los que no consumen reactivo al interactuar con el analito, por ejemplo, los sensores de pH.

Tipo de sensor	Ventajas	Desventajas
Gravimétrico	<ul style="list-style-type: none"> • Muy Preciso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Destructivo • Requiere de mano de obra para obtener los datos • Consume mucho tiempo el recolectar los datos
Sensores Resistivo	<ul style="list-style-type: none"> • Buena precisión en suelos de textura media a fina. • Manejo fácil (peso ligero, tamaño pequeño, instalación fácil y lectura directa). • Rango amplio de lecturas de la humedad del suelo (de 0 a 200cb). • Útil durante varias temporadas con un cuidado apropiado. • Medidas continuas en la misma ubicación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Respuesta lenta a cambios en el contenido de agua en el suelo. • Falta de precisión en suelos arenosos debido a sus partículas grandes. • Requiere de tiempo para determinar cuál lectura del sensor es la más apropiada para el riego. • Requiere de mano de obra intensa para recolectar la información regularmente. • Requiere de calibración para utilizarse en cada tipo de suelo.
Sensor de Capacidad	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de leer directamente el contenido volumétrico del agua en el suelo. • No requiere de mantenimiento especial. • Alta precisión cuando los sensores están instalados apropiadamente. • Amplio rango de operación (de 0 hasta suelo saturado). • Medidas continuas en el mismo sitio. 	<p>Técnica de alto costo. Para recolectar la información de forma automática se requiere una computadora personal, un programa y el registrador de datos HOB0 que eleva aun más el costo, pero permite la conexión de varios sensores.</p>
Tensiómetros	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo. • Lectura directa de la tensión del agua del suelo para programar el riego. • Medidas continuas en el mismo lugar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere revisión periódica. • Opera solamente para succión de la humedad del suelo menores a 80 cb (no es útil para suelos más secos).
Dispensor de neutrones	<ul style="list-style-type: none"> • Se considera uno de los métodos más exactos para medir el contenido de agua en el suelo cuando se calibra apropiadamente. • Tiene capacidad para medir el agua del suelo a diferentes profundidades, durante muchas veces en la temporada del cultivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • No puede proporcionar una lectura precisa en las primeras 6 pulgadas de profundidad del suelo debido al escape de neutrones rápidos emitidos de la sonda de neutrones. • Técnica muy costosa requiere de licencia especial, entrenamiento regular para el operador, manejo especial, procedimientos de embarque y almacenamiento. • Requiere de procesos de seguridad para la radiación, que son molestos. • Requiere calibración de las lecturas de la sonda de neutrones contra medidas gravimétricas mediante la selección de un sitio mojado y uno seco; para calibrarlo para diferentes tipos y profundidades del suelo[Enciso et al., 2007]

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas de algunos sistemas para monitorización de la humedad del suelo .

Sensores irreversibles: Los que consumen reactivo. Estos sensores pueden subdividirse en regenerables y no regenerables, según puedan o no recuperar su estado inicial con un reactivo adecuado.

3. En función de la naturaleza de la propiedad óptica medida, se dividen en:

- Sensores de absorbancia
- Sensores de reflectancia
- Sensores de luminiscencia (fluorescencia, fosforescencia, quimioluminiscencia y bioluminiscencia).
- Sensores de dispersión Raman
- Sensores de índice de refracción

A continuación se describirá el sensor de reflectancia, ya que este es el tipo de sensor óptico que se encuentra implementado en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, y cuyos requerimientos de procesamiento de señal motivaron el desarrollo de ésta tesis.

Sensores de reflectancia Cuando un haz de radiación incide sobre una superficie sólida, no pulida y opaca (o que transmite radiación muy débilmente) tiene lugar el fenómeno de la reflexión tanto especular (regular) como difusa.

Las características de las reflexiones especular y difusa se muestran en la tabla 2.2, en ella se observa que la principal diferencia entre ambas es el ángulo al que emerge la radiación reemitida por la muestra; la reflexión especular se da cuando la luz incide en una superficie lisa y plana, en la cual el rayo incidente y reflejado crean un solo ángulo con una normal a la superficie de reflexión, mientras que en la reflexión difusa, la radiación reflejada es independiente de la dirección, en este último caso la superficie donde incide la radiación se considera constituida por multitud de pequeñas superficies especulares donde se origina la reflexión regular, la suma de todas ellas da lugar a la reflexión difusa.

<i>Reflectancia especular</i>	<i>Reflectancia difusa</i>
Reflexión desde una superficie pulida (<i>front surface</i> , superficie frontal).	Reflexión desde una superficie mate.
Virtualmente la radiación no penetra en la muestra.	La radiación pasa el interior de la muestra. Existe absorción, refracción, reflexión y difracción antes de reemerger a la superficie.
Los ángulos de incidencia y reflexión son iguales. El haz incidente y reflejado están situados en el mismo plano.	La radiación reflejada emerge en todos los ángulos y direcciones desde la superficie.

Tabla 2.2: Características de la reflectancia especular y difusa

Al incidir la radiación sobre una superficie sólida, formada por partículas empaquetadas de tamaño igual o superior a dos veces la longitud de onda de la radiación incidente (hecho que generalmente se cumple en sólidos, cuando se utiliza radiación UV-Visible), tendrá lugar el fenómeno de reflexión, tanto regular como difusa, por el contrario, si el tamaño de las partículas fuese inferior al valor mencionado, se produce el fenómeno óptico de dispersión o *scattering*. Este último tipo de interacción, en el intervalo de longitudes de onda citado, tiene lugar en disoluciones, en dispersiones coloidales y en suspensiones con partículas de un diámetro inferior a $1.5\mu\text{m}$.

Si la muestra solida absorbe selectivamente a determinadas longitudes de onda, la composición de la radiación reflejada difiere considerablemente de la del haz incidente.

La medida de la radiación reemitida, en ambos casos, por la superficie sólida, se lleva a cabo midiendo la relación de las intensidades incidente y reflejada, el parámetro R que se denomina reflectancia por su analogía con el término transmitancia, se utiliza para cuantificar dicha radiación [Concepción, 1996].

$$R = \frac{J}{I} \quad (2.1)$$

en donde:

J : Intensidad de la radiación reemitida por la muestra sólida.

I : Intensidad de la radiación incidente.

Actualmente, en el laboratorio de comunicaciones ópticas de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño existe un sensor para la medición de humedad de suelo utilizando fibra óptica de plástico, el cual detecta una señal retrodispersada (reflectancia), cuya intensidad varía dependiendo del agua contenida en el suelo. Utiliza la modificación de propiedades de la luz incidente de la muestra bajo prueba, es decir, para medir las variaciones de humedad de suelo por medio de luz, éste sensor utiliza luz láser de HeNe con una longitud de onda de 632.82nm . El sistema de este sensor básicamente está constituido por tres etapas: acoplador óptico, una etapa de amplificación con detección síncrona (sincronización chopper o lock-in) y la comunicación entre el equipo de medición y una PC por medio del ducto estándar de comunicación GPIB. Este sensor detecta una señal retrodispersada muy pequeña e inmersa en ruido, la señal es tan pequeña que solo puede ser recuperada por la técnica especial chopper o lock-in (la señal ya amplificada es del orden de mV), es decir la información solo puede recuperarse con ayuda de la detección síncrona, por lo que, a continuación se describirá la teoría relativa al proceso de detección síncrona [Amador Bartolini, 2009].

2.4. Sistema de detección síncrona

Para poder describir la operación de un sistema de detección síncrona, se deben mencionar las condiciones de manejo de señal.

En primer lugar, el espectro de la señal de información en el dominio de la frecuencia debe trasladarse a una región en donde el ruido $1/f$ presente una contribución despreciable con respecto a la propia señal de información, dicho proceso se realiza por medio de una modulación, en éste caso del tipo modulación por amplitud de impulsos. Para explicar con más detalle el proceso mencionado anteriormente, se describirán los conceptos básicos involucrados en la conversión y procesamiento de la señal.

2.4.1. Teorema de muestreo

Una operación básica para construir un sistemas de modulación de pulsos es el proceso de muestreo, en donde una señal analógica se convierte en una secuencia de números que normalmente están uniformemente espaciados en el tiempo. Para que dicho proceso tenga utilidad práctica es necesario elegir la tasa de muestreo adecuadamente de modo que esa secuencia de números identifique de forma única a la señal analógica original. El término banda base se emplea para designar la banda original de frecuencias de la señal, es decir, la banda de frecuencias que entrega la fuente original del mensaje de entrada. Es importante tener en cuenta la banda base de la señal $f(t)$ para trasladarla de nuevo a su frecuencia original, a esto se le llama reconstrucción de señal, a partir de una señal muestreada definida por:

$$f_s(t) = f(t) \cdot p_T(t) \quad (2.2)$$

en donde:

$f(t)$: Señal de entrada.

$f_s(t)$: Señal de salida.

$p_T(t)$: Tren de impulsos.

En la Figura 2.2 se muestra la señal $f(t)$ y su espectro de Fourier respectivo, en esta figura se puede observar que el ancho de banda de la señal de información está limitado a B Hz y que la señal correspondiente en principio puede recuperarse por medio de un filtro pasa bajas.

Las $p_T(t)$ corresponde a un tren de impulsos tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, tal como puede verse en la Figura 2.3. Esta señal es multiplicada por la señal $f(t)$ para generar la señal muestreada $f_s(t)$.

La resultante en tiempo de la señal $f_s(t)$ es muestreada en la Figura 2.6, en la Figura 2.4se observa que los impulsos adquieren el valor instantaneo de la señal $f(t)$, produciendo un tren de impulsos con amplitudes instantaneas correspondientes a los instantes de muestreo de la señal $f(t)$. En el dominio de la frecuencia la multiplicación

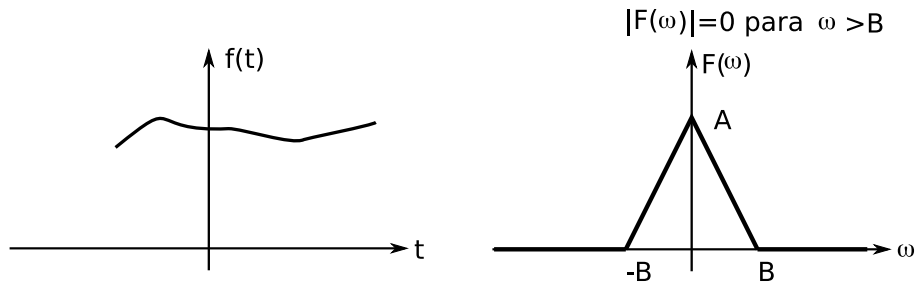


Figura 2.2: Señal de información en los dominios del tiempo (izquierda) y la frecuencia (derecha).

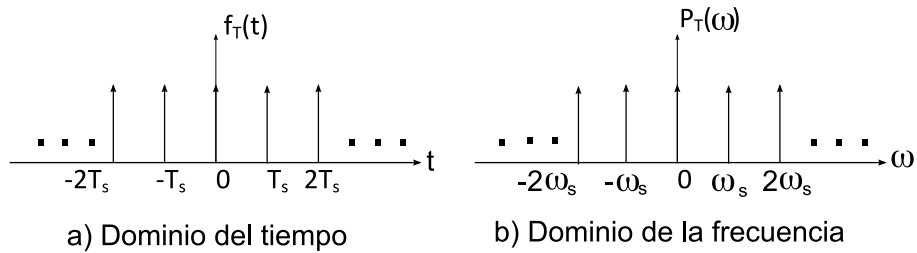


Figura 2.3: Tren de impulsos de muestreo.

en tiempo corresponde a la convolución [P.HSU, 1973]. La convolución del espectro de la señal original $F(\omega)$ con el espectro de la señal $P_T(\omega)$ dará como resultado la repetición del espectro $F(\omega)$ desplazando a múltiplos de ω_s (frecuencia de muestreo) tal como se observa en la Figura 2.6.

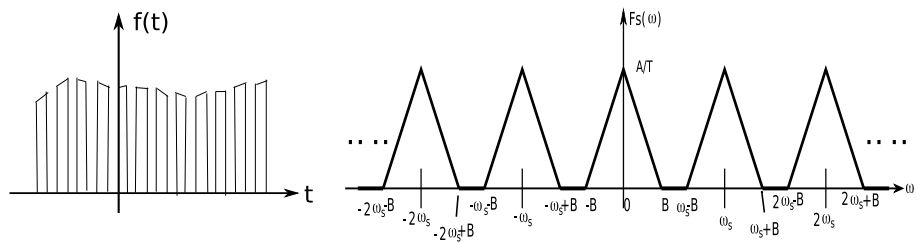


Figura 2.4: Señal de información muestreada en los dominios del tiempo (izquierda) y la frecuencia (derecha).

De la Figura 2.6 se observa que para poder recuperar la señal original se requiere que:

$$\omega_s \geq 2B \tag{2.3}$$

en donde:

B : Ancho de banda.

ω_s : Frecuencia de muestreo.

ya que si la frecuencia de muestreo es menor a esta frecuencia (frecuencia de Nyquist) el espectro desplazado a ω_s se traslapara con el espectro original en banda base causando una distorsión y por lo tanto no se podrá recuperar la señal original.

Si se pasa la señal muestreada por un filtro pasabajas como se muestra en la Figura 2.8 cuya respuesta en frecuencia es la mostrada en la Figura 2.7, se obtendra nuevamente el espectro de la señal original, por lo tanto e el tiempo se tendrá la señal de información recuperada después del proceso de muestreo.

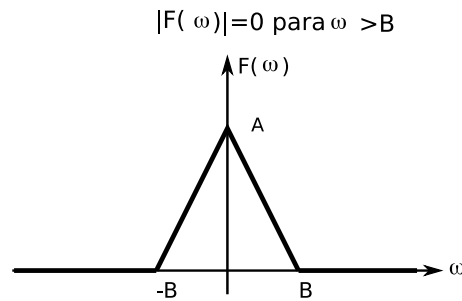


Figura 2.5: Transformada de Fourier de $f(t)$.

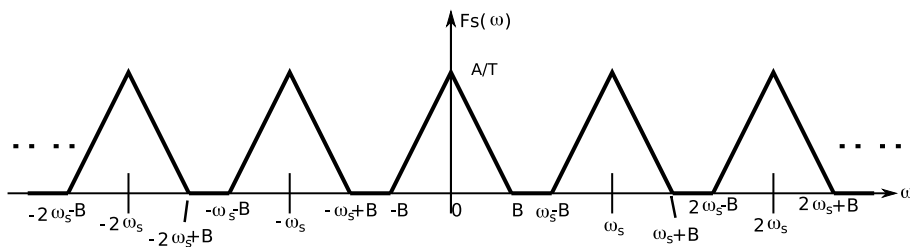


Figura 2.6: Transformada de Fourier de $f_s(t) = f(t)p_T(t)$.

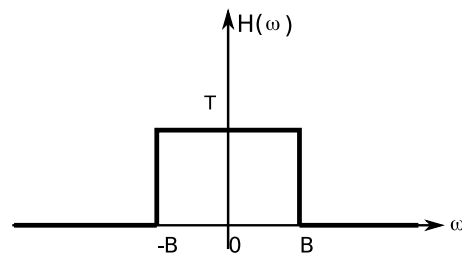


Figura 2.7: Función de respuesta en frecuencia del filtro ideal pasa baja con un ancho de banda B .

La reconstrucción de $f(t)$ a partir de la señal muestreada $f_s(t) = f(t)p_T(t)$ puede realizarse mediante la utilización de un filtro pasa bajas con frecuencia de corte B , si se elige la frecuencia de muestreo ω_s mayor o igual que $2B$. La frecuencia

mínima de muestreo $\omega_s = 2B$ se conoce como frecuencia de muestreo de Nyquist [Edward W. Karmen, 2008].

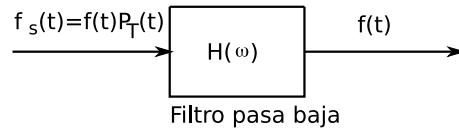


Figura 2.8: Reconstrucción de $f(t)$ a partir de $f_s(t) = f(t)p_T(t)$.

