

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALARMA PARA LA DETECCIÓN DE SOMNOLENCIA EN CONDUCTORES

Rascón Madrigal Lidia Hortencia, Gordillo Castillo Nelly, Sánchez Flores Julio César, Enríquez Aguilera Francisco Javier,

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación
Av. Del Charro 450 Nte. Ciudad Juárez, Chihuahua, México
Tel. 656-688-4841, email: lrascon@uacj.mx,

RESUMEN.

El sistema de alarma para la detección de somnolencia en conductores se basa en la medida de la frecuencia respiratoria en el costado de la décima costilla utilizando un acelerómetro triaxial. El acelerómetro registra los movimientos torácico- abdominales producidos al inhalar y exhalar aire. Se desarrolló un algoritmo para medir la frecuencia respiratoria en reposo; posteriormente, se mejoró el algoritmo para reducir el efecto de la vibración del automóvil en movimiento y finalmente, se desarrolló un algoritmo que clasifica el estado del sujeto para determinar si está somnoliento.

Palabras Clave: acelerómetro, somnolencia, frecuencia respiratoria, dsPIC30f4012.

ABSTRACT

An alarm system for detecting drowsiness in drivers is presented. The system is based on the respiratory rate measured on the side of the tenth rib, by means of a triaxial accelerometer the thoracic-abdominal movements produced by inhaling and exhaling air are recorded. An algorithm was developed to measure respiratory rate at rest; subsequently, the algorithm was improved to reduce the effect of vibration of the car in movement. An algorithm classifies the subject's condition and determines the drowsiness.

Keywords: accelerometer, drowsiness, respiratory rate, dsPIC30f4012.

1. INTRODUCCIÓN

El sueño es un factor de riesgo para los conductores que se deben trasladar de un punto a otro. La somnolencia en carretera puede llevar a la muerte, estudios realizados destacan que el 70% de conductores ha presentado síntomas de somnolencia [1], donde el 18% sufrieron accidentes en carretera [2]. En el pasado se han implementado sistemas de visión a fin de detectar la somnolencia en conductores y poder reducir el riesgo. Con el uso de cámaras se ha monitoreado la actividad de los ojos y boca [3], el problema que presentan estos sistemas es la cantidad de falsos positivos que pueden provocar cualquier movimiento facial del conductor. Diversos sistemas de monitoreo y registro de parámetros fisiológicos han ayudado a evaluar si el conductor se encuentra en diferentes situaciones de riesgo como somnolencia. Ficosa en el año 2011 realizó un dispositivo comercial, el *Somnoalert* que permite la detección del estado de somnolencia en conductores de camiones, el dispositivo cuenta con un sistema de alarma para avisar a la

base central que el sujeto puede provocar un accidente, por medio de GPS se realiza un seguimiento del camión [4]. El conductor debe colocarse una banda ergonómica alrededor del pecho. Sin embargo, la manipulación que el conductor tiene sobre la banda es un problema ya que puede no usarla u olvidar colocársela, lo que provoca la inhabilitación del sistema. Como una propuesta alternativa en la UACJ, Gordillo y col., en 2014 proponen una mejora al sistema *Somnoalert*, que consiste en reemplazar la banda torácica por un acelerómetro adherido al cinturón de seguridad, recomienda ubicar el acelerómetro en el reborde de la décima costilla del conductor para medir la señal de respiración en forma confiable. Este trabajo, es una continuación del trabajo de Gordillo y col., [5]; utiliza un acelerómetro triaxial y mediante un algoritmo mide la frecuencia respiratoria, estima el estado de somnolencia y genera una alerta visual; la ventaja sobre otras propuestas es que el sensor está colocado en el cinturón de seguridad y el conductor debe utilizarlo por ley.

2. RESPIRACIÓN Y SOMNOLENCIA

2.1. Respiración

La respiración se considera como los procesos implicados en el transporte de oxígeno desde la atmósfera hasta los tejidos corporales así como en el transporte y liberación a la atmósfera del dióxido de carbono producido en los tejidos [6]. Para llevar a cabo el proceso de respiración el ser humano ha desarrollado un aparato respiratorio; a diferencia de los microorganismos, el ser humano es incapaz de llevar el proceso de difusión por su proporción entre el volumen y el área de superficie por ser demasiado baja, además de la distancia de la superficie corporal hasta las células es grande dando como resultado un proceso lento [7]. El aparato respiratorio puede dividirse en tracto respiratorio superior e inferior.

