



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Doctorado en Mecatrónica

Sensor inteligente basado en FPGA para detección de cansancio en conductores automotrices.

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Doctor en Mecatrónica

Presenta:

M. en C. Irving Armando Cruz Albarrán


Dirigido por:

Dr. Juan Primo Benítez Rangel

Dr. Juan Primo Benítez Rangel
Presidente


Firma

Dr. Luis Alberto Morales Hernández
Secretario


Firma

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
Vocal

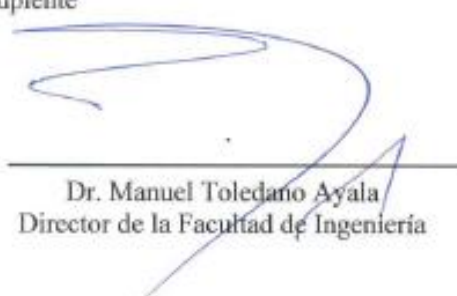

Firma

Dr. Iván Ramon Terol Villalobos
Suplente


Firma

Dr. Miguel Trejo Hernández
Suplente


Firma


Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad de Ingeniería


Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Resumen

El constante incremento de accidentes automovilísticos atribuidos al cansancio del conductor crea una importante brecha para el área de la investigación, ya que estos ocasionan que exista una gran cantidad de daños materiales, así como lamentables pérdidas humanas, por ello, surge la necesidad de crear un sensor que indique su presencia. En este trabajo se presenta un sensor inteligente para detección de cansancio en conductores automotrices, el cual se basa en cambios térmicos ocurridos en termobiomarcadores en la zona del rostro y de las manos. Para lograr dicho fin se realizó la caracterización de cinco emociones básicas: alegría, asco, enojo, miedo y tristeza, esto con el objetivo de diferenciar el comportamiento de cada una de ellas. Mediante la caracterización de estas emociones se propuso un patrón térmico que cumple dicho fin. Posteriormente se realizó un estudio de estrés, debido a que la exposición por un periodo prolongado al estrés desencadena en cansancio. Finalmente, se propuso una metodología para desarrollar una paleta de colores. Esta paleta permite una mejor visualización de los cambios térmicos presentados cuando se detecta la presencia de cansancio. Finalmente, el sistema se probó en conductores automotrices y se obtuvieron resultados satisfactorios.

(Palabras clave: **Sensor inteligente, Cansancio, Termografía**)

Summary

The continuous increase in automobile accidents attributed to the driver's fatigue creates an important gap for the research area, since they cause a great amount of material damage, as well as unfortunate human losses; therefore, the need arises to create a sensor that indicates its presence. This paper features a smart sensor to detect tiredness in car drivers, which is based on thermal changes presented in thermo-biomarkers in face and hands area. To achieve this goal, five basic emotions were characterized: joy, disgust, anger, fear and sadness, this with the objective of differentiating the behavior of each one of them. Through the characterization of these emotions, a thermal pattern that fulfills this purpose was proposed. Subsequently, a stress study was carried out, because exposure for a long period of time to stress triggers fatigue. Finally, a methodology to develop a color palette was carried out. This palette allows a better visualization of the thermal changes presented when the presence of fatigue is detected. Finally, the system was tested on automotive drivers and satisfactory results were obtained.

(Keywords: **Smart sensor, Fatigue, Thermography**)

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia. A mis padres, Aurelia y Armando, por conducirme por el camino del bien, por brindarme ese gran ejemplo a seguir, por estar siempre a mi lado en las buenas y en las no tan buenas, en fin, por ser los mejores padres. A mis hermanos, Mayte y Omar, por siempre estar a mi lado, por su apoyo y por las palabras de aliento. A mi cuñada Gina y a mis sobrinas Fati, Alexa, Mayrin y Thais. Finalmente, a mi esposa Katia, por su amor, consejos, risas y paciencia a lo largo de esta meta. Porque la familia es lo primero.

Al Dr. Luis Alberto Morales Hernández por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, por todas las enseñanzas y el apoyo brindado a lo largo de esta trayectoria.

A mis compañeros de posgrado, (Jesús, Carlitos, Roberto, Martin, Daniel, Omar, Jan, Chava, Israel, Emmanuel, David, Juan José, Juan Ángel), por todos los momentos que vivimos dentro y fuera de la UAQ, porque más que compañeros ahora los considero amigos.

A todos mis profesores, por hacer parecer fácil lo difícil y por todas las enseñanzas brindadas (tanto personales como profesionales).

Finalmente, a la Universidad Autónoma de Querétaro y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme la oportunidad de realizar este programa de posgrado.

Índice

Resumen.....	i
Summary.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice.....	iv
Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.1.1 Estudios no invasivos.....	3
1.1.2 Estudios invasivos.....	7
1.1.3 Estudios en conjunto, invasivos y no invasivos.....	9
1.2 Objetivos e Hipótesis.....	11
1.2.1 Objetivos.....	11
1.2.1.1 Objetivo general.....	11
1.2.1.2 Objetivos específicos.....	11
1.2.2 Hipótesis.....	11
1.3 Descripción del problema.....	12
1.4 Justificación.....	13
1.5 Planteamiento general.....	14
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	15
2.1 Estado del arte.....	15
2.2. Estados emocionales.....	16
2.2.1 Emociones básicas de Ekman.....	16
2.2.2 Estrés.....	16
2.2.2.1 Trier Social Stress Test (TSST).....	16
2.2.3 Fatiga.....	16
2.2.3.1 Características que indican la presencia de fatiga	17
2.2.4 Cansancio.....	17
2.3. Termografía.....	17
2.3.1 Ventajas de la termografía.....	18

2.3.2 Espectro electromagnético.....	18
2.3.3 Matriz termal.....	19
2.3.4 Factores a tomar en cuenta en termografía con humanos.....	19
2.4 Procesamiento de imágenes.....	20
2.4.1 Imagen.....	20
2.4.1.1 Imagen binaria.....	21
2.4.1.2 Imagen en escala de grises.....	21
2.4.1.3 Imagen a color – RGB	21
2.4.2 Histograma.....	22
2.4.3 Morfología matemática.....	22
2.4.3.1 Dilatación.....	22
2.4.3.2 Erosión.....	22
2.4.3.3 Apertura.....	23
2.4.3.4 Cerradura.....	23
2.4.4 Modelos de color.....	23
2.4.4.1 RGB.....	23
2.4.4.2 HSI.....	24
2.4.4.2.1 Conversión de RGB a HSI.....	24
2.4.5 Segmentación de los objetos de interés.....	26
2.4.5.1 Técnicas de segmentación.....	26
2.5 Dispositivos lógicos programables.....	26
2.5.1 Arreglo de compuertas programable en campo (FPGA).....	27
2.6 Sistema embebido.....	28
2.7 Controladores inteligentes.....	29
2.7.1 Red neuronal artificial.....	29
2.7.1.1 Redes de retropropagación	29
2.7.1.2 Elementos de una red neuronal.....	30
2.7.2 Controlador difuso.....	30
2.8 Clasificadores.....	34
2.8.1 Árbol de decisiones.....	34
III. METODOLOGÍA.....	35

3.1 Patrón de referencia.....	35
3.1.1 Estudio de emociones.....	36
3.1.2 Estudio de estrés	38
3.2 Sujeto.....	41
3.3 Adquisición de la imagen termográfica.....	41
3.3.1 Visor termográfico portátil – 100 % UAQ.....	41
3.4 Tratamiento de la imagen termográfica – Termobiomarcadores.....	43
3.5 Señal de alerta – Efecto visual (Paleta de color).....	44
IV. RESULTADOS.....	46
4.1 Estudio emocional.....	46
4.2 Estudio de estrés.....	50
4.3 Señal de alerta – Paleta de color según emoción.....	55
4.4 Estudio de caso real.....	56
V. CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS.....	59
5.1 Conclusiones.....	59
5.2 Prospectivas.....	62
REFERENCIAS.....	63
APÉNDICES.....	69
A. Derechos de autor.....	69
A1. Sistema de visión artificial para detección de termobiomarcadores.....	69
B. Diseño industrial.....	70
B1. Visor termográfico portátil.....	70
C. Artículos generados.....	71
C1. Artículo 1: “Human emotion detection based on a Smart-thermal system of thermographic images”.....	71
C2. Artículo 2: “A methodology based on infrared thermography for the study of stress in hands of young people during the Trier Social Stress Test”.....	72
C3. Artículo 3: “A new approach to obtain a colour palette in thermographic images”.....	73

Índice de figuras

Figura 1.1. Diagrama a bloques general del sensor inteligente basado en sistema embebido para detección de cansancio.....	14
Figura 2.1. Protocolo TSST.....	16
Figura 2.2. Espectro electromagnético.....	18
Figura 2.3. Tetraedro de color RGB.....	24
Figura 2.4. Color e intensidad en el modelo HSI.....	25
Figura 2.5. Arquitectura de un FPGA.....	27
Figura 2.6. Diseño lógico en FPGA.....	28
Figura 2.7. Perceptrón multicapa.....	30
Figura 2.8. Diagrama a bloques de un controlador difuso.....	31
Figura 2.9. Representación de una función de pertenencia	32
Figura 3.1. Metodología general propuesta para sensor inteligente enfocado a la detección de cansancio.....	35
Figura 3.2 Metodología general para detección de emociones.....	36
Figura 3.3. Etapas para inducción de emociones.....	37
Figura 3.4. Regiones de interés para inducción de emociones.....	37
Figura 3.5. Metodología propuesta para el estudio de emociones.....	38
Figura 3.6. Metodología propuesta para el estudio del estrés	39
Figura 3.7. Etapas para la aplicación del protocolo TSST.....	40
Figura 3.8. Regiones de interés en manos para el estudio de estrés.....	40
Figura 3.9. Vista posterior del visor termográfico portátil 100 % UAQ.....	42

Figura 3.10. Vista frontal del visor termográfico portátil 100 % UAQ.....	42
Figura 3.11. Regiones de interés para el rostro.....	43
Figura 3.12. Regiones de interés para las manos.....	44
Figura 3.13. Metodología propuesta para segmentación de imagen termográfica...	45
Figura 4.1. Termobiomarcadores para análisis térmico	46
Figura 4.2. Sistema de Lógica Difusa para auto calibración.....	48
Figura 4.3. Árbol de decisiones para clasificación de emociones.....	49
Figura 4.4. Regiones de interés para el estudio de estrés en manos.....	51
Figura 4.5. Tendencia térmica en hombres.....	51
Figura 4.6. Tendencia térmica en mujeres.....	52
Figura 4.7. Paleta de color para hombres basada en el gradiente de cambio.....	53
Figura 4.8. Paleta de color para mujeres basada en el gradiente de cambio.....	54
Figura 4.9. Paleta de color aplicada a regiones de interés en el pre-test y en el post-test.....	55
Figura 4.10. Aplicación de pseudocolor por emoción.....	56
Figura 4.11. Imagen real del sensor inteligente posicionado frente al conductor....	57
Figura 4.12. Imágenes termográficas faciales adquiridas con sensor inteligente....	57
Figura 4.13. Imágenes termográficas de manos adquiridas con sensor inteligente..	58
Figura 4.14. Figura 4.14. Paleta de color que indica la presencia de cansancio. a) Rostro. b) Cara.....	58

Índice de tablas

Tabla 2.1. Factores ambientales a tomar en cuenta en termografía con humanos...	19
Tabla 2.2. Factores técnicos a tomar en cuenta en termografía con humanos.....	19
Tabla 2.3. Factores individuales a tomar en cuenta en termografía con humanos...	20
Tabla 2.4. Sistemas embebidos basados en procesador contra sistemas embebidos basados en FPGA.....	29
Tabla 4.1. Tendencia térmica en regiones de interés ante estímulos emocionales...	47
Tabla 4.2. Matriz de confusión para 17 hombres.....	50
Tabla 4.3. Matriz de confusión para 8 mujeres.....	50
Tabla 4.4. Valores estadísticos por género en puntas de los dedos.....	52
Tabla 4.5 Valores estadísticos entre géneros en puntas de los dedos	52

I. INTRODUCCIÓN

Día a día, en el ajetreado mundo que se vive, se requiere de una mayor demanda de trabajo físico, intelectual o emocional. Lo cual, ante una exposición prolongada desencadena en un cansancio excesivo del cuerpo humano. Reportes de la Policía Federal (Comisión Nacional de Seguridad, 2014) indican que el 80% de los accidentes en carreteras federales son atribuidos al conductor, teniendo entre las principales causas el conducir bajo los efectos del alcohol, medicinas o estupefacientes, así como conducir con fatiga, cansancio o sueño.

En esta tesis se describe el diseño y desarrollo de un sistema de visión artificial basado en FPGA para detección de cansancio en conductores automotrices. El trabajo consta de cinco secciones principales, además de las Referencias y Apéndices. En el presente capítulo se desarrolla el concepto de cansancio, los Antecedentes, Descripción del problema, Justificación y Planteamiento General, que dieron lugar a este trabajo de investigación; además, se muestra el objetivo general que se persigue, así como los objetivos específicos que muestran las etapas del trabajo. El capítulo dos presenta el estado del arte referente a dispositivos desarrollados para detección de cansancio y que han sido enfocado al área automotriz, así como también, la fundamentación teórica en la que se sustenta este trabajo. En el capítulo tres se muestra la metodología general propuesta para el desarrollo del sistema para detección de cansancio. En este mismo capítulo se hace mención de los elementos o dispositivos desarrollados, los cuales se presentan como una herramienta complementaria al sistema. En el capítulo cuatro y cinco se muestran los resultados y conclusiones obtenidos a lo largo de este trabajo. Por último, en la sección de Apéndices se plasman los artículos científicos resultantes, la propiedad intelectual de los dispositivos desarrollados y los derechos de autor del software, todos ellos generados durante el desarrollo de esta tesis.

1.1 Antecedentes

El constante incremento de accidentes automovilísticos provoca lamentables pérdidas humanas, así como también grandes cantidades monetarias, dichos accidentes en muchas ocasiones son atribuidos a la fatiga o cansancio corporal del conductor ya que estos se encuentran asociados con alteraciones en los niveles de conciencia y percepción. Según Rauch et al. (2009) la fatiga puede ser definida como el cansancio o el agotamiento por el trabajo, el esfuerzo o el estrés, causado principalmente por la exposición prolongada en la tarea.

Por las razones mencionadas, se han llevado a cabo diversos estudios como el que presenta Abbood *et al.* (2014) en el que muestra las variables que se usan en los sistemas o trabajos de investigación para la detección de fatiga o cansancio, entre las cuales se tienen la electroencefalografía (EEG), electromiografía (EMG), Electrooculografía (EOG), latidos del corazón, parpadeos, bostezos, viraje, entre otros. Un estudio de gran importancia es el Gastaldi *et al.* (2014) ya que presentó un estudio realizado a diez personas en el cual muestra que las horas de manejo que un conductor trae consigo consecuencias negativas en el rendimiento de manejo así como en el ritmo cardíaco. Años atrás Wang *et al.* (2011) realizó una revisión de las tecnologías existentes para la detección de cansancio o fatiga en un conductor automotriz, las clasificó en las que miden el estado del conductor, el desempeño o rendimiento del conductor y por último la combinación de ambas; un aspecto importante que ataca en este trabajo es que también mide la distancia entre vehículos con el fin de mantener la distancia adecuada para así evitar accidentes. Dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro Romero *et al.* (2004) realizó una clasificación de los accidentes de la siguiente manera: aquellos que tienen que ver con la comodidad del conductor, los relacionados con el control de las horas de servicio, y por último los orientados a disminuir el esfuerzo mecánico y visual del chofer; muchos de los cuales se basan en el monitoreo de la fisiología del conductor, presentando las tecnologías existentes para la detección de fatiga en conductores. Se puede realizar una clasificación general en cuanto a las variables que se utilizan para la detección de fatiga como sistemas invasivos o no invasivos, es decir, si el elemento de medición tiene contacto o no con la persona en estudio. Como se mencionó anteriormente, existen trabajos que presentan sistemas o métodos para lograr la detección de fatiga, misma

que involucra el estudio de muchos aspectos, tanto físicos como mentales, por dicha razón May & Baldwin (2009) discutieron los distintos métodos que existen para la detección de fatiga, examinando la efectividad de cada uno.

1.1.1 Estudios no invasivos

La comodidad del conductor automotriz para llevar a cabo satisfactoriamente su tarea resulta de vital importancia ya que cualquier distracción o elemento que le impida cumplir su objetivo puede provocar una tragedia, es por ello que para el estudio de la fatiga es necesario que los sistemas presenten un enfoque no invasivo, es decir, que no tengan contacto con la persona. En esta sección se presentan los trabajos de investigación no invasivos para la detección de cansancio en un conductor automotriz.

Ahlstrom *et al.* (2012) desarrolló algoritmos para su incorporación a un sistema que sea capaz de detectar el movimiento o distracción de la mirada en una persona, con el fin de reducir la inatención al momento de conducir, disminuyendo con esto el número de accidentes atribuidos a la distracción. Ahmed & Hossain (2014) desarrollaron un sistema basado en dos cámaras con el objetivo de detectar los síntomas de la fatiga, con una cámara detecta cuales obtiene una imagen para detectar el porcentaje de apertura de los ojos, bostezos y la inclinación de la cabeza y con la otra obtiene una imagen del camino para verificar si el automóvil se encuentra dentro del camino. Azim *et al.* (2014) desarrolló un sistema basado en el análisis de video que trabaja durante el día y noche, los parámetros que utiliza para la detección de fatiga son la duración de los ojos cerrados y el estado de la boca, es decir, si existe presencia de bostezos. Segmenta la cara con el algoritmo de Viola-Jones y extrae y analiza los ojos mediante lógica difusa. El sistema fue desarrollado en software. La mayoría de los trabajos que se enfocan a la detección de fatiga a través del análisis ocular no toman en cuenta la presencia de inconvenientes, tales como la presencia de anteojos, sin embargo Cheng *et al.* (2013) presentó un sistema para alertar al conductor sobre la presencia de cansancio, dicho sistema se basa en el análisis ocular; el rostro y el área de los ojos son extraídos con ayuda de una librería libre en línea llamada OpenCV, posteriormente aplica operaciones de morfología matemática para lograr eliminar la presencia de los anteojos y así poder realizar el análisis y poder dar un veredicto. Cyganek & Gruszczyński (2014) desarrollaron un sistema visual híbrido que trabaja mediante dos cámaras, una en el espectro

visible y otra cerca del espectro infrarrojo, respectivamente. Con ello logra la detección de los ojos mediante clasificadores en cascada para posteriormente con el análisis ocular poder brindar un veredicto sobre si el conductor se encuentra en estado de fatiga. Dentro de este mismo concepto de detección de ojos se encuentra el trabajo de Murawski *et al.* (2013) el cual utiliza una cámara infrarroja para trabajar tanto en ambientes diurnos como en ambientes nocturnos así como también bajo cualquier condición ambiental ya que proporciona una técnica para aumentar el brillo de los ojos ocasionados por la exposición a la cámara infrarroja creado con esto un nuevo sensor, con la información obtenida analiza los ojos mediante PERCLOS (porcentaje de cerradura de los ojos), PEROPEN (porcentaje de apertura de los ojos), frecuencia de parpadeo, actividad de los ojos y diámetro de la pupila. Por otro lado, Devi & Bajaj (2010) acoplaron una cámara CCD en el tablero, de tal manera que siempre este monitoreando al conductor y con ello extraer el área de los ojos y la boca para posteriormente introducir esa información en un algoritmo basado en lógica difusa con el fin de determinar el nivel de fatiga en el que se encuentra el conductor. Otro trabajo de vital importancia es el de Guo *et al.* (2014) ya que desarrollo un sistema basado en una red Bayesiana que engloba el estudio de PERCLOS (porcentaje de cerradura de los ojos), la rapidez de cerradura de los ojos (AECS), porcentaje de apertura de la boca (PERVLO), porcentaje de inclinación de cabeza con el paso del tiempo (PERTITL), porcentaje de dirección del vehículo (PNS), la desviación estándar de la posición en el carril, el índice de descanso el día anterior (Recess_Idx) y por último el reloj biológico, es decir, los efectos de la hora del día en el que se está conduciendo. Otro trabajo propuesto es la de Singh & Kaur (2013) en el que presentan un sistema para detección de fatiga basado en una máquina de visión, realizan la localización de ojos y cejas mediante un algoritmo de detección de objetos para posteriormente comparar el número de puntos negros localizados con un valor predefinido, dos para los ojos y dos para las cejas. La resolución que maneja es de 320*240 pixeles. Yutian *et al.* (2009) propuso un nuevo algoritmo de detección de estados del ojo mediante la combinación de tres algoritmos, plantilla de reconocimiento correspondiente, cálculo de la curvatura superior del parpado y detección de la proyección del ojo cerrado. Otra propuesta similar es la de Xiong *et al.* (2011) quienes desarrollaron un método efectivo para la detección de fatiga el cual estaba basado en el comportamiento espontaneo de la fluctuación pupilar.

