

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE COMPORTAMIENTO EN PACIENTES CON PADECIMIENTO DE TEMBLOR DE VARIAS ETIOLOGÍAS

Ing. Iván Jaramillo J.^{*} - i_jaramj@ing.unal.edu.co

Afiliación a Iberchip número 8302

Diana María Rojas O.^{} - dianaroo@yahoo.com**

Eduardo Camperos S.^{} - ecamperos@hotmail.com**

Md. Pablo Lorenzana.^{*} - pablolorenzana@netscape.com**

**Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingenierías Eléctrica y Electrónica
Febrero de 2003**

Abstract.

Our work consists on developing a system of pursuit of tremor, that allows determining the type of this in a patient and consequently its illness. We are using accelerometers for determine characteristics, as frequency and amplitude, of different Tremor. It is a very common but complex movement disorder caused by neurological illnesses. This disease is of very difficult treatment, because the patients don't always respond from the same way to the drugs, and the movement change by time intervals of few hours, that until now have not been possible to follow and register with exactitude. Finally the work looks to have a cost low so that more people can use it, at the same time that is possible to employ it in medical and pharmacological investigations.

Resumen

Nuestro trabajo consiste en desarrollar un sistema de monitoreo de temblor que permita determinar el tipo de este en un paciente y por consiguiente su enfermedad. Nosotros estamos usando acelerómetros para determinar características, como frecuencia y amplitud, de diferentes temblores. Este es muy común pero complejo desorden de movimiento causado por enfermedades neurológicas. Esta enfermedad es de tratamiento muy difícil, porque los pacientes no siempre responden de la misma forma a las drogas, y el movimiento cambia por intervalos de tiempo de pocas horas que hasta ahora no ha sido posible seguir y registrar con exactitud. Finalmente el trabajo pretende tener un costo bajo para que más personas puedan usarlo, al mismo tiempo que es posible emplearlo en investigaciones médicas y farmacológicas.

^{*} *Director del Grupo de Microelectrónica Universidad Nacional de Colombia - GMUN*

^{**} *Estudiantes de pregrado de Ingeniería Electrónica, Universidad Nacional de Colombia.*

^{***} *Médico Neurólogo, Docente Universidad Nacional de Colombia.*

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE COMPORTAMIENTO EN PACIENTES CON PADECIMIENTO DE TEMBLOR DE VARIAS ETIOLOGÍAS

Ing. Iván Jaramillo J. ^{*} - i_jaramj@ing.unal.edu.co

Afiliación a Iberchip número 8302

Diana María Rojas O. ^{**} - dianaroo@yahoo.com

Eduardo Camperos S. ^{**} - ecamperos@hotmail.com

Md. Pablo Lorenzana. ^{***} - pablolorenzana@netscape.com

Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingenierías Eléctrica y Electrónica
Febrero de 2003

Abstract.

Our work consists on developing a system of pursuit of tremor, that allows determining the type of this in a patient and consequently its illness. We are using accelerometers for determine characteristics, as frequency and amplitude, of different Tremor. It is a very common but complex movement disorder caused by neurological illnesses. This disease is of very difficult treatment, because the patients don't always respond from the same way to the drugs, and the movement change by time intervals of few hours, that until now have not been possible to follow and register with exactitude. Finally the work looks to have a cost low so that more people can use it, at the same time that is possible to employ it in medical and pharmacological investigations.

1. Introducción

Este documento presenta algunos de los aspectos técnicos básicos para la realización de un sistema de monitoreo de enfermedades neurológicas que se manifiestan con temblor. Se presenta de forma sencilla pero rigurosa, la utilización de acelerómetros para determinar variables como frecuencia y amplitud, en un movimiento rítmico y oscilatorio, de personas

con enfermedades de temblor de diferentes etiologías, junto con los beneficios que representa el desarrollo de este equipo tanto para los médicos como para los pacientes.