Modulador de interrupción (muestreo natural)

Si $f(t)$ es una forma de onda analógica limitada por una banda a B hertz, entonces la señal PAM que utiliza *muestreo natural* está dada por:

$$f_s(t) = f(t)p_T(t) \tag{2.4}$$

en donde:

$f_s(t)$: Señal de salida

$f(t)$: Señal de entrada

$p_T(t)$: Tren de impulsos

la señal $p_T(t)$ obtenida a través de series de Fourier es igual a:

$$p_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\tau}{T_s} Sa\left(\frac{n\omega_s T}{2}\right) e^{jn\omega_s t} \tag{2.5}$$

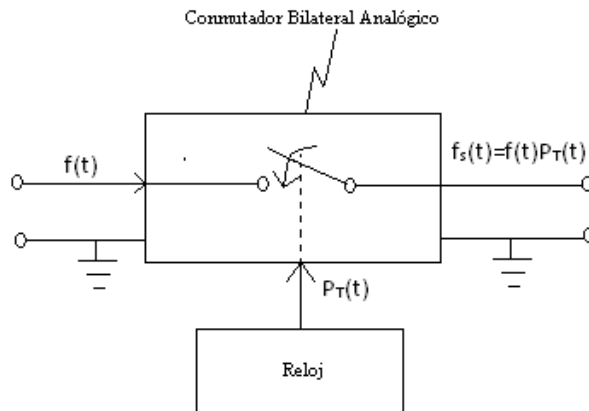


Figura 2.9: Generación de PAM con muestreo natural (por compuerta).

Si se considera una señal pasa-bajas $f(t)$ de banda limitada a B Hz multiplicada por un tren de impulsos cuadrados $p_T(t)$, en donde el intervalo de muestreo T_s es el intervalo de Nyquist $(2f_m)^{-1}$ segundos.

La densidad espectral de la señal muestreada se calcula por medio de la transformada de Fourier de la ecuación anterior:

$$F_s(\omega) = \frac{1}{2\pi} F(\omega) \otimes P(\omega) \quad (2.6)$$

en donde:

- $P(\omega)$: Tren de impulsos en el dominio de la frecuencia
- $F(\omega)$: Señal de entrada en el dominio de la frecuencia
- $F_s(\omega)$: Señal muestreada en el dominio de la frecuencia

se puede demostrar que el espectro de Fourier de la señal $p_T(t)$ es igual a:

$$P(\omega) = \frac{2\pi\tau}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Sa\left(\frac{n\omega_s\tau}{2}\right)\delta(\omega - n\omega_s) \quad (2.7)$$

Por lo tanto la expresión analítica equivalente al muestreo natural en el dominio de la frecuencia está dado por:

$$F_s(\omega) = \frac{1}{2\pi} F(\omega) \otimes \frac{\tau}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Sa\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) 2\pi\delta\left(\omega - \frac{n2\pi}{T}\right) \quad (2.8)$$

en donde el segundo término corresponde a la transformada de Fourier de un tren de impulsos rectangulares. Puesto que la función de muestreo (“sampling”) de este término es constante en relación a la frecuencia angular, puede salir de la convolución, quedando únicamente la convolución de $F(\omega)$ con la función impulso, aplicando ahora las propiedades de la función impulso la ecuación del muestreo natural en el dominio de la frecuencia quedará como:

$$F_s(\omega) = \frac{\tau}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Sa\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) F\left(\omega - \frac{n2\pi}{T}\right) \quad (2.9)$$

De lo anterior se puede concluir que el muestreo natural de $f(t)$ produce la generación de réplicas espectrales de $F(\omega)$ en múltiplos de la razón del muestreo con una amplitud dada por la función “sampling”. Los pulsos muestreadores no tienen que ser de forma cuadrada; la elección de la forma del pulso sólo alterará la forma de la envolvente del espectro de $F_s(\omega)$. Lo importante es que cada réplica espectral generada sea una reproducción exacta de la densidad espectral original $F(\omega)$ desplazada en frecuencia. La señal original puede recuperarse de la señal muestreada $f_s(t)$ usando un filtro pasa-banda [Stremmer, 1989] [Couch, 2008].

$$V_0 = F_{pb}\{F_s(\omega)\} = F_{pb}\left\{\frac{\tau}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Sa\frac{n\omega_s\tau}{2} F(\omega - n\omega_s)\right\} \quad (2.10)$$

al pasar a través del filtro se tiene un proceso equivalente a demodular una señal en amplitud modulada(AM), por lo tanto la señal en el dominio de la frecuencia será:

$$\frac{1}{2\pi} F(\omega + \omega_s) \otimes P(\omega) \quad (2.11)$$

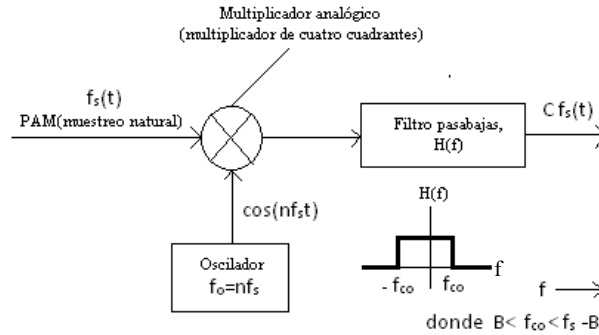


Figura 2.10: Demodulación de una señal PAM con muestreo natural.

2.5. Ruido

En un sistema, toda señal llega contaminada por otras señales. Si esta contaminación (ruido) es de frecuencia y amplitud similar a la señal, de información, esta será enmascarada. Para poder recuperar la información es necesario entonces cuantificar el ruido, analizar la señal e identificar las contribuciones de ruido en todo elemento electrónico. El ruido se define como todo aquel conjunto de señales que se superponen a la señal deseada y la degradan. Estas señales de ruido son producidas tanto por causas externas como internas del propio elemento de comunicaciones. Un ejemplo de causa externa, se puede encontrar en sensores ópticos, en donde la luz ambiente del lugar en el que se realiza la medición afectaría el nivel detectado de la señal medida. Un ejemplo de causa interna se puede localizar en los propios componentes de los circuitos, ya que todos los dispositivos electrónicos generan ruido. El ruido interno más común es el ruido térmico, este tipo de ruido existe en todos los circuitos y dispositivo, y se produce por los movimientos aleatorios de cargas eléctricas en los medios conductores y semiconductores causado por la energía térmica. Cuanto mayor sea la temperatura mayor será el ruido. El Ruido puede clasificarse según su origen en relación al dispositivo receptor en Ruido Intrínseco y Ruido Extrínseco.

Ruido Intrínseco

Se debe al comportamiento de los componentes que forman el sistema o dispositivo electrónico. Pueden distinguirse tres tipos de éste Ruido: Ruido Johnson o térmico, Ruido Flicker y Ruido Shot.

Ruido en componentes pasivos.

1. Ruido Johnson o térmico.- El ruido térmico se dice que está presente cuando en el interior de una resistencia aparece una tensión, que fluctúa de forma aleatoria, y que se debe a la influencia del movimiento al azar que tienen los electrones a causa de la energía térmica, la expresión que describe éste tipo de ruido es:

$$e_n^2 = 4KTReZ(f)B \quad (2.12)$$

en donde:

e_n^2 : Densidad espectral de potencia de ruido.

$ReZ(f)$: Componente resistiva de $Z(f)$ [Ω].

T : Temperatura [$^{\circ}\text{K}$].

K : Constante de Boltzman = 1.38×10^{-23} [$\text{W}\cdot\text{s}/^{\circ}\text{K}$].

B : Ancho de banda [Hz].

Ruido en elementos activos.

1. Ruido Flicker.- El Ruido Flicker o rosa, se produce por las variaciones de velocidad de los electrones o de los huecos en el interior de un semiconductor debido a fallas en el material. El ruido Flicker, al contrario que el Johnson o el shot, puede minimizarse para muchos casos prácticos, dado que su influencia, sólo sera notable a bajas frecuencias. El ruido de flicker también se conoce como ruido 1/f por tener una característica de amplitud que es inversa a la frecuencia y deja de tener influencia por encima de los 1000 Hz para los transistores.
2. El Ruido Shot .- Su nombre es una contracción del ruido Shottky. Este es causado por fluctuaciones aleatorias en el movimiento de portadoras de carga en un conductor. El flujo de corriente es debido a los electrones cargados que se mueven de acuerdo con un potencial aplicado. cuando los electrones encuentran una barrera, empiezan a almacenar energía hasta que esta es suficiente para cruzar esta barrera. cuando los electrones tienen energía suficiente, esta es abruptamente transformada en energía cinética conforme los electrones cruzan la barrera de potencial, la energía almacenada es liberada cuando el electrón cruza esta barrera, cada electrón contribuye con un “estallido” cuando la energía almacenada es liberada, lo que genera este tipo de ruido[Arnau Vives et al., 2000].

Ruido Extrínseco

Puede ser producido de forma natural, voluntaria o arbitraria y hace que la señal que llega al receptor tenga superpuesta una perturbación que trata de enmascararla.

Ruido Natural.- Es debido en su mayoría al conjunto de fenómenos atmosféricos que se producen en la tierra, incluso perturbaciones producidas por otros planetas o el sol. Son de destacar, como ruido natural, las ondas electromagnéticas producidas por los rayos (que crean una gran descarga de energía eléctrica) y las interferencias de origen cósmico (que perturban especialmente a señales de alta frecuencia).

Ruido Accidental.- Es el más común e importante y está formado por varios tipos de perturbaciones:

1. Diafonías o interferencias, entre emisoras especialmente, producidas al no respetarse al margen de frecuencias que separa unas de otras.
2. Perturbaciones debidas a parásitos industriales, es decir, a todo aquello que implique modificaciones de corrientes eléctricas ya que se emiten ondas amortiguadas en banda ancha de frecuencia.
3. Interferencias producidas por campos eléctricos y electromagnéticos, los cuales interactúan entre sí mediante acoplamientos capacitivos, inductivos y por radiaciones electromagnéticas[Arnau Vives et al., 2000].

Para proposito de este trabajo el ruido más importante es el ruido de flicker, ya que el sensor óptico que se utilizará mide variaciones de señal luminosa muy lentas de muy baja frecuencia, por lo que la contribución del ruido flicker en la señal es mayor que cualquiera de los otros tipos de ruido. Para recuperar este tipo de señales se necesita de técnicas especiales como es el amplificador lock-in por lo que esta técnica será descrita a continuación.

2.6. Métodos empleados para recuperar señales muy débiles y de muy baja frecuencia

2.6.1. Amplificador Lock-in:

Cuando se desea amplificar una señal que se encuentra inmersa en ruido y que además, como en este caso, que se tiene una señal proveniente de un sensor de humedad basado en retrodispersión de luz, con un nivel considerable de desbalance (offset) y cuya frecuencia de cambio es del orden de minutos, se requiere la aplicación de técnicas de amplificación y acondicionamiento no convencionales. La técnica más conocida para tratar éste tipo de señales se basa en la detección síncrona y los instrumentos que emplean ésta técnica reciben el nombre de amplificadores *Lock-in*.

En la forma más simple, cuando se tiene una señal de baja frecuencia a la que se desea eliminar el ruido se puede utilizar un filtro del tipo pasa bajas el cual debe calcularse para la frecuencia de trabajo, sin embargo, el ruido en la banda pasante del filtro seguirá presente, eliminándose únicamente el ruido fuera de dicha banda. La frecuencia de corte para el filtro de primer orden más sencillo (tipo RC) se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \text{ [Hz]} \quad (2.13)$$

en donde:

F_c : Frecuencia de corte

R : Resistencia

C : Capacitor

En el caso de que se deseara reducir el ruido a través del filtro pasa bajas en señales de frecuencia ultrabaja, los capacitores resultantes serían de una capacitancia muy alta quedando fuera de los rangos comerciales y si se desarrolla el filtro con componentes comerciales, se tendrían que hacer arreglos de dispositivos y las dimensiones resultantes del circuito serían muy grandes. Por otra parte se tiene la opción de implementar un amplificador para dicha señal, por ejemplo se puede implementar un filtro analógico de primer orden en un circuito impreso con ayuda de un Amp-Op (amplificador operacional). Puesto que se desea amplificar la señal proveniente del sensor óptico para realizar la medición de la variable deseada, es necesario definir la ganancia del amplificador operacional, es decir:

$$A_v = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} \quad (2.14)$$

en donde:

A_v : Ganancia del Amplificador Operacional (Op-Amp)

V_{sal} : Voltaje de salida

V_{ent} : Voltaje de entrada

Sin embargo, en dicha expresión solo se toman en cuenta los voltajes de entrada y salida y se deja de lado la contribución de ruido.

En todo componente electrónico, se tiene presente un factor de ruido conocido como Figura de Ruido (F), en realidad éste factor de ruido representa la contribución de ruido del componente y en general se expresa en decibeles (dB). Las expresiones que describen el factor de ruido se expresan de la forma siguiente:

$$F = \frac{SNR_{sal}}{SNR_{ent}} \quad (2.15)$$

$$F_{dB} = 10 \log(F) \quad (2.16)$$

en donde:

F : Figura de ruido.

SNR_{sal} : Relación Señal a Ruido de salida.

SNR_{ent} : Relación Señal a Ruido de entrada.

F_{dB} : Figura de ruido en decibeles.

Este parámetro sirve para caracterizar los sistemas donde las ganancias y pérdidas suelen darse en decibeles, dada la mayor operatividad de éstos frente a las unidades lineales. Es evidente que lo ideal sería tener una figura de ruido nula, pero en la practica esto no sucede, por esto al utilizar este tipo de amplificador no solo se le estaría sumando ruido a la señal de entrada, sino que también se estaría amplificando la señal de interés inmersa en ruido y a la salida se tendría el mismo problema solo que amplificado [Arnau Vives et al., 2000].

Puesto que la recuperación de la señal se vuelve impráctica por los métodos tradicionales, se requiere de una técnica especial. El amplificador chopper permite la recuperación de las señales de baja frecuencia inmersa en ruido. Su principal función es la de trasladar en frecuencia la señal (que se desea recuperar) para poder ser tratada de forma más conveniente (en este caso amplificarla).

El principio del amplificador chopper se basa en la teoría de operación del amplificador lock-in. Este es un instrumento de medición que tiene como función extraer pequeñas señales inmersas en ruido, el ruido pueden llegar a ser hasta 100 veces mayor a la señal que se desea recuperar. El funcionamiento de todos los amplificadores Lock-in, ya sea del tipo analógico o digital, se basa en el concepto de detección sensitiva de fase. Este circuito está controlado por una forma de onda de referencia, por lo que el amplificador responde eficazmente a las señales coherentes (misma frecuencia y misma fase) sincronizadas con la onda de referencia y rechazando aquellas señales que no están sincronizadas, como lo es el ruido, que es de naturaleza aleatorio.

Este amplificador consta básicamente de cuatro etapas (ver figura 2.11):

1. Ganancia de entrada (amplificador selectivo)
2. Circuito de referencia (desplazador de fase)
3. Demodulador
4. Filtro pasa-bajas

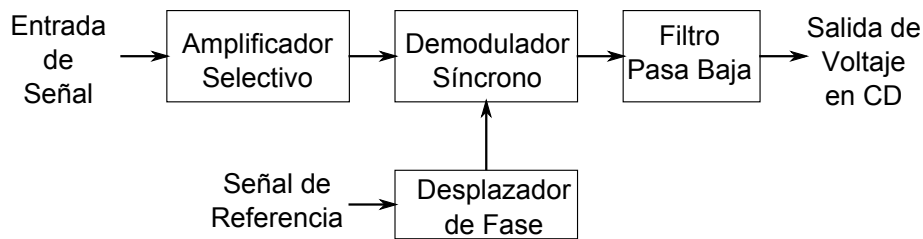


Figura 2.11: Amplificador lock-in.

Ganancia de entrada: Se requiere de un amplificador básico que amplifique la señal de forma selectiva adecuándola a un nivel conveniente para el demodulador.

Circuito de referencia: El circuito de referencia, es un circuito desfasador el cual idealmente debe ser capaz de transmitir una onda sin cambiar su amplitud, aunque si modificando su ángulo de fase de acuerdo con una cantidad preestablecida.

Demodulador: El demodulador es básicamente un multiplicador, el cual toma la señal de entrada y la de referencia y las multiplica. Cuando se multiplican dos señales senoidales periódicas se tiene como resultado la suma y resta de las frecuencias, si la señal de entrada y referencia tienen la misma frecuencia su resta es cero por lo tanto se consigue entonces una señal de CD a la salida, esta corriente directa será proporcional a la amplitud de la señal de entrada. En esta etapa, la señal aún se encuentra inmersa en ruido.