Mediante el estudio de los ojos y la boca en conjunto Omidyeganeh *et al.* (2011) presentó un esquema inteligente y robusto para la detección de adormecimiento en conductores automotrices, en el cual engloba el método de detección de apertura de ojos y la detección de bostezos, primero detecta el rostro mediante técnicas de visión por computador, en la cual son extraídos los ojos y la boca para su posterior análisis. Con ello, finalmente determina el estado del conductor, sin embargo, el sistema solo trabaja en ambientes diurnos. Similarmente, Luo *et al.* (2013) propuso un método para detección de fatiga en conductores mediante tecnología de reconocimiento facial. Para la detección de ojos utiliza un algoritmo llamado AdaBoost el cual es capaz de localizarlos tanto en ambientes diurnos como ambientes nocturnos, posterior a la localización utiliza el método PERCLOS con el cual calcula el porcentaje de cerradura de los ojos. Por último, para la detección de la boca hace uso del algoritmo denominado Patrón Binario Local (LBP), para al final poder brindar un veredicto sobre el estado del conductor.

En lo que respecta a sistemas no invasivos con base en el estudio del volante, Chieh *et al.* (2003) desarrollaron un método que toma en cuenta la fuerza de agarre del volante que el conductor ejerce sobre este, el cual se basa en la variación en la fuerza de agarre debido a la fatiga, ya que cuando el conductor se encuentra en estado normal la fuerza de agarre del volante es mayor que cuando este se encuentra en estado de fatiga. El sistema usa un par de sensores resistivos posicionados en la superficie del volante, una para la mano derecha y otro para la mano izquierda. Otro trabajo que caracteriza el comportamiento del volante es el de Imamura *et al.* (2012) ya que estudió el comportamiento del conductor en lo que respecta al agarre del volante, proponiendo un sensor, el cual cuenta con veintiocho puntos de presión mismos que son analizados uno a uno para proporcionar un método que sea robusto. Otro trabajo es el de Jung *et al.* (2014) quien diseño un sensor electrocardiográfico embebido en el volante con un electrodo de tela eléctricamente conductora, el cual transmite las señales medidas vía Wireless.

Para el monitoreo facial es necesario tomar en cuenta el movimiento del rostro, debido a que no siempre la cara se encuentra en la posición deseada. Para lograr este fin Li *et al.* (2009) propusieron usar dos cámaras que utiliza para la detección de bostezos. El primer cámara se mantiene fija y su función es proporcionar la posición de la cabeza del conductor,

mientras que la segunda es controlable y se encarga de localizar la boca para de esta forma extraer la zona de la boca y proporcionar un veredicto del estado de acuerdo al número de bostezos por minuto.

Dentro de los sistemas no invasivos que estudian varios elementos para lograr la detección de fatiga se encuentra el de Feng *et al.* (2009) el cual incorpora tres elementos en estudio. Con una cámara estudia el estado de los ojos, en específico verifica el porcentaje de apertura de los ojos con un algoritmo denominado PERCLOS (Percentage of Eyelid Closure), el segundo elemento que toma en cuenta es en qué posición se encuentra la llanta, esto lo logra con la incorporación que mide el ángulo el cual está montado en la columna de dirección del automóvil, y por último mide el tiempo que ha pasado conduciendo la persona, ya que entre más horas este frente al volante mayor es el estado de fatiga.

Algunos de los métodos presentados anteriormente tienen el inconveniente de que las metodologías presentadas para el análisis de las imágenes tienden a ser susceptibles a la variación de iluminación, sin embargo, existe un campo de investigación que se encuentra en pleno auge, la termografía, dicho campo toma imágenes en base a la radiación infrarroja que los cuerpos emiten, por consiguiente no son susceptibles a variaciones en la iluminación. Es por ello que Gade & Moeslund (2014) realizaron un estudio sobre las principales aplicaciones de la termografía, las de mayor relevancia son: agricultura, detección de gas, industria, aplicaciones militares y detección, seguimiento y reconocimiento de humanos. Como aplicaciones específicas se tiene el trabajo de Seal *et al.* (2014) en el cual presenta una metodología para reconocimiento de rostro en imágenes térmicas, mediante cuatro pasos, toma de imagen, pre-procesamiento de la imagen, corte del área de interés mediante la localización del centroide del rostro y por último aplicación de SVD (Singular Value Decomposition) para obtención de las características deseadas. Dentro del mismo contexto Mostafa *et al.* (2013) presenta un nuevo enfoque para detección de características faciales, como son: ojos, boca y nariz, en imágenes térmicas, el cual es invariante a la rotación y hace uso de algoritmos Haar y Adaboost. Como un estudio más detallado Osia & Bourlai (2014) presentan un trabajo para detección de características faciales mediante el análisis de imágenes en el espectro visible así como en la onda media y alta de imágenes infrarrojas. Por otra parte, Cruz-Albarran *et al.* (2017) desarrollaron un sensor inteligente para detección de

emociones básicas, las cuales son: alegría, asco, enojo, miedo y tristeza. Este sistema tiene la ventaja de que se auto calibra, ya que como es sabido, todas las personas tienden a reaccionar de distinta ante el mismo estímulo. Posteriormente, Cruz-Albarran et al. (2018) estudiaron el comportamiento de las manos antes situaciones de estrés. El protocolo que usaron fue el Trier Social Stress Test (TSST), ante el cual concluyeron que la temperatura de la punta de los dedos decremента una vez llevado a cabo el test, sin embargo, la temperatura de las palmas no sufre cambios significativos.

1.1.2 Estudios invasivos

El desarrollo de sistemas tecnológicos enfocados a la detección de fatiga en conductores para su incorporación en tareas de la vida cotidiana es de vital importancia para el confort humano, es por ello que han surgido distintos trabajos como el de Milenio (2013) en el cual se presenta un sistema desarrollado por estudiantes del IPN el cual tiene como finalidad la prevención de accidentes automovilísticos ya que alerta a los conductores para que no se queden dormidos, toma como parámetros la temperatura del auto, frecuencia cardíaca, cabeceo y parpadeo del individuo en estudio. Augenbraun (2014) presenta un artículo en el que presenta que la empresa General Motors (GM) pretende poner un nuevo sensor dentro del vehículo que pueda prevenir accidentes debidos a la distracción. Por otra parte, Lee et al. (2016) hicieron un sistema para detección de somnolencia a través de un reloj inteligente, el cual analiza el comportamiento de movimiento del sujeto por medio de un giroscopio y acelerómetro, ambos contenidos en el reloj inteligente. Boke et al. (2016) desarrollaron una banda inteligente que censa la frecuencia cardíaca del sujeto, para con ello, detectar somnolencia. Si se detecta somnolencia, se envía una alerta al conductor con el objetivo de que tome alguna medida.

Como un estudio de señales en conjunto Zhang *et al.* (2014) presenta una metodología basada en características de entropía (estimadores) provenientes de señales producidas por EEG, EOG y Electromiograma, mismas que posteriormente son aplicadas a una red neuronal con el fin de mostrar si es individuo en estudio se encuentra cansado. Un estudio relacionado al análisis de la actividad cerebral es el de Nayak *et al.* (2012) ya que analizó las señales proporcionadas por la electroencefalografía (EEG), la electrocardiografía (ECG) así como también biomarcadores de la sangre como lo es porcentaje de azúcar en la

sangre, urea en la sangre y creatina. Con ello, llegaron a la conclusión de que existen importantes cambios en las variables medidas cuando el conductor se encuentra en estado de fatiga lo cual hace un sistema efectivo a la hora de brindar un diagnóstico sobre el estado en el que se encuentra el individuo en estudio. Anteriormente Borghini *et al.* (2012) realizó una revisión sobre las medidas neurofisiológicas que son tomadas en cuenta para la detección de fatiga o cansancio, las cuales son: la electroencefalografía, electrooculografía, y el ritmo cardiaco, todas ellas se presentan como sistemas invasivos ya que utilizan sensores o electrodos para adquirir la información proveniente del cuerpo humano. El electrocardiograma es un indicador efectivo para evaluar la fatiga de un conductor, sin embargo tiene el inconveniente de que maneja demasiada información distribuida en dieciséis canales, los cuales son agrupados en tres grupos, en alpha, beta y gamma, por lo que Li *et al.* (2012) propone un método que se basa solo en el estudio de dos electrodos del electroencefalograma mostrando resultados satisfactorios. De manera similar, Patel *et al.* (2011) presentaron un sistema basado en inteligencia artificial el cual puede detectar tempranamente un estado de fatiga mediante la variabilidad del ritmo cardiaco (HRV) como una medida fisiológica, el rendimiento de detección de la red neuronal fue probado usando un conjunto de datos provenientes de electrocardiogramas obtenidos bajo condiciones de laboratorio, la precisión del sistema es de un 90%. Por otro lado, mediante el análisis del electroencefalograma (EEG) se pueden obtener buenos resultados a la hora de detectar fatiga. Por ello, Simon *et al.* (2011) muestra un algoritmo para la identificación del husillo alfa en un electroencefalograma definida por una corta ráfaga de banda estrecha en la banda alfa convencional de un estudio de este tipo con lo cual llega a la conclusión de que solo con el estudio de esta pequeña ráfaga se puede detectar la presencia de fatiga. De manera similar, Khushaba *et al.* (2011) presenta un sistema multi-información basado en lógica difusa el cual es capaz de clasificar las señales provenientes del EEG, EOG y ECG en un nivel de cansancio predefinido.

El uso de sensores corporales tiene infinidad de aplicaciones, por ejemplo Rebolledo-Mendez *et al.* (2014) en su trabajo presentan un detector de emociones humanas (Concentración, tensionado y relajado) mediante el análisis de señales provenientes de un sensor electroencefalográfico y un sensor electrodérmico. Además, muestra una arquitectura sobre cómo integrar dicho sistema en una unidad a bordo de un vehículo. El estrés es un

factor de vital importancia a tomar en cuenta a la hora de conducir. Por ello, Healey & Picard (2005) presentan una metodología para coleccionar y analizar señales fisiológicas (EEG, EMG, comportamiento de la piel y ritmo de respiración) durante distintas condiciones de manejo, llegando a la conclusión de que el estrés se muestra de mejor manera en el comportamiento de la piel así como en el ritmo de respiración.

1.1.3 Estudios en conjunto, invasivos y no invasivos

El esfuerzo por disminuir el número de accidentes atribuidos a la fatiga o cansancio del conductor automotriz ha provocado que se realicen estudios donde se involucren más variables o factores de estudio, obteniendo sistemas que tengan componentes invasivas y no invasivas. En esta sección se muestran los trabajos de investigación que presentan sistemas compuestos por elementos invasivos y no invasivos.

Koh *et al.* (2007) diseñaron una unidad de monitoreo para la detección de fatiga del conductor la cual se basa en el estudio de las variaciones del ritmo cardiaco, la calidad del sueño que tuvo el conductor previo a la tarea de manejo, el nivel de cansancio por manejar, el cual aumenta con el incremento de las horas de manejo y por último se incorpora un giroscopio en el exterior del vehículo con la finalidad de medir los movimientos laterales que se desarrollan mientras se realiza la tarea de manejar. Por otro lado Anumas & Kim (2012) desarrollaron un sistema para detección de fatiga. Este se basa en una cámara para analizar el porcentaje de cerradura de los ojos, los grados de apertura de la boca y el tiempo de duración del bostezo y, con un sensor foto-pletismógrafo detectan el ritmo cardiaco y con esto analiza la variación del ritmo cardiaco cuando el individuo se encuentra fatigado. Por otro lado Lee & Chung (2012) propusieron un método para monitorear la seguridad del conductor mediante el análisis de información proveniente de los ojos, la cual se basa en una cámara que graba el rostro del conductor, por otro lado se analiza el nivel de oxígeno en la sangre mediante un oxímetro de pulso el cual es instalado en el pulgar de la mano derecha. Un trabajo de vital relevancia es el de Jagannath & Balasubramanian (2014) ya que realizaron un estudio para evaluar la fatiga en un conductor fusionando señales físicas y mentales, señales que provienen de la electroencefalografía (EEG), electromiografía (EMG), presión en el asiento del conductor, frecuencia cardiaca y nivel de saturación del oxígeno, llegaron a la conclusión de que en los aspectos que analizaron existen variaciones vitales en dichas

señales cuando el conductor se encuentra en estado de fatiga, mismas que pueden ser medidas y analizadas para proporcionar un veredicto fiable.

Por otro lado, la termografía infrarroja se ha usado en conjunto con otros sensores para la detección de estrés, el cual se induce a través del TSST. Por ejemplo, Engert et al. (2014) realizaron una comparación entre los cambios de temperatura en el área del rostro a través de la termografía y valores provenientes de sensores invasivos, tales como: frecuencia cardiaca, variabilidad de la frecuencia cardiaca temperatura de punta del dedo índice, alfa-amilasa y cortisol. Concluyeron que la termografía es un método benéfico para la estimación de la actividad simpática del estrés bajo condiciones de laboratorio. Vinkers et al. (2013) realizaron una comparativa entre la actividad de la temperatura corporal central (arteria intestinal y temporal) y la periférica (facial y periférica) y concluyeron que ante el estrés existe un decremento de la temperatura intestinal, mientras que la dirección del gradiente de cambio para la temperatura periférica depende de la zona de interés donde se desee medir.

Realizando un resumen de los antecedentes mostrados anteriormente se puede observar que existen variados estudios para la detección de cansancio en conductores automotrices, teniendo entre los principales aspectos a estudiar los rasgos faciales (bostezos, parpadeos y cabeceo), señales fisiológicas tales como Electroencefalograma (EEG), Electrocardiograma (ECG), Electromiograma (EMG) y Electrooculograma (EOG), señales provenientes del color de la piel, temperatura corporal y frecuencia cardiaca. Los rasgos faciales se estudian de manera no invasiva, mientras que los fisiológicos se estudian de manera invasiva, algunos trabajan solo en ambientes diurnos y otros solo en ambientes nocturnos, sin embargo, la mínima cantidad trabaja para ambos ambientes. Todos estos trabajos estudian por separado cada una de las señales, logran caracterizarlas por separado, sin embargo, no existe ningún trabajo que estandarice las señales en conjunto y menos aún existe un trabajo que proporcione un patrón de referencia de estas señales con el fin de calibrar un sistema, cualquiera que sea. Por lo tanto, sería deseable desarrollar un trabajo que caracterice cada señal y que posteriormente estandarice estas señales para así poder obtener un patrón de referencia con el fin de poder calibrar un sistema no invasivo que nos muestre un resultado verídico sobre el estado real de un conductor automotriz, teniendo la capacidad de trabajar confiablemente tanto en ambientes diurnos como en nocturnos.

1.2 Objetivos e hipótesis

1.2.1 Objetivos

1.2.1.1 Objetivo general

Los objetivos generales del presente trabajo se basan en dos áreas principales: la científica y la tecnología. El objetivo general para el área científica es: Desarrollar una metodología para obtener un patrón de referencia que indique la presencia de cansancio mediante la caracterización de valores térmicos. Para el área tecnológica se tiene el siguiente objetivo: Desarrollar un sensor inteligente basado en FPGA y visión artificial para detección de cansancio en conductores automotrices.

1.2.1.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo son:

- Obtener las ROI's que serán evaluadas para la cuantificación de los cambios térmicos.
- Generar un patrón de referencia que indique la presencia de cansancio a partir de la caracterización de los valores provenientes de los cambios térmicos en los termobiomarcadores.
- Desarrollar un sistema de bajo costo, no invasivo y reconfigurable basado en FPGA para detección de cansancio
- Publicar en revistas internacionales los hallazgos obtenidos con la realización del trabajo de investigación.
- Obtener propiedad intelectual, así como derechos de autor de los productos desarrollados a lo largo del trabajo.

1.2.2. Hipótesis

Con la estandarización de señales provenientes de termografía se puede obtener un patrón de referencia que indique la presencia de cansancio, para con ello, a través de un sensor inteligente térmico basado en FPGA y visión artificial lograr la detección de cansancio de conductores automotrices.

1.3. Descripción del problema

Con el análisis del individuo, así como del comportamiento o forma de manejo se puede detectar si el conductor se encuentra cansando. Actualmente existen trabajos que muestran metodologías o formas de detectar el cansancio o fatiga en un conductor automotriz. Entre los que destacan los que se basan en el número de parpadeo y bostezos (Azim *et al.* 2014), la frecuencia cardíaca (Anumas & Kim 2012), el grado de atención o la forma de conducir (Chieh *et al.* 2003). Sin embargo, por la complejidad de acoplar todos los elementos en conjunto para obtener un resultado fiable, estos trabajos solo se basan en el estudio de un elemento. Algunos prototipos que se han creado tienen la desventaja de ser sistemas invasivos, es decir, los sensores o elementos de obtención de información están en contacto con el cuerpo humano, lo cual resulta perjudicial debido a que limitan al conductor para realizar sus actividades satisfactoriamente, otra desventaja es que la mayoría de ellos solo trabajan en un ambiente, ya sea diurno o nocturno. El costo juega un papel importante, debido a que con los sistemas que se pretenden comercializar son caros y se presentan solo en los automóviles de lujo dejándolos inaccesibles para automóviles de gama baja o media. Por otro lado, la mayoría de los trabajos o prototipos presentados trabajan vía software, con un procesamiento secuencial, es decir, no ejecuta una acción sin haber cumplido previamente otra acción. Por otra parte, son arquitecturas cerradas, lo que quiere decir que ya no se le pueden acoplar más elementos al proceso que se desea realizar.

A causa de la demanda de sistemas que garanticen la prevención de accidentes atribuidos al conductor sería deseable tener un sistema que realice un análisis detallado, es decir, que involucren variados aspectos tales como el estado físico, medido bajo distintos parámetros, tales como bostezos, parpadeos, temperatura, frecuencia cardíaca, entre otros, así como también su comportamiento o forma de manejo y que a su vez trabaje tanto en ambientes diurnos como en ambientes nocturnos, con el fin de obtener un resultado fiable. Debido a la gran cantidad de información que se maneja en los sistemas de detección de cansancio se requiere de nuevas técnicas de procesamiento que permitan trabajar en tiempos relativamente cortos.

1.4 Justificación

Reportes de la Policía Federal (Comisión Nacional de Seguridad, 2014) indican que el 80% de los accidentes en carreteras federales son atribuidos al conductor, teniendo entre las principales causas el conducir bajo los efectos del alcohol, medicinas o estupefacientes, así como conducir con fatiga, cansancio o sueño. Los accidentes traen consigo consecuencias lamentables, que van desde pérdidas monetarias, pequeñas o grandes lesiones hasta lamentables pérdidas humanas. En el presente trabajo se realizará un sistema para el análisis del comportamiento y estado del conductor para detectar si el individuo se encuentra en estado de cansancio. Dicha tarea se llevará a cabo mediante la estandarización de una fusión de información proveniente de un sensor de frecuencia cardiaca y de imágenes termográficas, con el fin de obtener un patrón de referencia para el sistema. Además, se deja abierta la posibilidad de incluir más elementos que en conjunto con los mencionados ayuden a obtener un resultado fiable. Como unidad de procesamiento de la información obtenida se tendrá una plataforma FPGA ya que presenta ventajas reales respecto al procesamiento en software, entre las ventajas que se pueden mencionar se tiene el paralelismo, la reconfigurabilidad y la portabilidad. Las arquitecturas serán abiertas, dejando la posibilidad de incluir más aspectos a futuro y con ello mejorar el sistema. El sistema será no invasivo debido a que el sensor inteligente tendrá el patrón de referencia (obtenido mediante la estandarización de las señales) para solo comparar la imagen térmica en cuestión con dicho patrón; trabajará tanto en ambientes diurnos como en ambientes nocturnos por las ventajas que presenta la termografía. Con el desarrollo del trabajo se estaría en la cúspide en lo que respecta a los sistemas de detección de cansancio debido a que importantes empresas tales como GM prevén incorporar sistemas para el mismo fin, pero en un tiempo no menor a dos años (Augenbraun, 2014). Por otro lado, se contribuye a la disminución de la tasa de accidentes atribuidos al conductor, de igual manera, se ayudaría en lo que respecta a los programas federales para la prevención de accidentes, poniendo como ejemplo que en la ciudad de México todas las nuevas unidades de transporte público deberán contar con cámaras de video internas, GPS, accesibilidad total y otras especificaciones con el fin de garantizar la comodidad y seguridad de los usuarios (Alhua Technology, 2014).

