

## $\mathcal{DIFU}_{100}ci$ @, Revista de Difusión Científica

### Ingeniería y Tecnologías

**Vol:** 19

Num: 1

Publicación: Enero - Diciembre 2025

**ISSN:** 2007-3585



#### **Directorio**

#### Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas"

Dr. Rubén de Jesús Ibarra Reyes, *Rector*Dr. Ángel Román Gutiérrez, *Secretario General*M.C. Hans Hiram Pacheco García, *Secretario Académico*Dr. Carlos Francisco Bautista Capetillo, *Coord. Investigación y Posgrado* 

#### Editor en Jefe

Víktor Iván Rodríguez Abdalá, Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)

#### **Editores Asociados**

Manuel Hernández Calviño, *Universidad de La Habana*, (Cuba) José Ricardo Gómez Rodríguez, *Universidad Autónoma de Zacatecas*, (México)

#### **Grupo Revisor**

Remberto Sandoval Aréchiga, Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)

Salvador Ibarra Delgado, Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)

Rodrigo Daniel Méndez Ramírez, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, (México)

Leonardo Acho Zuppa, Universidad Politécnica de Catalunya, (España)

Miguel Ándres, Universidad de Valencia, (España)

Germán Díaz Flores, Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)

Ramón Parra Michel, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, (México)

Leonel Soriano Equigua, Universidad de Colima, (México)

José Luis Álvarez Flores, Universidad de Colima, (México)

Fermín Marcelo Rubén Maciel Barbosa, Universidad de Colima, (México)

Francisco Rubén Castillo Soria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (México)

Cristian Eduardo Boyain y Goytia Luna, Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)

Juan Pablo Morales Álvarez, *Instituto Tecnológico de La Paz*, (México)

Daniel Armando Hirles Valles, *Instituto Tecnológico de La Paz*, (México)

Jaime Sánchez García, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, (México)

Héctor Alonso Guerrero Osuna, Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)

Ernesto Iván Sandoval García, Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)

Fabián García Vázquez, Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)

Jesús Antonio Nava Pintor, Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)

#### **Derechos reservados**

>0**⊘**000

#### **Editorial**

Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas"

#### Diseño de revista

Víktor Iván Rodríguez Abdalá José Ricardo Gómez Rodríguez

#### **Derechos Reservados**

Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas"

#### ISSN 2007-3585

DIFU100ci@ (léase difuciencia) es una publicación anual editada por la Universidad Autónoma de Zacatecas, "Francisco García Salinas", a través de la Unidad Académica de Ingenieráa Eléctrica. Jardín Juárez No. 147, Colonia Centro, Zacatecas, Zacatecas, C.P. 98000. Tel. (01 492) 925 6690.

ISSN: 2007-3585 otorgado por el Instituto Nacional de Derecho de Autor.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda extrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas" a través de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica.

http://www.uaz.edu.mx http://difu100cia.uaz.edu.mx difu100cia@uaz.edu.mx

Portada: Foto de Sora ChatGPT

Plantilla de revista: ElegantLaTeX

Plantilla de artículos: Wenneker Article

#### Carta del editor

Sirva la presente para informar una modificación sustancial en el modelo de publicación de Difu100ci@, la cual entrará en vigor a partir del presente año. Esta decisión responde al compromiso de la revista con la mejora continua, la adecuación a los ritmos institucionales y la promoción eficiente de la producción científica en el campo de la ingeniería y las tecnologías.



Con base en lo anterior, Difu100ci@ publicará sus artículos bajo la modalidad de volumen único anual con publicación continua, permitiendo la incorporación inmediata de los trabajos aprobados una vez concluido su proceso editorial.

El objetivo principal de este esquema es brindar una alternativa dinámica que responda a los tiempos de trabajo de las distintas universidades, centros de investigación y colaboradores, facilitando a las y los autores una vía más ágil para la difusión de sus resultados académicos.

Este nuevo formato no implica cambios en la rigurosidad del proceso editorial ni en la política de dictaminación por pares. Por el contrario, representa una mejora sustantiva en la visibilidad de los contenidos, reduce los periodos de espera entre aceptación y publicación, y se alinea con las mejores prácticas internacionales en materia de divulgación científica.

La revista mantendrá su compromiso con la calidad, la transparencia y el servicio a la comunidad científica, propiciando que la investigación se mantenga al alcance de quienes la generan, la consultan y la aplican.

Reiteramos nuestro agradecimiento por la confianza depositada en Difu100ci@ y les extendemos la más cordial invitación a continuar enviando sus contribuciones, participar como evaluadores y promover el uso de este espacio editorial entre sus redes académicas.