Filtro pasa-bajas: Cuando la señal de información amplificada se hace pasar por el filtro pasabajas, a la salida de este el nivel de ruido será mucho menor que el que originalmente se tenía en banda base.

2.7. Descripción de un sistema simple de medición aplicando el amplificador Lock-in.

Para la descripción del amplificador Lock-in se utilizará la detección de la intensidad de una señal luminosa que varía con periodos del orden de minutos y cuyo nivel de desbalance es superior a un orden de magnitud, comparado con la variación pico-pico de la intensidad. Se tiene entonces un caso de amplificación muy complicada para un esquema típico, como se ha mencionado anteriormente.

La señal luminosa de referencia se hace pasar a través de una muestra que modifica muy lentamente la intensidad de la señal de salida. La señal de salida es recibida en un fotodetector y convertida a señal eléctrica. Posteriormente se amplifica y se mide con ayuda de un osciloscopio.

Gracias a los sistemas modernos de adquisición de datos, es posible almacenar los resultados en una computadora personal y graficar la evolución de la señal recuperada

con respecto al tiempo. La representación gráfica de los procesos a los que es sometida la señal se muestran en las Figuras 2.12, 2.13, 3.5, 2.15, 2.16 y 2.17.

En la gráfica 2.12 se puede observar que la señal de información es de ordenes de magnitud menor que el ruido, por lo que este enmascara a la señal de información, adicionalmente se observa que la energía del ruido a frecuencias cercanas a cero Hz es mucho mayor, debido a la contribución del ruido flicker que es función de $1/f$. También se observa que existen picos en 60, 120 y 180 Hz, los que se encuentran en 60 y 180 Hz se deben a interferencias eléctricas del sistema, mientras que el pico que se encuentra en 120 Hz se debe a luz de iluminación de la habitación.

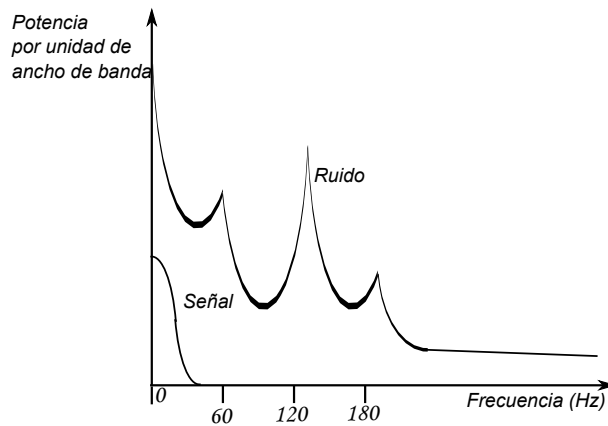


Figura 2.12: Señal inmersa en Ruido.

En la Figura 2.13 se muestra el efecto de un filtro pasa-bajas, se observa que únicamente se elimina el ruido fuera de la banda del filtro (área sombreada), sin embargo, la señal sigue estando enmascarada por el ruido presente en la banda de paso del filtro, por lo que la señal de información no podrá recuperarse.

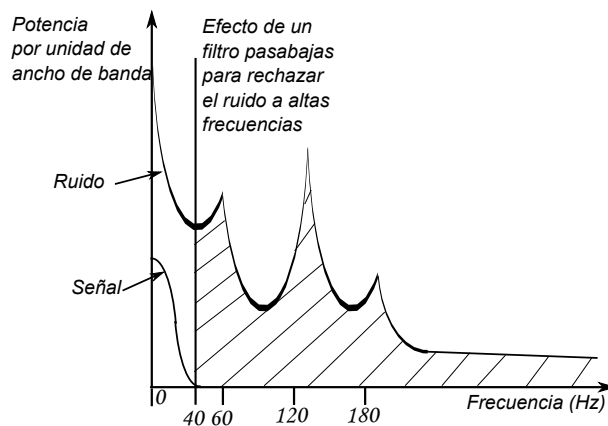


Figura 2.13: Efecto filtro pasa-bajas.

Como se ha mencionado, se requiere de técnicas síncronas para recuperar la señal en dichas condiciones. Al utilizar un troceador (chopper) óptico que interrumpa periódicamente el haz de luz entre la fuente luminosa y el detector se modulará la señal recorriéndola fuera de banda base como se describió en la sección del muestreo natural.

En la Figura 2.14 se muestra el espectro de salida del detector con el chopper funcionando a 205Hz.

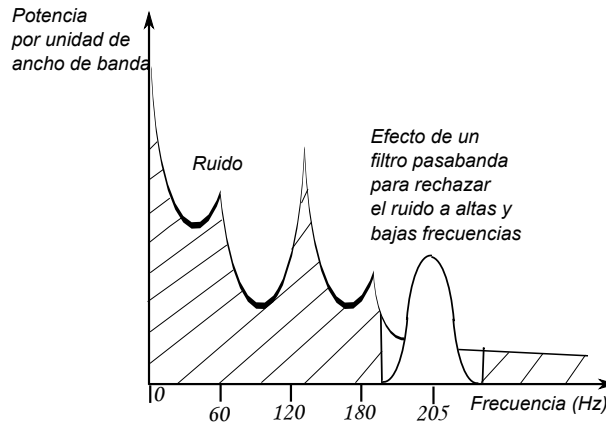


Figura 2.14: Efecto filtro pasa-banda.

Se observa que el ruido de baja frecuencia, que tiene mayor potencia, puede ser eliminado utilizando un filtro pasa banda lo que mejora la relación señal a ruido, ya que la potencia del ruido en esta banda es mucho menor.

Sin embargo, ahora se tiene una señal de CA (corriente alterna) cuyo valor medio es igual a cero. Para regresar la señal amplificada a banda base, se utiliza un arreglo de detector de envolvente, como el mostrado en la Figura 2.15.

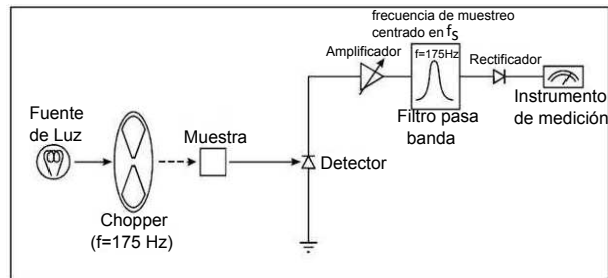


Figura 2.15: Amplificador sintonizado.

A este sistema se le llama amplificador sintonizado. El amplificador sintonizado es utilizado para detectar y medir señales de CA muy pequeñas, incluso de unos pocos nanovolts. Es posible hacer mediciones muy precisas aun si la señal contiene mucho ruido. Éstos amplificadores utilizan una técnica conocida como (PSD) phase-sensitive detection (Detección Sensitiva de Fase), la cual permite aislar una componente de la

señal entrante a una determinada frecuencia y fase de referencia. Todo ruido que posea una frecuencia distinta a la frecuencia de referencia será rechazado y no afectará la medición.

Para éste circuito, entre más estrecho es el ancho de banda del filtro, mayor es el rechazo al ruido. Pero esto tiene 3 desventajas:

1. El factor de calidad (Q) máximo que se consigue en un amplificador sintonizado es de 100, pero puede ser que se necesite un Q de 1000 para lograr una relación señal a ruido aceptable.
2. Si se produce cualquier cambio pequeño en la frecuencia del chopper se presentan grandes cambios a la salida, lo cual provoca que se filtre sólo ruido.
3. El dispositivo rectificador genera una señal de C.D. la cual con el ruido es indistinguible.

Una solución a éste problema se muestra en la Figura 2.16, en donde se tiene el amplificador seguido por un interruptor, el cual es operado por la señal de referencia y está conectado a un filtro pasa-bajas.

Este dispositivo se comporta como un filtro pasa banda y realiza la misma función que un amplificador sintonizado pero con las siguientes ventajas:

- La frecuencia central del filtro es amarrada a la frecuencia del troceador (chopper).
- La señal nunca podrá separarse de la salida del filtro pasa banda, de aquí el nombre de Lock-in (amarrador de fase).
- Cualquier ruido a la entrada se va a reducir en el filtro al ser promediado.

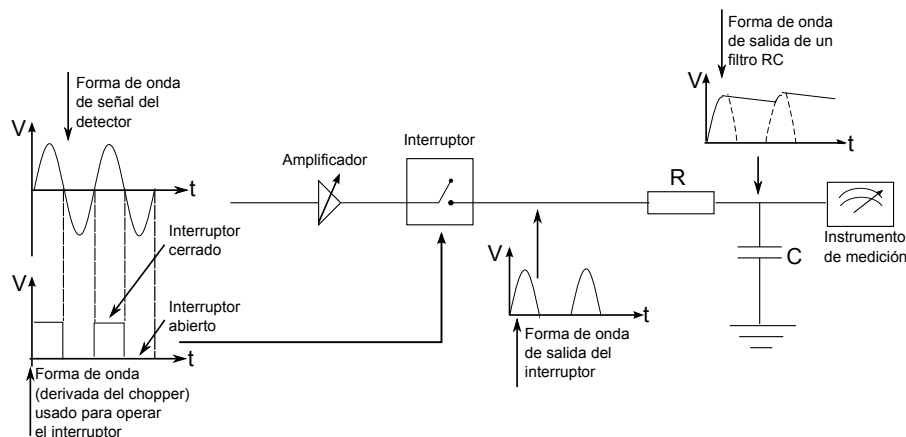


Figura 2.16: Amplificador sintonizado como filtro pasa-banda.

En la Figura 2.16 se puede observar como se pierde la mitad de la señal, mientras que en la Figura 2.17 al agregar dos amplificadores operacionales uno en configuración

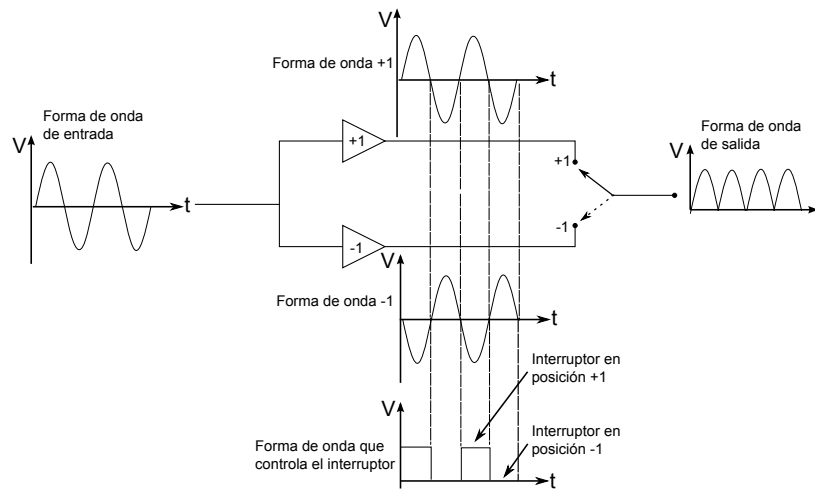


Figura 2.17: Amplificador sintonizado como filtro pasa-banda con amplificador operacional.

no inversora y el otro en configuración inversora se aprovecha toda la señal, aumentando con ello la relación señal a ruido.

En la práctica la señal cuadrada no siempre está sincronizada con la señal de entrada, puede tener desfases, en las Figuras 2.18, 2.19 y 2.20 se muestra lo que sucedería si los desfases fueran de 90° , 180° y 270° respectivamente. De la figura 2.19 se observa que la señal recuperada será inversa en magnitud, mientras que en las figuras 2.18 y 2.20 se tendrá una señal de CA que o corresponde a la información deseada, por lo que se debe garantizar la fase correcta del sistema. Para corregir este problema, el Lock-in incluye una circuitería de corrimiento de fase completa y flexible, la cual permite ajustar el corrimiento de fase de 0° hasta 360° [Bentham Instruments Ltd, 2008].

2.7.1. Teoría del Amplificador Chopper

El amplificador chopper al igual que el amplificador lock-in se caracteriza por recuperar señales inmersas en ruido, básicamente este amplificador permite amplificar las variaciones de la señal deseada, independientemente de su nivel de desbalance, amplitud y variación lenta.

Las etapas que componen un amplificador chopper son las siguientes: muestreo, modulación, amplificación, muestreo y filtrado.

En la figura 2.21 se muestra una señal de información cuya variación es de una frecuencia muy baja con un nivel de voltaje mucho menor que el ruido, la cual servirá para describir el funcionamiento del amplificador chopper.

El primer paso para poder recuperar la señal de interés, es el de trasladarla en frecuencia, lo cual se logra con ayuda de una etapa de muestreo, cuya salida se muestra en la Figura 3.3.

La ecuación que describe el muestreo en el dominio del tiempo es la siguiente:

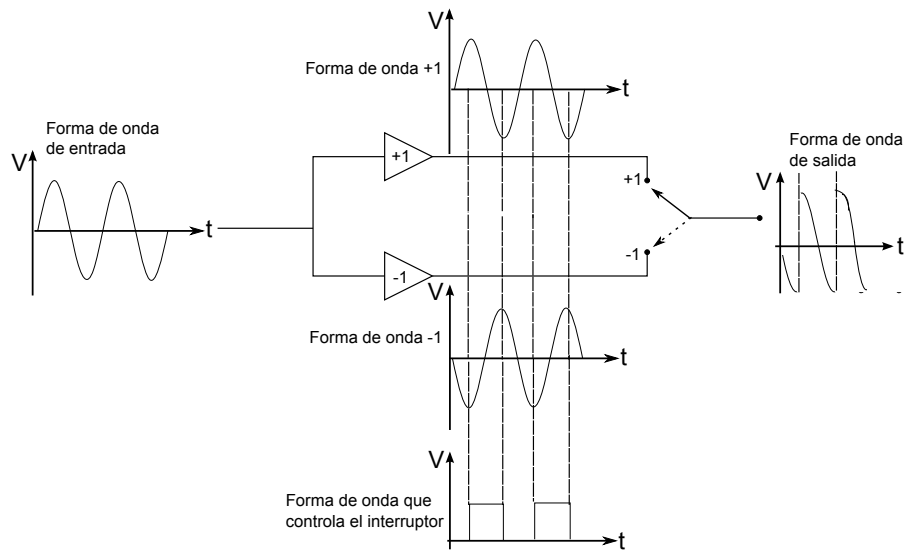


Figura 2.18: Señal de referencia desfasada 90°.

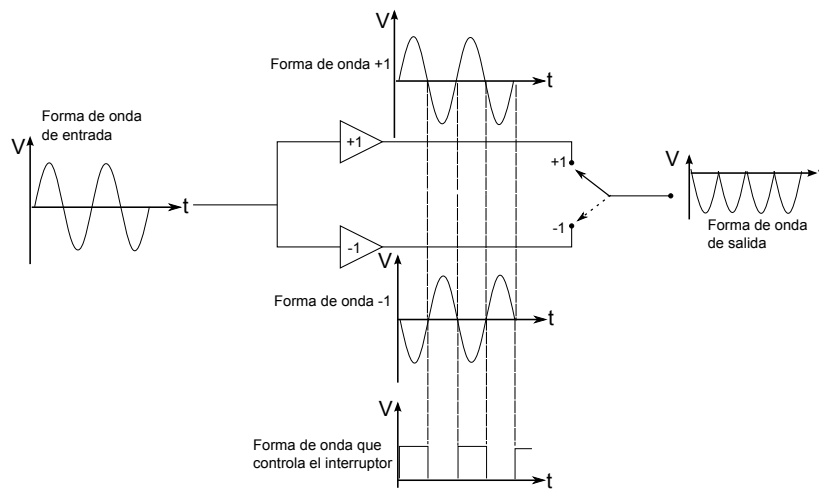


Figura 2.19: Señal de referencia desfasada 180°

$$g\delta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nT_s)\delta(t - nT_s) \tag{2.17}$$

donde:

$g\delta(t)$: Muestreo de la señal

$g(nT_s)$: Secuencia de impulsos

$\delta(t - nT_s)$: Tren de deltas (impulsos muy angostos) espaciado

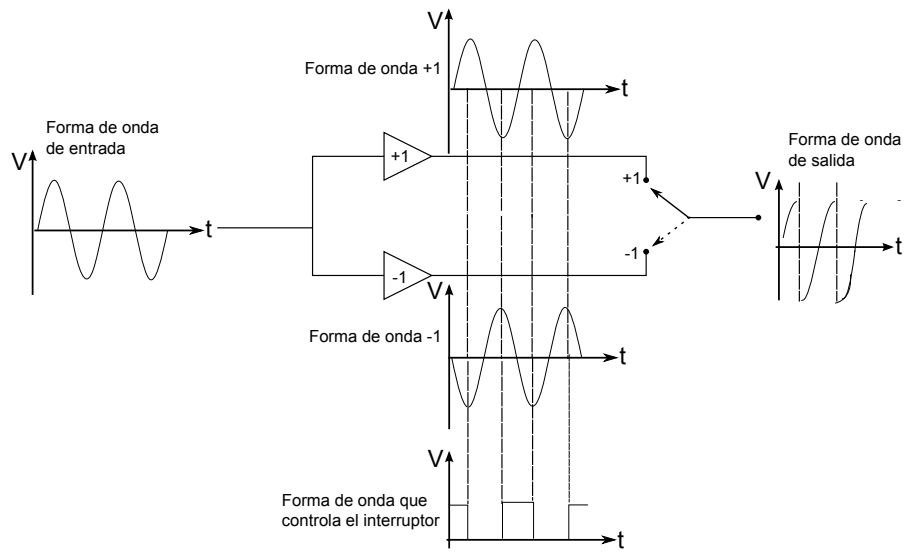


Figura 2.20: Señal de referencia desfasada 270°.