1.5 Planteamiento general

La metodología general para el desarrollo del sensor inteligente basado en FPGA para detección de cansancio se muestra en la Figura 1.1. En esta se pueden visualizar los elementos que serán requeridos para lograr el objetivo deseado.

Primero se tiene al sujeto sobre el cual se determinará su estado (cansado o normal). Segundo, se tiene el sensor inteligente, el cual está basado en un sistema embebido que contiene el patrón de referencia que indica la presencia de cansancio. Posterior a ello, se realiza la toma de imágenes termográficas que compara con el patrón de referencia, si se encuentra una similitud entre ambos lo muestra a través de una alerta visual en el sistema. Mismo que se refleja en un cambio de la paleta de colores. De lo contrario, la paleta de colores continua de manera normal.

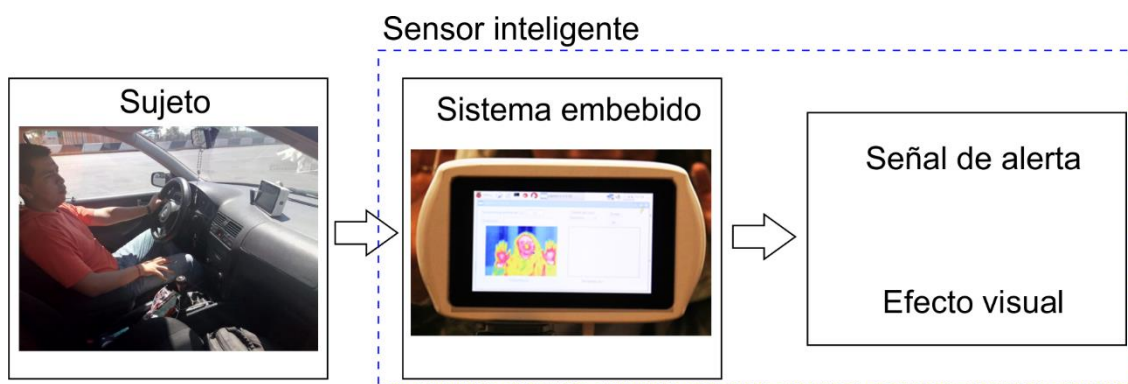


Figura 1.1. Diagrama a bloques general del sensor inteligente basado en sistema embebido para detección de cansancio.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2. 1 Estado del arte

Como se puede apreciar en la sección anterior el interés por el estudio del cansancio, fatiga o sueño en el conductor ha ido aumentando gradualmente debido a la importancia que este genera en el ámbito del transporte vehicular, ya que muchos accidentes son atribuidos a esta causa. Por ello, han surgido sistemas que estudian dicho fenómeno, los cuales se engloban en el estudio de aspectos fisiológicos del conductor y los que estudian el comportamiento del vehículo, aunque sin embargo el comportamiento del vehículo también es atribuido al conductor. Entre los sistemas que estudian los aspectos fisiológicos se pueden encontrar los que estudian las características faciales, entre los más comunes se encuentran los bostezos y parpadeos debido a que son factores presentes cuando una persona se encuentra en estado de cansancio o fatiga, en ellos se analizan distintos factores como lo es el porcentaje de apertura, porcentaje de cerradura, la velocidad con que se realiza la actividad (bostezo o parpadeo); sin embargo existen sistemas que involucran aspectos más complejos como es la electroencefalografía la cual tiene como misión proporcionar el comportamiento del cerebro mediante señales eléctricas y bajo ciertas circunstancias, también se puede encontrar la electrocardiografía que se encarga de mostrar el comportamiento de ritmo cardiaco mediante señales eléctricas, de igual manera se encuentra el electromiografía que proporciona la actividad eléctrica producida por los músculos esqueléticos y, por último la electrooculografía que recoge señales eléctricas del comportamiento de los ojos; sin embargo aún se pueden encontrar más aspectos a para su estudio, los que se mencionan son los más estudiados debido a que proporcionan información relevante para la detección de fatiga en conductores automotrices. Por otro lado, en los sistemas que proporcionan información sobre el comportamiento del vehículo se tienen los que proporciona el viraje del conductor, el grado de inclinación del vehículo con la inclusión de un giroscopio, y por último el comportamiento del volante debido al conductor. Existen trabajos que realizan el estudio tanto fisiológico como del comportamiento del vehículo. Un aspecto que es de gran importancia mencionar es que existen empresas comerciales que pretenden incursionar en sus vehículos sistemas de detección de fatiga, tal es el caso de GM que prevé introducir un sistema basado en electroencefalografía.

2.2. Estados emocionales

2.2.1 Emociones básicas de Ekman

Según Ekman (2003) existen seis emociones básicas, las cuales son: alegría, sorpresa, rabia/ira, miedo, disgusto y tristeza. El cuerpo manifiesta de manera diferente cada una de las emociones por medio de indicadores musculares específicos y distintos para cada tipo de emoción básica. Además, argumenta que la expresión facial y la voz son los componentes somáticos que identifican las emociones con mayor exactitud.

2.2.2 Estrés

El estrés es una parte fundamental en la vida diaria, debido a que este permite preparar al cuerpo humano ante posibles situaciones de amenaza (Camargo, 2014).

2.2.2.1 Trier Social Stress Test (TSST)

El protocolo TSST tiene el objetivo de inducir estrés psicológico bajo condiciones de laboratorio. Este se divide en 4 etapas, como se muestra en la figura 2.1. La primera etapa es un periodo del pre-Test de 5 minutos (PS). En la segunda etapa se lleva a cabo la preparación del discurso que tiene que decir el sujeto de estudio, este discurso será de porque es el mejor candidato para su trabajo ideal. En la tercera etapa, que tiene una duración de 5 minutos, el sujeto tiene que expresar el discurso frente a un auditorio. Finalmente, en la cuarta etapa, el sujeto tiene que realizar una tarea matemática por un periodo de 5 minutos (Birkett, 2011).

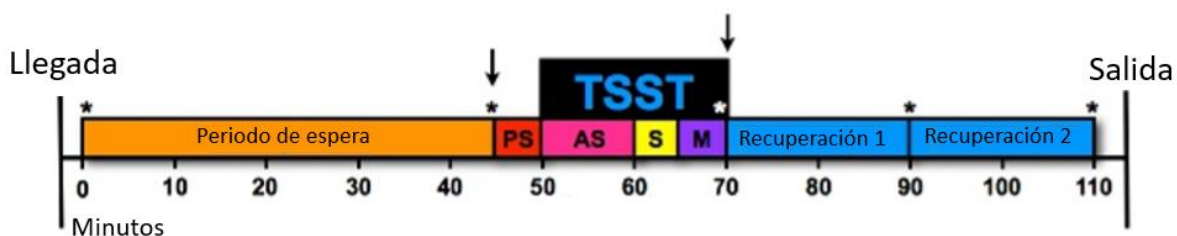


Figura 2.1. Protocolo TSST (Birkett, 2011)

2.2.3 Fatiga

La Real Academia Española define a la Fatiga como “Agitación duradera, cansancio, trabajo intenso y prolongado” o como “Molestia ocasionada por un esfuerzo más o menos

prolongado o por otras causas y que se manifiesta en la respiración frecuente o difícil” (RAE, 2013).

2.2.3.1 Características que indican la presencia de fatiga

La fatiga se muestra como la sensación de cansancio, agotamiento o debilidad, atribuida a muchas causas, entre las que podemos mencionar exceso de tareas, preocupación, estrés, enfermedades, debido al entorno, entre otros.

Fisiológicamente la fatiga se encuentra principalmente reflejada en (Romero *et al.*, 2004):

- La expresión facial
- Caída de parpados
- Tono muscular de la cámara
- Flujo respiratorio
- Saturación de oxígeno en el flujo sanguíneo arterial
- Temperatura corporal
- Electrocardiografía durante el manejo y el descanso

2.2.3 Cansancio

En términos generales el cansancio en conductores automotrices puede ser definido como la pérdida de las habilidades básicas para llevar a cabo una conducción segura. Tales condiciones ocurren después de un excesivo periodo de manejo, por un sueño deficiente o incluso debido a ciertas condiciones físicas o fisiológicas del conductor. Por lo tanto, estas condiciones pueden ocurrir a cualquier horario del día, siendo los horarios de mayor riesgo entre las 2 y 4 pm así como también entre las 3 y 6 am (Jimenez, Prieto, and Grisales 2011).

2.3 Termografía

La termografía es una técnica que permite medir temperaturas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar. Mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético. Utilizando cámaras termográficas se puede convertir la energía radiada en temperatura (Guía de la termografía infrarroja, 2011).

2.3.1 Ventajas de la termografía

Entre las ventajas que tiene la termografía respecto a otras tecnologías de medición de temperatura están las siguientes:

- Es una medida actual: la medición es en tiempo real, ya que se puede medir mientras se visualiza el objeto en la pantalla.
- No invasiva, es decir, no está en contacto directo con el sujeto o elemento en estudio.
- Es bidimensional, se puede medir la temperatura en dos o más puntos del objeto al mismo tiempo.
- Es multidisciplinar, ya que las imágenes no hablan solo de temperatura, sino también de patrones térmicos, comportamiento, anomalías, entre otros.

2.3.2 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el rango de todos los tipos de radiación electromagnética clasificados por longitud de onda.

Los infrarrojos están a medio camino entre el espectro visible y las microondas del espectro electromagnético (Figura 2.2). La fuente principal de radiación de infrarrojos es el calor o la radiación térmica. Cualquier objeto con una temperatura superior al cero absoluto ($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ o 0 Kelvin) emiten radiación en la región infrarroja.

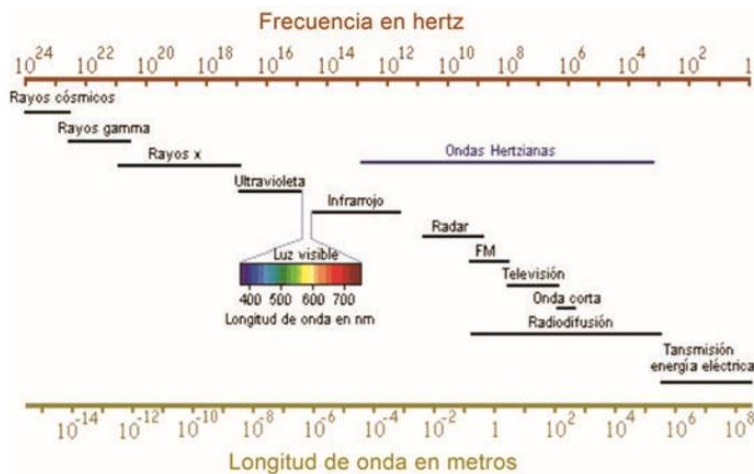


Figura 2.2. Espectro electromagnético. (Luque, 2012)

2.3.2 Matriz termal

Las imágenes termográficas al ser tomadas se presentan en valores de escala de grises, por lo cual, no muestran los valores de temperatura reales. Por lo tanto, los valores de temperatura real deberán calcularse a partir de cada intensidad de nivel de gris de cada píxel. Esta relación viene dada por la siguiente ecuación:

$$T_r = T_{min} + \frac{T_{gris}}{T_{mng}} \times (T_{max} - T_{min}) \quad (1)$$

Donde T_{max} y T_{min} representan el rango de temperatura de la imagen, T_{gris} es el valor de nivel de gris del píxel a tratar y T_{mng} es el nivel mas alto de gris en la imagen (Jadin et al. 2014).

2.3.4 Factores a tomar en cuenta en termografía con humanos

Los factores que tomar en cuenta para el uso de termografía en humanos son los siguientes: factores ambientales (tabla 2.1), factores técnicos (tabla 2.2) y factores individuales (tabla 2.3) (Fernández-Cuevas et al. 2015).

Tamaño del cuarto	Cuarto mínimo de 2 x 3 m.
Temperatura ambiente	Se sugiere un rango de temperatura de 18-25 °C
Humedad relativa	Humedad relativa ente 40% y 70%.
Presión atmosférica	Usualmente es ignorada.
Fuente de radiación	Aislar el cuarto de fuentes de radiación infrarroja.

Tabla 2.1. Factores ambientales a tomar en cuenta en termografía con humanos.

Validez	Capacidad de estimar las temperaturas de la superficie de un objeto a partir de su radiación infrarroja, registrada con una cámara térmica.
Confiabilidad	Grado en que la medida da el mismo resultado en mediciones repetidas. Se requieren confiabilidades altas.
Protocolo	Se recomienda usar protocolos estandarizados
Características de la cámara	Se aconseja un rango de temperatura optimizado (20-50°C), Entre mayor resolución mayores beneficios.
Selección de ROI's	Se sugiere el desarrollo de procedimientos automáticos y objetivos para la selección de ROI's
Software	Diseñar software específico para aplicaciones en humanos
Análisis estadístico	Temperatura promedio y temperatura máxima muestran tendencias similares en análisis cutáneos.

Tabla 2.2. Factores técnicos a tomar en cuenta en termografía con humanos.

Factores intrínsecos	
Sexo	Temperaturas entre hombres y mujeres son diferentes.
Edad	La temperatura es ligeramente menor en sujetos con mayor edad.
Antropometría	Se ha demostrado una relación inversa entre masa corporal y temperatura cutánea.
Ritmo cardiaco	El ritmo cardiaco altera la temperatura corporal ya que el flujo sanguíneo es mayor a mayor ritmo cardiaco
Densidad del cabello	La temperatura del cabello está relacionada con su emisividad.
Emisividad de la piel	La emisividad de la piel es alta y constante. Usualmente se usa de 0.98
Historial medico	Es recomendable realzar una anamnesis medica antes de un examen termográfico.
Ritmo metabólico	El metabolismo influye en la temperatura corporal.
Flujo sanguíneo de la piel	El flujo sanguíneo de la piel está relacionado con el sistema nervioso autónomo, que controla la vasoconstricción y vasodilatación de los vasos capilares para mantener la homeostasis
Genética	Existe una influencia teórica de la genética sobre los perfiles térmicos cutáneos.
Emociones	Las emociones alteran la temperatura corporal. Emociones positivas aumenta la temperatura y emociones negativas la decremantan.
Factores extrínsecos	
Factores de entrada	Evitar usos de estimulantes ya que estos afectan la temperatura de la piel.
Aplicaciones	Evitar uso de cosméticos, ungüentos, productos tópicos y radiación.
Terapias	Las terapias que se aplican directamente en la piel afectan la radiación y temperatura de la piel, por ello, es necesario evitarlas.
Actividad física	La actividad física es una de las principales fuentes de perturbación homeostática.

Tabla 2.3. Factores individuales a tomar en cuenta en termografía con humanos.

2.4 Procesamiento de imágenes

El procesamiento digital de imágenes puede definirse como un conjunto de procedimientos que se realizan sobre una imagen (señal obtenida mediante un captador conectado a la computadora) para su almacenamiento, transmisión o tratamiento (Rodríguez y Sossa, 2002).

2.4.1 Imagen

Una imagen podría ser definida como una función de dos dimensiones, $f(x,y)$, donde x y y son coordenadas espaciales, y la amplitud de f en cualquier par de coordenadas (x,y) es llamada la intensidad o nivel de grises de la imagen en ese punto. Cuando los valores de x,y

y la amplitud son finitos, cantidades discretas, nosotros llamamos a la imagen como una imagen digital. El campo del procesamiento digital de imagen se refiere al procesamiento digital de imágenes por medio de una computadora digital. Un pixel es el término más comúnmente usado para denotar los elementos de una imagen (González, 2002).

2.4.1.1 Imagen binaria

El valor de cada pixel en una imagen binaria es uno o cero (blanco o negro, respectivamente), dependiendo si el pixel se encuentra en el primer plano o en el segundo. Sobre un soporte blanco, los pixeles del primer plano están en 0, es decir, en negro; y los pixeles del segundo plano en 255 (Soille, 2002).

2.4.1.2 Imagen en escala de grises

Una imagen en escala de grises es una matriz de datos, cuyos valores representan tonos en nivel de gris, estos valores se extienden en un conjunto finito más grande de enteros no negativos. Mas precisamente, una imagen en tono de gris f , es un mapeo de un subconjunto D_f en Z^n llamando la definición del dominio f en un conjunto acotado de enteros no negativos.

$$f: D_f \subset Z^n \rightarrow \{0, 1, \dots, t_{max}\} \quad (2)$$

Donde t_{max} es el máximo valor del tipo de datos utilizado para almacenar la imagen (por ejemplo, $2^n - 1$). (Soille, 2002)

2.4.1.3 Imagen a color - RGB

Una imagen multicanal consiste en una matriz de imágenes mono canales (ya sea un tono binario o gris) definidas sobre un dominio común. De ello se deduce que un vector de valores escalares se asocia con cada pixel de una imagen multicanal. La dimensionalidad de este vector es determinada por el número de canales disponibles. Para el caso de una imagen RGB, existen tres canales, el rojo, el verde y el azul.

2.4.2 Histograma

El histograma de una imagen digital con niveles de grises en el rango $[0,255]$ es una función discreta $h(r_k) = n_k$ donde r_k es el k -ésimo nivel de gris y n_k es el número de píxeles en la imagen teniendo un nivel de grises r_k . Es común practicar la normalización de un histograma mediante la división de cada valor por el número total de píxeles en la imagen, denotado por n (González, 2002).

2.4.3 Morfología matemática

La morfología matemática aprovecha las propiedades de los conjuntos de puntos, los resultados de la geometría integral y la topología. La premisa inicial consiste en suponer que las imágenes reales pueden ser modeladas utilizando conjunto de puntos de cualquier dimensión (por ejemplo el espacio Euclídeo N-dimensional) (Pajares, 2008).

2.4.3.1 Dilatación

La transformación morfológica de la Dilatación \oplus combina dos conjuntos utilizando la adición de vectores (o adición de Conjuntos de Minkowski). La dilatación $X \oplus B$ es conjunto de puntos de todas las posibles adiciones vectoriales de pares de elementos, una de cada conjunto X y B (Pajares, 2008).

$$X \oplus B = \{d \in E^2: d = x + b \text{ para cada } x \in X \text{ y } b \in B\} \quad (3)$$

2.4.3.2 Erosión

La transformación morfológica de la erosión \ominus combina dos conjuntos utilizando la substracción de vectores. Es dual de la dilatación. Ni la erosión ni la dilatación son transformaciones invertibles.

$$X \ominus B = \{d \in E^2: d + b \in X \text{ para cada } b \in B\} \quad (4)$$

Esta expresión dice que cada punto d del conjunto X , que para nosotros será la imagen, es testeado, el resultado de la erosión está dado por los puntos d para los cuales todos los posibles $d + b$ están en X (Pajares, 2008).

2.4.3.3 Apertura

La apertura por un elemento estructural B se denota por:

$$(X)_B = X \circ B = (X \ominus \tilde{B}) \oplus B \quad (5)$$

Como se puede observar, primero se erosiona a X por B . En seguida, el conjunto resultante es dilatado por el conjunto transpuesto \tilde{B} de B . Esta operación resulta ser antiextensiva. La apertura tiende a eliminar los picos, además, puede desconectar conjuntos y suprimir las componentes conexas más pequeñas (Rodríguez y Sossa, 2002).

2.4.3.4 Cerradura

La apertura por un elemento estructural B se denota por:

$$(X)^B = X \cdot B = (X \oplus \tilde{B}) \ominus B \quad (6)$$

Como se puede observar, primero se dilata a X por B . En seguida, el conjunto resultante es erosionado por el conjunto transpuesto \tilde{B} de B . La cerradura es extensiva. Esta operación tiende a llenar los valles, por otro lado, enlaza o conecta las regiones más pequeñas y llena sus huecos (Rodríguez y Sossa, 2002).

2.4.4 Modelos de color

El propósito de un modelo de color es facilitar la especificación de los colores de alguna forma estándar. En esencia, un modelo de color es una especificación de un sistema de coordenadas 3-D y un subespacio dentro de dicho sistema donde cada color se representa por un punto (Pajares, 2008).

2.4.4.1 RGB

En el modelo RGB cada color aparece en sus componentes espectrales primarias: rojo, verde y azul. Este modelo está basado en el sistema de coordenadas cartesianas. El subespacio de color de interés es el tetraedro mostrado en la figura 2.3. En el cual los valores RGB están en tres vértices; cyan, magenta y amarillo se sitúan en otros tres vértices, el negro corresponde al origen y el blanco en el vértice más alejado del origen. En este modelo, la

escala de grises se extiende desde el negro al blanco a lo largo de la diagonal que une esos dos puntos, y los colores son puntos dentro del tetraedro, definidos por vectores desde el origen. Por conveniencia, se asume que todos los vectores han sido normalizados, de modo que el tetraedro de la figura 2 es el tetraedro unitario, es decir, todos los valores de R, G y B están en el rango de $[0,1]$. Las imágenes en este modelo se forman por la combinación en diferentes proporciones de cada uno de los colores primarios RGB (Pajares, 2008).