El tracto respiratorio superior tiene una extensa área de superficie ya que son los órganos localizados fuera del tórax, cavidad nasal, oral, faringe, laringe y la tráquea, así como también abundante perfusión sanguínea y su epitelio respiratorio está recubierto por secreción mucosa, en el interior de la nariz hay vellos que actúan como filtros. La función de las vías respiratorias consiste en calentar, humidificar y filtrar el aire, para dar un soporte para el intercambio gaseoso en la parte distal de las vías respiratorias inferiores.

El tracto respiratorio inferior comprende la parte inferior de la tráquea, los dos bronquios principales y los pulmones. Estas estructuras están localizadas en el interior de la cavidad torácica. Los pulmones son los órganos encargados del intercambio gaseoso, actúan en el paso del oxígeno a la sangre y en la salida del dióxido de carbono. El acino es parte de la vía aérea implicada en dicho proceso, el paso del oxígeno desde el pulmón a la sangre y del dióxido de carbono desde la sangre al pulmón y por último, las pleuras, que son capas continuas de epitelio, pleura interna y externa. La capa que recubre el pulmón es la pleura interna y la capa que recubre la pared torácica es la externa, ambas pleuras están en contacto, separadas por una capa de líquido que actúa como lubricante y permite que las dos superficies se deslicen entre sí con la ventilación [6].

2.2. Somnolencia

El cuerpo humano requiere de tres necesidades básicas para su sobrevivencia: agua, alimento y descanso; se puede tomar la decisión de no consumir agua ni alimentos aunque se tendrá como consecuencia una muerte lenta, el sueño es un factor necesario para el ser humano, considerando que si el cuerpo necesita dormir este obligará a la persona hacerlo sin importar que actividad este realizando en cualquier situación [8]. El ciclo natural del sueño es afectado por diferentes cambios ocurridos en el reloj biológico humano, las principales causas de somnolencia son la disminución de la cantidad de horas de sueño, cambios del ritmo circadiano, uso de medicamentos y una calidad de sueño deficiente, aunque las necesidades de cada persona son diferentes, ocasionados por los diferentes cambios de turno en un ambiente laboral, escolar u otros. El ser humano debe dormir por lo menos 8 horas durante la noche, existen parámetros que imposibilitan dormir durante el día, como la luz solar, ruidos generados en el ambiente que evitan conciliar el sueño de una manera correcta, y aun así sin considerar que las costumbres de la persona al dormir durante el día permiten que exista la somnolencia durante horarios anormales. Los efectos de somnolencia han sido comparados con estado de ebriedad de las personas. Un estudio realizado a finales de los años 90's, concluyó que sujetos sin dormir 18 horas presentaban un grado de alcohol de 0.05; contra 0.10 que presentaban sujetos sin conciliar el sueño 24 horas, lo que corresponde a dificultades de pronunciación [8].

2.3. Relación entre somnolencia y señal respiratoria

La respiración es un proceso automático que ocurre sin ninguna conciencia, es decir, la respiración se lleva a cabo mientras se esté despierto, dormido o bajo los efectos de anestesia. Durante la respiración, la inspiración es ocasionada por un cambio en la activación de los músculos inspiratorios, primordialmente en el diafragma, en la Figura 1, se observa la comparación de los cambios de la presión pleural, el cual corresponde a la actividad eléctrica durante la respiración.