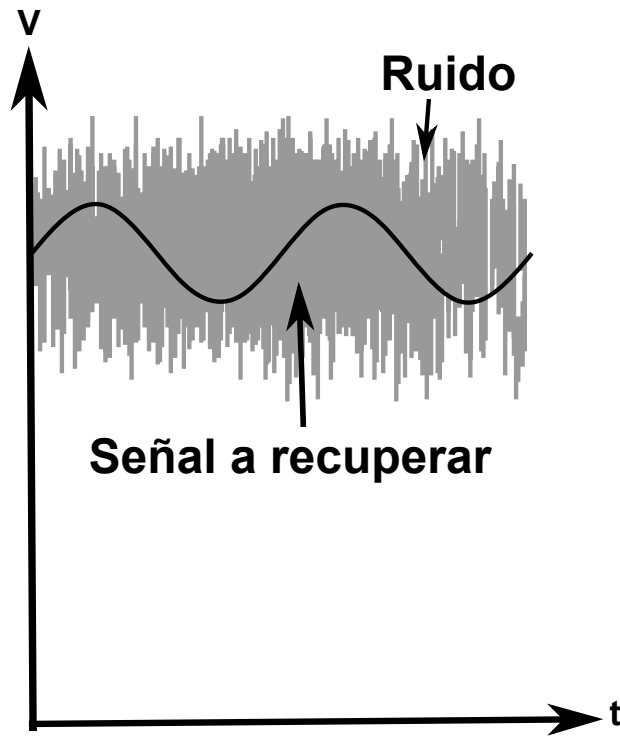


Figura 2.21: Señal inmersa en Ruido.

El segundo paso es eliminar el desbalance de la señal, lo cual se logra a través de la modulación.

La modulación se puede representar matemáticamente de la siguiente manera:

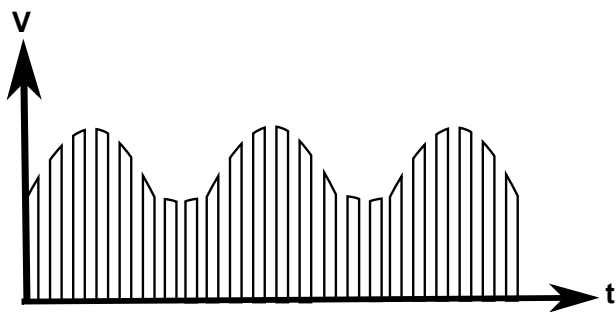


Figura 2.22: Señal Muestreada.

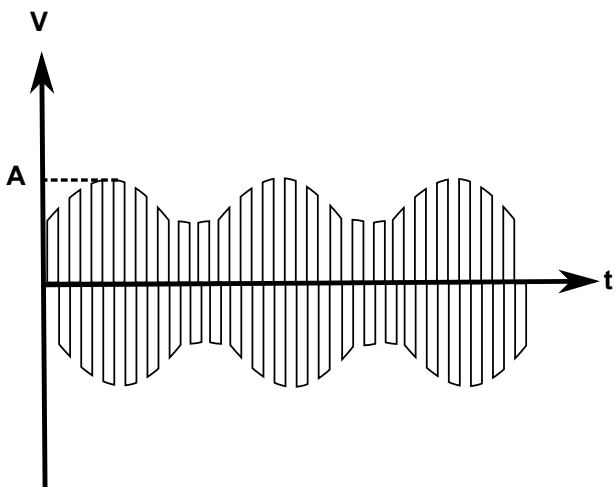


Figura 2.23: Señal Modulada.

$$f(t) = k[1 + m(t)]\cos(\omega_c t) \quad (2.18)$$

en donde:

$f(t)$: Señal de amplitud modulada

k : Nivel de potencia de la señal portadora

$m(t)$: Señal moduladora

ω_c : Frecuencia de la señal portadora

La etapa de amplificación se realiza con un amplificador típico, a cuya salida se obtiene sin embargo una señal centrada en la frecuencia de muestreo.

Por medio de un proceso de demodulación (multiplicación por la señal de muestreo) se regresa la señal a su banda base.

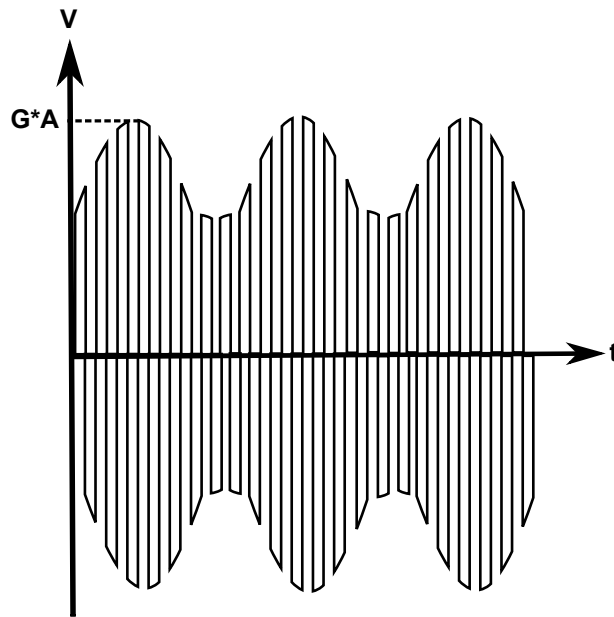


Figura 2.24: Señal Modulada Amplificada.

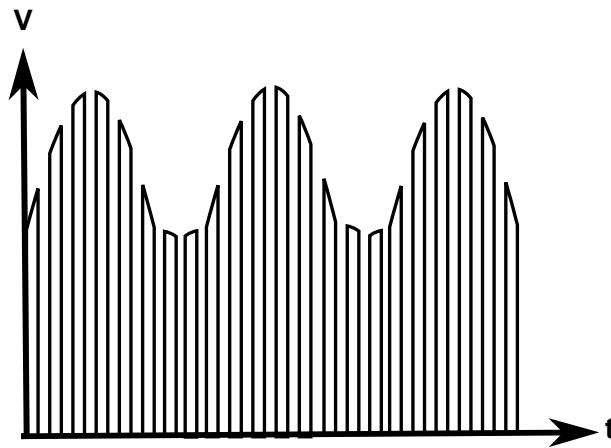


Figura 2.25: Señal Amplificada, con un nivel de c.d. recuperado.

La relación señal a ruido puede mejorarse con ayuda de un filtro pasa banda, como el mostrado en la Figura 2.26 centrado en la frecuencia de muestreo y cuya respuesta en frecuencia puede observarse en la Figura 2.27.

La función de transferencia del filtro mencionado (ver Figura 2.26), se representa por medio de la siguiente ecuación:

$$H(s) = \frac{sk_1}{s^2 + sk_2 + k_3} \quad (2.19)$$

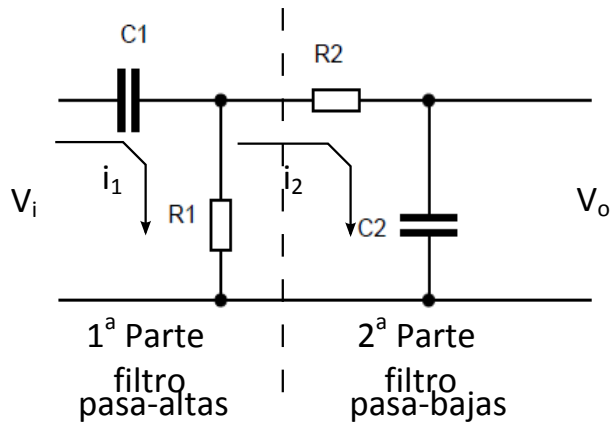


Figura 2.26: Filtro pasa-banda tipo RC.

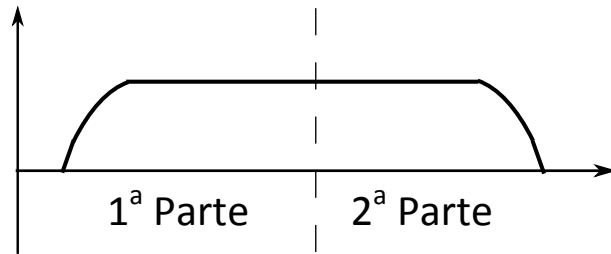


Figura 2.27: Filtro pasa-banda.

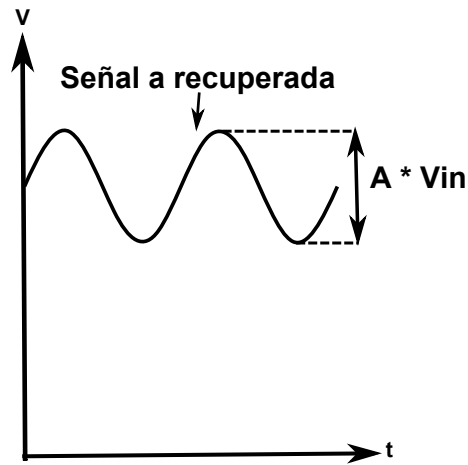


Figura 2.28: Señal Filtrada.

$$k_1 = \frac{1}{R_2 C_2} \tag{2.20}$$

$$k_2 = \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_1} \tag{2.21}$$

$$k_3 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \tag{2.22}$$

en donde:

$H(s)$: Función de transferencia del filtro.

s : Variable en el dominio de Laplace.

Capítulo 3

Diseño del amplificador chopper

Como se mencionó anteriormente, el objetivo del presente trabajo tiene como fin desarrollar un sistema para amplificar señales provenientes de un sensor óptico de humedad basado en un proceso de retrodispersión de la luz (ver figura 3.1), es decir; este dispositivo permite evaluar la humedad en el suelo en base a la variación de la intensidad de la señal retrodispersada por el sensor. Entre las principales ventajas que presenta este dispositivo con respecto a dispositivos electrónicos se pueden mencionar: inmunidad a interferencia electromagnética, peso, tamaño reducido y versatilidad.

El sensor de humedad es excitado con una señal luminosa proveniente de un láser del tipo Helio-Neon (He-Ne) cuya longitud de onda corresponde aproximadamente a 633 nm. Para inyectar la excitación luminosa y poder recuperar la señal retrodispersada es necesario emplear un dispositivo llamado opto-acoplador 2x2 (con dos entradas y dos salidas) cuya distribución de potencias de salida es 90/10, es decir por una salida se obtiene el 90 % de la señal de entrada y consecuentemente por la otra salida se obtiene el 10 % de la señal de entrada. En la Figura 3.2 se muestra de forma esquemática un opto-acoplador como el descrito en el párrafo anterior, las entradas son marcadas con los números (1) y (4), mientras que las salidas corresponden a los números (2) y (3). Para el caso del sensor utilizado, la señal de excitación se inyecta por la entrada (1), la señal de salida (3) es enviada por medio de una fibra óptica hacia la muestra bajo prueba. Al incidir la luz sobre la muestra, parte de la energía será absorbida (el porcentaje dependerá del contenido de agua) y parte será reflejada, a su vez, de la señal reflejada una parte será acoplada a la fibra y viajará en sentido opuesto a la señal de excitación, Puesto que la señal que viaja en sentido opuesto a la excitación contiene la información sobre las variaciones de humedad, es necesario recuperarla y procesarla. Para la señal de retorno, los puertos (entradas y salidas) del opto-acoplador se encuentran invertidos, es decir, los puertos de salida serán (1) y (4) y las entradas (2) y (3). En realidad, la señal de información de humedad es recolectada en el puerto (4), por lo que es necesario asegurar que no existe otra componente que pueda alterar la señal de información, esto se consigue acoplando la salida (2) a un gel igualador de índice que absorbe toda la energía proveniente del puerto (1) y por lo tanto evita que exista una señal de retorno por el puerto (2). Debido a que el sistema de medición

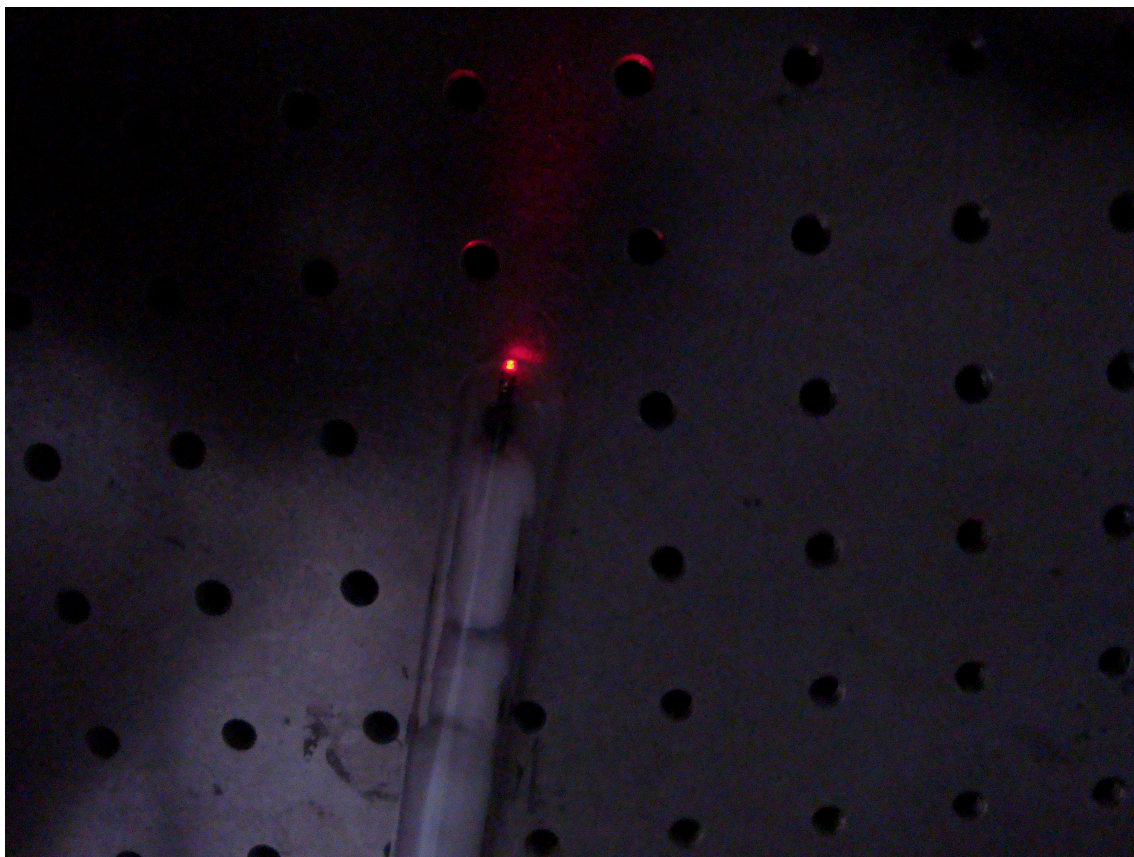


Figura 3.1: Sensor óptico para humedad de suelo.

de humedad de suelo ésta basado en la modulación de la señal óptica reflejada por la muestra del suelo, se requiere de una etapa de detección capaz de operar con variaciones de intensidad luminosa extremadamente pequeñas y lentas [Amador Bartolini, 2009].