2. Antecedentes y Justificación

Algunas enfermedades de tipo neurológico se manifiestan con temblor. Dicho síntoma es un movimiento involuntario rítmico, oscilatorio, producido por la contracción alternante de músculos inervados recíprocamente (Agonistas - Antagonistas). El temblor es clasificado por la frecuencia y la amplitud asociado con los exámenes neurológicos y el historial clínico de la enfermedad y del paciente; además es clasificado principalmente en De Reposo, Postural y Cinético.

Los conocimientos acumulados del mecanismo del temblor están basados en la composición de factores experimentales, observación empírica y especulación. Estas enfermedades son de difícil definición para un procedimiento médico y la falta de seguimiento farmacológico hace aun mayor la dificultad para garantizar un tratamiento correcto para los pacientes, y dependiendo del tipo de temblor se puede tratar con farmacoterapia y obtener buenas respuestas. El Temblor Esencial (E. T.) es una de estas

^{*} Director del Grupo de Microelectrónica Universidad Nacional de Colombia - GMUN

^{**} Estudiantes de pregrado de Ingeniería Electrónica, Universidad Nacional de Colombia.

^{***} Médico Neurólogo, Docente Universidad Nacional de Colombia.

enfermedades donde el seguimiento farmacológico puede ser de bastante ayuda, ya que presenta una respuesta modestamente favorable dependiendo de la formulación médica.

Observando las características del temblor y la respuesta medible a los fármacos en el Temblor de varias etiologías, la electrónica puede jugar un papel importante para el seguimiento farmacológico por medio de sensores de aceleración. Este tipo de instrumentación aún no ha sido desarrollado.

3. Metodología de Solución

Por tratarse de un prototipo, el principal método de desarrollo es la realización de pruebas. Aunque se siguen lineamientos de diseño, la implementación se realizará por etapas, de forma que se vayan cumpliendo los objetivos secuencialmente. También se planea usar herramientas de simulación para observar el comportamiento del registro.

El proyecto consta de tres partes:

3.1. Recopilación de información

- Arquitectura de los acelerómetros.
- Características físicas y medibles del Temblor esencial, junto con estudios previos.
- Herramientas de programación.

3.2. Caracterización de los acelerómetros y de la enfermedad

- Desarrollar un modulo de entrenamiento que permita caracterizar los acelerómetros.
- Realizar la caracterización de algunos sensores de aceleración comerciales y de los fabricados por el Centro Nacional de Microelectrónica de España (CNM).
- Hacer pruebas con los sensores en pacientes, empleando instrumentos de medición para caracterizar la enfermedad.

3.3. Diseño e Implementación

- Diseñar e implementar el sistema de registro de información, que permita la interconexión con un PC.
- Diseño e implementación del software del PC que analizará los datos contenidos en el registro y los reportará al médico de una forma útil.
- Hacer la prueba del sistema completo en los pacientes, realizando a la vez observación de estos para corroborar la veracidad del sistema y su correcto funcionamiento.

4. Características del Temblor en pacientes

Como ya se menciona en la justificación del trabajo, el temblor es un movimiento rítmico, involuntario y oscilatorio producido por la contracción de algunos músculos. Pero en los pacientes que presentan esas enfermedades de tipo neurológico que se manifiestan con el temblor especialmente, también se pueden tener periodos de tiempo donde se producen torceduras de algunos miembros como brazos y piernas, o posturas anormales rígidas. Estas molestias llegan a ser en la mayoría de los casos permanentes aunque al comienzo se activen por acciones específicas.

Factor Postural	Ejemplos
Reposo	Parkinson
Estático	Fisiológico
	Esencial
	Distónico
Cinético	Cerebelar
	Neuropatía
	Cerebelar
Tareas específicas	Esencial
	Distónico
	Escritura
	Ortoestático

Tabla 1. Clasificación Postural del Temblor

Casi todos los movimientos a excepción del parkinsoniano, comparten una calidad direccional que típicamente se sostiene, a veces para un momento, como para todo el tiempo, haciendo posible una consistencia y previsibilidad. Los movimientos son direccionales y fuerzan la parte del cuerpo envuelta o región a una posición o estado anormal. El temblor parkinsoniano no tiene una dirección definida y su movimiento es tridimensional.