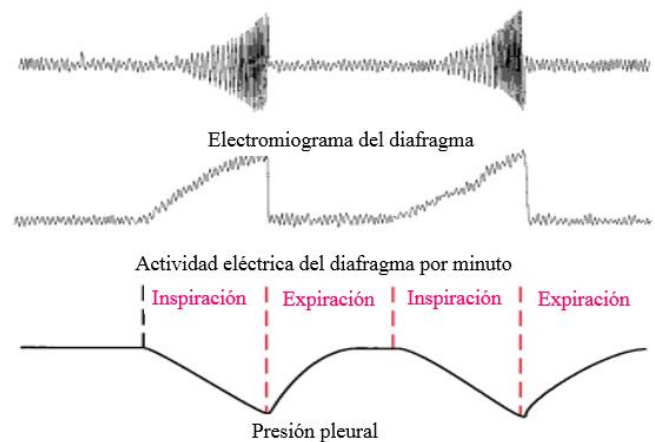


Figura 1. Cambios de la presión pleural en comparación con la actividad eléctrica durante la respiración.

Los cambios efectuados en la señal respiratoria por causas de somnolencia, apnea, daños cerebrales provocan que exista una disminución en la frecuencia respiratoria o caso contrario cuando existen factores como por ejemplo la fiebre, asma o sobredosis pueden aumentar su frecuencia respiratoria.

2.4. Protocolos para la detección de somnolencia

Los accidentes de tráfico se han visto afectados por factores que alteren el trayecto de los conductores, es por ello que se han realizado protocolos de investigación que permiten detectar elementos que intervengan en la conducción.

En el protocolo para obtener el permiso de conducir, los conductores deben someterse a pruebas para mantener el estado de vigilia. Se han empleado los protocolos MWT20 (mantenimiento de prueba de vigilia, por sus siglas en inglés, *maintenance of wakefulness test*), correspondiente a 20 minutos y para la viabilidad del examen se ha mejorado con el protocolo de MWT40 con una duración de 40 minutos [9].

La mayoría de los test de detección de somnolencia están basados en mantener el estado de vigilia, como el test psicomotor de vigilancia que valora la rapidez de respuesta ante estímulos o el tiempo de reacción entre dos estímulos, mide la capacidad de fatiga. Consiste en colocar al sujeto en un asiento y que permanezca sentado durante un lapso de 20 minutos, con indicaciones previas de procurar no dormir lo suficiente el día anterior para hacer válida la prueba [10]. Durante las pruebas mencionadas anteriormente es factible aplicar sistemas de simulación en conducción para recrear un ambiente de carretera. En general, los protocolos para la detección de somnolencia consisten en preparar al sujeto y ver su estado de vigilia sin recibir alguna sustancia que lo mantenga en alerta.

3. METODOLOGÍA.

3.1. Descripción del sistema.

El Sistema está integrado por un sensor acelerómetro triaxial ADXL335 con un ancho de banda ajustable para cada eje. El rango de medición es de $\pm 3 g$ con una sensibilidad de $330 mV/g$ es de bajo consumo de energía. Utiliza un filtro pasa banda con frecuencias de corte de 0.1 a $1 Hz$, un amplificador de instrumentación INA131BP, y un dsPIC30f4012 que almacena el programa para generar la alerta de somnolencia (Figura 2). El sistema en este prototipo es alimentado por baterías.

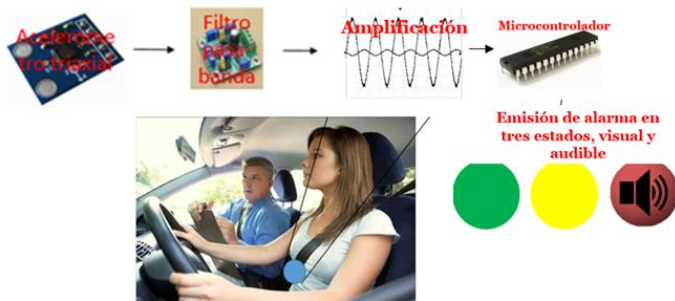


Figura 2. Sistema de alarma para la detección de somnolencia.