Para detectar la señal retrodispersada proveniente del sensor óptico (luz, generada por el tren de impulsos) que se introduce en la muestra bajo prueba se utiliza un fotodetector, el cual convierte la señal de luz en una señal eléctrica que puede procesarse con circuitos electrónicos, el circuito de fotodetección empleado se muestra en la Figura 2.24. Como ya se menciona anteriormente, la señal detectada es de muy baja frecuencia, lo cual implica que es seriamente afectada por el ruido $1/f$ (flicker), para recuperar dicha señal se diseñó el amplificador troceador (Chopper).

3.0.2. Amplificador Chopper

El amplificador chopper tiene como objetivo acondicionar señales (de forma que puedan procesarse por etapas electrónicas posteriores) de amplitud muy pequeña, con una componente de CD muy grande (relativo a la componente de CA) y que varían

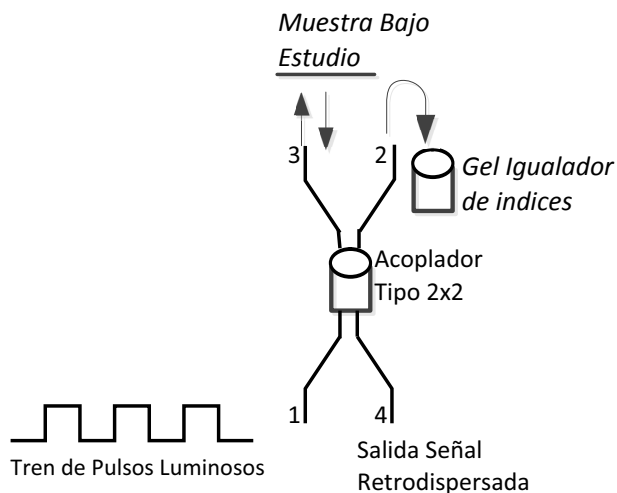


Figura 3.2: Diagrama esquemático del Acoplador utilizado.

muy lentamente (en el orden de minutos). Debido a que la frecuencia de estas señales son inferiores a 5 Hz, la componente del ruido es muy grande, ya que es debida al ruido Flicker ($1/f$), por lo que no pueden ser tratadas de manera convencional debido a las limitaciones de los componentes disponibles comercialmente y de los amplificadores tradicionales, de tal forma que este tipo de señales requiere la utilización de una técnica especial para que la información pueda ser recuperada e interpretada. El esquema utilizado para la amplificación de señales con las características descritas anteriormente se conoce como amplificador chopper, este amplificador basa su funcionamiento en una técnica de detección síncrona, la cual utiliza como referencia una fuente pulsada. El esquema de detección síncrona utilizado en el presente trabajo se describe a continuación.

3.1. Detección síncrona en base a una fuente pulsada

Este tipo de detección se implementa en forma general, con ayuda de un tren de impulsos generado por medio de un multivibrador en configuración astable (circuito integrado LM555), este tren de impulsos controla la intensidad de la fuente luminosa, ya sea un diodo emisor de luz -LED- o diodo láser, de tal forma que al circular la corriente pulsada a través del diodo emisor se emiten pulsos de luz, que en etapas posteriores sirven como referencia para la detección síncrona. Para que la señal de entrada (información) pueda ser amplificada debe ser “troceada”, es decir, se lleva a cabo la multiplicación del tren de pulsos con la señal de entrada lo que da origen a una señal del tipo Amplitud Modulada por Pulsos (PAM por sus siglas en inglés). Para realizar el proceso mencionado, los pulsos son utilizados como señal de control de un circuito multicanalizador (o multiplexor) utilizado en una configuración de interruptor. El efecto de la multiplicación (muestreo) de la señal de entrada es trasladar esta señal a

una frecuencia dada por la frecuencia de la señal de muestreo, tal como se describió en el muestreo natural. Posterior a este traslado en frecuencia se realiza un proceso de modulación que permite eliminar la componente de CD de la señal con el fin de que pueda ser amplificada sin que la componente de CD llegue a saturar al amplificador. Puesto que esta amplificación se realiza a "alta" frecuencia, la contribución del ruido flicker es eliminada. Se dice que la detección es síncrona ya que la fuente luminosa que se utiliza como moduladora para la señal de entrada debe tener la misma frecuencia y fase que la señal que controla al interruptor, de tal manera que a la salida del amplificador se vuelva a multiplicar la señal obtenida con el tren de impulsos de referencia. Este proceso permitirá regresar la señal (previamente amplificada y filtrada) a banda base. Con éste procedimiento se asegura que la magnitud de la señal de salida será muy superior al nivel de ruido que originalmente enmascaraba a la señal de información.

$$\frac{1}{2\pi}F(\omega + \omega_s) \otimes P(\omega) \quad (3.1)$$

3.1.1. Fuente pulsada

Debido a que el amplificador chopper se utilizará para amplificar la señal proveniente de un sensor óptico, se requiere de una fuente luminosa estable y fácilmente controlable por medios electrónicos. La etapa de control para la fuente luminosa que genera los impulsos de luz que se introducen en el sensor óptico, es proporcionada por el circuito integrado LM555. El circuito LM555 permite generar un tren de impulsos con un periodo fijo (Figura 3.3), pero cuyo ciclo de trabajo debe ser ajustado a través de las resistencias R_A y R_B . Para una operación correcta del amplificador chopper se calcularon valores de tiempo iguales en los niveles bajo y alto a fin de conseguir un impulso simétrico, con un ciclo de trabajo de 50 %.

El cálculo de la frecuencia deseada para el tren de pulsos se llevo a cabo utilizando las siguientes ecuaciones [Microelectronics, 1998]:

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

$$T = 0.693 * (R_A + 2R_B) * C \quad (3.3)$$

$$\therefore f = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B) * C} \quad (3.4)$$

en donde:

f : Frecuencia del tren de impulsos (685.71Hz)

T : Periodo entre cada impulso

R_A : Resistencia para controlar periodo y ciclo de trabajo (10K Ω)

R_B : Resistencia para controlar periodo y ciclo de trabajo (100K Ω)

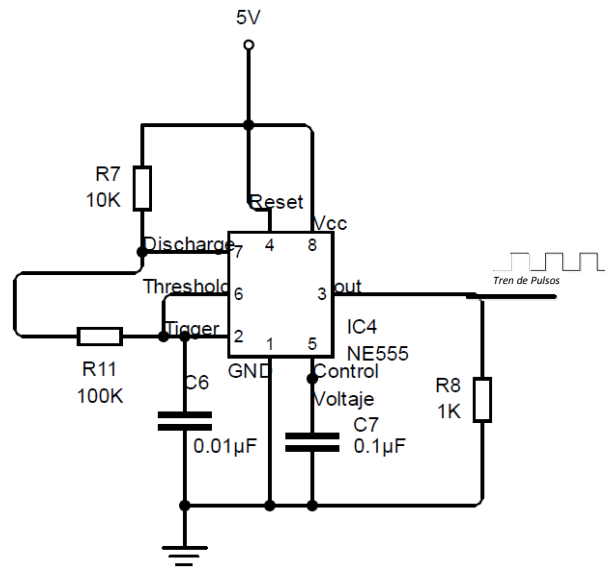


Figura 3.3: Esquema del circuito implementado para la generación del tren de impulsos.

C : Capacitancia para controlar el valor de la frecuencia del tren de impulsos ($0.01\mu\text{f}$)

Un problema con el circuito temporizador LM555 es que no puede generarse una señal simétrica (con ciclo de trabajo de 50%), para lograr esto se utilizó un multivibrador (Flip-Flop) tipo D configurado como divisor de frecuencia, debido a que el reloj de este Flip-Flop es activado por transición de subida, cada ciclo de reloj del temporizador cambiara la salida invirtiendo el valor de esta; esto es, si la salida estaba en 1 lógico cambiara a 0 lógico y viceversa, esto se muestra en la Figura 3.4. En esta misma figura se observa que la frecuencia de salida del Flip-Flop es la mitad de la del temporizador por lo cual la frecuencia del temporizador deberá de ser el doble de la frecuencia de referencia que se desea.

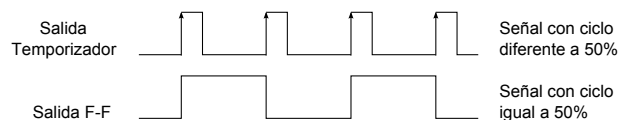


Figura 3.4: Salidas de temporizador y Flip-Flop.

3.1.2. Descripción del amplificador chopper diseñado

Como se mencionó anteriormente, el amplificador chopper consta de las etapas mostradas en la Figura 2.21. En el diagrama esquemático de la Figura 3.5 se muestra la implementación de los bloques correspondientes a las etapas de Señal de entrada, Muestreo, Modulación, Muestreo y Demodulación.

En la primer etapa se indica la señal de entrada, proveniente del sensor óptico para medición de humedad de suelo. En realidad, lo que se tiene es una señal eléctrica proporcional a la señal retrodispersada. A la entrada de la Figura 3.6 se observa el proceso de troceado realizado con ayuda de la señal de referencia (tren de impulsos) que excita a la fuente luminosa.

El troceado corresponde a la etapa de muestreo la cual realiza el traslado en frecuencia de la señal de información de tal forma que pueda ser amplificada. En la configuración 3.11 se puede observar la operación del multicanalizador como interruptor. En esta etapa se tiene una señal de frecuencia igual a 3Hz, y otra señal de pulsos cuadrados con una frecuencia de 685.71Hz, se sabe que $T = \frac{1}{f}$ por lo tanto al sustituir los valores de las señales se obtiene que la frecuencia de muestreo está muy por encima de la frecuencia de la señal original.

Si la señal original tiene una frecuencia $f = 3Hz \therefore T \approx \frac{1}{3}s$ y el tren de impulsos cuadrados con frecuencia $f_s = 685.71Hz \therefore T_s \approx \frac{1}{685.71}s$, esto es $0.333333333s \gg 0.0014583424s$, es decir, se tiene una señal con un alto número de muestras, lo cual proporciona una señal más nítida para recuperar a la salida.

El proceso de troceado se realiza a través del circuito CD4052, este circuito contiene dos multicanalizadores/demulticanalizadores de 4 canales c/u el canal es seleccionado a través de dos líneas de control denominadas B y A. La entrada B, es la entrada de mayor peso, por lo que se conectó a nivel bajo con el fin de limitar la selección de los canales 0 y 1, los cuales se eligen a través de la línea de entrada A, si el valor de esta entrada es cero en la salida se tendrá con la señal retrodispersada proveniente del sensor de humedad, si la entrada A es uno, la salida estará conectada a tierra, con lo cual se logra el muestreo de la señal de entrada. El circuito CD4052 requiere para su funcionamiento ser alimentado con voltajes positivo (V_{CC}) y negativo (V_{DD}), el voltaje máximo de la diferencia debe de ser menor a 15V, se seleccionó un voltaje de $\pm 5V$ debido a que las entradas de control dependen del voltaje V_{DD} y puesto que la entrada A proviene de un circuito TTL, el voltaje máximo deberá limitarse a 5V. La línea de control INH permite habilitar o deshabilitar el circuito, para que este esté activo se requiere mantener esta línea en bajo, por lo cual se colocó directamente a tierra. Como se menciono uno de los problemas a resolver para el funcionamiento correcto del amplificador chopper es la sincronía entre la señal troceada de entrada y la referencia del amplificador. Para solucionar este problema es necesario poder modificar la fase de la señal de referencia, para lograr esta sincronía, para este fin se utilizó el circuito 74123 Figura 3.10 el cual contiene dos circuitos multivibradores monoestables (one-shoot) redisparables. El primer one-shoot se utiliza para poder modificar la fase de la señal de referencia, esto se logra incrementando el periodo en alto de la señal de salida a través del potenciómetro y capacitor correspondiente, puesto que el ciclo de trabajo se modifica, es necesario el segundo one-shoot, el cual tiene como fin ajustar el ciclo de trabajo del circuito desfasador nuevamente al 50%, puesto que la salida del primer one-shoot es la entrada del segundo, el efecto global conseguido es el de desfasar la señal de sincronía de 0° a 360° . Es importante que el ciclo de trabajo se ajuste correctamente para el adecuado funcionamiento del sistema, este ajuste se realiza únicamente al momento

del acondicionamiento inicial del amplificador chopper.

<i>INHIBIT</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>On Channel(s)</i>
0	0	0	0x, 0y
0	0	1	1x, 1y
0	1	0	2x, 2y
0	1	1	3x, 3y
1	x	x	None

Tabla 3.1: Tabla logica del CI CD4052

De la tabla de funcionamiento del circuito 74123 se puede observar que cuando A es mantenido en bajo y CLR en alto, la transición de B que controla el disparo del circuito será la transición de subida, por otra parte, cuando B y CLR se mantienen en alto la transición de bajada de A controlará el disparo de salida. Estas configuraciones fueron las utilizadas en el one-shoot uno y dos respectivamente, de tal forma que a partir de la señal de referencia se obtienen las señales mostradas en la Figura 3.9.

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>CLR</i>	<i>Response</i>
x	x	L	No Trigger
⌊	L	x	No Trigger
⌊	H	H	Trigger
H	⌈	x	No Trigger
L	⌈	H	Trigger
L	H	⌈	Trigger

Tabla 3.2: Tabla logica del CI 74123

La eliminación de la componente de CD se realiza con ayuda del capacitor C_9 , lo cual da origen a una señal similar a la obtenida con una modulación del tipo amplitud modulada (AM), la señal se puede amplificar ahora con un amplificador típico de gran ganancia.

Para la etapa de amplificación se utilizó un amplificador operacional TL084 en configuración no-inversor, con una ganancia $A_v = 100$, dicha etapa amplifica la señal modulada que se encuentra fuera de banda base (muestreada), con el fin de no amplificar el ruido sino solo la señal de interés.

Posteriormente al pasar la señal por el proceso de muestreo con el CD4052 el cual utiliza la misma señal de referencia para que regrese la señal a banda base con un pequeño nivel de ruido, el cual es despreciable comparado con la señal a recuperar, y por ultimo pasa por una etapa de filtrado en la Figura 3.12 un filtro pasa bajas con una $f_c = 7Hz$, donde $\tau = R_1C_1$ el cual es $\gg T_s$, y proporciona la demodulación de la señal. El resultado es una señal de gran nivel, pero en banda base, por lo tanto se obtiene a la salida la señal de interés amplificada, lista para ser recuperada por aparatos comerciales (osciloscopio) y ser llevada a un sistema de adquisición de datos para observar su comportamiento.

3.1.3. Sistema de adquisición automático

Gracias a los avances en los sistemas electrónicos de medición, es posible visualizar y registrar las señales obtenidas en cada etapa del amplificador chopper.

Para realizar dicha tarea, es necesario contar con instrumentos que posean interfaces que permitan su operación con ayuda de una computadora personal, en el caso de éste trabajo se implementó un banco de medición con instrumentos interconectados a través de la interfaz GPIB.

El banco implementado permite capturar los datos medidos y enviarlos por medio de uno de los puertos USB hacia una computadora personal. Para visualizar y procesar la información se utilizó la plataforma Matlab, que inclusive permite el desarrollo de interfaces gráficas para facilitar la interacción del usuario con los instrumentos mencionados.

El banco de medición automática posee la ventaja adicional de realizar mediciones por largos periodos de tiempo, eliminando errores humanos y manteniendo un registro pormenorizado de las variables de interés, en éste caso la medición de humedad.

3.1.4. Interfaz gráfica

Finalmente, para poder interpretar la señal proveniente del sensor óptico se desarrolló una interfaz gráfica elaborada con ayuda del programa Matlab, por medio de este programa se pueden controlar los instrumentos de medición, que para éste caso son: osciloscopio, multímetro, fuente de voltaje y generador de funciones. Permite también almacenar los datos adquiridos y controlar su visualización en cualquier momento, los datos fueron graficados para mostrar el comportamiento de la señal y así poder deducir el cambio de humedad de la muestra bajo prueba. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento exponencial inverso. Finalmente, es necesario recalcar la versatilidad del banco de caracterización automática, que permite seleccionar los tiempos de muestreo e intervalos de caracterización de acuerdo a las necesidades particulares del usuario.