Diagnóstico	Frec.	Activado por
Fisiológico	8-12Hz	Postura, ansiedad, ejercicio, medicamentos.
Esencial	4-12Hz	Postura, tareas específicas.
Distónico	4-7Hz	Postura, tareas específicas.
Parkinson	4-6Hz	Reposo.
Cerebelar	2-5Hz	Tareas específicas.
Psycogénico	2-15Hz	Postura.

Tabla 2. Clasificación según la frecuencia del movimiento y la actividad que lo provoca.

Además de la frecuencia del temblor, se deben tener en cuenta parámetros como amplitud y ocurrencia (porcentaje de tiempo). En este sentido no se tiene suficiente información y por lo general la medida de la amplitud es muy subjetiva. Mientras a un médico le parece el temblor apacible a otro le puede parecer moderado, dependiendo de su experiencia y juicio, por tanto no se llega a un acuerdo creíble en la evolución de la enfermedad cuando a un paciente lo atienden diferentes doctores.

En algunos países de Europa y en estados Unidos se emplea para sensar las características del temblor electrodos que se ubican en la piel del paciente y que están acoplados a la Electromiografía (EMG). No obstante este sistema de medida proporciona la frecuencia del temblor y la amplitud de forma no confiable y en unidades no validas para los médicos,

además este modo de sensar es muy costoso y no se tiene en muchos lugares por la misma causa. Otro método que se emplea actualmente es hacer grabación del movimiento en vídeo para ver la evolución de la enfermedad, pero nuevamente se tiene inconveniente de costos y de disponibilidad de la información.

En la tabla 3 se presenta la escala de medida Fahn-Tolosa-Marin para el temblor en la cabeza y las extremidades, que es la más conocida y empleada en el diagnóstico.

Rango	Grado	Amplitud(Aprox.)
Normal	0	0
Apacible	1	< 0.5 cm
Moderado	2	0.5 – 1.0 cm
Marcado	3	1 - 2 cm
Severo	4	> 2 cm

Tabla 3. Escala de medida Fahn-Tolosa-Marin para el temblor en la cabeza y las extremidades.

Teniendo un dispositivo que proporcione la frecuencia y amplitud, y que a la vez permita detectar los cambios en la actividad del temblor durante un lapso de tiempo de varias horas, se beneficia la investigación “Psychophysiological” del temblor causado por tareas específicas o por reacciones emocionales, y la formulación de los pacientes será más efectiva al llevar un registro exacto del comportamiento del temblor, pues pequeñas variabilidades de este en ocasiones disimulan efectos significantes del mismo tratamiento farmacológico.

5. Acelerómetros

5.1. Tipos de Acelerómetros.

La variedad de acelerómetros que se encuentra en el mercado son resultado de las diferentes aplicaciones con los requerimientos de rango, frecuencia natural, y resolución. La diferencia básica entre los diferentes sensores está en el

método de medida de desplazamiento de masa, por tanto se cuenta con potenciométricos, LVDT, de reluctancia variable, piezoeléctricos y capacitivos. Por las características que presentan los acelerómetros capacitivos se decidió trabajar con estos.

5.1.1. Acelerómetro Capacitivo

El principio físico de este microsistema es el efecto capacitivo por flexión de una viga de polisilicio, que tiene un espesor aproximado de 10µm incrementando el área de gravedad lateral y la capacitancia de sensado. El espesor del polisilicio disminuye la sensibilidad a la aceleración vertical, cuando los ejes están paralelos a la superficie de la tierra.

Presentan como características alta sensibilidad, buena estabilidad a variaciones de temperatura, y compatibilidad con dispositivos de tecnología CMOS.

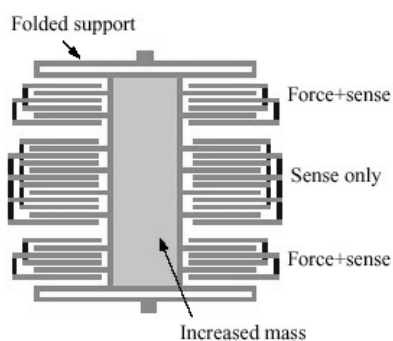


Figura 1. Acelerómetro capacitivo, con dos ejes de sensibilidad (ADXL202E).