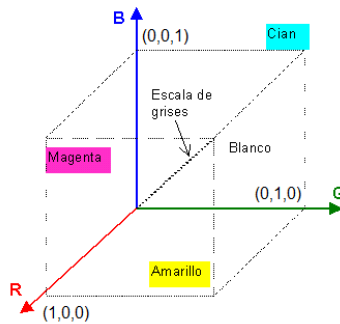


Figura 2.3. Tetraedro de color RGB. (Pajares, 2008)

2.4.4.2 HSI

El matiz es un atributo del color que describe su pureza (amarillo puro, rojo, naranja), mientras la saturación proporciona una medida del grado en que el color puro es diluido con luz blanca. El modelo de color HSI debe su utilidad a dos hechos fundamentales. Primero la componente de intensidad I, se puede separar de la información del color en la imagen. Segundo, las componentes de matiz y saturación están íntimamente relacionadas con el modo en que los humanos perciben el color (Pajares, 2008).

2.4.4.2.1 Conversión de RGB a HSI

Combinando matiz, saturación e intensidad en un espacio de color 3-D se obtiene la representación piramidal de la figura 2.4, donde cada triángulo con líneas más gruesas corresponde a un determinado nivel de intensidad. Cualquier punto en la superficie de la estructura piramidal representa un color saturado puro, ya que son puntos de los lados de los triángulos. El matiz de dicho color se determina por su ángulo con respecto al eje rojo y su intensidad por su distancia perpendicular desde el punto correspondiente al negro (esto es cuanto mayor es la distancia desde el negro mayor es la intensidad del color). Todo lo anterior

es aplicable a puntos dentro de la estructura, la única diferencia es que los colores se hacen menos saturados a medida que se aproximan al eje vertical que une blanco con negro (Pajares, 2008).

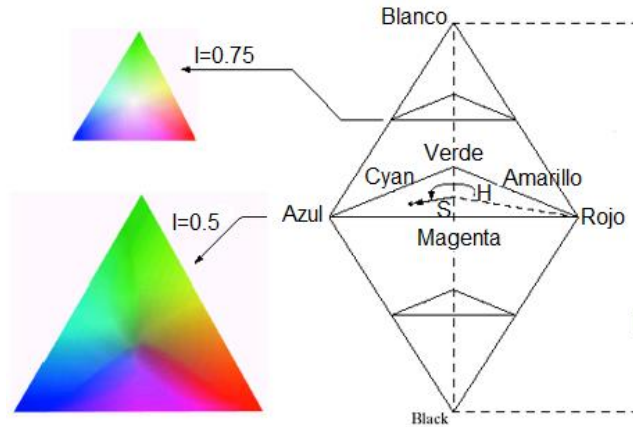


Figura 2.4. Color e intensidad en el modelo HSI. (Pajares, 2008).

Para cualesquiera tres componentes de R, G y B la componente de intensidad en el modelo HSI se define como:

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (7)$$

La componente del tono en el modelo HSI en términos de R, G y B es:

$$H = \begin{cases} \theta & \text{si } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{si } B > G \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{0.5[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right)$$

La componente de saturación se obtiene mediante:

$$S = 1 - \frac{3[\min(R, G, B)]}{R + G + B} \quad (9)$$

2.4.5 Segmentación de los objetos de interés

Cuando ya se dispone de la imagen capturada y filtrada, es necesario aislar o separar los objetos de interés de la imagen. Por tanto, es necesario dividir una imagen en diferentes regiones, o dicho de otra forma, detectar automáticamente los bordes entre los elementos o regiones. Las operaciones de segmentación de una imagen dependen de la propia escena y de la información que se busque dentro de la imagen.

2.4.5.1 Técnicas de segmentación

Las técnicas básicas de segmentación se pueden dividir en tres grupos:

- Aplicación de umbrales de niveles de gris.

La umbralización es un método para convertir una imagen en escala de grises a una imagen binaria, donde solo se encuentran dos valores, 0 y 1, es decir, negro y blanco respectivamente. Los objetos de interés son separados del fondo de la imagen. Para hacer una umbralización correcta es necesario que los objetos y el fondo tengan suficiente contraste (Jain, 1995).

Una imagen binaria $B[i,j]$ es igual que una imagen gris umbralizada $F_T[i,j]$ la cual es obtenida usando una umbralización T para la imagen gris original. Entonces

$$B[i,j] = F_T[i,j] \quad (10)$$

Donde para un objeto negro en un fondo claro

$$F_T = \begin{cases} 1 & \text{si } F[i,j] \leq T \\ 0 & \text{cualquier otro} \end{cases} \quad (11)$$

- Agrupación por rasgos comunes.
- Extracción de bordes.

2.5 Dispositivos Lógicos Programables

Los Dispositivos Lógicos Programables (PLD) son fabricados de tal forma que el usuario tiene la capacidad de definir la conexión interna de algunos de sus componentes elementales. Entre los dispositivos programables se encuentran los Arreglos Lógicos Programables (PAL), los Arreglos Lógicos Genéricos (GAL), los Dispositivos Programables Complejos (CPLD) y los Arreglos de Compuertas Programables en Campo (FPGA). Las PALs, GALs

y CPLDs comparten la misma filosofía de diseño, que se compone de una matriz de conexiones en dos o más niveles de compuertas AND y OR, estos dispositivos son de muy bajo costo y generalmente para funciones sencillas. Por el contrario, los FPGAs están formados por matrices de elementos lógicos pequeños en cantidades masivas, con lo anterior se logra una mayor densidad de lógica por lo que estos dispositivos son apropiados para diseños complejos y de alto desempeño (Morales, 2013).

2.5.1 Arreglo de Compuertas Programables en Campo (FPGA)

Los dispositivos FPGA se basan en arreglos de compuertas, los cuales consisten en la parte de la arquitectura que contienen tres elementos configurables: bloques lógicos configurables (CLB), bloques de entrada y salida (IOB) y canales de comunicación. La densidad de los FPGA se establece en cantidades equivalentes a cierto número de compuertas.

Por dentro, un FPGA está formado por arreglos de bloques lógicos configurables (CLB), que se comunican entre ellos y con las terminales de entrada/salida (E/S) por medio de alambrados llamados canales de comunicación. Cada FPGA contiene una matriz de bloques lógicos idénticos, por lo general de forma cuadrada, conectados por medio de líneas metálicas que corren vertical y horizontalmente entre cada bloque tal y como se muestra en la figura 2.5.

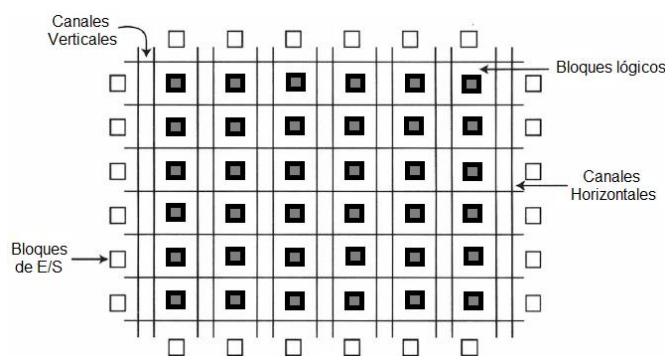


Figura 2.5. Arquitectura de un FPGA (Fuente: Maxinez et al., 2002)

Los bloques lógicos (llamados también celdas generadoras de funciones) están configurados para procesar cualquier aplicación lógica. Estos bloques tienen la característica

de ser funcionalmente completos; es decir, permiten la implementación de cualquier función booleana representada en la suma de productos. El diseño lógico se implementa mediante bloques conocidos como generadores de funciones o LUT (Look up Table: tabla de búsqueda), los cuales permiten almacenar la lógica requerida, ya que cuentan con una pequeña memoria interna. Cuando se aplica alguna combinación en las entradas de la LUT, el circuito la traduce en una dirección de memoria y envía fuera del bloque el dato almacenado en esa dirección tal y como se muestra en la figura 2.6. (Maxinez et al., 2002).

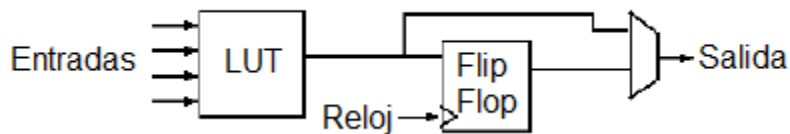


Figura 2.6. Diseño lógico en FPGA (Fuente: Morales, 2013)

2.6 Sistema embebido

Cualquier sistema eléctrico, mecánico o químico que incluya entradas, decisiones, cálculos, análisis y salidas es candidato a implementarse como un sistema embebido. Un sistema embebido está integrado por los siguientes elementos:

- Circuitos integrados programables.
- Memoria flash o ROM.
- El correspondiente circuito impreso
- El software embebido

El software embebido efectúa las decisiones, los cálculos y los análisis necesarios, sin embargo, solo resuelve una gama limitada de problemas, por ello, a este software también se le conoce como software de propósito específico. Dicho software usualmente se ejecuta sobre un microprocesador interno, un microcontrolador, un procesador digital de señal (DSP), una compuerta programable en campo (FPGA), un controlador lógico programable (PLC) y a veces sobre una PC de propósitos generales. Entre los sistemas embebidos más usuales se tienen los que incluyen un procesador y los que incluyen FPGA, en la tabla 2 se muestra una comparación de ambos sistemas. (Hernández, 2010).

Sistema Embebido (Procesador)	Sistema Embebido (FPGA)
<ul style="list-style-type: none"> - Económicos. - Consumen menos poder. - Usan procesos secuenciales. - Software de propósito específico. - Limitado en tiempo o ciclos de reloj. - Solo es necesario conocer sobre el lenguaje de programación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Para aplicaciones de alta velocidad. - Procesos en paralelo. - Sistemas reconfigurables. - Es necesario el uso de más componentes para su funcionamiento (memoria). - Es necesario contar con conocimientos de electrónica digital.

Tabla 2.4. Sistemas embebidos basados en procesador contra sistemas embebidos basados en FPGA

2.7 Controladores inteligentes

2.7.1 Red Neuronal Artificial

Una red neuronal artificial (ANN, por sus siglas en inglés), es un método para procesar información inspirada por los sistemas biológicos, tal como el cerebro procesa información. El elemento clave de este método es la novedosa estructura del sistema de procesamiento. Está compuesta de un gran número de elementos de procesamiento ampliamente conectados (neuronas) trabajando en conjunto para resolver un problema específico. Las ANN's, como las personas aprenden en base a ejemplos.

Las ANN son configuradas para aplicaciones específicas, tales como reconocimiento de patrones o clasificación de datos a través de un proceso de aprendizaje. El aprendizaje en un sistema biológico involucra ajustes en las conexiones sinápticas que existen entre las neuronas, esto es esencialmente una red neuronal.

2.7.1.1 Redes de retropropagación

Las redes de retropropagación (figura 2.7), pueden tener señales pasando a través de ambas direcciones introduciendo un ciclo en la red. Las ANN's con retropropagación son dinámicas, lo que significa que cambia continuamente hasta encontrar un estado de equilibrio. Ellas se mantienen en equilibrio hasta que una de las entradas cambia nuevamente busca el punto de equilibrio necesario.

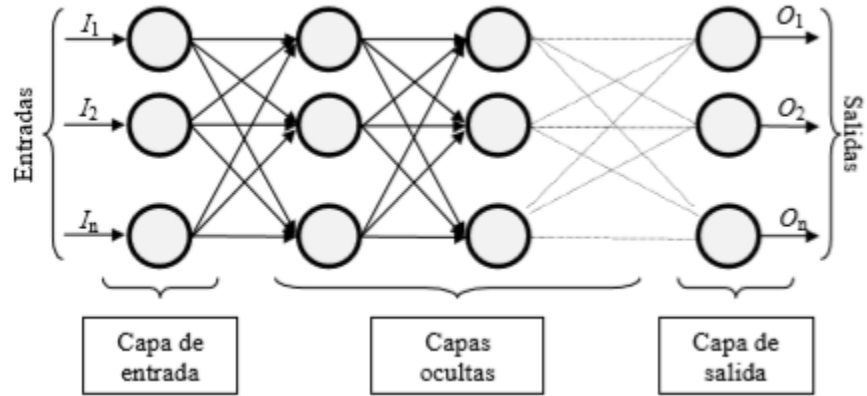


Figura 2.7. Perceptrón multicapa. (Matich, 2001)

2.7.1.2 Elementos de una red neuronal

Una red neuronal consta de los siguientes elementos:

- Capa de entrada: Denotada por neuronas i , no llevan procesamiento solo sirve para almacenar las entradas en la red.
- Capa oculta: Denotada por neuronas j , son se utilizan para procesamiento, contienen una cantidad limitada de memoria y realiza cálculos locales.
- Capa de salida: Denotadas por neuronas k , son utilizan para procesamiento.

La salida de la neurona se define en:

$$y_i(t) = f_i \left(\sum_j w_{ij} x_j - \theta_i \right) \quad (12)$$

2.7.2 Controlador Difuso

Los principales elementos de un controlador difuso se presentan en el siguiente diagrama a bloques (ver figura 2.8) y se describen a continuación:

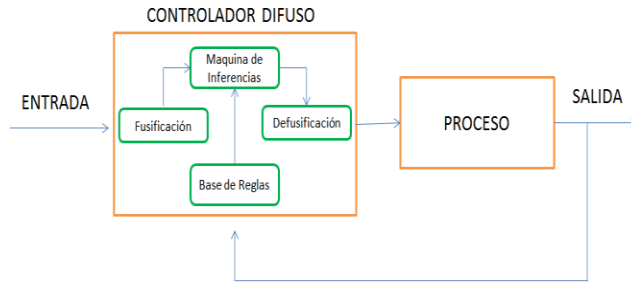


Figura 2.8. Diagrama a bloques de un controlador difuso

Base de reglas: contiene el conocimiento del experto, resumido en un conjunto de reglas del tipo if-then.

Dentro de este apartado se puede definir una variable lingüística, que es una palabra o expresión de un lenguaje natural que designa información relevante del proceso.

El número máximo de reglas se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$N_{maxr} = N_{vi}^{Nvar} \quad (13)$$

Donde:

N_{maxr} = número máximo de reglas.

N_{vi} = número de variables lingüísticas.

N_{vi} = número de variables de entrada.

La regla de las reglas lingüísticas es la siguiente:

IF premisa **THEN** consecuencia

Donde las premisas están asociadas con las entradas y las consecuencias con las salidas.

Fusificación: se encarga de transformar la información de entrada al controlador en forma lingüística y que puede ser interpretado por la base de reglas y la máquina de inferencias.

También se puede definir como el acto de obtener un valor de una variable de entrada y encontrar el valor numérico de la función de pertenencia que se define para esa variable.

Esto se obtiene mediante la combinación de los grados de pertenencia entre el error y la derivada del error, se puede obtener de dos formas, una mediante el mínimo entre los dos elementos en cuestión y otra mediante el producto entre los dos elementos.

Función de pertenencia: La función de pertenencia de un conjunto indica la relación que asocia a cada elemento de un conjunto con su grado de pertenencia del mismo. Son una forma de representar gráficamente un conjunto difuso sobre un universo. Se puede representar como se muestra en la siguiente figura 2.9.

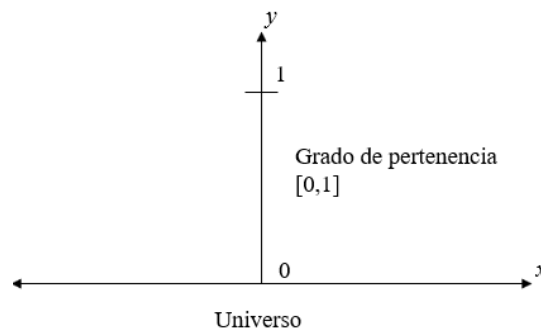


Figura 2.9. Representación de una función de pertenencia

Las funciones de pertenencia pueden ser:

- Triangulares
- Trapezoidales
- Gamma
- Sigmoidal
- Gaussiana
- Pseudo-exponencial

Máquina de inferencia: simula el proceso de toma de decisiones del experto, teniendo en cuenta la base de reglas.

Defusificación: convierte las conclusiones de la máquina de inferencias en acciones de control. Esta conversión se puede realizar mediante tres métodos distintos.

1) Centro de gravedad

$$U = \frac{\sum_i b_i \int u(u(i))}{\sum_i \int u(u(i))} \quad (14)$$

Donde:

b_i = centro de la función de pertenencia

$A_i = \int u(u(i))$ = área de cada trapecio

Así mismo:

$$A_i = W_i \left(h_i - \frac{h_i^2}{2} \right) \quad (15)$$

Con:

W_i = ancho de la base de la función de pertenencia

h_i = altura, es decir el grado de pertenencia.

2) Método de implicación producto

$$U = \frac{\sum_i b_i \int u(u(i))}{\sum_i \int u(u(i))} \quad (16)$$

Es similar que el anterior con la pequeña diferencia de que el área se calcula mediante:

$$A_i = \frac{1}{2} W_i (h_i) \quad (17)$$

3) Promedio de centros

$$U = \frac{\sum_i b_i \mu_i}{\sum_i \mu_i} \quad (18)$$

Donde:

b_i = centro de la función de pertenencia

μ_i = valor de la función de pertenencia obtenido con mínimo y producto.

2.8 Clasificadores

Un clasificador es un sistema que ha aprendido las características de un modelo, usando un conjunto de datos para predecir las características de nuevos datos (Del Castillo, 2013).

2.8.1 Árbol de decisiones

Los arboles de decisión son una serie de decisiones o condiciones organizadas de forma jerárquica, a modo de árbol. Son muy útiles para encontrar estructuras en espacios de alta dimensionalidad y en problemas que mezclan datos categóricos y numéricos. Básicamente, un árbol de decisiones es un árbol donde cada nodo representa una condición o test sobre algún atributo y cada rama que parte de ese nodo corresponde a un posible valor para ese atributo. Finalmente, las hojas representan el valor de la variable predicha. Esta técnica se usa en tareas de clasificación, agrupamiento y regresión. Los arboles de decisión que se usan para predecir variables categóricas se llaman arboles de clasificación, mientras que los arboles de decisión que se utilizan para predecir variables continuas se llaman arboles de regresión (Alcover et al., 2001).

III. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se muestra la metodología general propuesta para el sensor inteligente basado en un sistema embebido para la detección de cansancio en conductores automotrices (Figura 3.1). Se optó por un sistema embebido basado en procesador debido a que los requerimientos del sistema final permitían lograr el objetivo con dicho sistema. Inicialmente se plasmó en un FPGA, sin embargo, debido a sus características, se llegó a la conclusión de que bastaba con un sistema embebido basado en procesador. Dentro del sistema, se encuentra la etapa de adquisición, el tratamiento de la imagen termográfica, el patrón de referencia y la señal de alerta, que en este caso es un efecto visual a través de una paleta de color.

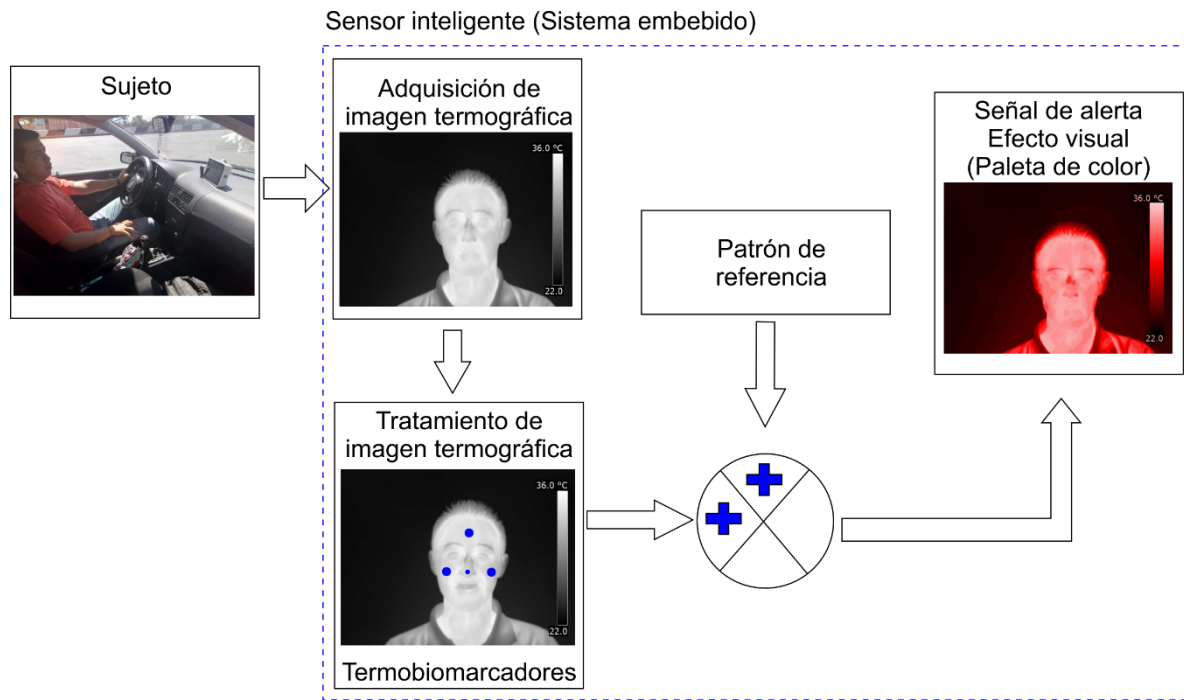


Figura 3.1. Metodología general propuesta para sensor inteligente enfocado a la detección de cansancio

3.1 Patrón de referencia

Para desarrollar el sistema de detección de cansancio es necesario obtener un patrón de referencia que indique su presencia. Dicho patrón debe de diferenciar entre distintos estados emocionales, con el objetivo de evitar falsos positivos. Por ello, primero es necesario

un estudio de emociones, seguido de un estudio de estrés. Ambos estudios se realizaron de manera experimental, es decir, bajo condiciones de laboratorio. Estos se llevaron a cabo en un cuarto de 2.5 x 3 m. en el ENSAIN de la Facultad de Enfermería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Las condiciones ambientales de dicho cuarto fueron: temperatura de 20 ± 2 °C, humedad relativa entre 45 – 60 % y con la menor incidencia de luz posible.