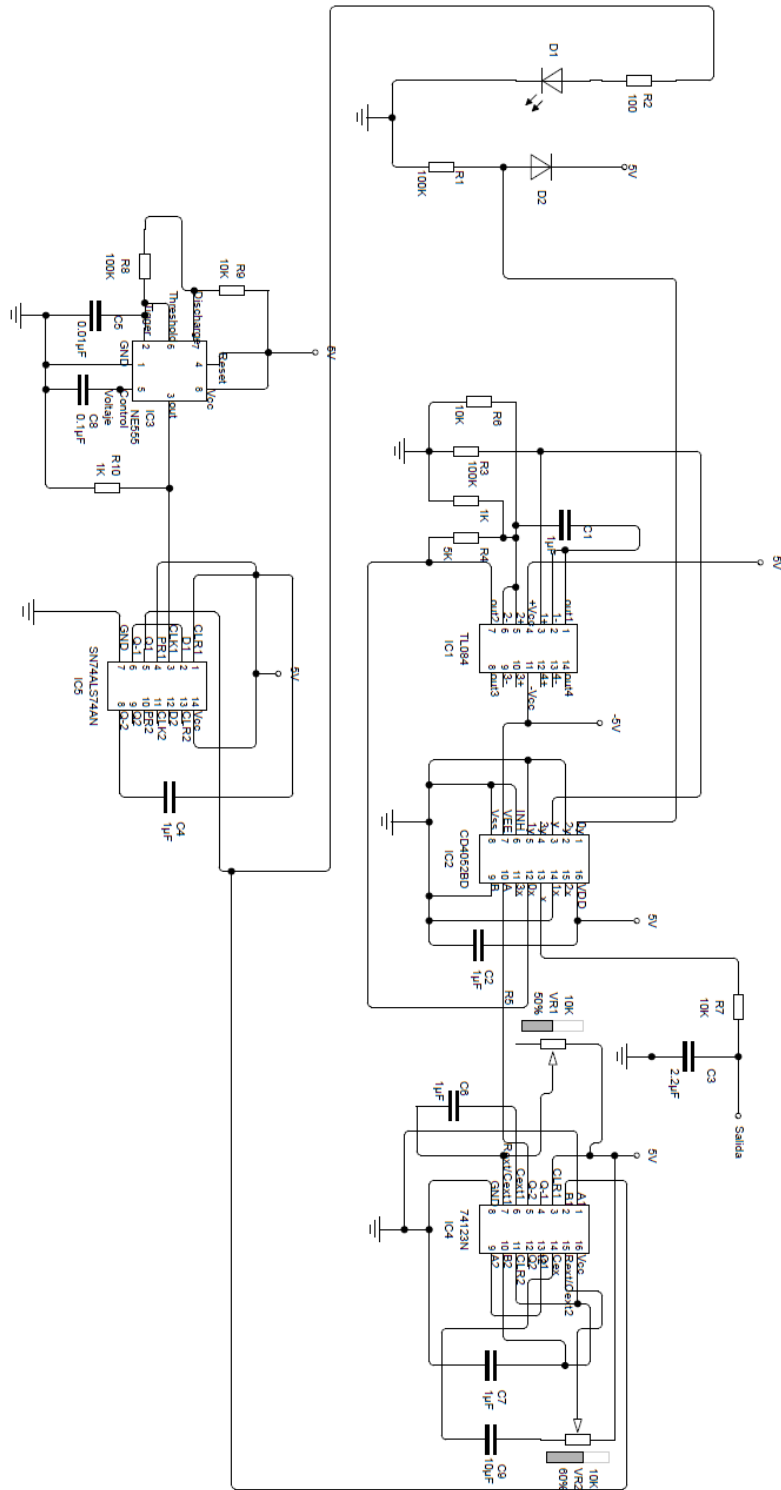


Figura 3.5: Diagrama esquemático completo del amplificador chopper empleado para la detección de la señal retrodispersada.

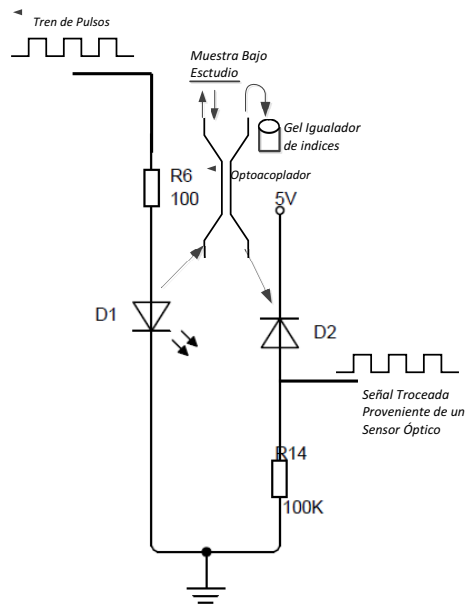


Figura 3.6: Recuperación de una señal eléctrica proporcional a la señal retrodispersada proveniente del sensor óptico.

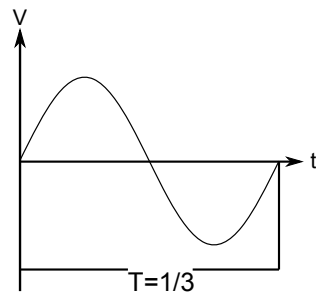


Figura 3.7: Señal original con frecuencia de 3Hz.

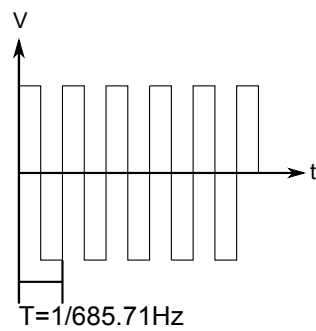


Figura 3.8: Tren de impulsos con frecuencia de 687.71Hz.

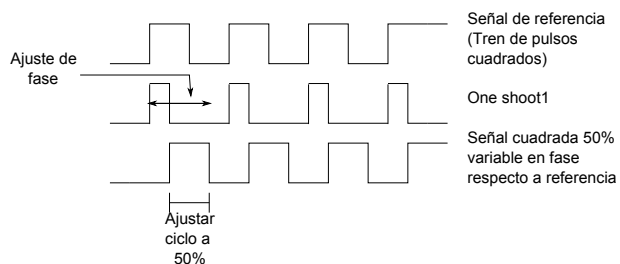


Figura 3.9: Señales del circuito de defasamiento.

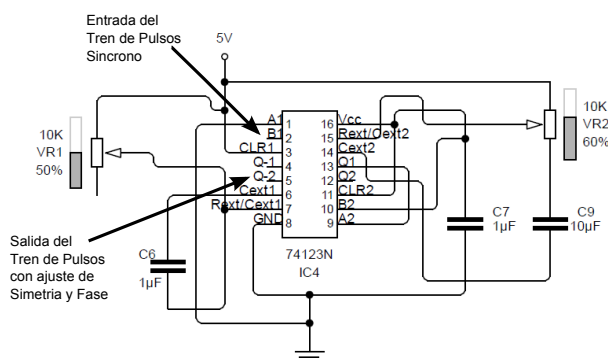


Figura 3.10: Circuito de defasamiento.

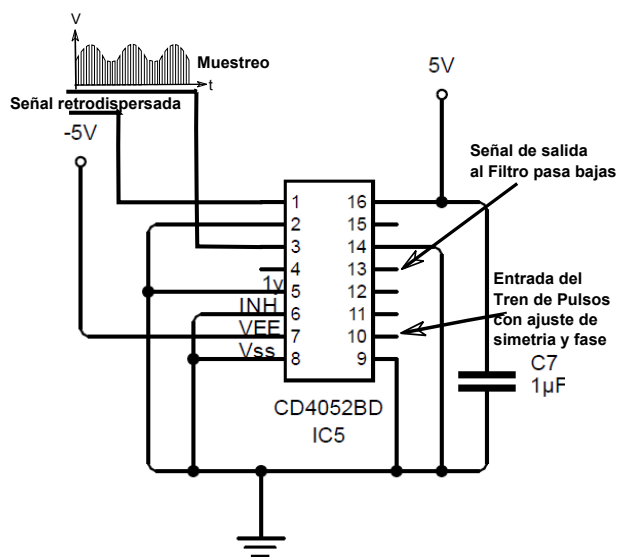


Figura 3.11: Operación de un circuito multicanalizador como interruptor.

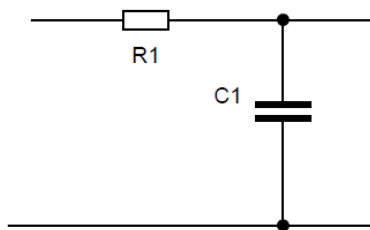


Figura 3.12: Filtro RC pasa-bajas de primer orden.

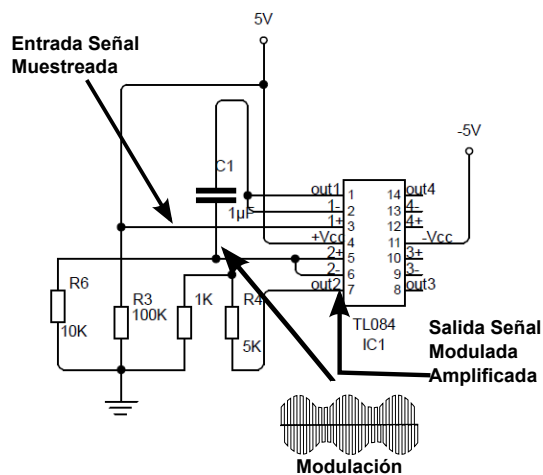


Figura 3.13: Señal sin componente de CD, observe la similitud con una señal del tipo AM.

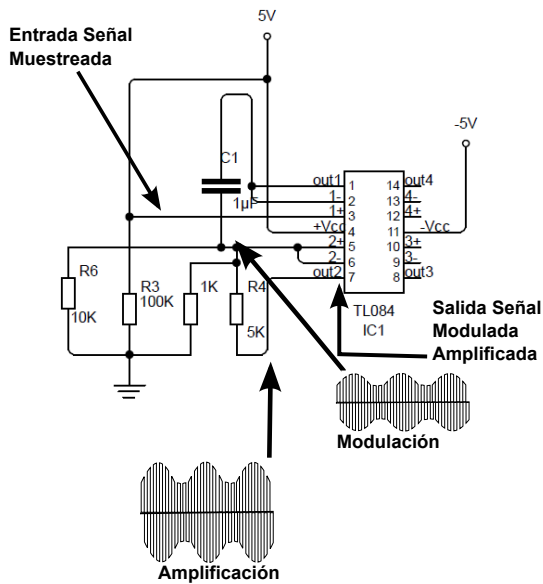


Figura 3.14: Amplificación de la señal sin componente de CD y con una frecuencia de operación (muestreo) mucho mayor a la señal de banda base.

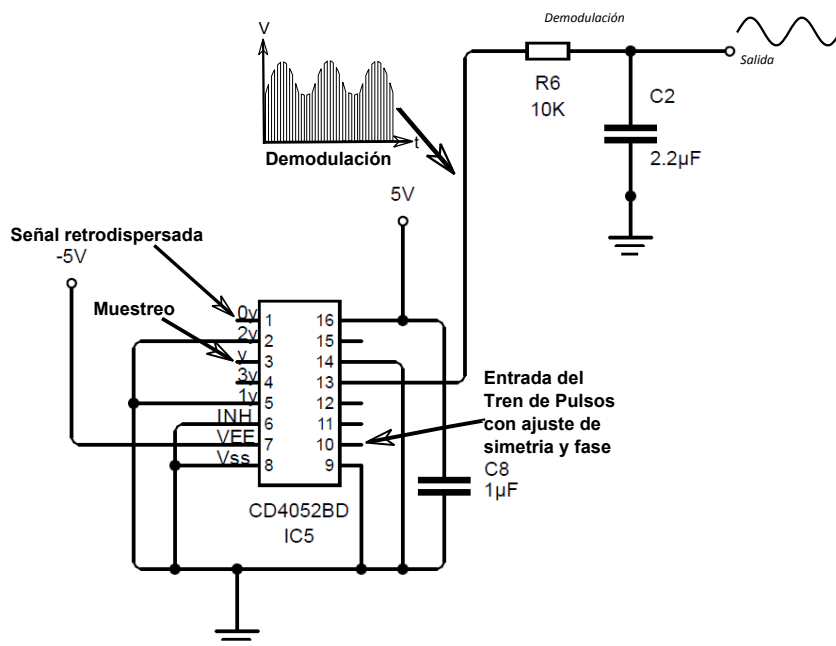


Figura 3.15: Segunda operación de muestreo (equivalente a rectificación) y posterior demodulación (regreso a banda base) de la señal .

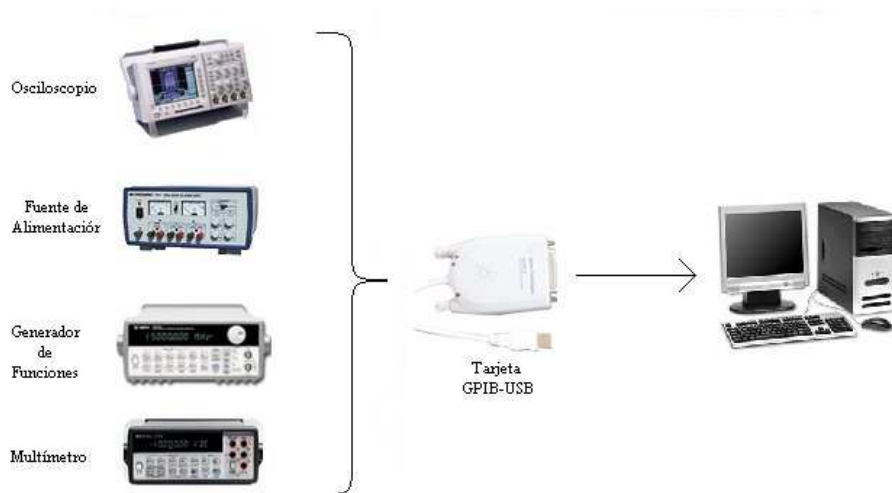


Figura 3.16: Interfaz GPIB-USB.

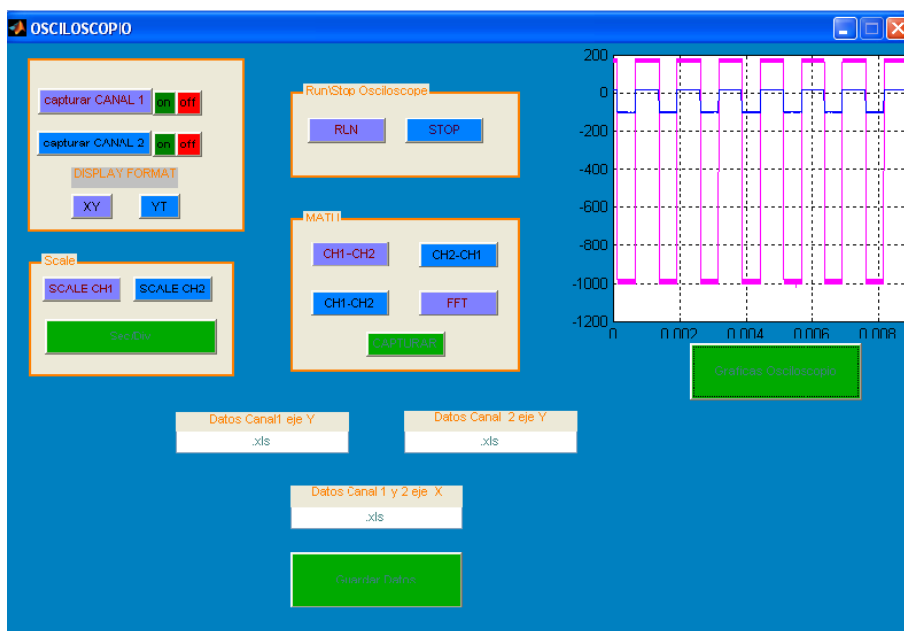


Figura 3.17: Interfaz para modificar el osciloscopio por medio de la interfaz GPIB-USB.