Estos acelerómetros no requieren de un choque constante a alguna parte del sensor, su consumo de energía y costo son bajos, tienen buena resolución, son de tamaño muy pequeño y permiten sensar en varios ejes simultáneamente, entre otras características por lo cual se selecciono uno de este tipo.

El acelerómetro seleccionado es el ADXL202JE, de Analog Devices.

5.2. Acelerómetro ADXL202JE

Este sensor tiene las siguientes características que vale la pena resaltar:

- 2 ejes de para sensar la aceleración, en un solo chip, con respuesta rápida.
- Resolución de 2mg a 60Hz.
- Escala de medida de ±2g.
- Salida digital PWM, modulada por ancho de pulso (ciclo útil).
- Utilización de la misma masa de prueba para sensar los dos ejes.

Este acelerómetro contiene una superficie de polisilicio micromaquinada y señal de acondicionamiento del circuito a implementarse en una arquitectura de medida en lazo abierto. Para cada eje, un circuito de salida convierte la señal análoga a una señal modulada en ciclo útil (DCM), que se puede decodificar con un microprocesador. Además el sensor es capaz de medir aceleraciones positivas y negativas. En la Figura 2 se observa el diagrama funcional por bloques del acelerómetro.

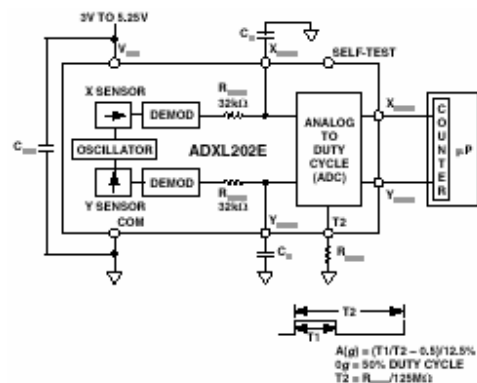


Figura 2. Diagrama Funcional del Acelerómetro ADXL202JE

5.3. Configuración del Acelerómetro.

Teniendo en cuenta que el rango de frecuencia para los diferentes temblores que presentan los pacientes es de 1 a 18 Hz, y la accesibilidad a los componentes pasivos que se requieren para determinar las condiciones de operación del

sensor se determino fijar el ancho de banda en 50Hz para cada eje, empleando capacitores (C_x y C_y) de $0.1\mu F$.

El periodo de la señal de salida (T_2) es determinado por medio de una resistencia R_{SET} . Para determinar este periodo se debe cumplir con la condición de que el ancho de banda (BW) sea menor a un décimo de la frecuencia DCM. Según esta frecuencia y la del contador del microprocesador a emplear se obtiene una resolución mayor. Finalmente junto con estas condiciones y los valores estándar de resistencias se determino emplear:

$$R_{SET} = 150 K\Omega$$

con lo cual se obtuvo:

$$T_2 = 1ms$$

$$F_{DCM} = 1KHz.$$

Por ultimo se deben establecer los niveles de ruido que presenta la configuración realizada, que son función del ancho de banda y que se sumaran al ruido blanco Gaussiano que presenta el acelerómetro.

$$Ruido(rms) = (200\mu g/Hz) \left(\sqrt{BW * 1.6} \right)$$

$$Ruido(rms) = 1.788mg$$

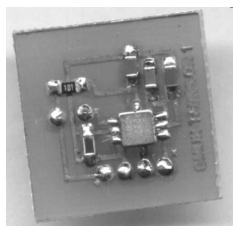


Figura 3. Tarjeta Construida para realizar pruebas y caracterización.

Con esta configuración y estando cada eje paralelo a la Tierra y en reposo, se obtiene la señal de la figura 4 en el eje y. La señal obtenida para el eje X en las mismas condiciones es muy similar a esta.