Víktor Iván Rodríguez Abdalá Editor en Jefe

## Índice general

Di	rectorio	1
De	erechos reservados	11
Ca	arta del editor	III ito 1
1.	Desarrollo de una aplicación computacional para visualizar y analizar datos del tratamiento con insulina en un adolescente con Diabetes Mellitus Tipo 1	1
2.	Desarrollo de un prototipo de geolocalización y procesamiento estadístico en tiempo real para la detección de impactos y volcaduras en automóviles	10

#### $\mathcal{DIFU}_{100}ci@$ Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías

Vol. 19, No. 1, Ene - Dic 2025 ISSN:2007-3585

Artículo arbitrado

Publicado: 23 de agosto de 2025



# Development of a computational application for visualizing and analyzing insulin treatment data in an adolescent with Type 1 Diabetes Mellitus

Desarrollo de una aplicación computacional para visualizar y analizar datos del tratamiento con insulina en un adolescente con Diabetes Mellitus Tipo 1

J.A. García-Rodríguez • \*1, Jorge I. Cuevas-Chávez • 1, Roberto Carlos Diaz Velazco • 1, Sofía Mireles-S. • 1, G.Y. Cortés-Solares • 1, and Cynthia Mejía • 1

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Tecnológico 100, Ciudad Guzmán, Municipio de Zapotlán el Grande, Jalisco, México, CP. 49100 {julio.gr, M22290910, M22290912, M22290908, M22290907, M22290909}@cdguzman.tecnm.mx

#### Abstract

In this manuscript, a computational application is developed to analyze the effect of *Lispro* and *Glargine* insulins in an adolescent living with T1DM, who used a FreeStyle® sensor over a 14-day monitoring period. The action of both insulins is estimated using pharmacokinetic profiles based on their respective dynamic mathematical models. The results revealed prolonged hyperglycemic episodes and potential inefficiencies in medication. The application aims to be a strategic computational tool for medical professionals in making decisions regarding diabetes management.

Keywords— Type 1 Diabetes Mellitus (T1DM), FreeStyle® sensor, Lispro insulin, Glargine insulin

#### Resumen

En este manuscrito se desarrolla una aplicación para analizar el efecto de las insulinas *Lispro* y *Glargina* en un adolescente que vive con DMT1 y usó un sensor FreeStyle<sup>®</sup> durante 14 días de experimentación. La acción de ambas insulinas se estima por la programación del perfil farmacocinético a través de su respectivo modelo matemático dinámico. En los resultados se identificaron episodios prolongados de hiperglucemia y posibles ineficiencias en la medicación. Esta aplicación pretende ser una herramienta computacional estratégica para los médicos especialistas en la toma de decisiones sobre el tratamiento de DMT1.

Palabras clave— Diabetes Mellitus Tipo 1 (DMT1), Sensor FreeStyle®, Insulina Lispro, Insulina Glargina

#### I. Introducción

a glucosa es una variedad de azúcar transportada a través de la sangre y sirve como energía para que las células realicen sus funciones biológicas normales. La glucosa es un carbohidrato simple que se encuentra naturalmente en muchas cosas que comemos. Además, el cuerpo humano puede producir glucosa descomponiendo

otros carbohidratos más complejos. El cerebro, los tejidos y los órganos del cuerpo dependen de esta sustancia como su principal fuente de energía. Sin embargo, los tejidos no pueden retener naturalmente la glucosa del torrente sanguíneo. Aquí funciona la hormona insulina que se produce en el páncreas, permitiendo que la glucosa entre en los tejidos y se utilice como energía. Este proceso biológico es extremadamente complejo. Por lo tanto, la insulina es fundamental para el control de la glucosa y

<sup>\*</sup>Autor de correspondencia

el consumo humano [1].

La Diabetes Mellitus (DM) es un padecimiento que se distingue por presentar niveles de glucosa en sangre crónicamente elevados, teniendo como síntoma principal la orina abundante, sed excesiva, pérdida de peso, entre otros. En esta enfermedad existe una deficiencia relativa o absoluta de secreción de insulina pancreática agotando los recursos para controlar el nivel de azúcar en sangre. Hay dos tipos principales de DM, la tipo 1 (DMT1) y la tipo 2 (DMT2). La DMT1 sucede porque el sistema inmunitario ataca y destruye la célula productora de insulina en los islotes de Langerhans del páncreas (déficit absoluto). En DMT2 el cuerpo no utiliza la insulina adecuadamente. Puede aparecer por causas relacionadas a la obesidad, estilo de vida sedentario o carga genética [2]. La DM es un grave problema de salud pública ya que conlleva a complicaciones de corto y largo plazo. La falta absoluta de insulina puede conducir a una situación de cetoacidosis diabética o a un coma hiperglucémico con una gran tasa de mortalidad. La DM es una de las principales causas de ceguera, insuficiencia renal, ataques cardíacos, accidentes cerebrovasculares y amputación de miembros inferiores. La mortalidad por cardiopatía isquémica es entre 2 y 4 veces superior a la de las personas no diabéticas [3].