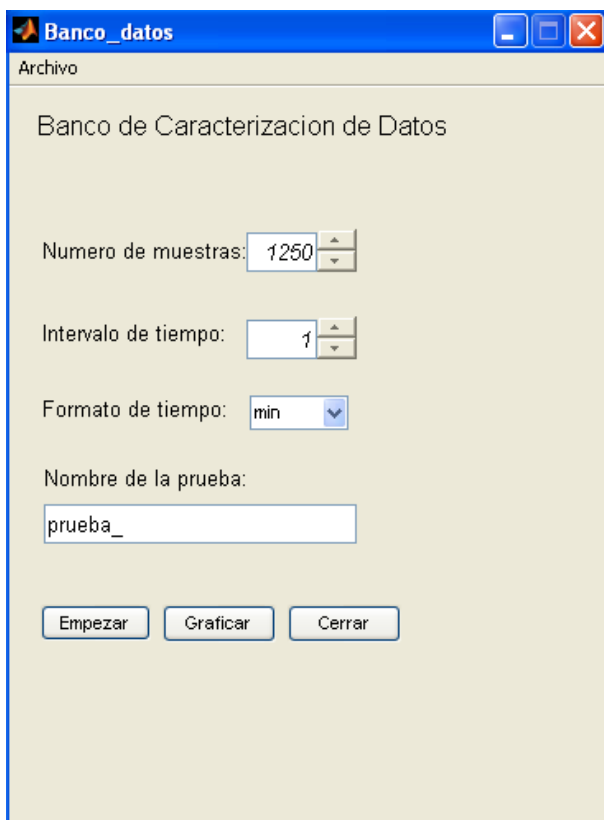


Figura 3.18: Interfaz para graficar los datos adquiridos por medio de interfaz GPIB-USB.

Capítulo 4

Pruebas y resultados

En éste capítulo se presentan las pruebas y resultados obtenidos con el prototipo de amplificador “chopper” desarrollado. Para caracterizar la operación del sistema, en primer lugar se generó una señal con parámetros controlados (amplitud, frecuencia, forma de onda, nivel de desbalance y ruido) con ayuda de un generador de forma de onda arbitraria. Los resultados preliminares permitieron hacer los ajustes pertinentes para probar el sistema con una señal real proveniente de un sensor óptico para medición de humedad de suelo.

4.1. Caracterización del Amplificador Chopper

4.1.1. Señales de prueba

Para evaluar el funcionamiento del aplicador chopper, se generó una señal que emulara las condiciones reales de operación del circuito sensor de humedad, es decir: una señal de muy baja amplitud pico-pico, un nivel de desbalance (offset) muy superior a la amplitud pico-pico y una frecuencia muy baja, de forma que el ruido $1/f$ fuera dominante y no permitiera recuperar la señal de información por métodos clásicos.

La señal de prueba se generó con ayuda de dos instrumentos, un generador de funciones y un generador de forma de onda arbitraria del fabricante BK PRECISION(4003A) y un circuito sumador no-inversor, en ésta etapa básicamente se realizó la suma de una señal senoidal (con frecuencia de 3 Hz) de muy bajo nivel (80 mV_{p-p}) con un nivel de CD y ruido blanco.

La decisión de utilizar una frecuencia de 3 Hz se debió a que a ese valor corresponde la máxima frecuencia que se espera proporcionen los cambios de humedad en la señal entregada por el sensor. Para incrementar el grado de dificultad de la detección de la señal, se le agregó un nivel de desbalance elevado (400 mV) y además se le sumó ruido “blanco” (800 mV_{p-p}) proporcionado por un generador de forma de onda arbitraria (HP 33120A).

Una imagen de las señales de prueba se muestran en la Figura 4.1, en donde se puede notar que la señal de información (señal amarilla) corresponde a una onda senoidal de

80 mVp-p cuyo periodo es de 333 ms, es decir que su frecuencia es de 3Hz.

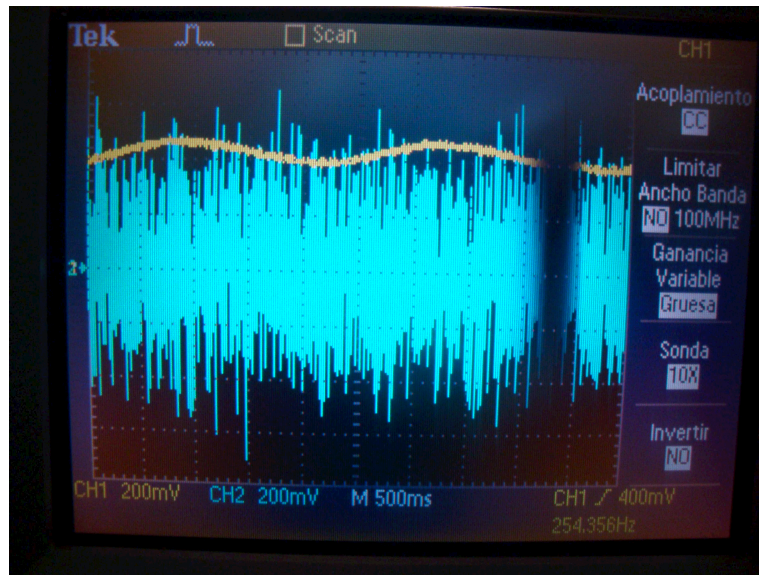


Figura 4.1: Señal de información (trazo amarillo) y señal de ruido blanco (trazo azul) obtenidas con ayuda de un generador de funciones y un generador de forma de onda arbitraria respectivamente.

Considerando que la línea horizontal a la mitad del cuadrante corresponde al valor de referencia (0 V), es fácil observar que el nivel de desbalance de la señal es de 400 mV, es decir, 5 veces mayor que la amplitud pico-pico de la señal de información. Respecto al trazo en color azul, se puede notar que la señal de ruido blanco presenta un nivel pico-pico de 800 mV.

4.1.2. Suma de señales

La señal resultante se obtuvo con ayuda de un circuito sumador no-inversor implementado con el amplificador operacional TL084 de acuerdo al diagrama esquemático en la Figura 4.2. Dicho amplificador fue elegido debido a que presenta una alta impedancia de entrada (JFET), baja impedancia de salida y no invierte la señal, por lo que además de sumar las señales deseadas sirve como reforzador para acoplar la señal de prueba a etapas posteriores.

La señal obtenida a la salida del sumador no-inversor se muestra en la Figura 4.3 (trazo color azul) y como referencia se muestra también la señal de información con nivel de desbalance (trazo color amarillo).

Para recuperar la señal de información a partir de la señal de prueba generada, se utilizó el amplificador chopper desarrollado. A continuación se describirán las etapas individuales en base a las señales medidas.

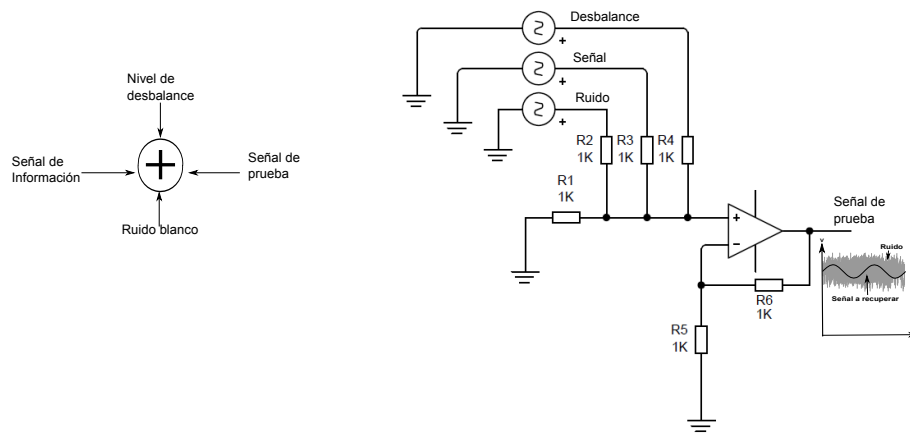


Figura 4.2: Amplificador no-inversor en configuración de sumador.

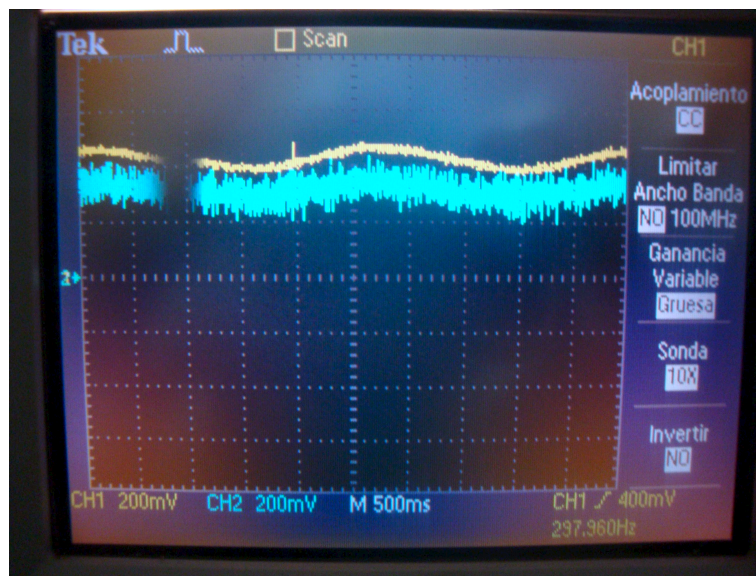


Figura 4.3: Señal de prueba generada (trazo azul) y señal de información con nivel de desbalance (trazo amarillo).

4.1.3. Muestreo (desplazamiento en frecuencia)

La señal de muestreo utilizada para hacer el corrimiento de frecuencia de la señal de prueba corresponde a un tren de impulsos generados con ayuda de un circuito oscilador descrito en el capítulo 3, cuya salida es mostrada en la Figura 4.4. Este oscilador se calculó originalmente para frecuencia de 180 Hz, de forma que se cumpliera con el criterio de Nyquist, es decir que la frecuencia de muestreo fuera mucho mayor que la frecuencia de la señal (para éste caso la frecuencia de muestreo era 60 veces mayor a la frecuencia de la señal de información), sin embargo el valor de frecuencia medido fue

de 163.33 Hz, la diferencia se debe básicamente a las tolerancias de los valores de los elementos (comerciales) utilizados en la implementación del oscilador. Cabe mencionar que el oscilador implementado permite además controlar la fase por medio de un arreglo de circuitos monoestables.

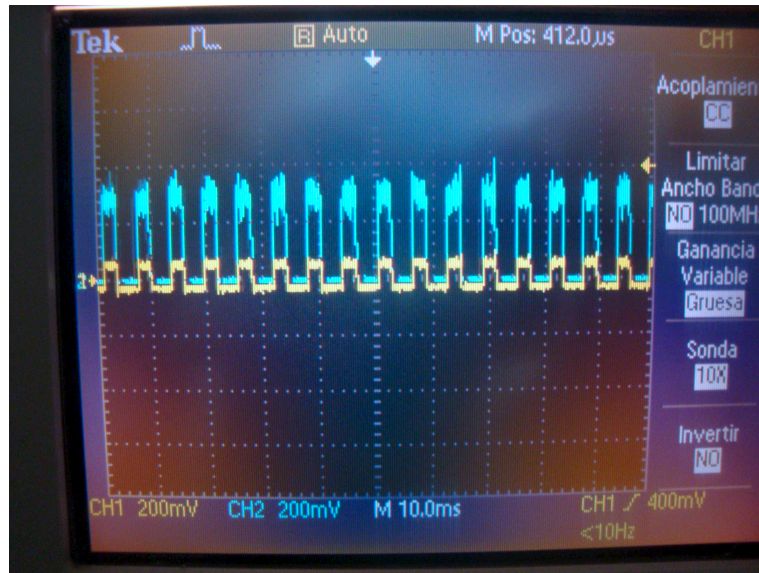


Figura 4.4: Señal de muestreo (trazo amarillo) y salida del multicanalizador analógico (trazo azul).

La primera etapa del chopper se encarga de muestrear a la señal de prueba (ver Figura 4.5). Este proceso se realiza por medio de un multicanalizador/demulticanalizador (MUX/DEMUX) analógico fabricado en tecnología CMOS (CD4052) controlado por la señal de muestreo.

El circuito multicanalizador analógico fué elegido debido a que no presenta un nivel de saturación como el presentado en los circuitos basados en transistores bipolares, en decir en modo de selección permite que pase la señal sin pérdidas apreciables, mientras que en modo de puesta a tierra, aparece un nivel de 0 V a la salida, éste efecto puede apreciarse en el trazó azul de la Figura 4.6.

Con el proceso de muestreo se logran dos efectos favorables, primero se desplaza el espectro de la señal de información de su banda base a una posición centrada en la frecuencia de muestreo, con lo cual se reduce el efecto del ruido $1/f$ y además se obtiene una señal alterna que puede amplificarse fácilmente.

4.1.4. Eliminación de CD y Amplificación

Después de desplazar en frecuencia a la señal de prueba, es necesario acondicionarla para poder amplificarla y reducir el nivel de ruido que contiene. En la figura 4.7 puede observarse el efecto de promediación (eliminación del nivel de CD) de la señal con

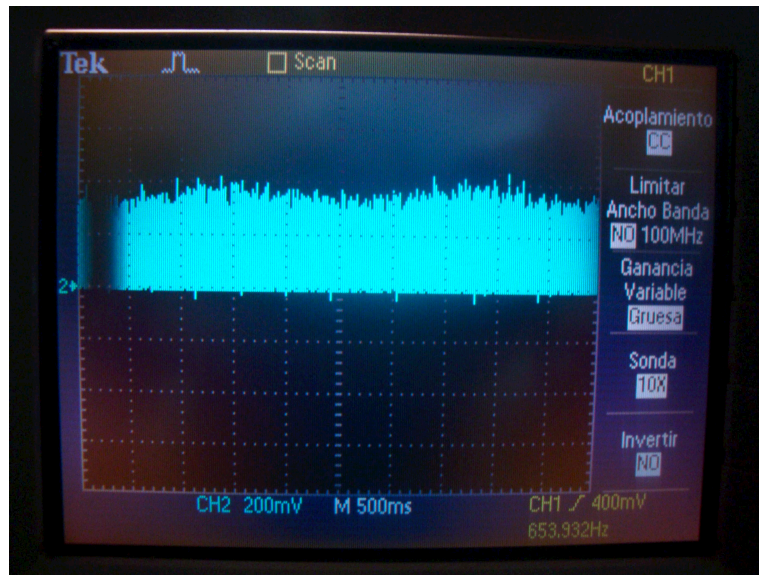


Figura 4.5: Señal de prueba muestreada.

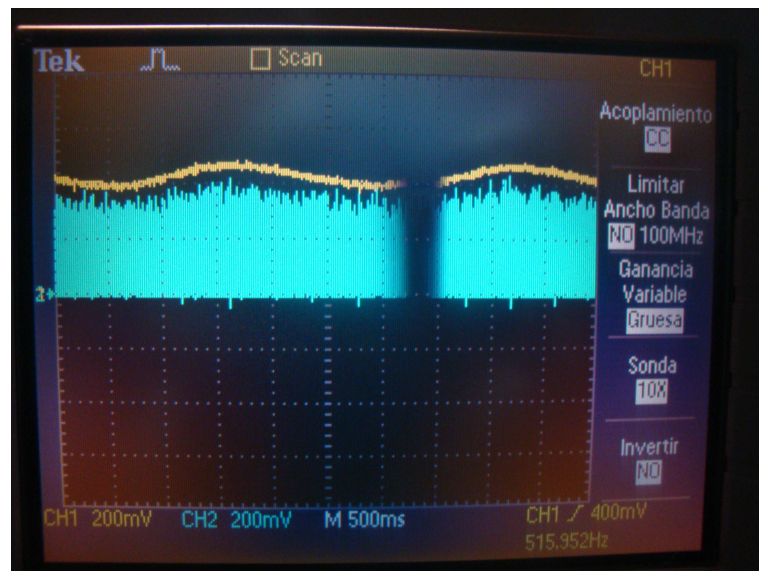


Figura 4.6: Efecto del muestreo con el circuito MUX/DEMUX (trazo azul), para efectos de comparación se muestra también la señal de información con desbalance (trazo amarillo).

respecto a la señal muestreada original, es decir se redujo el nivel de desbalance y se centró la señal en 0 V. Este proceso se realiza para poder incrementar el nivel de la señal por medio de un amplificador de CA típico.