3.2. Algoritmo para medir respiración

Una vez adquirida la señal de respiración se elaboró un algoritmo en Matlab para filtrar en forma digital la señal, suavizarla, identificar y contar el número de valores máximos de la señal. La señal de respiración pasa por un filtro butterworth pasa bajas de 4^{to} orden a una frecuencia de corte a $1 Hz$. El suavizado de la señal se realiza con un filtro promediador de 60 muestras que recorre la señal y genera la señal suavizada. Para contar el número de valores máximos de la señal de respiración, es decir las crestas en la señal, las cuales fisiológicamente corresponden al final de la inhalación e inicio de exhalación se utiliza un algoritmo para determinar la frecuencia respiratoria en un periodo de tiempo. El algoritmo se encarga de recorrer la señal suavizada y buscar un valor mayor al anterior y mayor al posterior y con ello determina en instante de tiempo que corresponde al valor máximo. El valor máximo y su correspondiente valor en el dominio del tiempo se utilizan para calcular la frecuencia respiratoria.

3.3. Protocolo para estimar la somnolencia

Se utilizó el protocolo de S.P Rubio [10], participaron 17 personas. Se solicitó dormir menos de 7 horas el día anterior a la prueba, y el día de la prueba no consumir alimentos con cafeína, alcohol, ni cantidades excesivas de azúcar y no descansar. Las pruebas se realizaron en horarios posteriores a las 12:00 A.M, las personas se recibían con estado de cansancio, se sometieron a una habitación frente a un monitor con un video el cual hacía la simulación de un camino en automóvil en carretera con duración de 25 minutos, se colocó el sensor acelerómetro en una banda simulando el cinturón de seguridad, se conectó al circuito de filtrado, amplificación y al

sistema para la adquisición, se registró de la señal de respiración. Se pidió al sujeto sentarse en una posición de reposo para no alterar su estado de vigilia, se le dio indicaciones: ver el video durante todo el periodo de prueba, no efectuar movimientos bruscos a excepción de movimientos ligeros como optar por posición más cómoda, entre otros. Y no se les indicó la variable a medir para que no alteraran la frecuencia respiratoria.

3.4. Algoritmo para medir somnolencia

En la validación del sistema de alarma se desarrolló un algoritmo que clasifica el estado del conductor como despierto, inicio de somnolencia y somnoliento. Para el desarrollo del algoritmo se analizaron las 17 señales de respiración obtenidas durante el protocolo de somnolencia y 10 señales de respiración en sujetos sin rasgos de somnolencia.

Para clasificar al sujeto en algún estado, primero se analiza el comportamiento de la frecuencia respiratoria durante el tiempo, en el estado despierto la frecuencia respiratoria es mayor o igual a 16 respiraciones por minuto, el estado inicio de somnolencia registra un disminución entre 14 y 16 respiraciones por minuto y el estado de somnolencia presenta 15 respiraciones por minuto o menos.

Para realizar la clasificación se analiza la señal obtenida durante un minuto con un patrón de solapamiento del 50%, se mide la frecuencia respiratoria, y se evalúan los resultados a los 3 minutos, para clasificar el estado en algún conjunto dependiendo de su grado de pertenencia [11].

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Pruebas en reposo

Se realizaron pruebas de adquisición de señales con diferentes frecuencias de muestreo para validar que la señal de interés no perdiera datos en diferentes condiciones y con ello considerarla para el análisis en el dsPIC 30f4012. Se utilizó la frecuencia de muestreo de 50 y 10 Hz. Inicialmente, la señal se adquirió con una tarjeta de adquisición de datos USB 6009 para visualizarla y posteriormente, con el dsPIC30f4012 se utilizó una frecuencia de muestreo de 10 Hz (Figura 3). Los algoritmos utilizados se trabajaron en Matlab y el sistema de adquisición de datos con la USB 6009 se utilizó para adquirir, visualizar y almacenar la señal.

Se efectuaron varias pruebas en las que se simulaban movimientos dentro del automóvil, como freno (Figura 4), movimientos oscilatorios, movimientos hacia la izquierda y a la derecha, mover una mano simulando encender el radio, etc., con el fin de identificar la señal en dichos artefactos de movimiento.