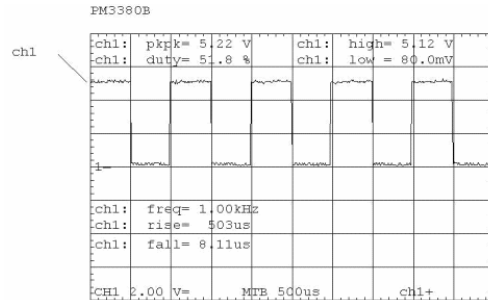


Figura 4. Señal del acelerómetro en el eje y, en posición paralelo a la Tierra y en reposo.

Cuando un eje del acelerómetro es colocado en el mismo sentido de la gravedad de la Tierra, el sensor leerá $+1g$ o $-1g$, dependiendo de la orientación del mismo eje, y las variaciones al movimiento en su salida son menores que en el caso anterior. Sin embargo para esta posición el eje Y es más sensible que el X, lo cual se observa en el tiempo del ciclo útil, figuras 5 y 6.

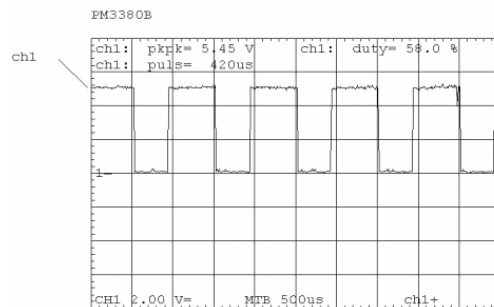


Figura 5. Señal del acelerómetro en el eje Y, paralelo al eje de gravedad de la Tierra y en reposo.

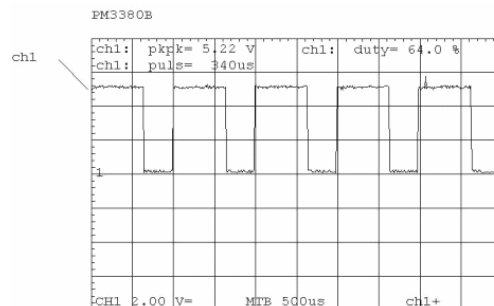


Figura 6. Señal del acelerómetro en el eje X, paralelo al eje de gravedad de la Tierra y en reposo.

Como el acelerómetro empleado solo tiene dos ejes de sensado y el movimiento de los pacientes es tridimensional es necesario realizar una configuración con dos acelerómetros, colocándolos perpendicularmente, y con eje de sensado para Z, un eje Y.

5.4. Cálculo de la Salida de Aceleración.

La aceleración experimentada por el ADXL202JE puede ser calculada por la siguiente fórmula:

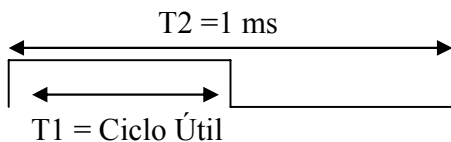
$$Aceleración(g) = \frac{Ciclo\acute{U}til - Ciclo\acute{U}til\ en\ 0\ g}{Ciclo\acute{U}til\ por\ g}$$

Si el ciclo útil para cero g del ADXL202 es diferente al 50%, y/o el ciclo útil cambia más o menos que el 12.5% por g, el cálculo de la aceleración será inadecuado. En la práctica, 0g y la sensibilidad del ADXL202 varía de componente a componente, por lo cual se requiere una calibración previa para cada acelerómetro dentro del programa del microcontrolador.

La calibración se realiza en cada eje colocando el acelerómetro en dirección a la tierra para medir 1g y luego -1g, usando las dos lecturas la sensibilidad es:

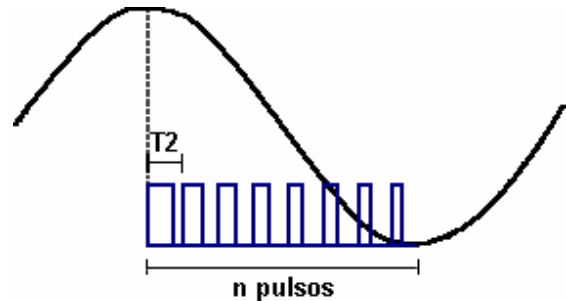
$$S = \frac{(Acelerómetro\ a\ +1g) - (Acelerómetro\ a\ -1g)}{2}$$