Para la etapa de amplificación se eligió una ganancia de 22 con el fin de obtener una señal suficientemente grande, pero manejable en etapas posteriores. El resultado de la

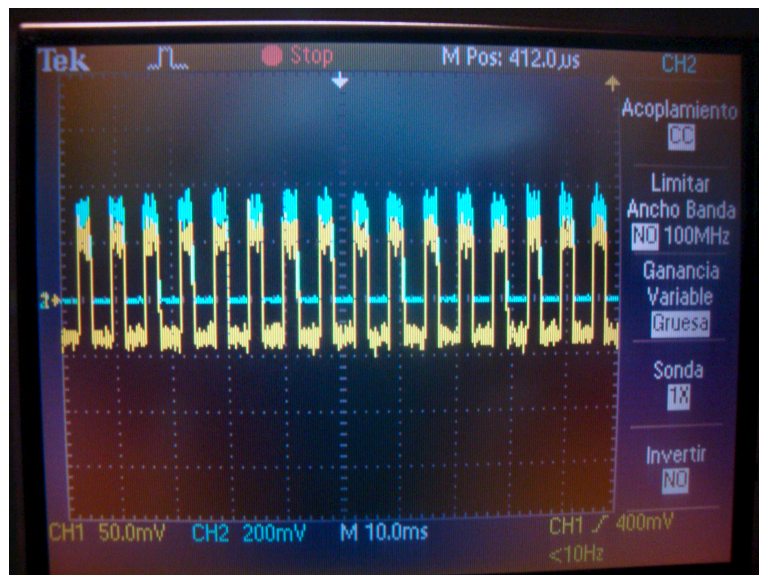


Figura 4.7: Señal promediada (trazo amarillo) y señal muestreada original (trazo azul).

amplificación se muestra en la Figura 4.8.

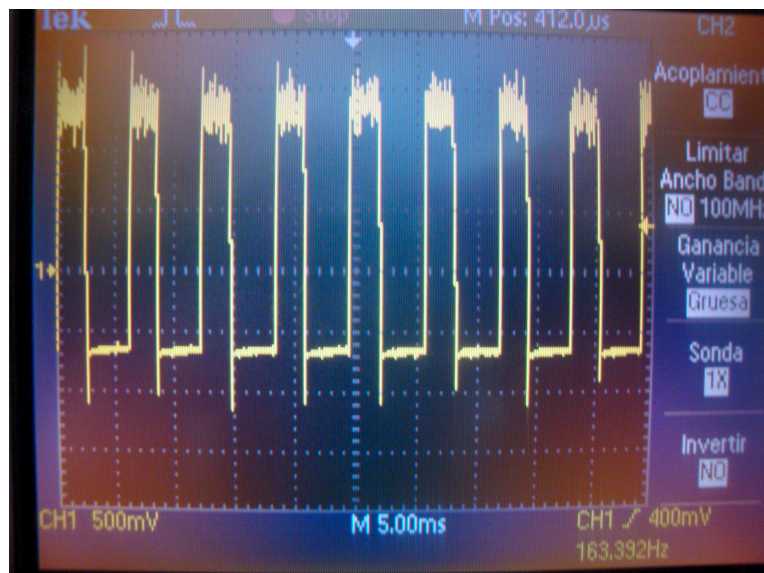


Figura 4.8: Señal modulada amplificada 22 veces.

4.1.5. Recuperación de la señal de información

Puesto que la señal de información se encuentra ahora en la envolvente de la señal amplificada, se realiza un proceso de demodulación al multiplicar la señal por la referencia de muestreo, lo que provoca que la señal de información sea regresada a su banda base, pero con un nivel mucho mayor al del ruido que la enmascaraba, el cual fue reducido en el proceso de demodulación coherente, por lo que ahora se puede recuperar la señal de información con ayuda de un filtro sencillo de 1^{er} orden.

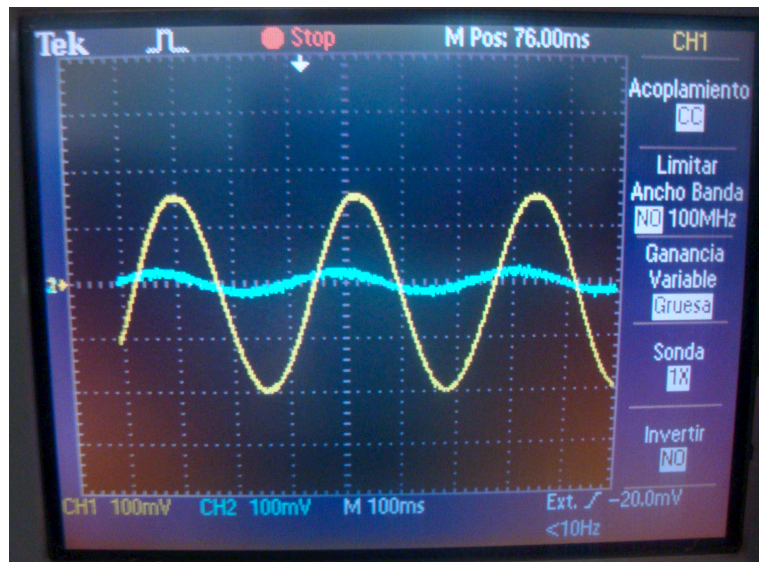


Figura 4.9: Señales original (trazo azul) y recuperada (trazo amarillo).

La señal de información y la recuperada se muestran en la Figura 4.9. Como puede apreciarse la señal recuperada es mucho mayor que la señal original, pero se observa un desfase entre ambos. El desfase se debe básicamente a la respuesta del filtro de primer orden empleado, ya que al efectuar los cálculos correspondientes, se observó que el ángulo medido es prácticamente del mismo valor que el desfase que introduce el filtro a una frecuencia de 3Hz. En el trazo amarillo se observa la señal recuperada amplificada y se puede notar que esta ya se encuentra enmascarada como la señal a recuperar.

4.1.6. Resultado con sensor óptico

Para validar la operación del amplificador chopper, se realizaron pruebas para recuperar la información proveniente del sensor óptico de humedad de suelo, para realizar estas pruebas se realizó el sistema de adquisición de datos automatizado que se describe en el capítulo 3. En esta prueba el sensor se enterró en una muestra de suelo seco a 5.5 cm de la superficie, posteriormente se le aplicó agua con ayuda de una sonda controlada por un dispositivo manual que permite regular el paso del agua, la tasa de

suministro se ajustó a aproximadamente a una gota por segundo, simulando de ésta manera el riego por goteo que se utiliza en el campo. Para suministrar de forma más realista el agua, se decidió dejar caer las gotas a aproximadamente 6 cm de la superficie de la muestra bajo estudio. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.10, en donde se puede observar que el cambio en forma exponencial decreciente indica el cambio de humedad que está sufriendo la muestra bajo prueba, este cambio se da muy lentamente, en el orden de minutos, considerando que se tomaba una lectura cada minuto, entonces la escala horizontal no sólo indica la cantidad de mediciones realizadas, sino además el tiempo total del experimento, esta lectura llega a un punto en donde se semiestabiliza la detección, lo cual indica que a partir del minuto 80 la tierra que se encuentra a la misma profundidad del sensor se encuentra saturada. Por otro lado, al minuto 110 aproximadamente, se observa un cambio abrupto del trazo, el cual se debe a una modificación repentina de la temperatura en el ambiente donde se encontraba la muestra bajo prueba.

Para justificar al aseveración anterior, se incluye la gráfica de la temperatura del suelo (ver figura 4.11), que se realizó de manera simultanea a la medición de humedad, con el fin de compensar los valores de las lecturas de humedad, las cuales son dependientes del valor de la temperatura de suelo. Es importante mencionar que la medición de temperatura no está dada en grados sino en voltaje, ya que corresponde a la salida de un sensor electrónico y para éste caso sólo se utilizó como referencia del cambio abrupto de temperatura. Como se puede observar en las Figuras 4.10 y 4.11, el amplificador chopper entregó una señal proporcional a la variación de la humedad de suelo en una medición que duró aproximadamente 3 horas ininterrumpidas, por lo que se cumplió con el objetivo general planteado en éste trabajo de tesis.

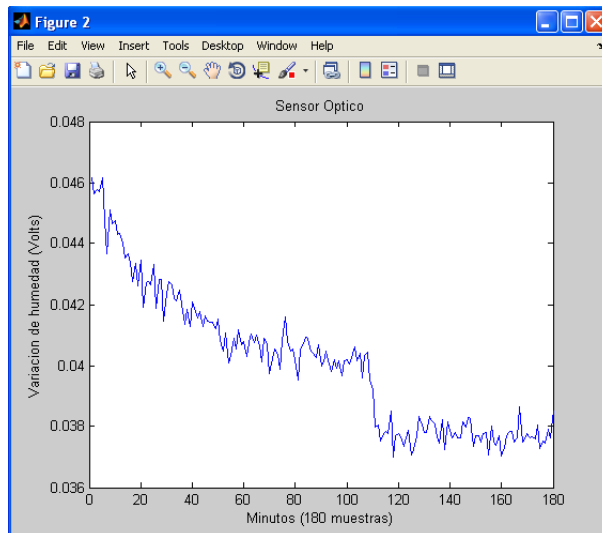


Figura 4.10: Señales recuperada del sensor óptico con ayuda del amplificador chopper diseñado.

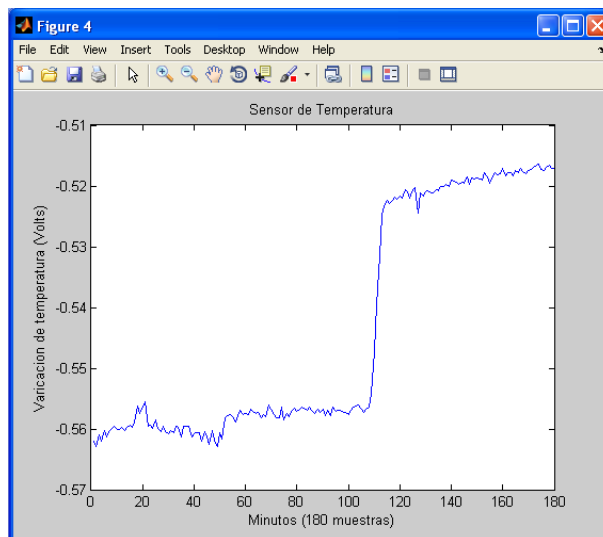


Figura 4.11: Señal de temperatura de la muestra bajo prueba.

Capítulo 5

Conclusiones Generales

5.1. Conclusiones

En este trabajo se presentó la metodología para el diseño y construcción de un amplificador del tipo “Chopper”, utilizado para detectar señales de muy baja frecuencia y cuyo nivel de desbalance (“offset”) es muy superior al nivel pico-pico de la señal de información. En particular se realizó el diseño del amplificador para su aplicación en el acondicionamiento de señales ópticas provenientes de un sensor óptico de humedad de suelo basado en el principio de retrodispersión de señal óptica. Los resultados obtenidos permiten realizar la amplificación de una señal inmersa en ruido, con frecuencia que varía en el orden de minutos (inferiores a 3Hz), lo cual no se puede realizar con un amplificador convencional ya que al intentar realizar la amplificación de la señal también se tendría amplificación del ruido, por lo que al implementar el amplificador chopper se tiene como salida una señal que puede ser medida con los aparatos de medición convencionales y con una buena relación señal a ruido, lo cual permite observar una señal con variaciones en la que se detecta en este caso el nivel de humedad de suelo, y así se detecte cuando un cultivo necesite ser regado y cuando dejar de hacerlo, para que se tenga un ahorro de agua y la planta tenga un mejor desarrollo . Cabe mencionar que el amplificador chopper diseñado es más económico que los amplificadores comerciales tipo lock-in, también es más fácil de visualizar los resultados y detectar los niveles de humedad del suelo gracias a la interfaz gráfica realizada, lo cual hace de el una buena opción para los agricultores.

5.2. Aportaciones

Entre las principales aportaciones de éste trabajo se pueden mencionar:

- Desarrollo de un banco de pruebas para caracterización automática de sensores para medición de humedad de suelo.
- Diseño e implementación de un amplificador “Chopper”.

- Contribución al desarrollo de un sistema de caracterización de suelo portátil.

5.3. Trabajo a futuro

Implementar el amplificador chopper para un sistema de telemetría en campo.

Hacer diversas pruebas con distintas condiciones climatológicas en campo.

Realizar un análisis de los datos obtenidos para verificar la confiabilidad del sistema en campo.

Bibliografía

- [Amador Bartolini, 2009] Amador Bartolini, D. E. (2009). *Medición de humedad de suelo utilizando fibra óptica de plástico*. PhD thesis, UABC.
- [Arnau Vives et al., 2000] Arnau Vives, A., Ferrero y De Loma, J. M., Jiménez Jimenez, Y., and Sogorb Devesa, T. (2000). *Sistemas electrónicos de comunicaciones I*. Universidad Politecnica De Valencia, Valencia.
- [Bentham Instruments Ltd, 2008] Bentham Instruments Ltd (2008). 225 Lock-in amplifier.
- [Bosyk et al., 2005] Bosyk, G., Martinez, A., and Martinez Heimann, D. (2005). Lock-In. *Laboratorio de Electronica Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires*, page 4.
- [Concepción, 1996] Concepción, P. C. (1996). *Sensores ópticos*. UPV, España.
- [Couch, 2008] Couch, W. L. (2008). *Sistemas de comunicación digitales y analógicos*. Prentice-Hall, Mexico, 7a edition.
- [Edward W. Karmen, 2008] Edward W. Karmen, B. S. H. (2008). *Fundamentos de señales y sistemas usando la web y matlab*. 3a edition.
- [Enciso et al., 2007] Enciso, J. M., Porter, D., and Périès, X. (2007). Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego.
- [Garcia Casillas and Briones Sánchez, 2007] Garcia Casillas, I. and Briones Sánchez, G. (2007). *Sistemas de riego por aspersión y goteo*. Mexico, 2a edition.
- [Graetz, 1982] Graetz, H. A. (1982). *Manuales para educacion agropecuaria: Suelos y fertilizacion*. Mexico, 1a edition.
- [Guarovich, 1985] Guarovich, L. A. (1985). *Fundamentos y diseño de sistemas de riego*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San Jose, Costa Rica.
- [Kuzin et al., 2001] Kuzin, E., Marquez-Lucero, A., Lopez, R., and Sprin, V. (2001). Perdidas por macrocurvaturas en fibras opticas producidas por materiales suaves y expansibles. *Revista Mexicana De Fisica* 47(5)421-424, page 4.

- [Microelectronics, 1998] Microelectronics, S. (1998). *Ne555*. ST Microelectronics.
- [Pallás Areny, 2007] Pallás Areny, R. (2007). *Sensores y acondicionadores de señal*. Mexico, 4a edition.
- [P.HSU, 1973] P.HSU, H. (1973). *Analisis de Fourier*. Bogota, colombia, 1ra edition.
- [Porta et al., 2003] Porta, J., López-Acevedo, M., and Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid, 3a. edition.
- [Skoog et al., 2001] Skoog, D. A., Holler, F. J., and A. Nieman, T. (2001). Principios de analisis instrumental. *Ed. McGraw-Hill*, (104-106):1028.
- [Stremmler, 1989] Stremmler, F. (1989). *Sistemas de comunicación*. 1a edition.
- [Torres Ruiz, 1989] Torres Ruiz, E. (1989). *Manual de conservación de suelos agrícolas*. 2a edition.
- [Valverde Conejo, 2007] Valverde Conejo, J. C. (2007). *Riego y drenaje*. Universidad Estatal a Distancia, San Jose, Costa Rica, 1ra edition.
- [Vazquez,] Vazquez, R. R. Analisis, diseño y construcción de un amplificador Lock-in. *Tesis*, page 36.
- [Withers and Vipond, 1978] Withers, B. and Vipond, S. (1978). *El riego: diseño y práctica*. 2a edition.