Los criterios de exclusión para ambos estudios fueron: no ingerir bebidas estimulantes ni tomar medicamento al menos 8 horas antes del estudio. No usar cremas corporales o maquillaje y no usar accesorios (gorras, lentes, anillos, entre otros) en la zona del rostro y de las manos. No hacer ejercicio intenso antes del estudio. Estar libre de enfermedades.

3.1.1 Estudio de emociones

El estudio de emociones se llevó a cabo de acuerdo con la figura 3.2. El lugar, los aspectos ambientales y los criterios de exclusión que se tomaron en cuenta fueron los que se mencionaron al inicio de esta sección. Posteriormente, se realizó la inducción de las emociones. Después el análisis de todas las imágenes adquiridas. Y finalmente se propuso un sensor inteligente para detección de emociones. Las emociones estudiadas son: alegría, enojo, miedo, tristeza y asco.

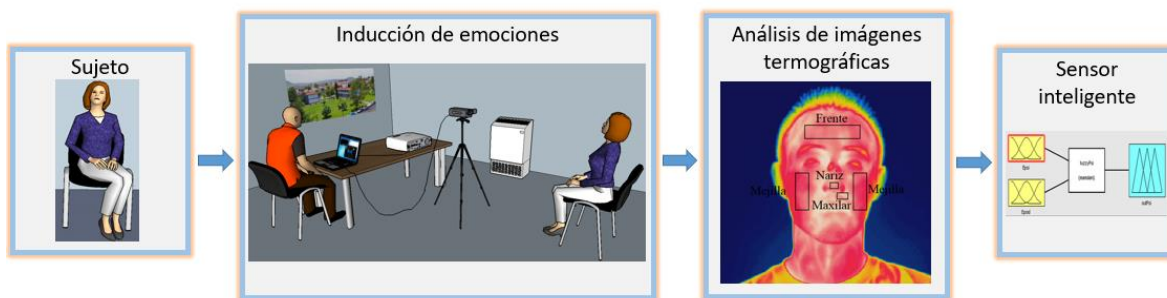


Figura 3.2 Metodología general para detección de emociones

La etapa de inducción de emociones se llevó a cabo como se muestra en la figura 3.3. El sujeto de estudio debía de permanecer sentado en el cuarto climatizado por un periodo de 15 minutos. Posteriormente se hacía la captura del estado basal durante un tiempo de dos minutos. En la siguiente etapa se proyectaba un video para inducir la emoción a estudiar

durante un periodo de ocho minutos. Una vez finalizado el video se realizaba una respiración diafragmática con el objetivo de relajar al sujeto para de esta manera devolverlo a su estado basal

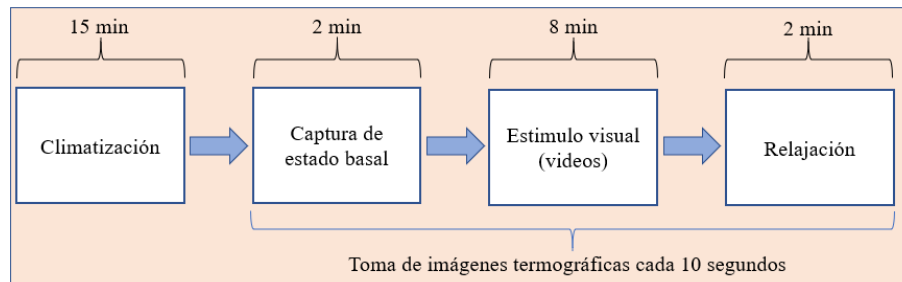


Figura 3.3. Etapas para inducción de emociones

Con las imágenes adquiridas de las emociones se procedió a realizar el análisis estadístico de estas. Los parámetros que se obtuvieron fueron la media, desviación estándar y varianza. Las regiones de interés que se analizaron fueron: frente, mejillas, punta de la nariz y maxilar, las cuales se muestran en la figura 3.4.

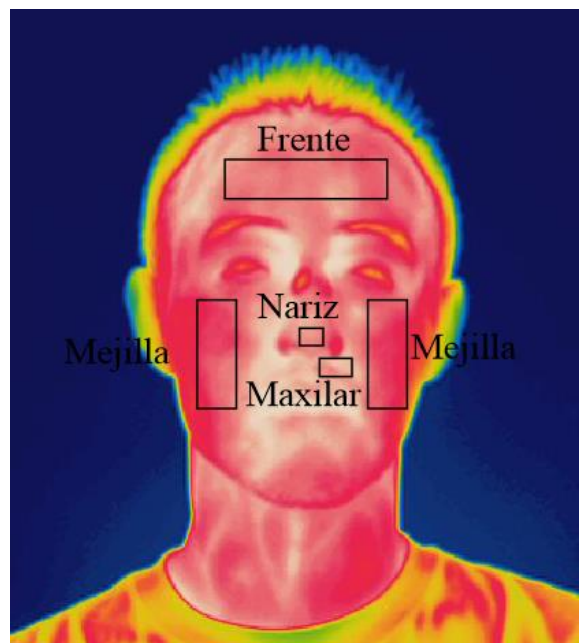


Figura 3.4. Regiones de interés para inducción de emociones.

Una vez obtenida la tendencia emocional se procedió a plantear un sistema térmico inteligente para detección de emociones, tal y como se muestra en la figura 3.5. Dicho sistema parte de la adquisición de una imagen termográfica en la línea base (1) y otra con la emoción inducida (2). Primero se realiza el análisis de la imagen en línea base y esta información entra al clasificador. Seguido se realiza el análisis de la imagen con la emoción inducida, el valor de cada RIO obtenido pasa a una etapa de calibración debido a que todas las personas reaccionan de manera distinta ante una emoción. Los valores calibrados pasan a el clasificador, el cual, junto con los valores en estado basal decide que emoción se encuentra presente.

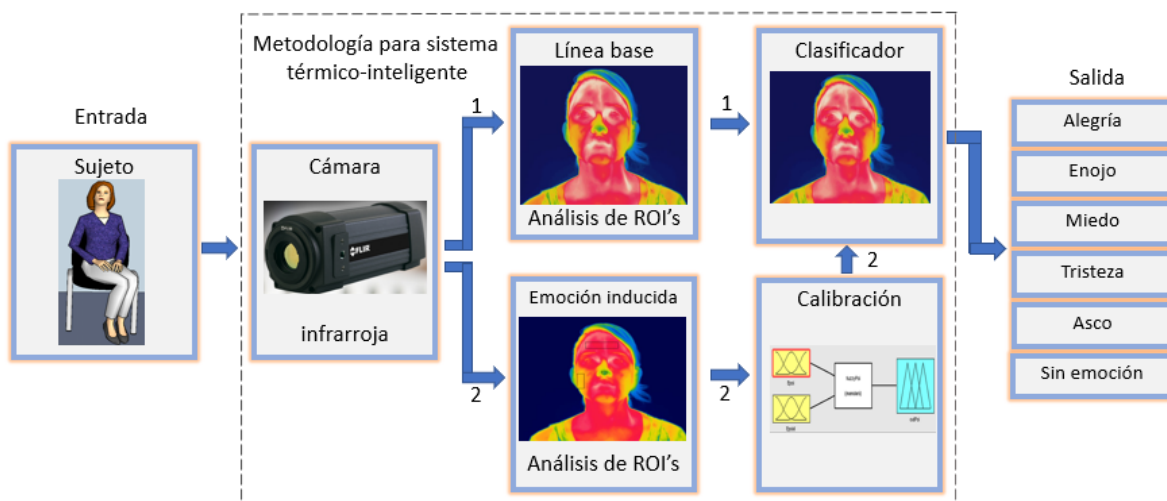


Figura 3.5. Metodología propuesta para el estudio de emociones

3.1.2 Estudio de estrés

El estudio de estrés se llevó a cabo de acuerdo con la figura 3.6. Para este estudio, se tomaron en cuentas las condiciones ambientales y los criterios de exclusión mencionados al inicio de esta sección. Una vez cumplidas ambos aspectos, se procedió a la aplicación del protocolo TSST, el cual fue dirigido por un experto en Psicología con el fin de que este se aplicará de manera correcta. Durante el transcurso del protocolo se adquirieron imágenes termográficas las cuales se analizaron una vez que este finalizó.

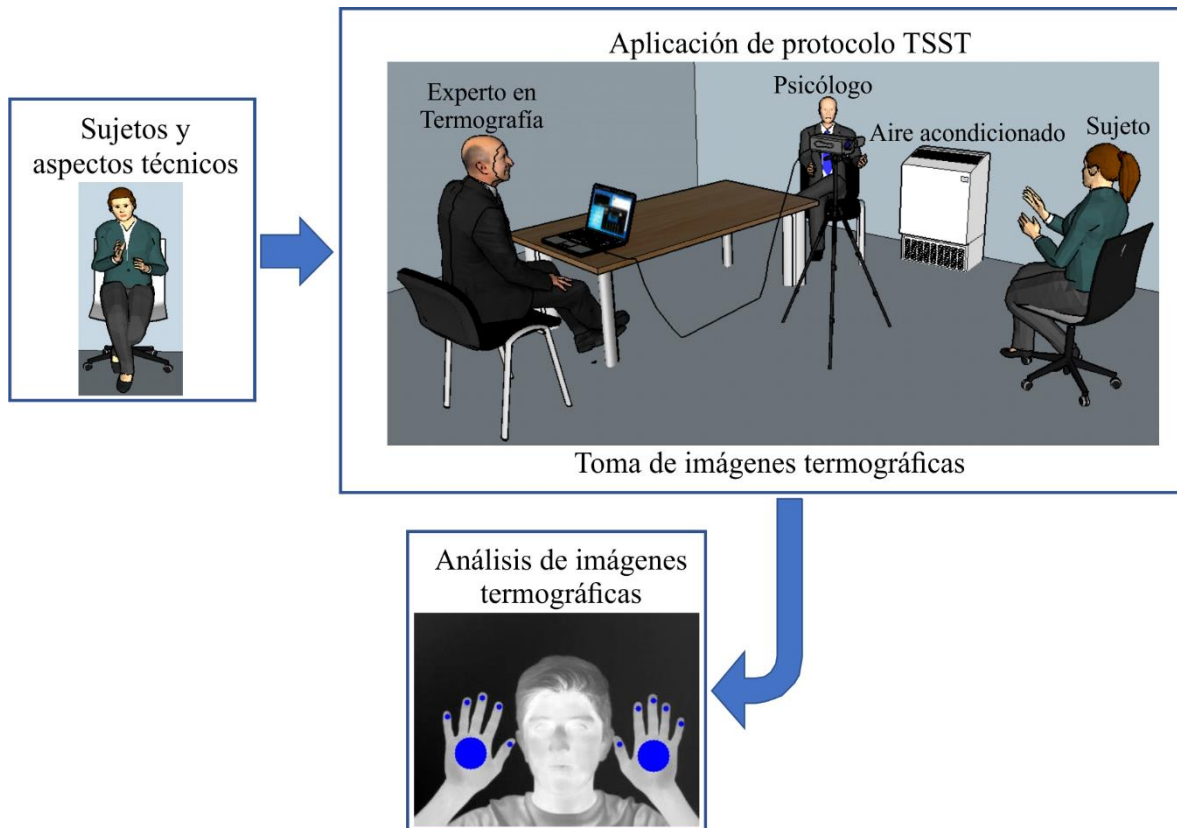


Figura 3.6. Metodología propuesta para el estudio del estrés

La aplicación del protocolo TSST se dividió en cinco etapas principales, tal y como se muestra en la figura 3.7. La primera fue la climatización del sujeto durante un tiempo de quince minutos. En la segunda etapa se realizó la captura del estado basal por un periodo de dos minutos. En la tercera etapa se explicaba al paciente que debía preparar un discurso mental sobre por qué sería el mejor candidato para su trabajo ideal, esto durante un periodo de tres minutos. En la cuarta etapa el sujeto tenía que exponer de manera oral su discurso durante un periodo de cinco minutos. En la última etapa el sujeto tenía que realizar una tarea matemática, la cual consistía en una resta de 17 en 17 a partir del número 1021, por cada equivocación debía volver a comenzar en el número inicial. A partir de la segunda etapa se realizaba una toma de imagen termográfica cada 10 segundos.

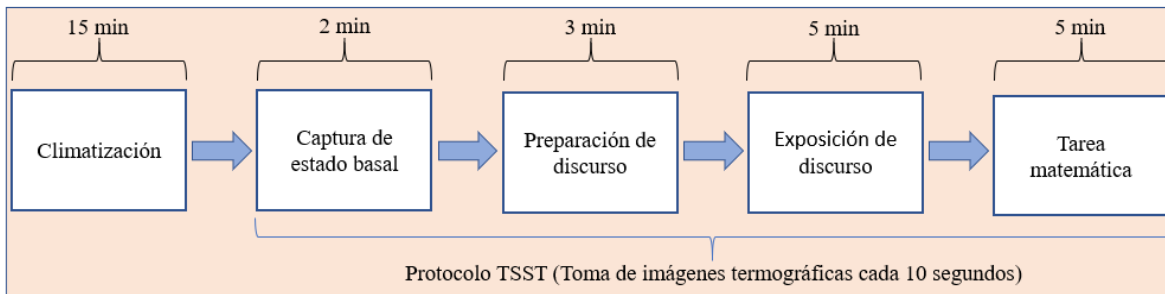


Figura 3.7. Etapas para la aplicación del protocolo TSST

Después de la aplicación del protocolo TSST se procedió a analizar las imágenes termográficas adquiridas. Las regiones de interés seleccionadas para este estudio fueron la punta de los dedos y las palmas de las manos, las cuales se muestran marcadas en color azul en la figura 3.8. De cada una de ellas, se obtuvo la media, desviación estándar y varianza.



Figura 3.8. Regiones de interés en manos para el estudio de estrés

3.2 Sujeto

El sistema propuesto está enfocado a conductores automotrices, quienes fungen como sujetos de estudio. Por ello, los criterios de exclusión a tomar en cuenta son: no usar gorras, pasamontañas, lentes, entre otros accesorios que impidan la toma de las regiones mencionadas. Además, es necesario que no tengan ninguna enfermedad ni que hayan tomado algún medicamento. También se debe de evitar el uso de maquillaje, cremas corporales o cualquier otro accesorio.

3.3 Adquisición de la imagen termográfica

La adquisición de la imagen termográfica llevo a cabo con un visor termográfico portátil 100 % UAQ. La imagen se adquiere en niveles de gris con el objetivo de aminorar el procesamiento.

3.3.1 Visor termográfico portátil – 100 % UAQ

Para el presente trabajo se desarrolló un visor termográfico portátil. El cual, cuenta con un sensor termográfico FLIR Lepton V2 que tiene una resolución de 80 x 60 pixeles, con una sensibilidad de 0.05 °C. Con dicha cámara se pueden adquirir hasta nueve imágenes por segundo, sin embargo, para el presente trabajo se dejó el sistema funcionando para adquirir una imagen por segundo. Además, cuenta con una cámara digital de 7 MPx que toma imagen en paralelo a la imagen termográfica y un puerto USB con el cual se pueden extraer las imágenes (termográfica y digital) adquiridas (Figura 3.9). El display para la visualización de las imágenes es de 7 pulgadas, con una resolución de 800 x 480 pixeles (Figura 3.10).

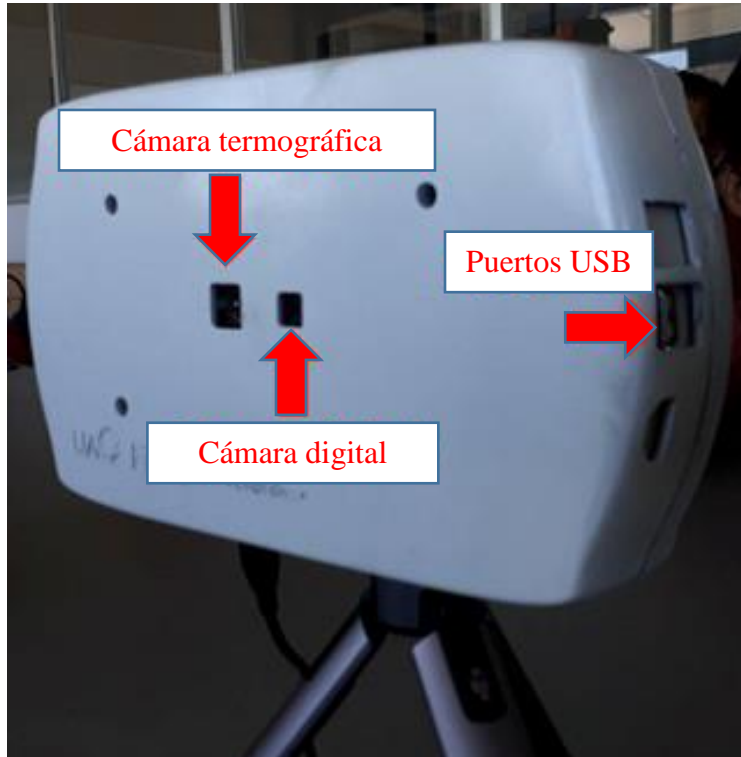


Figura 3.9. Vista posterior del visor termográfico portátil 100 % UAQ.

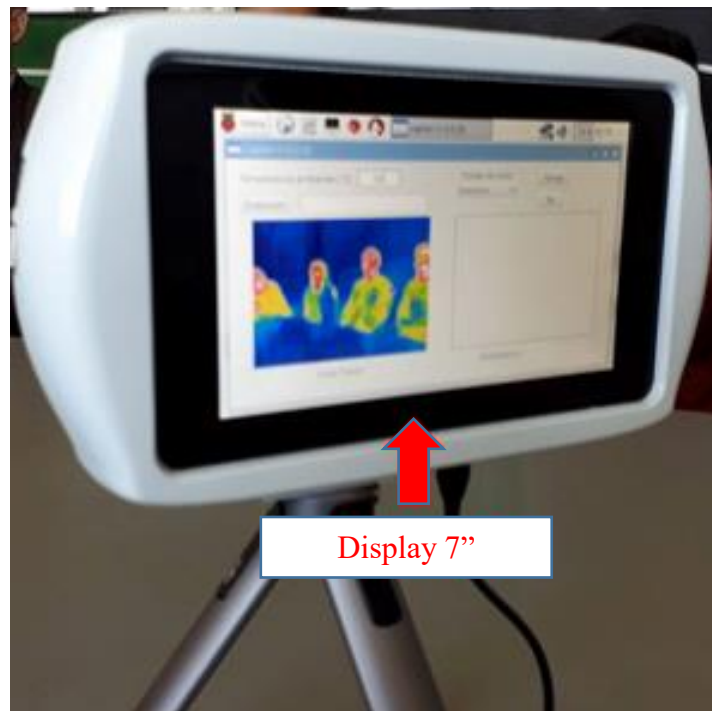


Figura 3.10. Vista frontal del visor termográfico portátil 100 % UAQ.