Un análogo de insulina tiene el propósito de emular la función regulatoria que la insulina humana desempeña. La administración de un análogo de insulina se realiza típicamente mediante invecciones subcutáneas. Estas dosis son administradas antes de las ingestas de comidas para absorber la glucosa circulante en el torrente sanguíneo y regular los niveles después de la comida [4]. Existen dos tipos principales de insulina utilizada en el tratamiento de DM: la insulina de acción rápida y la insulina de acción prolongada [5], [6]. En los últimos años se han desarrollado insulinas de acción lenta mejoradas como la insulina Glargina que tiene un pico de acción de aproximadamente 4 a 7 horas y una duración total de 16 a 22 horas después de la administración [7], [8]. La insulina Lispro es uno de los análogos más comúnmente usados para obtener una acción rápida. Suele invectarse entre 20 y 30 minutos antes de la comida y su acción máxima ocurre entre 1 v 2 horas después de la invección [9]. Las dosis de insulina son prescritas por el médico basándose en el peso corporal del paciente y generalmente oscila entre 0.4 y 1.0 unidades por kilogramo. La combinación suele ser del 50 % de insulina de acción rápida y el 50 % de insulina de acción prolongada [10]. Las insulinas Glargina y Lispro pueden administrarse individualmente o combinadas para imitar el aumento natural de la insulina pancreática después de comer y mantener una concentración basal

En este trabajo se desarrolla una aplicación utilizando

Matlab<sup>®</sup> App Designer para la visulización de seis variables cruciales en el control de la glucemia. Estas variables se basan en datos experimentales recopilados de un adolescente real de 15 años de edad, que vive con DMT1. Se obtuvo el consentimiento informado por escrito tanto de los padres como del propio adolescente para utilizar un sensor de glucosa FreeStyle® durante un periodo de 14 días. El equipo de investigación registró información detallada, incluyendo todas las comidas con sus respectivos horarios, el tipo de insulina administrada (Lispro o Glargina), la cantidad de insulina, los horarios de las invecciones y los sintomas generales, a lo largo del experimento. La aplicación computacional extrae esta información de una base de datos creada y genera gráficos representativos de las variables esenciales para el día seleccionado por el usuario. Las variables que se muestran incluyen el nivel de glucosa, la ingesta de carbohidratos, las unidades de insulina Glargina y Lispro, así como la acción de ambas insulinas. Tal acción se estima por la programación del perfil farmacocinético a través de su respectivo modelo matemático dinámico, desarrollados a detalle en la sección III. El objetivo principal de esta interfaz gráfica es proporcionar una herramienta útil para las personas que viven con DMT1. Además, se busca brindar un respaldo confiable a los médicos especialistas en DMT1, permitiéndoles tomar decisiones más informadas sobre el ajuste de la medicación y la gestión del tratamiento mediante un análisis preciso del comportamiento glucémico facilitado por esta interfaz.

#### II. Estado del arte

Es un hecho que el tratamiento de la DMT1 ha avanzado significativamente mediante el uso de tecnologías digitales como sensores de monitoreo continuo de glucosa (MCG), aplicaciones móviles y herramientas basadas en inteligencia artificial. Aún así, los pacientes y médicos continúan enfrentando desafíos para integrar y visualizar múltiples fuentes de información clínica como niveles de glucosa, dosis de insulina e ingesta de carbohidratos de manera clara y útil para la toma de decisiones terapéuticas.

Durante las últimas décadas, se han desarrollado modelos matemáticos precisos que representan el comportamiento dinámico del sistema glucosa-insulina. Destacan los modelos propuestos por Dalla Man *et al.* [11] para simular la absorción gastrointestinal de carbohidratos y la respuesta a la insulina del cuerpo humano [12]. Así como el modelo compartimental para la absorción subcutánea de insulina Glargina desarrollado por Schiavon *et al.* [13]. Estos modelos han servido como base para simulaciones fisiológicas y para el diseño de algoritmos en el ámbito clínico y experimental.