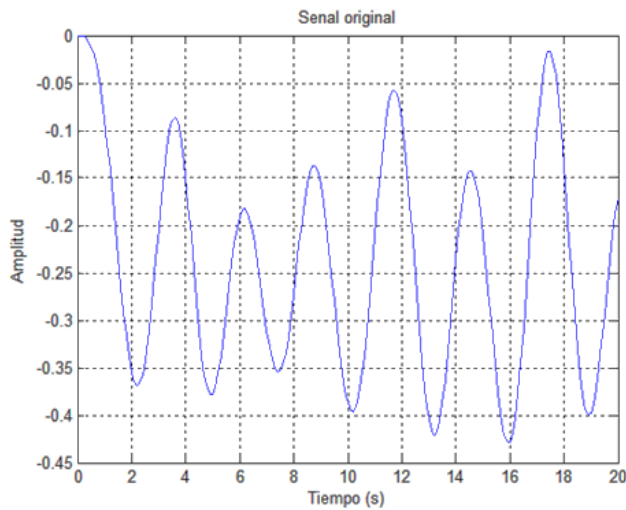


Figura 3. Toma de muestra a 20 segundos en condiciones de reposo con una frecuencia de muestreo a 10 Hz.

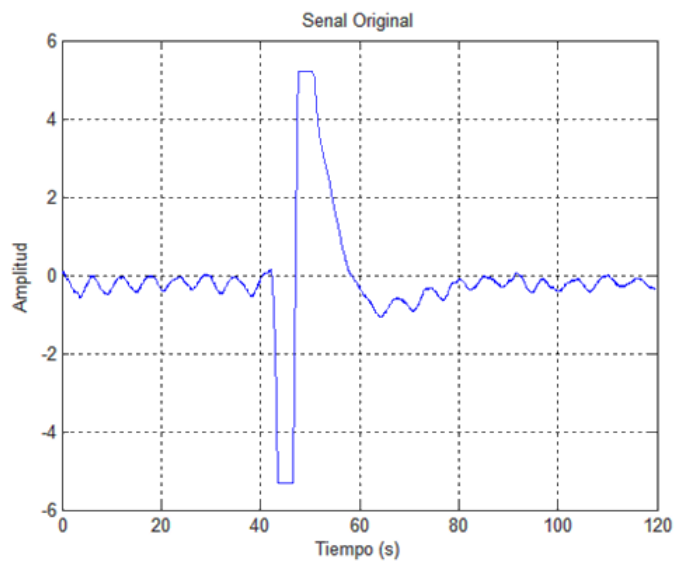


Figura 4. Toma de muestra de 120 segundos con la simulación en reposo simulando un freno.

Como se observa, la señal de respiración se ve alterada más no modifica el comportamiento de la señal, la señal incrementa su valor y con ello indica que el sujeto realiza movimientos voluntarios o involuntarios que representan su estado de vigilia, al existir estos movimientos existe un periodo recuperación de la señal de aproximadamente 8 segundos (reacción del filtro) al volver al estado de reposo. Se realizaron pruebas de mayor tiempo para observar el comportamiento de la señal; se efectuaron dos movimientos bruscos y un movimiento ligero que algún conductor haría en un estado de somnolencia, véase Figura 5.

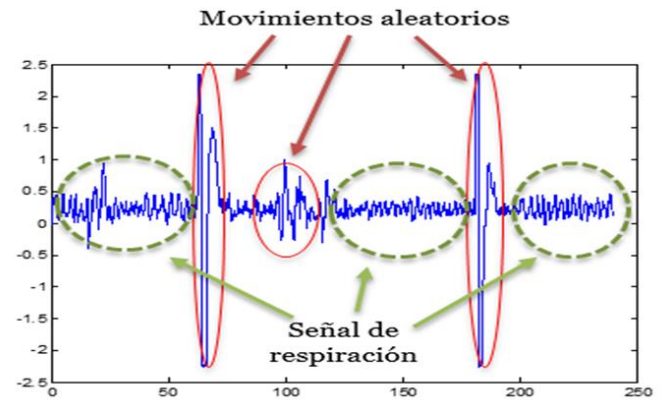


Figura 5. Señal de respiración, muestra en efecto del movimiento del conductor durante 250 segundos.

Una vez obtenida la señal de respiración, esta es filtrada y suavizada para identificar mediante el algoritmo descrito en el punto 3.2 los valores máximos que corresponden al final de la inhalación e inicio de la exhalación. La Figura 6 muestra la señal adquirida por la DAQ USB 6009, la señal filtrada, la señal suavizada y la señal suavizada indicando los valores máximos identificados. De esta forma un arreglo almacena los valores máximos y el instante de tiempo en que este ocurre.