3.4 Tratamiento de la imagen termográfica – termobiomarcadores

Como se mencionó anteriormente, la imagen termográfica se toma en niveles de gris. A partir de ello se obtiene la matriz termal con el objetivo de tener la temperatura de cada pixel, para posteriormente detectar las regiones de interés a ser analizadas. De acuerdo con los estudios realizados para obtener el patrón de referencia se obtuvieron las regiones de interés donde se presenta un cambio significativo una vez que se experimenta alguna emoción. Las regiones a tomar en cuenta son: la frente y la nariz para el área del rostro (Figura 3.11) y la punta de los dedos para las manos (Figura 3.12); todas ellas se encuentran marcadas en color azul en su respectiva imagen.



Figura 3.11. Regiones de interés para el rostro.



Figura 3.12. Regiones de interés para las manos.

Para el análisis se obtiene la media, desviación estándar y varianza de cada región de interés.

3.5 Señal de alerta - efecto visual (paleta de color)

Una vez que se ha recibido la bandera de alerta que indica la presencia de cansancio se procede a obtener la segmentación de la imagen termográfica (Figura 4) para la posterior asignación de la paleta de color que indique de manera visual la presencia de cansancio, tal y como se muestra en la Figura 5.

La segmentación de la imagen termográfica (Figura 3.13) se realiza de la siguiente manera: Primero se convierte la imagen termográfica, que está en formato RGB, al espacio de color IHSL, ya que este presenta mejores características para realizar el procesamiento de imágenes a color. Posteriormente, se obtiene el histograma bi-variable acromático del espacio de color IHSL. Después, para obtener los valores más representativos de la imagen se realiza el filtrado del histograma y la reducción de máximos a través de la dinámica de máximos. A partir de los máximos obtenidos, los cuales fungen como marcadores, se aplica el watershed, para con ello, determinar las clases y a su vez, las vertientes acromáticas.

Finalmente, con las vertientes generadas, se obtiene la tabla de correspondencia con el objetivo de clasificar cada pixel de la segmentación final acromática.

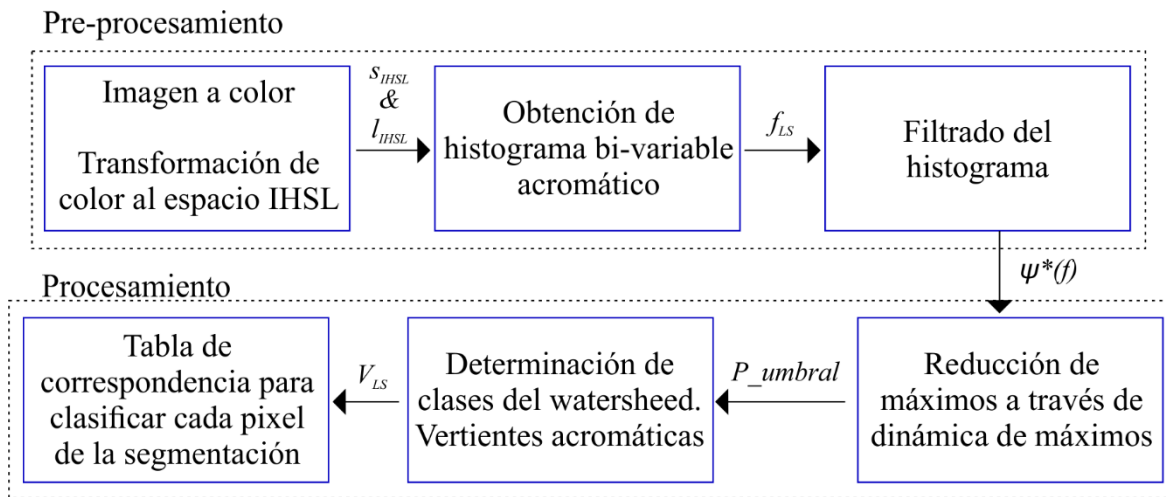


Figura 3.13. Metodología propuesta para segmentación de imagen termográfica

Una vez llevada a cabo la segmentación de la imagen termográfica y la matriz termal, se procede a obtener la paleta de color de la siguiente manera:

- a) Obtener temperatura promedio de cada clase de la segmentación.
- b) Ordenar de menor a mayor los promedios de temperatura de cada clase.
- c) Asignar pseudocolor de manera gradual a cada clase, como sigue:
 - o Dividir el rango de tonalidades a ser asignadas entre el número de los máximos resultantes después de la imposición del umbral. El valor obtenido será el gradiente de cambio tanto en las clases como en la barra de color.
 - o Comenzar con la asignación del pseudocolor con la menor tonalidad en la temperatura promedio más baja. De ahí en adelante se debe de ir incrementando de acuerdo con el gradiente obtenido, hasta llegar al promedio más alto con la tonalidad más alta.
- d) Retornar los promedios de temperatura a el orden original con el pseudocolor asignado.

Con el procedimiento mencionado se obtiene la paleta de color. Es importante mencionar que se puede asignar el color que se desee, lo cual se logra variando los canales de cada tonalidad.

IV. RESULTADOS

Los resultados que se obtuvieron con el desarrollo del trabajo se dividen en cuatro etapas principales, las cuales son estudio emocional, estudio de estrés, asignación de color y estudio de caso:

5.1 Estudio emocional

Una vez que se llevó a cabo la aplicación del protocolo para el estudio de las cinco emociones básicas (alegría, enojo, miedo, tristeza y asco) se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

Se llevo a cabo el análisis de distintas regiones de interés faciales, sin embargo, se encontró que las zonas que muestran los mayores cambios son las mejillas, la frente, la nariz y el maxilar, tal y como se muestra en la figura 4.1.

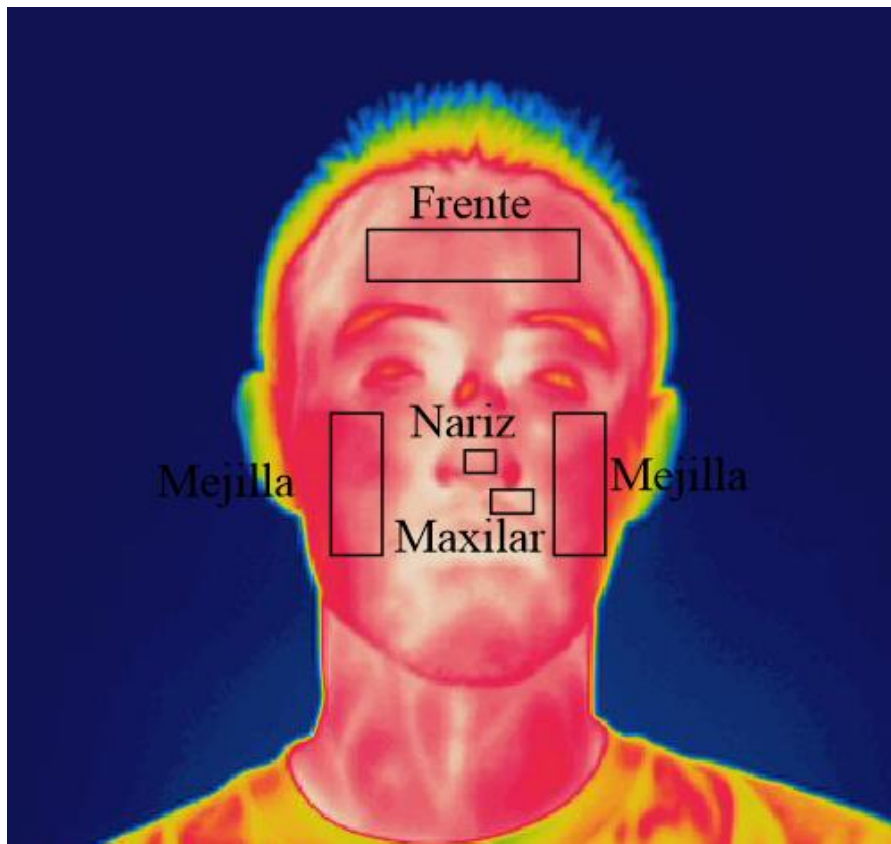


Figura 4.1. Termobiomarcadores para análisis térmico

Después de la definición de los termobiomarcadores se llevó a cabo el análisis estadístico a través de las medias y la desviación estándar obtenidas en cada ROI, los resultados se presentan en la tabla 4.1. Se encontró que para el miedo existe un decremento de temperatura en la región de la nariz, la frente y las mejillas; para la alegría existe un decremento de temperatura en la zona de la nariz y el maxilar; para el enojo existe un decremento de temperatura en la nariz y en el maxilar y un incremento de temperatura en la frente; en el caso del asco hay decremento de temperatura en la nariz y el maxilar y un incremento en las mejillas; finalmente, en la tristeza existe un incremento de temperatura en las mejillas y un decremento de temperatura en la nariz, la frente y el maxilar.

ROI	Emoción				
	Miedo	Alegría	Enojo	Asco	Tristeza
Nariz	↓	↓	↓	↓	↓
Mejillas	*	*	*	↑	↑
Frente	↓	*	↑	*	↓
Maxilar	↓	↓	↓	↓	↓

Tabla 4.1. Tendencia térmica en regiones de interés ante estímulos emocionales

Con la tendencia térmica se propuso un clasificador de emociones, sin embargo, es bien sabido que todas las personas tienden a reaccionar de manera distinta ante un mismo estímulo emocional, por ello, se planteó una etapa de calibración que permitiera llegar a la tendencia térmica emocional. Dicha etapa fue por medio de un controlador difuso, el cual cuenta en su máquina de inferencias con una colección de cuarenta reglas. Las entradas del sistema son las temperaturas iniciales y finales de cada región de interés, mientras que las salidas son las regiones de interés que deben sufrir un cambio, es decir, que debe de incrementar o decrementar, esto se muestra en la figura 4.2.

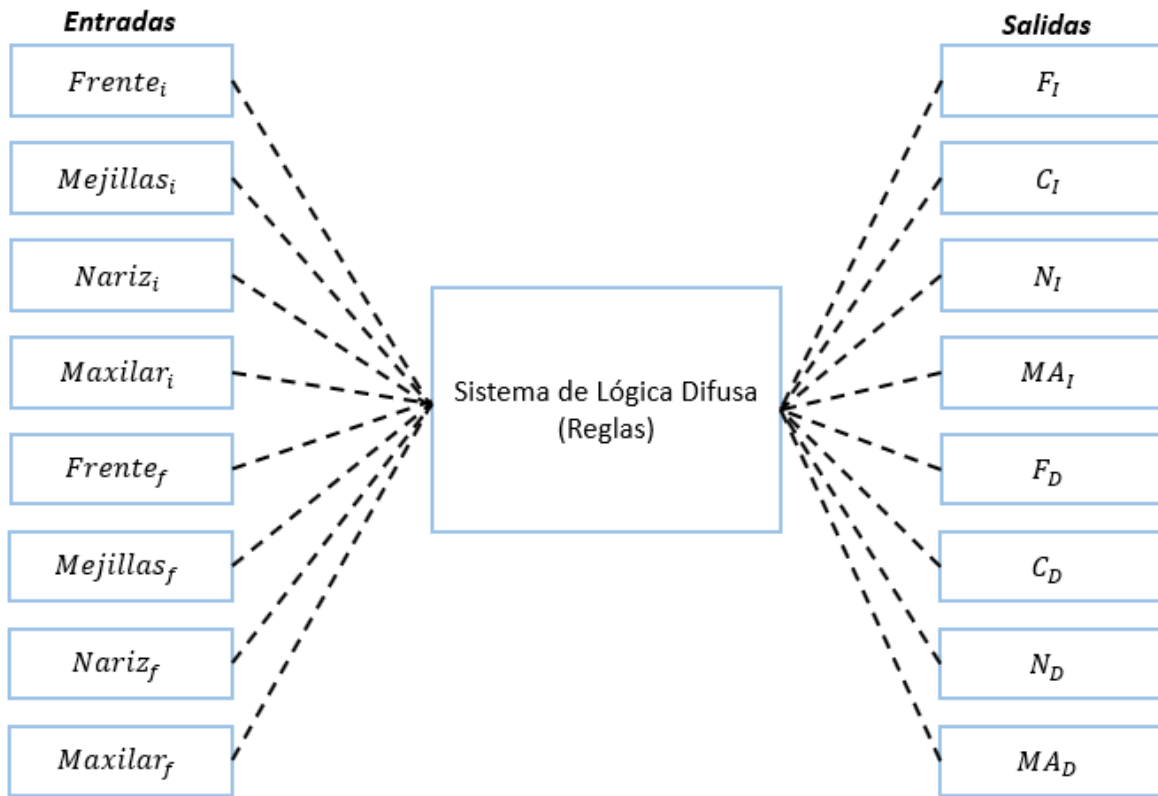


Figura 4.2. Sistema de Lógica Difusa para auto calibración

Teniendo la etapa de auto calibración y el análisis de la línea base, se procedió a desarrollar el clasificador, el cual toma en cuenta la tendencia térmica de las regiones de interés, es decir, si la zona decrementa o incrementa su temperatura de acuerdo con la emoción presente. Al tener solo dos variables, se optó por proponer un árbol de decisiones para esa etapa, el cual se presenta en la figura 4.3. El cual toma como punto de partida la nariz, debido a que esta zona sufre cambios considerables antes las cinco emociones estudiadas, de ahí, se toma la decisión si incremento o decremento, para ir revisando si hay alguna emoción presente.

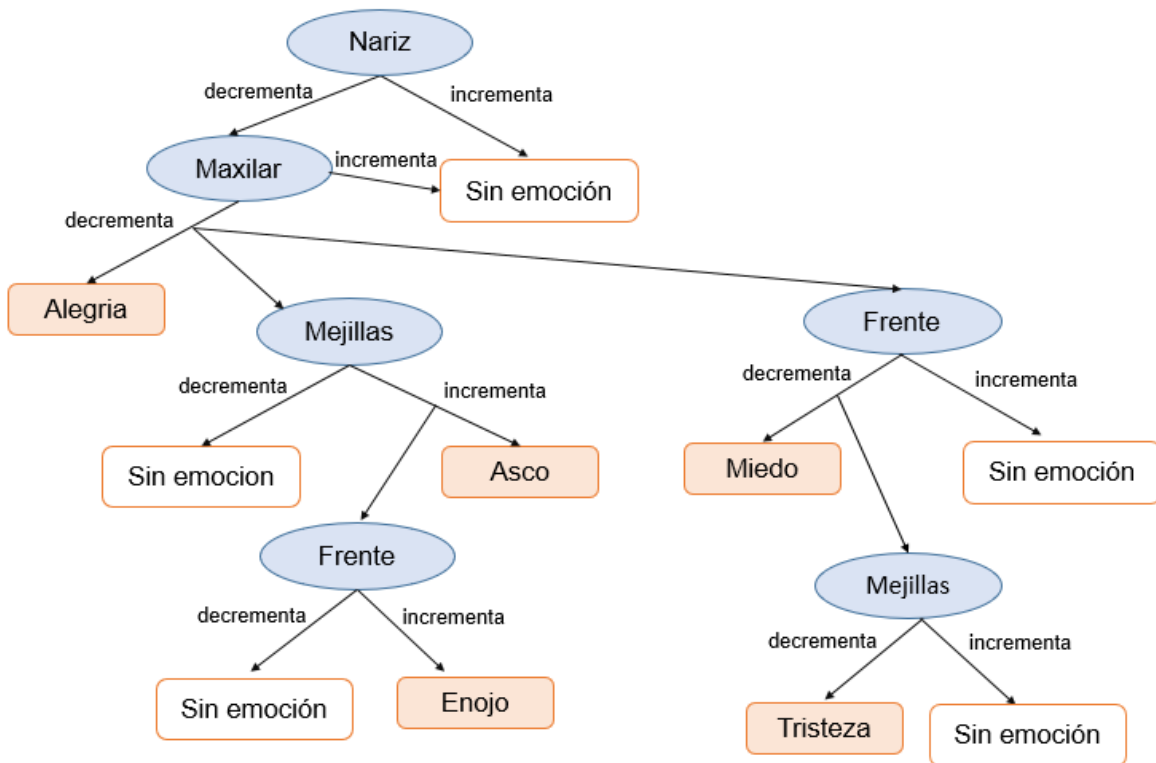


Figura 4.3. Árbol de decisiones para clasificación de emociones

Con el sistema desarrollado, se procedió a llevar a cabo la etapa de verificación de precisión del sistema, para ello, se probó con 625 termogramas, las cuales provienen de 8 mujeres y 17 hombres. Los resultados muestran que existe una mejor precisión para los hombres que para las mujeres, debido a que ellos presentan cierta tendencia ante los estímulos emocionales, sin embargo, ellas son muy variantes. Por otro lado, el sistema baja su eficiencia debido está diseñado para una postura dada, si existe una variación decremента su eficiencia.

La matriz de confusión para 17 hombres se muestra en la Tabla 4.2 y la matriz de confusión para 8 mujeres se muestra en la Tabla 4.3.

		Emoción (Clasificador)						Total	Precisión (%)
		Enojo	Asco	Miedo	Alegría	Tristeza	Sin emoción		
Emoción (Valor real)	Enojo	54	0	11	0	3	0	68	79.41
	Asco	0	61	0	0	7	0	68	89.70
	Miedo	12	0	56	0	0	0	68	82.35
	Alegría	0	0	2	66	0	0	68	97.05
	Tristeza	0	6	0	0	62	0	68	91.17
	Sin emoción	0	0	0	0	0	85	85	100
Total		66	67	69	66	72	85		
Precisión (%)		81.81	91.04	81.15	100	86.11	100		
		Precisión en hombres							90.3

Tabla 4.2. Matriz de confusión para 17 hombres

		Emoción (Clasificador)						Total	Precisión (%)
		Enojo	Asco	Miedo	Alegría	Tristeza	Sin emoción		
Emoción (Valor real)	Enojo	25	0	6	0	1	0	32	78.12
	Asco	0	30	0	0	2	0	32	93.75
	Miedo	7	0	25	0	0	0	32	78.12
	Alegría	0	1	0	31	0	0	32	96.87
	Tristeza	0	4	0	0	28	0	32	87.5
	Sin emoción	0	0	0	0	0	40	32	100
Total		32	35	31	31	31	40		
Precisión (%)		78.12	85.71	80.64	100	90.32	100		
		Precisión en mujeres							89.5

Tabla 4.3. Matriz de confusión para 8 mujeres.

5.2 Estudio de estrés

El estudio de estrés se realizó en 60 participantes, todo ellos gente joven (18-27 años). Después de que se llevó a cabo la ejecución del protocolo se obtuvo una base de datos de 5640 termogramas. Estos termogramas se analizaron estadísticamente, las regiones de interés seleccionadas fueron, la punta de los dedos y las palmas de las manos. Estas regiones se muestran en la figura 4.4 marcadas en color azul. Para su selección se impuso un marcador y a partir de ahí se extendió la zona, con el objetivo de analizar la mayor cantidad de píxeles posibles.



Figura 4.4. Regiones de interés para el estudio de estrés en manos.

Una vez seleccionadas las regiones de interés se llevó a cabo el análisis de los datos. De estos se obtuvo que existe una tendencia térmica del 90 % de decremento para los hombres (Figura 4.5), sin embargo, para las mujeres solo de un 50 % (Figura 4.6).

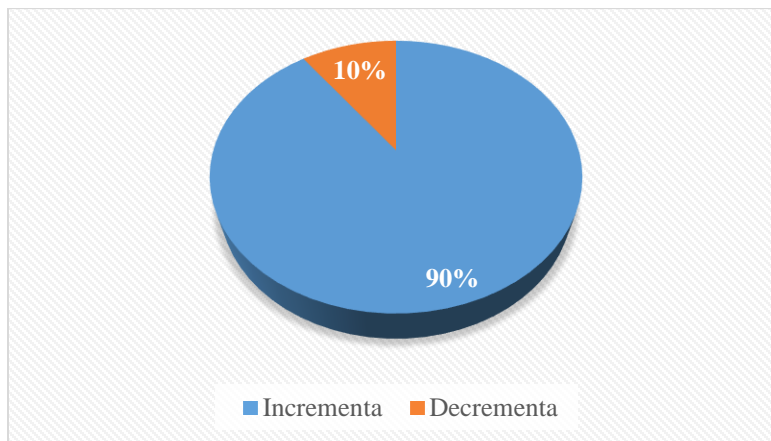


Figura 4.5. Tendencia térmica en hombres

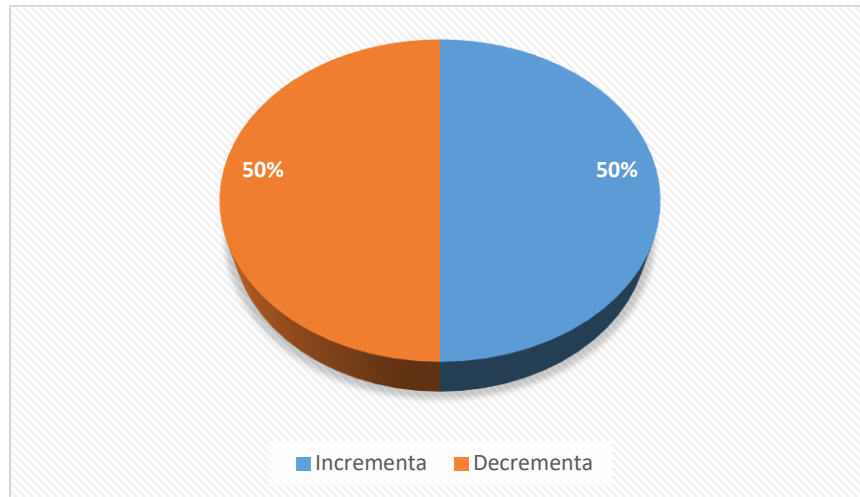


Figura 4.6. Tendencia térmica en mujeres

Posterior a la obtención de los resultados anteriores, se realizó un análisis para revisar asimetría entre mano izquierda y mano derecha. Además, se realizó un estudio para revisar asimetría entre géneros. De acuerdo con la tabla 4.4 no existe simetría entre mano derecha y mano izquierda de cada género.