La comunidad científica ha comenzado a explorar el desarrollo de herramientas computacionales con capacidad predictiva, empleando algoritmos de aprendizaje automático como clasificadores RF (del inglés: Random Forest), máquinas de soporte de vectores (SVR, del inglés: Support Vector Machine) o redes neuronales artificiales (ANN, del inglés: Artificial Neural Network) con el fin de anticipar episodios de hipoglucemia o hiperglucemia [14], [15], [16]. Estas iniciativas suelen apoyarse en datos simulados o en bases de datos clínicos históricos y buscan generar sistemas personalizados de apoyo a decisiones médicas. Aunque muchos de estos desarrollos se encuentran en fases de prueba o validación, representan un paso importante hacia soluciones predictivas aplicables en entornos reales. No obstante, pocas propuestas han logrado integrar en una misma plataforma visualización de datos reales, modelos dinámicos de absorción de insulina y registros detallados de ingesta alimenticia. Esta integración resulta crucial para contextualizar los niveles de glucosa en función del tratamiento administrado y los hábitos alimenticios diarios de los pacientes DMT1.

#### III. Materiales y métodos

En esta sección se describen a detalle los materiales y métodos que conforman esta propuesta.

#### III.1. Monitoreo continuo de glucosa (MCG)

Uno de los principales objetivos de investigación en DM ha sido el de proporcionar monitorización continua de la glucosa para que la terapia con insulina se mantenga en niveles normales la mayor cantidad de tiempo posible. Los sensores de glucosa pueden colocarse por vía subcutánea hasta 14 días y se comunican de forma inalámbrica con dispositivos inteligentes como los smartphones [17]. El sensor de glucosa FreeStyle® contiene un transmisor y generalmente se inserta mediante un aplicador en la parte posterior y superficial del brazo. El sensor FreeStyle® y el aplicador pueden verse en la Figura 1. La cánula que se inserta mide 0.4 milímetros de ancho y 5 milímetros de largo. El sensor se comunica de forma inalámbrica con el medidor y la calibración es automática. Las lecturas de glucosa se obtienen sosteniendo el medidor a 4 centímetros del sensor o mediante una aplicación en un teléfono móvil. Los datos se pueden descargar a una computadora [18]. En el diagrama de la Figura 2 se muestra cómo el sensor de glucosa queda pegado en la piel y la cánula es capaz de llegar al fluido intersticial para medir la cantidad de glucosa proveniente del torrente sanguíneo.



**Figura 1:** Fotografía del Sensor FreeStyle<sup>®</sup> dentro del aplicador.

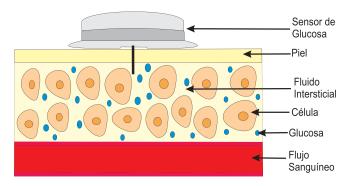


Figura 2: Diagrama del sensor de glucosa sobre el tejido subcutáneo.

#### III.2. Modelos de absorción subcutánea de insulina

Los modelos de absorción subcutánea de insulina de acción prolongada (del inglés: Long Acting) y de acción rápida (del inglés: Short Acting) fueron obtenidos de los trabajos Michele Schiavon et al. en [6] y [13], respectivamente. Estos estudios detallan los modelos de cada tipo de insulina y explican cómo son aplicables a personas que usan insulina.

#### III.3. Acción rápida

La insulina de acción rápida se utiliza para regular los niveles de glucosa en sangre justo después de las comidas. Ésta se absorbe de manera rápida en el tejido subcutáneo y su perfil de absorción se representa mediante el gráfico por compartimentos de la Figura 3. El modelo describe cómo se absorbe la insulina rápida en el cuerpo después de una inyección subcutánea. El trabajo de Michele Schiavon et al. [13] argumenta que en su modelo incluye un retraso de promedio de 7.6 minutos antes de que la insulina comience a distribuirse. Una parte de la insulina pasa directamente al plasma y otra parte va a un segundo compartimento antes de llegar al plasma. Este enfoque logró representar con precisión cómo varía la insulina en la sangre tras la inyección.

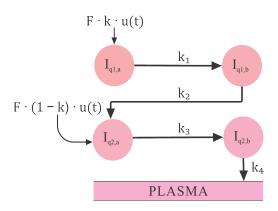


Figura 3: Modelo de absorción de insulina de acción rápida.