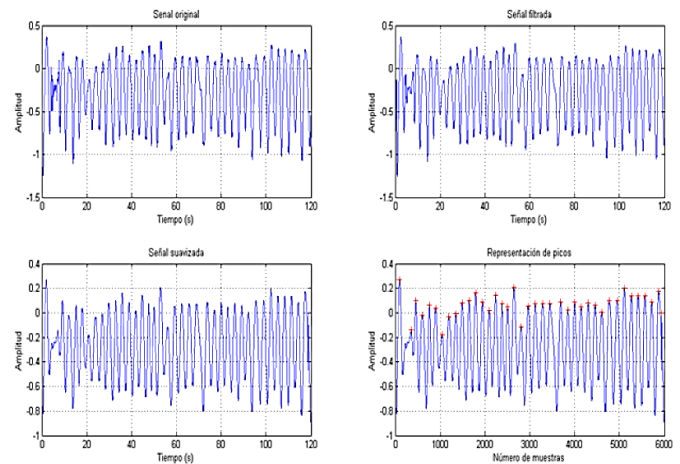


Figura 6. Señal de respiración en reposo, filtrada, suavizada y con los valores máximos identificados.

4.2. Pruebas en movimiento

Se realizaron pruebas en movimiento con el uso de un automóvil en carretera plana con las mínimas obstrucciones en pavimento para la obtención de la señal de respiración con un total de recorrido de 30 Km, se realizó un análisis del espectro para determinar el tipo de ruido presente en la señal (Figura 7).

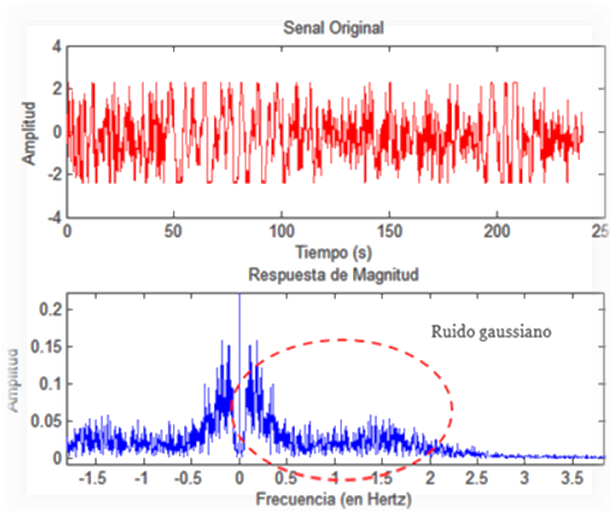


Figura 7. Arriba, señal de respiración registrada con el auto en movimiento; abajo, espectro de la señal.

La señal en conducción se muestra saturada debido a los diferentes movimientos generados en el camino, aun así la información de la señal respiratoria se encuentra en el conjunto de datos. Se determinó que los artefactos de movimiento están presentes en el automóvil y se genera un ruido que se encuentra dentro del mismo ancho de banda utilizado, se realizó una comparación del análisis espectral de una prueba en estado de reposo (Figura 8).

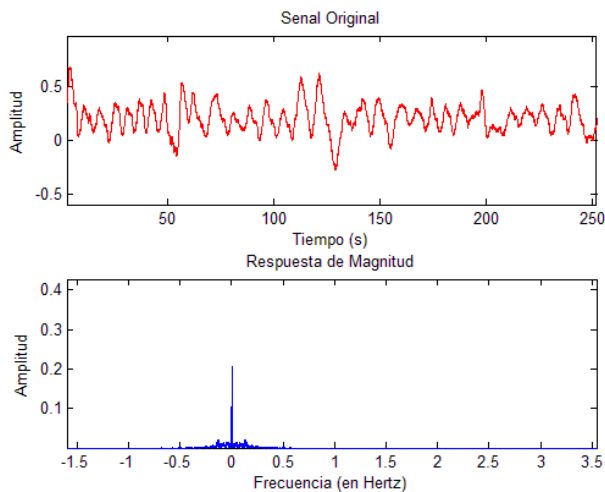


Figura 8. Señal de respiración en reposo y análisis espectral.