		Mano derecha			Mano izquierda		ΔT
		<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>p</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	
Hombres	Pre-TSST	28.90	9.25	0.881	28.91	8.84	-0.01
	Post-TSST	26.56	4.47	0.994	26.42	4.36	0.14
Mujeres	Pre-TSST	26.92	9.69	0.893	27.13	9.89	-0.21
	Post-TSST	26.20	9.13	0.991	26.21	8.12	-0.01

Tabla 4.4. Valores estadísticos por género en puntas de los dedos

Donde *M* representa la media de temperatura de las regiones de interés, *SE* la desviación estándar, *p* es el nivel de significancia, y ΔT es la diferencia de temperatura entre la media de la mano izquierda y la mano derecha. De acuerdo con la tabla 4.5 no existe simetría entre géneros, es decir, las variaciones de temperatura son distintas para ambos géneros.

		Hombres			Mujeres		ΔT
		<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>p</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	
Hombres vs Mujeres (Punta de los dedos)							
Mano derecha	Pre-TSST	28.90	9.25	0.183	26.92	9.69	1.98
	Post-TSST	26.56	4.47	0.226	26.20	9.13	0.36
Mano izquierda	Pre-TSST	28.91	8.84	0.826	27.13	9.89	1.78
	Post-TSST	26.42	4.36	0.979	26.21	8.12	0.21

Tabla 4.5 Valores estadísticos entre géneros en puntas de los dedos

Donde M representa la media de temperatura de las regiones de interés, SE la desviación estándar, p es el nivel de significancia, y ΔT es la diferencia de temperatura entre la media de la mano los de los hombres y las mujeres.

Como se verifico que no existe simetría entre géneros, se obtuvo un gradiente de estrés tanto para hombres como para mujeres. Para ello, primero fue necesario obtener la temperatura basal por género. Se encontró que para los hombres la temperatura basal oscila entre los 27.8 °C mientras que para las mujeres es ligeramente inferior, para ellas se obtuvo de 27.1 °C. Para los hombres es más notorio el gradiente de estrés, el cual toma un valor de ± 4.2 °C (Figura 4.7).

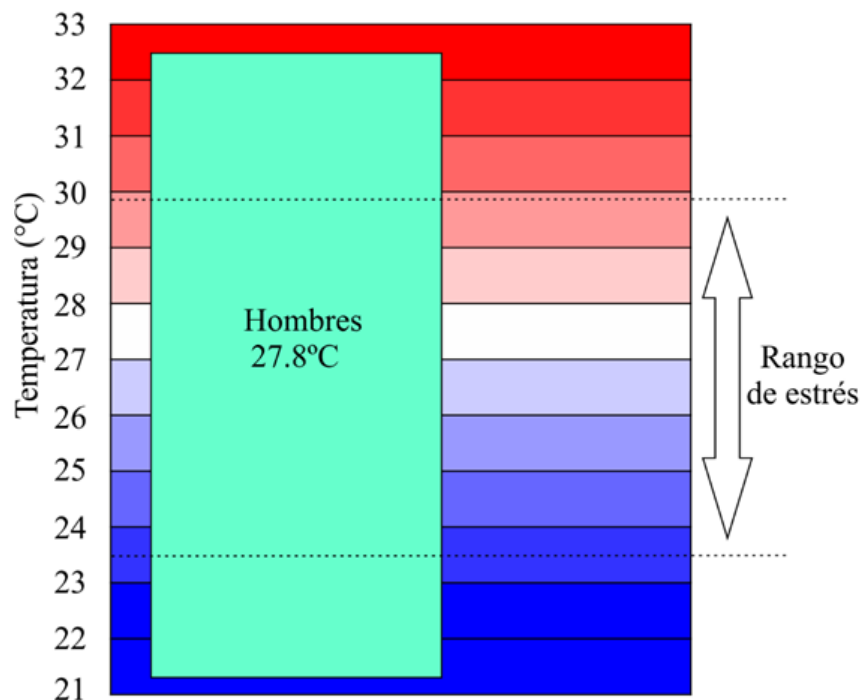


Figura 4.7. Paleta de color para hombres basada en el gradiente de cambio

En la figura 4.8 se muestra el gradiente de cambio en el género femenino, para ellas se encontró un gradiente de cambio inferior que el de los hombres, su gradiente de cambio es de 3.2 °C.

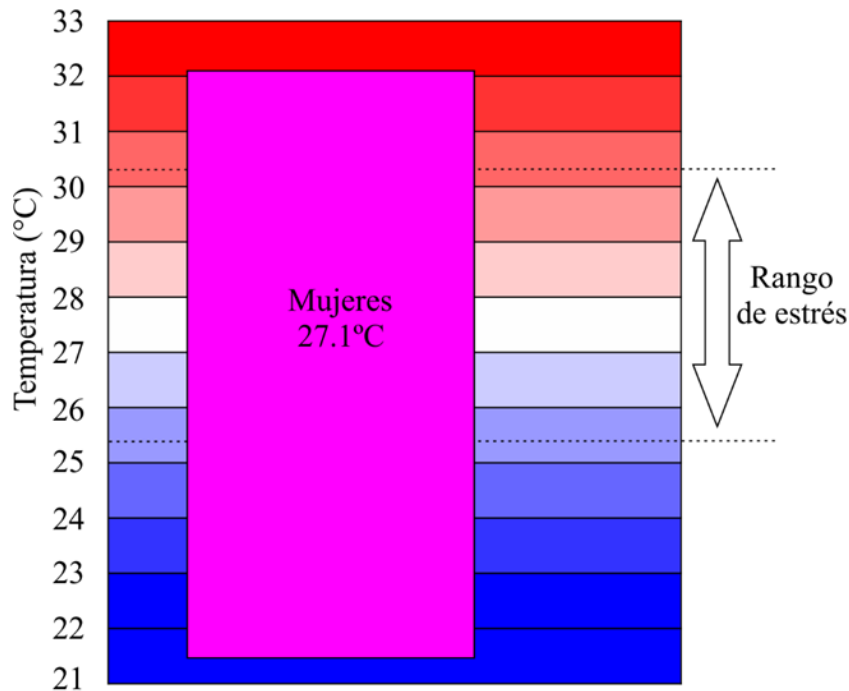


Figura 4.8. Paleta de color para mujeres basada en el gradiente de cambio

Ya que se obtuvo la temperatura basal por género y el gradiente de cambio ante el estrés se propuso una paleta de colores que varía por grado centígrado, tal y como se visualiza en la figura 4.7 y 4.8. Teniendo estas paletas, se procedió a realizar un análisis tanto en el pre-test como en el post-test. Una vez realizado el análisis se le asignó un color a las regiones de interés de acuerdo con la temperatura existente, en las imágenes se puede visualizar que existen ambos patrones, tanto de ascenso como descenso de temperatura, tal y como se muestra en la figura 4.9.


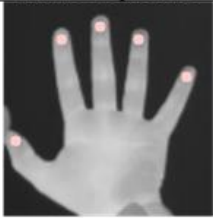
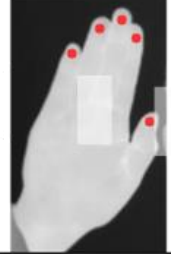








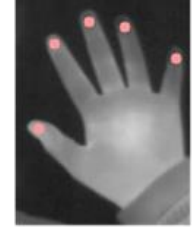
	Pre - test		Post - test	
	Mano derecha	Mano izquierda	Mano derecha	Mano izquierda
Sujeto 1				
Sujeto 2				
Sujeto 3				
Sujeto 4				

Figura 4.9. Paleta de color aplicada a regiones de interés en el pre-test y en el post-test.

4.3 Señal de alerta – paleta de color según emoción

Una vez que se sabe el comportamiento emocional, es posible asignar un color conforme a cada emoción, en el presente trabajo se asignan los siguientes colores: rojo al enojo, violeta al asco, azul al miedo, amarillo a la alegría y gris a la tristeza. Algunos ejemplos de ellos se muestran en la figura 4.10.



Figura 4.10. Aplicación de pseudocolor por emoción

4.4 Estudio de caso real

El sistema propuesto se probó en un automovilista en un periodo de 6 horas de manejo de la ciudad de Querétaro a la Ciudad de Colima. El sensor inteligente se posicionó frente al conductor, como se muestra en la figura 4.11, con el objetivo de adquirir las imágenes termográficas. Cada hora se tomó una imagen termográfica para verificar los cambios térmicos que ocurrían conforme pasaba el tiempo en el periodo de manejo.



Figura 4.11. Imagen real del sensor inteligente posicionado frente al conductor

Las imágenes termográficas de la zona del rostro adquiridas durante el transcurso del viaje se muestran en la figura 4.12, están fueron tomadas en escala de grises. Dichas imágenes fueron tomadas cada hora.

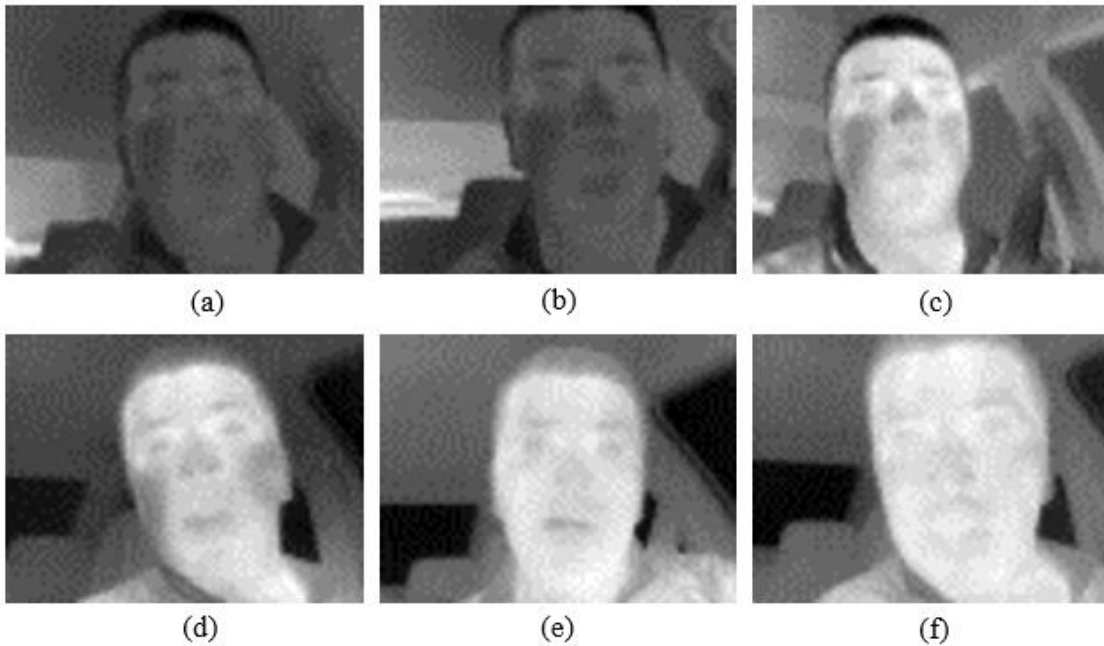


Figura 4.12. Imágenes termográficas faciales adquiridas con sensor inteligente

La secuencia la figura 4.13 muestra la región de las manos durante el transcurso del viaje. De igual manera, fueron adquiridas cada hora.

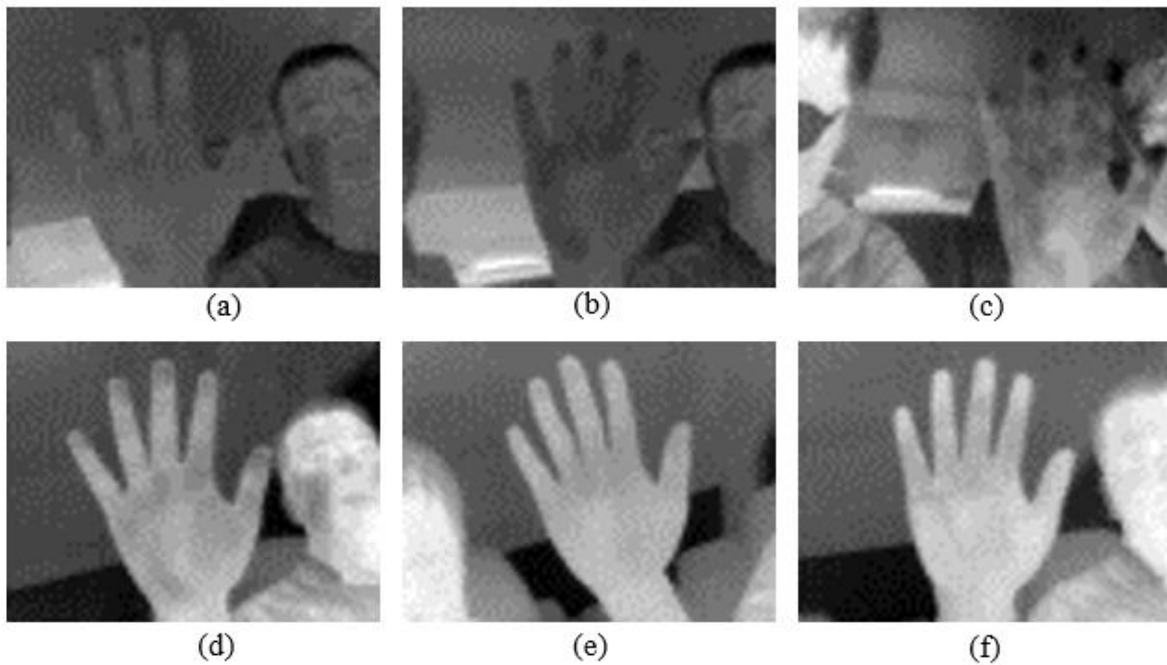


Figura 4.13. Imágenes termográficas de manos adquiridas con sensor inteligente

Una vez que el sensor inteligente detecta que se produce un estado de cansancio en el conductor, las zonas del rostro y de las manos cambian a una tonalidad en rojo, con el objetivo de mostrar una señal de alarma que indica su presencia, tal y como se muestra en la figura 4.14.



Figura 4.14. Paleta de color que indica la presencia de cansancio. a) Rostro. b) Cara.

V. CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló un sensor inteligente basado en un sistema embebido para la detección de cansancio en conductores automotrices. Para dicho sistema, primero, se establecieron termobiomarcadores a través de diversos estudios desarrollados. Los estudios desarrollados fueron dos: el primero fue un estudio emocional, donde se indujeron cinco emociones, alegría, enojo, miedo, tristeza y asco, de las cuales las últimas dos no habían sido estudiadas con termografía, el objetivo de este estudio fue normalizar las emociones para saber su comportamiento; el segundo estudio fue sobre el estrés, debido a que una exposición prolongada a este causa un estado de cansancio. Además, con estos estudios se establecieron los termobiomarcadores, los cuales indican las regiones donde existen cambios significativos de temperatura una vez que se experimentan situaciones emocionales. Los termobiomarcadores establecidos son: la punta de los dedos de las manos, la punta de la nariz, la frente y las mejillas. Se encontró que estos termobiomarcadores descienden su temperatura ante situaciones de estrés o cansancio. A partir de ello, se desarrolló un patrón de referencia que indica la presencia de cansancio. El cual se basa en el análisis de los termobiomarcadores establecidos. Una vez que se detecta la presencia de cansancio se procede a llevar a cabo su visualización a través de la imposición de color en la imagen, para ello, se desarrolló una metodología que permite segmentar la imagen termográfica a color través del uso de un algoritmo de procesamiento de imágenes conocido como watershed y, a partir del resultado de la aplicación de este algoritmo se procede a la asignación de color que funge como una señal de alerta de cansancio.

Los productos que se obtuvieron durante la realización del presente trabajo se describen a continuación de manera detallada:

- El artículo científico “A new approach to obtain a colour palette in thermographic images” aceptado y publicado en la revista Quantitative Infrared Thermography Journal. El artículo se presenta en el apéndice A1.

- El artículo científico “Human emotions detection based on a smart-thermal system of thermographic images” aceptado y publicado en la revista *Infrared Physics and Technology*. El artículo se presenta en el apéndice A2.
- El artículo científico “A methodology based on infrared thermography for the study of stress in hands of young people during the Trier Social Stress Test” aceptado y publicado en la revista *Infrared Physics and Technology*. El artículo se presenta en el apéndice A3.
- El registro de los derechos de autor del software “Sistema de visión artificial para detección de termobiomarcadores” con número de registro 03-2016-042209455500-01. El programa desarrollado en C permite realizar el análisis estadístico de las regiones de interés a ser analizadas. Dichas zonas son detectadas a partir de marcadores impuestos en la imagen.
- El registro de Diseño industrial Modelo MX/f/2017/002296 del equipo termográfico desarrollado. El cual engloba un sistema embebido que permite la adquisición de imágenes termográficas con una resolución de 80 x 60 píxeles y una sensibilidad de 0.05 °C. Además, permite el procesamiento de la imagen dentro del sistema.
- Por otro lado, se han desarrollado publicaciones en conjunto con la Facultad de Psicología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Los cuales son: Evaluación biopsicosocial afectiva de un grupo de sobrevivientes de cáncer bajo tratamiento integral (*Revista Latinoamericana de Medicina Conductual*), The Infrared Thermal Image and Citokine Il-6 in the Affective Diagnosis of Patients with Non-Communicable Chronic Diseases (*Biomedical – Journal of Scientific & Technical Research*), Biopsychosocial assessment of pain with thermal imaging of emotional facial expression in breast cancer survivors (*Medicines*), Nasal thermal activity during voluntary facial expression in a patient with chronic pain and alexithymia (*Pan American Journal of Medical Thermology*), Psychophysiological facial thermal assessment of the relaxation in a patient with osteoarthritis (*Pan American Journal of Medical Thermology*), Relación entre el estrés psicológico y la presión arterial media: un estudio piloto de laboratorio (*International Digital Journal of Psychology*) y Termografía aplicada a Psicología de la Salud: utilidades, retos y

estudios de caso (Revista de Psicología de la Universidad Católica de Santa María, Arequipa).

Además de lo mencionado, se participó en distintos cursos y talleres promoviendo la tecnología infrarroja desarrollada en este trabajo.

5.2 Prospectivas

Con el desarrollo del presente trabajo se encontraron distintos hallazgos que sirvieron como precursores en otras investigaciones. Sin embargo, no solo se encuentra limitado a ellas, por el contrario, se considera que existen otras oportunidades, como, por ejemplo: el estudio de otros estados emocionales distintos a los que se estudiaron, la medición de variables fisiológicas (frecuencia cardiaca, saturación de oxígeno) cuando se experimenta una emoción y estudios emocionales en distintas etapas de la vida. Además, realizar pruebas bajo distintas condiciones ambientales, para con ello, implementar mejoras en el sistema y hacerlo más robusto. Por otro lado, sería deseable, profundizar por qué las mujeres son muy variantes en su temperatura corporal cuando experimentan una emoción.

Las prospectivas mencionadas pueden generar productos de alto nivel, tales como: publicaciones en congresos, en revistas internacionales, derechos de autor, propiedades industriales y tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado.