5.5. Cálculo de la Frecuencia.



Para determinar la frecuencia en uno de los ejes, es necesario contar los n pulsos que transcurren entre la medición de un máximo y un mínimo de tiempo de ciclo útil. Para calcular la frecuencia solo es necesario realizar una multiplicación de T2, que es el período de la señal PWM que suministra el acelerómetro, por

el doble de n ciclos que corresponden a los ciclos transcurridos en una oscilación completa, posteriormente se invertirá el resultado.



Este procedimiento se realiza de forma consecutiva para los tres ejes, los resultados son interpretados de forma vectorial permitiendo obtener un valor de la magnitud del vector de frecuencia.

$$Frecuencia = \sqrt{Fx^2 + Fy^2 + Fz^2}$$

Este proceso se encuentra limitado por un tiempo específico de dos segundos, pues si no se presenta movimiento en este intervalo no se presentará ni un máximo ni un mínimo y por tanto se entenderá como estado de reposo, para llevar un control del comportamiento del temblor en el paciente con tiempos determinados desde el encendido del sistema de monitoreo.

5.6. Cálculo de la Amplitud.

Los acelerómetros empleados permiten convertir la medida de aceleración a inclinación en grados para cada eje cuando la señal de salida A varía entre +1g y -1g, y se calcula como:

$$Inclinación(^{\circ}) = A \sin(A/1g)$$

Teniendo en cuenta que la inclinación máxima se presentará cuando exista la mayor aceleración y este valor ya ha sido almacenado en el procedimiento para calcular la frecuencia, al igual que el mínimo, se debe realizar una conversión de estos valores a inclinaciones y realizar la diferencia de las dos, con lo que se obtiene el ángulo de oscilación.

Este valor es convertido en amplitud por medio de un parámetro que suministra el médico al hacer la personalización del sistema de monitoreo al paciente, el dato suministrado se interpreta como un valor del radio del arco que describe el temblor.

Este valor de amplitud puede ser interpretado de forma vectorial al igual que la frecuencia para dar un valor más real del movimiento.

5.7. Almacenamiento, y Comunicación al PC.

Es posible hacer todo el tratamiento de señal (frecuencia y amplitud) con el mismo microcontrolador y para el almacenamiento solo es necesario que después de cada reconocimiento de frecuencia se compare el dato obtenido con el último valor almacenado de esta, para evitar repetir valores consecutivos del comportamiento, y ahorrar memoria.

Teniendo en cuenta que el temblor de los pacientes no presenta cambios bruscos sino graduales y que el movimiento perdura por intervalos mayores a 5 segundos aproximadamente, se mantiene el sistema en modo de bajo consumo de energía (inactivo) por un lapso de tres segundos después de cada monitoreo.

La medida del tiempo se hace de forma externa al microcontrolador, por tanto los datos almacenados en la memoria son la frecuencia en cada eje; para el cálculo de la amplitud que se realiza en el computador, se guarda el valor máximo y mínimo de la aceleración en cada eje, finalmente se almacena el valor del tiempo.

De acuerdo a estos valores y a que el sistema en cada muestreo como mínimo tarda un segundo, entonces se tendrá un máximo de 15 almacenamientos por minuto. Se puede calcular la memoria necesaria como:

$$(3\text{ejes} * 8\text{b} + 3\text{ejes} * 2 * 8\text{b} + 16\text{b}) * 15\text{s} * 60\text{m} * 12\text{h} \\ = 950.4\text{Kbits}$$

Estos datos almacenados en memoria, luego son comunicados a un PC, por medio de la interfase serial RS232, para su correspondiente análisis, tratamiento necesario, y muestra de resultados.