Para las pruebas en movimiento se coloca el sensor en el cinturón de seguridad del conductor y la señal es adquirida con la USB 6009. Se solicitó conducir en un camino recto sin efectuar movimientos bruscos; se aplicó el algoritmo para medir la frecuencia respiratoria descrito en 3.2, en la Figura 9 se observa la respuesta de cada proceso en la señal de respiración.

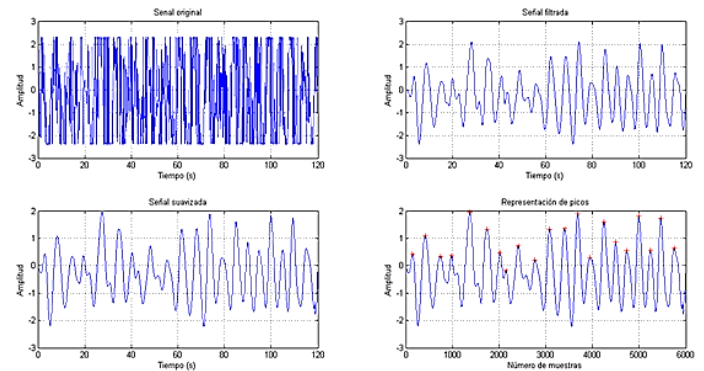


Figura 9. Señal de respiración de pruebas en movimiento.

También se realizaron pruebas de medida de la frecuencia respiratoria con el automóvil realizando movimientos controlados en un camino recto durante 2 minutos. Se condujo en línea recta durante 21 s, cambio de carril y continuar 4 s, mirar los espejos, y continuar manejando 37 s, frenar, continuar conduciendo por 28 s, mover una mano para encender el audio y continuar conduciendo. En la Figura 10 se muestran los cambios en la señal de acuerdo al tiempo establecido en los diferentes movimientos.

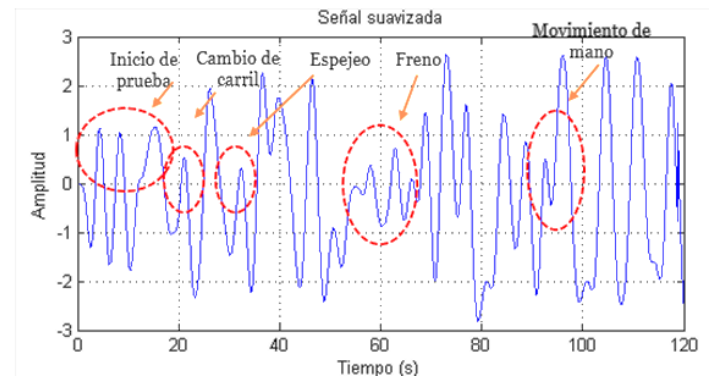


Figura 10. Visualización de los movimientos controlados en la señal.

4.3. Validación del algoritmo del sistema de alarma.

El algoritmo se probó con una señal de respiración en personas despiertas con duración de 5 minutos y el algoritmo las clasificó en el estado de despierto. Posteriormente, se probó el algoritmo de la señal sometidas al protocolo de somnolencia y solo uno de ellos lo clasificó como estado despierto.

Se calcularon los índices estadísticos de sensibilidad y especificidad. La sensibilidad indica si es posible clasificar correctamente un dato y la especificidad es la capacidad de estimar casos negativos cuando realmente son positivos. La sensibilidad se determina con la Ecuación 1 y la especificidad con la Ecuación 2.

$$S = \frac{V_p}{V_p + F_N} \quad (1)$$

$$E = \frac{V_N}{V_N + F_p} \quad (2)$$

Donde:

Vp=Verdaderos positivos

Fp=Falsos positivos

Vn=Verdaderos negativos

FN=Falsos negativos

Con los valores Vp= 11, Vn= 11, Fp= 0, FN=1 se determinó la sensibilidad S=0.9166 y la especificidad E=1. Los cuales validan el algoritmo.