REFERENCIAS

- AAPOS HEADQUARTERS, (2014), Parpadeo excesivo en niños, recuperado el 27 de Octubre de 2014, de <http://www.aapos.org/es/terms/conditions/133>.
- Abbood, Hilal et al. 2014. "Prediction of Driver Fatigue: Approaches and Open Challenges." *2014 14th UK Workshop on Computational Intelligence (UKCI)*: 1–6. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6930193>.
- Ahlstrom, Christer, Trent Victor, Claudia Wege, and Erik Steinmetz. 2012. "Processing of Eye/Head-Tracking Data in Large-Scale Naturalistic Driving Data Sets." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13(2): 553–64. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6093970>.
- Ahmed, Rafi, and Md. Foisal Hossain. 2014. "Robust Driver Fatigue Recognition Using Image Processing." *2014 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*: 1–6. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6850713>.
- Anumas, Sasiporn, and Soo-chan Kim. 2012. "Driver Fatigue Monitoring System Using Video Face Images & Physiological Information." *The 4th 2011 Biomedical Engineering International Conference*: 125–30. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6172034>.
- Azim, Tayyaba, M. Arfan Jaffar, and Anwar M. Mirza. 2014. "Fully Automated Real Time Fatigue Detection of Drivers through Fuzzy Expert Systems." *Applied Soft Computing* 18: 25–38. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494614000398> (September 4, 2014).
- Boke, C., et al. (2016). "Smart band for drowsiness detection to prevent accidents". *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 1 (5): 1107-1114.
- Borghini, Gianluca et al. 2012. "Measuring Neurophysiological Signals in Aircraft Pilots and Car Drivers for the Assessment of Mental Workload, Fatigue and Drowsiness." *Neuroscience and biobehavioral reviews* 44: 58–75. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149763412001704> (July 15, 2014).
- Cheng, Wen-chang, Hsien-chou Liao, Min-ho Pan, and Chih-chuan Chen. 2013. "A Fatigue Detection System with Eyeglasses Removal." : 331–35.
- Chieh, Chia, Mohd Marzuki Mustafa, Aini Hussaini, and Edmond Zahedi. 2003. "Detection Using Steering Grip Force." : 45–48.

- Cruz-Albarran, I. A. et al (2017), Human emotions detection based on a smart-thermal system of thermographic images, *Infrared Phys. Technol.* 81 (2017) 250–261. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449516304182>
- Cruz-Albarran, I. A. (2018), A methodology based on infrared thermography for the study of stress in hands of young people during the Trier Social Stress Test, *Infrared Phys. Technol.* 93 (2018) 116-123. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449518302822>
- Cyganek, Bogusław, and Sławomir Gruszczyński. 2014. “Hybrid Computer Vision System for Drivers’ Eye Recognition and Fatigue Monitoring.” *Neurocomputing* 126: 78–94. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231213006863> (October 10, 2014).
- Devi, Mandalapu Sarada, and Preeti R Bajaj. 2010. “Fuzzy Based Driver Fatigue Detection.” *2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*: 3139–44. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5641788>.
- Engert, V. et al. (2014) , Exploring the use of thermal infrared imaging in human stress research, *PLoS One.* 9 (2014) 1–11. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0090782>
- Feng, Ruijia, Guangyuan Zhang, and Bo Cheng. 2009. “An on-Board System for Detecting Driver Drowsiness Based on Multi-Sensor Data Fusion Using Dempster-Shafer Theory.” *2009 International Conference on Networking, Sensing and Control*: 897–902. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4919399>.
- Fernandez-Cuevas, Ismael et al. 2015. "Classification of factors influencing the use of infrared thermography in humans: A review." *Infrared Physics & Technology.* 71 (2015): 28. 55. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449515000523>
- Gade, Rikke, and Thomas B. Moeslund. 2014. “Thermal Cameras and Applications: A Survey.” *Machine Vision and Applications* 25: 245–62.
- Gastaldi, Massimiliano, Riccardo Rossi, and Gregorio Gecchele. 2014. “Effects of Driver Task-Related Fatigue on Driving Performance.” *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 111: 955–64. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042814001311> (November 3, 2014).
- Guo, Wenqiang et al. 2014. “A Novel Driver Fatigue Assessment in Uncertain Traffic Condition.” *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*: 4777–81. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6895747>.
- Healey, J. a., and R W Picard. 2005. “Detecting Stress During Real-World Driving Tasks Using Physiological Sensors.” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation*

Systems 6(2): 156–66.
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1438384>.

Hernández Vega, J S. 2010. El software embebido y los retos que implica su desarrollo. *Conciencia Tecnológica*. 40 (2010): 42-45.

Imamura, Takashi, Yuto Takeuchi, Zhong Zhang, and Tetsuo Miyake. 2012. “Estimation for Grasp Behavior of Vehicle Driver by Using Steering Wheel Sensor System.” *2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*: 1515–19. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6377950>.

Jadin, M. S., Taib, S., and Ghazali, K. H. "Feature extraction and classification for detecting the thermal faults in electrical installations." *Measurement*. 57 (2014) : 15-24. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224114003066>

Jagannath, M, and Venkatesh Balasubramanian. 2014. “Assessment of Early Onset of Driver Fatigue Using Multimodal Fatigue Measures in a Static Simulator.” *Applied ergonomics* 45(4): 1140–47. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687014000222> (November 7, 2014).

Jimenez, Robinson, Flavio Prieto, and Victor H. Grisales. 2011. “Detection of the Tiredness Level of Drivers Using Machine Vision Techniques.” *2011 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*: 97–102. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6125812> (November 27, 2014).

Jung, Sang-Joong, Heung-Sub Shin, and Wan-Young Chung. 2014. “Driver Fatigue and Drowsiness Monitoring System with Embedded Electrocardiogram Sensor on Steering Wheel.” *IET Intelligent Transport Systems* 8(1): 43–50. <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-its.2012.0032> (November 10, 2014).

Khushaba, Rami N, Sarath Kodagoda, Sara Lal, and Gamini Dissanayake. 2011. “Driver Drowsiness Classification Using Fuzzy.” *Ieee Transactions on Biomedical Engineering* 58(1): 121–31.

Koh, Alex, Gordon R Jones, Joe W Spencer, and Ian Thomas. 2007. “Chromatic Analysis of Signals from a Driver Fatigue Monitoring Unit.” *Measurement Science and Technology* 18(3): 747–54. <http://stacks.iop.org/0957-0233/18/i=3/a=026?key=crossref.5ac916e15afe6b347cbe20884b4efb37> (November 7, 2014).

Lee, Boon-Giin, and Wan-Young Chung. 2012. “Driver Alertness Monitoring Using Fusion of Facial Features and Bio-Signals.” *IEEE Sensors Journal* 12(7): 2416–22. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6166846>.

- Lee, B. L., Lee, B. G. and Chung, W. Y. 2016. “standalone wearable driver drowsiness detection system in a smartwatch” *IEEE Sensors Journal* 13(16): 5444–5451. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7484220/>
- Li, Lingling, Yangzhou Chen, and Zhenlong Li. 2009. “Yawning Detection for Monitoring Driver Fatigue Based on Two Cameras.” *2009 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems:* 1–6. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5309841>.
- Li, Wei, Qi-chang He, Xiu-min Fan, and Zhi-min Fei. 2012. “Evaluation of Driver Fatigue on Two Channels of EEG Data.” *Neuroscience letters* 506(2): 235–39. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304394011015369> (November 5, 2014).
- Luo, Xiao-qing, Rong Hu, and Tian-e Fan. 2013. “The Driver Fatigue Monitoring System Based on Face Recognition Technology.” (45): 384–88.
- Luque Ordóñez, J. (2012). Espectro electromagético y espectro radioeléctrico. Manual informativo de ACTA. 62 (2012): 17-31.
- Matich, Damián Jorge. (2001). Redes Neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones. Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Rosario. 1-55.
- May, Jennifer F., and Carryl L. Baldwin. 2009. “Driver Fatigue: The Importance of Identifying Causal Factors of Fatigue When Considering Detection and Countermeasure Technologies.” *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 12(3): 218–24. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847808001009> (October 13, 2014).
- Mostafa, Eslam, Riad Hammoud, Asem Ali, and Aly Farag. 2013. “Face Recognition in Low Resolution Thermal Images.” *Computer Vision and Image Understanding* 117(12): 1689–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cviu.2013.07.010>.
- Murawski, K. et al. 2013. “The Contactless Active Optical Sensor for Vehicle Driver Fatigue Detection.” *2013 Ieee Sensors:* 1–4. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6688139>.
- Nayak, Bibhukalyan Prasad, Sibsambhu Kar, Aurobinda Routray, and Akhaya Kumar Padhi. 2012. “A Biomedical Approach to Retrieve Information on Driver’s Fatigue by Integrating EEG, ECG and Blood Biomarkers during Simulated Driving Session.” *2012 4th International Conference on Intelligent Human Computer Interaction (IHCI):* 1–6. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6481812>.
- Omidyeganeh, M., a. Javadtalab, and S. Shirmohammadi. 2011. “Intelligent Driver Drowsiness Detection through Fusion of Yawning and Eye Closure.” *2011 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and*

Measurement Systems Proceedings: 1–6.
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6053857>.

Osia, N., and T. Bourlai. 2014. “A Spectral Independent Approach for Physiological and Geometric Based Face Recognition in the Visible, Middle-Wave and Long-Wave Infrared Bands.” *Image and Vision Computing* 32(11): 847–59.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0262885614001097>.

Patel, M., S.K.L. Lal, D. Kavanagh, and P. Rossiter. 2011. “Applying Neural Network Analysis on Heart Rate Variability Data to Assess Driver Fatigue.” *Expert Systems with Applications* 38(6): 7235–42.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417410013916> (October 13, 2014).

Rauch, N. et al. 2009. HAVEit Deliverable D32.1 Report on driver assessment methodology. HAVEit - Highly automated vehicles for intelligent transport, Regensburg.

Rebolledo-Mendez, Genaro et al. 2014. “Developing a Body Sensor Network to Detect Emotions during Driving.” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15(4): 1850–54.

Samy, Lauren et al. 2014. “Unobtrusive Sleep Stage Identification Using a Pressure-Sensitive Bed Sheet.” 14(7): 2092–2101.

Seal, Ayan, Debotosh Bhattacharjee, Mita Nasipuri, and Consuelo Gonzalo-Martin. 2014. “Robust Thermal Face Recognition Using Region Classifiers.” *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence* 28(5): 1456008.
<http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218001414560084>.

Simon, Michael et al. 2011. “EEG Alpha Spindle Measures as Indicators of Driver Fatigue under Real Traffic Conditions.” *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology* 122(6): 1168–78.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21333592> (October 7, 2014).

Singh, a., and J. Kaur. 2013. “Driver Fatigue Detection Using Machine Vision Approach.” *2013 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*: 645–50.
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6514302>.

Vinkers, C. H., et al. (2013) The effect of stress on core and peripheral body temperature in humans, *Stress*. 16 (2013) 520–530.
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3109/10253890.2013.807243>

Wang, Qiong, Huan Wang, Chunxia Zhao, and Jingyu Yang. 2011. “Driver Fatigue Detection Technology in Active Safety Systems.” *2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*: 3097–3100.
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5964969>.

Zhang, Chi, Hong Wang, and Rongrong Fu. 2014. "Automated Detection of Driver Fatigue Based on Entropy and Complexity Measures." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15(1): 168–77.
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6589164>.

APÉNDICES

A. Derechos de autor

A1. Sistema de visión artificial para detección de termobiomarcadores

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: BENITEZ RANGEL JUAN PRIMO
CRUZ ALBARRAN IRVING ARMANDO
MORALES HERNANDEZ LUIS ALBERTO

TITULO: SISTEMA DE VISION ARTIFICIAL PARA DETECCION DE
TERMOBIOMARCADORES

RAMA: PROGRAMAS DE COMPUTACION

TITULARES: BENITEZ RANGEL JUAN PRIMO
CRUZ ALBARRAN IRVING ARMANDO
MORALES HERNANDEZ LUIS ALBERTO

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2016-042209455500-01

México D.F., a 28 de abril de 2016

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESUS PARETS GOMEZ



B. Diseño industrial

B1. Visor termográfico portátil

"2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

IMPI
INSTITUTO MEXICANO
DE LA PROPIEDAD
INDUSTRIAL

Certificado de acuse
de recibo registro(s):
MX/2017/056863

DIRECCION DIVISIONAL DE PATENTES
SUBDIRECCION DIVISIONAL DE PROCESAMIENTO ADMINISTRATIVO DE PATENTES
COORDINACION DEPARTAMENTAL DE EXAMEN DE FORMA
Expediente de Registro de Diseño Industrial Modelo **MX/f/2017/002296**

Asunto: Resultado del Examen de Forma.

Ciudad de México, a 6 de octubre de 2017.
No. Folio: **79817**

Luis Alberto MORALES HERNÁNDEZ
Juan Primo BENITEZ RANGEL
Irving Armando CRUZ ALBARRAN
Jose Antonio MORALES VÁZQUEZ
Juan Angel RAMÍREZ NÚÑEZ
Roque Alfredo OSORNIO RÍOS
Río Moctezuma No. 249
San Cayetano
76807, San Juan del Río, Querétaro, México

REF: Se da acuse de recibo a su Solicitud presentada el 27/07/2017
Se tiene por satisfecho el examen de forma señalado por la Ley de la Propiedad Industrial y su Reglamento.

El suscrito firma el presente oficio con fundamento en los artículos 6° fracciones III y XI y 7° bis 2 de la Ley de la Propiedad Industrial (Diario Oficial de la Federación 27/06/1991, reformada el 02/08/1994, 25/10/1996, 26/12/1997, 17/05/1999, 26/01/2004, 16/06/2005, 25/01/2006, 06/05/2009, 06/01/2010, 18/06/2010, 28/06/2010, 27/01/2012, 09/04/2012 y 01/06/2016); artículos 1°, 2°, 3° fracción V, inciso a), sub inciso i), segundo guion, 4°, 5° y 12° fracciones I, II, III, IV y VI del Reglamento del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (D.O.F. 14/12/1999, reformado el 01/07/2002, 15/07/2004, 28/07/2004 y 07/09/2007); artículos 1°, 2°, 3°, 4°, 5° fracción V inciso a) sub inciso i), segundo guion, 16 fracciones I, II, III, IV y VI y 30 del Estatuto Orgánico del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (D.O.F. 27/12/1999, reformado el 10/10/2002, 29/07/2004, 04/08/2004 y 13/09/2007); artículos 1°, 3° y 5° inciso e) e i) y penúltimo párrafo del Acuerdo que delega facultades en los Directores Generales Adjuntos, Coordinador, Directores Divisionales, Titulares de las Oficinas Regionales, Subdirectores Divisionales, Coordinadores Departamentales y otros subalternos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. (D.O.F. 15/12/1999, reformado el 04/02/2000, 29/07/2004, 04/08/2004 y 13/09/2007).

Asimismo, el presente oficio se signa con firma electrónica avanzada (FIEL), con fundamento en los artículos 7° BIS 2 de la Ley de la Propiedad Industrial; 3° de su Reglamento, y 1° fracción III, 2° fracción V, 26 BIS y 26 TER del Acuerdo por el que se establecen los lineamientos para el uso del Portal de Pagos y Servicios Electrónicos (PASE) del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, en los trámites que se indican.

ATENTAMENTE
COORDINADOR DEPARTAMENTAL DE EXAMEN DE FORMA
OMAR SANTIAGO GALVEZ CASTILLO.
OSGC/RMRV/2017



MX/2017/79817

Arenal No. 550, Col. Pueblo de Santa María Tepepan, Del. Xochimilco, 16020, Ciudad de México
(55) 53340700 - www.gob.mx/impi

C. Artículos generados

C1. Artículo 1. “Human emotion detection based on a Smart-thermal system of thermographic images”.



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Infrared Physics & Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/infrared



Regular article

Human emotions detection based on a smart-thermal system of thermographic images



Irving A. Cruz-Albarran, Juan P. Benitez-Rangel, Roque A. Osornio-Rios, Luis A. Morales-Hernandez*

Mecatrónica/Facultad de Ingeniería, Campus San Juan del Río, Universidad Autónoma de Querétaro, Río Moctezuma 249, Col. San Cayetano, 76807 San Juan del Río, Querétaro, México

HIGHLIGHTS

- A study on thermal behavior of anger, disgust, fear, joy and sadness is carried out.
- A self-calibrated system to have the same thermal trend for each subject is proposed.
- A diagnostic of emotion through a top-down hierarchical classifier is done.
- Biomarkers are proposed through temperature changes.

ARTICLE INFO

Article history:
Received 17 August 2016
Revised 19 November 2016
Accepted 4 January 2017
Available online 11 January 2017

Keywords:
Infrared thermography
Emotion
Region of Interest
Diagnostic
Self-calibration and biomarker

ABSTRACT

This work presents a noninvasive methodology to obtain biomedical thermal imaging which provide relevant information that may assist in the diagnosis of emotions. Biomedical thermal images of the facial expressions of 44 subjects were captured experiencing joy, disgust, anger, fear and sadness. The analysis of these thermograms was carried out through its thermal value not with its intensity value. Regions of interest were obtained through image processing techniques that allow to differentiate between the subject and the background, having only the subject, the centers of each region of interest were obtained in order to get the same region of the face for each subject. Through the thermal analysis a biomarker for each region of interest was obtained, these biomarkers can diagnose when an emotion takes place. Because each subject tends to react differently to the same stimuli, a self-calibration phase is proposed, its function is to have the same thermal trend for each subject in order to make a decision so that the five emotions can be correctly diagnosed through a top-down hierarchical classifier. As a final result, a smart-thermal system that diagnose emotions was obtained and it was tested on twenty-five subjects (625 thermograms). The results of this test were 89.9% successful.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

C2. Artículo 2. “A methodology based on infrared thermography for the study of stress in hands of young people during the Trier Social Stress Test”.

Infrared Physics and Technology 93 (2018) 116–123



Contents lists available at ScienceDirect

Infrared Physics & Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/infrared



Regular article

A methodology based on infrared thermography for the study of stress in hands of young people during the Trier Social Stress Test



Irving A. Cruz-Albarran^a, Juan P. Benitez-Rangel^a, Roque A. Osornio-Rios^a,
Benjamin Dominguez-Trejo^b, David A. Rodriguez-Medina^b, Luis A. Morales-Hernandez^{a,*}

^a *Mechatronics/Engineering Faculty, Campus San Juan del Rio, Autonomous University of Queretaro, San Juan del Rio, Queretaro, Mexico*

^b *Postgraduate Studies Division, Psychology Faculty, National Autonomous University of Mexico, Mexico City, Mexico*

ARTICLE INFO

Keywords:

Infrared thermography
Stress
Region of interest
Colour pallet
Thermal index of stress

ABSTRACT







This work presents a non-invasive semiautomatic methodology through infrared thermography for the study of human stress in hands of young people (fingertips and palms) once the Trier Social Stress Test is completed. The regions of interest were the fingertips (these are influenced by the sympathetic nervous system) and the palms. The analysis of these parts of the hands was done through the thermal matrix, that is, at the temperature level. Once the analysis was made, significant differences were found between the pre-post test on the tips of the fingers, but not on the palms. A comparison between hands and a comparison between genders were made, however, no significant differences were found, which shows the thermal asymmetry of the body. With the differences found in the fingertips, a thermal index of emotions was proposed. For a better visualisation of the index, a colour palette for the ROI's was proposed; one for men and another for women, this was due to the fact that a higher basal temperature was found in men compared to women. The study was carried out on 30 men and 30 women.

C3. Artículo 3. “A new approach to obtain a colour palette in thermographic images”.

QUANTITATIVE INFRARED THERMOGRAPHY JOURNAL
<https://doi.org/10.1080/17686733.2018.1509199>



A new approach to obtain a colour palette in thermographic images

Irving A. Cruz-Albarran ^a, Juan P. Benitez-Rangel ^a, Roque A. Osornio-Rios ^a, Benjamin Dominguez-Trejo ^b, David A. Rodriguez-Medina ^b and Luis A. Morales-Hernandez ^a

^aMecatrónica/Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México; ^bDivisión de Estudios de Posgrado, Facultad de Psicología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

ABSTRACT

This work presents a methodology for automatic colour allocation in thermographic images which is based on two thermograms, one with an Iron colour palette for segmentation and the other in grayscale for thermal analysis through the thermal matrix. With the fusion of both procedures, a palette of colours image is obtained. The colour palette allows characterising the thermography in a controlled manner and gain a better interpretation of the colours. Likewise, the colour palette permits to work in temperature level. With this proposed methodology, it is possible to assign any colour desired. An experiment to induce human emotions (joy, disgust, anger, fear, and sadness) was carried out to prove the application of this proposed method. In a quantitative way, a thermal index of emotions that shows the emotion concerning the baseline was obtained, which correlates with the colours assigned to the new image. Each emotion was associated with one colour. The results attained from both the thermal index of emotions and the hue allocation show the applicability and validation of the proposed palette; thus, it could be employed in any application of thermographic analysis.

ARTICLE HISTORY

Received 3 October 2017
Accepted 4 August 2018

KEYWORDS

Colour palette; image processing; thermography; thermal index; emotions