6. Resultados

Es posible llevar a cabo las medidas de frecuencia y amplitud con los acelerómetros seleccionados, y en las tres dimensiones, con una configuración sencilla de dos sensores, hasta la fecha se ha podido sentir el movimiento de algunos pacientes en la Clínica Carlos Lleras del Instituto de Seguro Social (lugar donde se realizan las prácticas médicas de la Universidad). Estas observaciones se hacen de forma inmediata, ya que el sistema de almacenamiento aun esta en la etapa de diseño.

Los montajes de acelerómetros, sueltos, es decir no acoplados a un eje estático, dan lugar a una reducción de la frecuencia de resonancia de acoplamiento y, por tanto, de la gama de frecuencia útil del captador.

Los acelerómetros son también sensibles a las vibraciones en sentido transversal, pero se puede ignorar porque la sensibilidad transversal típica es inferior al 1% de la principal.

El factor de inter cambiabilidad, aunque es muy bajo, para este tipo de acelerómetros, hace que cada uno tenga un valor diferente a 0g, no obstante con el procedimiento que se está llevando a cabo este factor no afecta, al igual que no lo hacen los errores por dispersión propia del proceso de fabricación del acelerómetro.

Como la frecuencia a observar tiene valores inferiores a 20 Hz, se hace posible utilizar los

acelerómetros ADXL202JE para el objetivo perseguido.

El método empleado para medir la frecuencia del temblor es conveniente ya que los microcontroladores empleados hacen posible obtener una resolución de 16 bits de la duración del ciclo útil, y no se requiere fijar un eje de referencia o verificar la posición del acelerómetro respecto al eje de gravedad de la tierra, lo que es difícil de garantizar ya que el paciente debe poder realizar sus actividades cotidianas.

7. Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo se proporciona una ayuda a los pacientes que sufren de temblor, facilitándole a los Médicos Neurólogos un equipo que permite determinar el tipo de temblor de una persona, observar los efectos de los medicamentos, y la evolución de la enfermedad, de forma más eficiente y segura para el paciente.

Se facilita una visión más acerca de las múltiples aplicaciones que puede tener la electrónica en el campo de la medicina, ayudando a personas que tienen limitaciones de salud para que de pronto sea más llevadera su situación y con mejores tratamientos, ya que el camino a su verdadera recuperación no lo tenemos los Ingenieros Electrónicos.

Este equipo puede ser utilizado también, para determinar los valores máximos de frecuencia que una persona puede soportar, ocasionados por alguna máquina en vibración y regidos por la norma ISO 2631/1974.

8. Referencias

BRESSMAN SB. Dystonia: A review. *Curr Opin Neurol.* 1998; 11:363 - 372

CURTIS D. Johnson: Types of Accelerometers. *Process Control Instrumentation Technology*, Prentice Hall PTR. National Instruments. www.national.com.

Data Sheet ADXL202E*, Analog Devices. www.analog.com

DEUSCH G. Tremor: Basic mechanisms and clinical aspects. *Mov. Disord.* 1998;13

ELBLE, Rodger J., MD, PhD: Methods of Assessing Tremor in Clinical Trials and in Everyday Clinical Practice. Department of Neurology. Southern Illinois University School of Medicine. Springfield, Illinois.

INTERNATIONAL ESSENTIAL TREMOR FOUNDATION – IETF. www.essentialtremor.org

M. Smeja, F. Foerster, G. Fuchs, D. Emmans, A. Hornig, y J. Fahrenberg: 24-h Assessment of Tremor Activity and Posture in Parkinson's Disease by Multi-Channel Accelerometry. *Journal of Psychophysiology* Volume 13, No. 4, 1999.

WATTS R, Koller. *Movement Disorders*. New York, McGraw Hill, 1997.

WEINBERG, Harvey: Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications. Analog Devices.

WEINBERG Harvey, y LEMAIRE Christophe: Using the ADXL202 Accelerometer as a Multifunction Sensor (Tilt, Vibration And Shock) in car Alarms. Analog Devices.

WEINBERG, Harvey: Using the ADXL202 Duty Cycle Output. Analog Devices.

RAMOS M., Juan: Capacitive Microsensors with Applications. Instituto de Microelectrónica de Sevilla Centro Nacional de Microelectrónica. 2000.