4.4. Pruebas en movimiento del sistema completo.

Con los algoritmos realizados en Matlab probados y validados, se utilizó simulink 2013a para programar el dsPIC 30f4012. El sistema implementado en el dsPIC 30f4012 se muestra en la parte superior de la Figura 11. Para las pruebas en movimiento se colocó el acelerómetro en el cinturón de seguridad del conductor y la señal se envió al sistema. Durante la prueba, el sistema evalúa el estado de somnolencia y lo indica mediante un LED de color verde para indicar que el conductor está despierto (Figura 11, arriba), LED de color amarillo para indicar inicios de somnolencia (Figura 11, centro) y LED de color rojo para indicar somnolencia.

Para las pruebas durante la conducción del automóvil se realizó una respiración normal y el sistema encendió el LED verde indicando que el conductor está despierto, luego se realizó una respiración más lenta en forma intencional y el sistema lo clasificó como inicio de somnolencia; posteriormente, se disminuyó aún más el tiempo entre cada respiración y el sistema lo clasificó como somnoliento.



Figura 11. Sistema de alarma de somnolencia en conductores; estado despierto (arriba), inicio de somnolencia (centro), somnoliento (abajo).

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo demostró que es posible registrar la señal de respiración utilizando un acelerómetro triaxial colocado en el cinturón de seguridad que a futuro será reemplazado por uno de un solo eje. El acelerómetro es capaz de detectar la respiración así como los artefactos de movimiento del conductor, que son un indicio de que el sujeto se encuentra despierto.

Respecto al rango respiratorio cuando el sujeto está en estado somnoliento no existe una gran diferencia a lo esperado con el rango de una persona en estado de relajación, suelen tener un rango respiratorio muy similar, es notable destacar que la frecuencia respiratoria en cada uno de los tres estados no está determinado por un rango respiratorio, si no por una disminución de la frecuencia respiratoria y con ello es permisible realizar un sistema de alarma. Si el conductor inicia su trayecto en estado relajado, al pasar un determinado tiempo la frecuencia respiratoria se verá afectada con una disminución cuando hay indicios de somnolencia o somnolencia; por lo tanto, se concluye que el sistema es capaz de detectar somnolencia en conductores.

6. REFERENCIAS

- [1] C. G. Madrid, «El 70% de los conductores ha tenido sueño al volante,» 04 Octubre 2013. [En línea]. Available: <http://WWW.elmundo.es/elmundosalud/2014/10/04/noticias/1380903131.html>. [Último acceso: 31 agosto 2014].
- [2] M. Venelle, H. M. Engleman y N. J. Douglas, «Sleepiness and sleep-related accidents in commercial bus driver,» *Sleep breath*, vol. 18, n° 1, pp. 39-42, 2010.
- [3] S. Gupta y E. Garima, «Road accident prevention system using driver's drowsiness detection by combining eye closure and yawning,» n° 6, pp. 839-842, 2014.
- [4] Ficosa, «Somnoalert,» Datasheet, 2011.
- [5] K. Gutiérrez y R. Valtierra, «Localización de un acelerómetro dentro de un automóvil para la detección de la respiración de conductores,» *Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología*, p. 96, 2014.
- [6] A. Jefferies y A. Turley, *Lo esencial del aparato respiratorio*, Primera ed., Madrid: Harcourt, 2000, p. 242.
- [7] G. A. Thibodeau y K. T. Patton, *Anatomía y fisiología*, Cuarta ed., Madrid: ELSEVIER, pp. 680-730.
- [8] «Manejando dormido o somnoliento,» *Academia Americana de Medicina del Sueño*, p. 16, 2006.
- [9] L. Arzi y R. Shreter, «Forty- Versus 20-Minute Trials of the Maintenance of Wakefulness Test Regimen for Licensing of Drivers,» *J Clin Sleep Med*, vol. 5, n° 1, pp. 57-62, 2009.
- [10] S. P. Rubio, «Métodos de evaluación de la excesiva somnolencia diurna,» *Vigilia-Sueño*, vol. 15, n° 2, 2003.
- [11] J. Sánchez, «Desarrollo de un sistema de alarma para la detección de somnolencia en conductores,» *Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología*, p. 111, 2015.