#### III.4. Acción prolongada

La insulina de acción prolongada es un tipo de insulina diseñada específicamente para liberarse de manera más lenta hacia el torrente sanguíneo. Ayuda a regular la glucosa durante las comidas del día y el periodo nocturno. El modelo de insulina de acción prolongada publicado por Michele Schiavon *et al.* en [6] es lineal y consta de dos compartimentos. Este modelo matemático representa cómo la insulina glargina en sus formulaciones Gla-100 y Gla-300 se disuelve primero en el sitio de inyección y luego se distribuye entre dos compartimentos antes de llegar al plasma. El modelo se representa en la Figura 4 donde se pueden ver las etapas representadas por ecuaciones matemáticas.

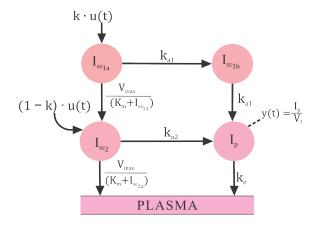


Figura 4: Modelo de absorción de insulina de acción prolongada.

#### IV. Resultados

La obtención de datos de un sensor de glucosa Freestyle<sup>®</sup> puede realizarse mediante la aplicación

Freestyle Libre o a través de la plataforma LibreView de Abbott<sup>®</sup> exclusiva para usuarios de sensores.

### IV.1. Monitoreo continuo de glucosa en un adolescente con DMT1

El grupo de investigación que desarrolla el presente artículo obtuvo el consentimiento informado por escrito tanto de los padres como del propio adolescente para utilizar un sensor de glucosa FreeStyle<sup>®</sup> durante un periodo de 14 días. Se coloca el sensor en la parte trasera del brazo izquierdo del adolescente que vive con DMT1, como se presenta en la Figura 5.



**Figura 5:** Colocación del sensor Freestyle<sup>®</sup> en el brazo izquierdo del adolescente DMT1.

El sensor se calibrará dentro de los primeros 60 minutos de manera automática. Después estará listo para monitorear el nivel glucosa en el fluido intersticial del adolescente. El monitoreo continuo de glucosa se lleva a cabo durante los próximos 14 días y los datos se suben automáticamente a la plataforma LibreView con almacenamiento en la nube. Los datos están disponibles para descargar en formato .csv.

#### IV.2. Conteo de carbohidratos

Una persona que vive con DM debe seguir un plan de alimentación equilibrado y personalizado. Su estilo de vida y cuidados médicos son extremadamente importantes para mantenerse dentro de un régimen de control. Es crucial cuantificar la ingesta de alimentos, en especial la de los carbohidratos. Todo esto, en conjunto con la actividad física diaria puede ayudar a controlar los niveles de glucosa en la sangre, optimiza la sensibilidad a la insulina y mejora el control de la diabetes, manteniendo un peso saludable. El adolescente

elaboró un registro manual de todos los alimentos consumidos durante los días de experimentación. El Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes (SMAE) es una guía que agrupa los alimentos que contienen carbohidratos, proteínas o grasas. Sirve para ayudar a las personas, especialmente con diabetes, a planear sus comidas [19]. En el conteo de carbohidratos, el SMAE indica cuánta cantidad de un alimento contiene más o menos 15 gramos de carbohidratos. De esta manera, se hace el conteo de carbohidratos por comida y por día usando la guia SMAE. Como resultado se obtiene una base de datos que contiene todos los alimentos consumidos y la cantidad de carbohidratos correspondiente en los 14 días de experimentación. Para este manuscrito, solamente se presentan los datos de dos días que corresponden al 20 de Diciembre de 2023 y 24 de Diciembre de 2023 en las Tablas 1 y 2, respectivamente. Se seleccionaron estos días por evidenciar con mayor claridad la interacción entre glucosa, insulina y carbohidratos en comparación con los demás.

Tabla 1: Conteo de carbohidratos. Día 20 de Diciembre de 2023.

Día 1	Alimentos	Carbohidratos (gramos)
Desayuno	2 Molletes de frijoles con queso, 1 taza de papaya y calabacitas.	56.3
Comida	1 Porción de carne asada con chorizo, 1 taza de frijoles y 2 tortillas de maiz.	53.6
Cena	1 Taza de cereal y 1 taza de leche.	61.0
Consumo Total		170.9

Tabla 2: Conteo de carbohidratos. Día 24 de Diciembre de 2023.

Día 2	Alimentos	Carbohidratos (gramos)
Desayuno	1 Plato de menudo con 2 tortillas.	37.1
Comida	Picadillo con romeritos y 1 tortilla.	23.6
Cena	2 tamales de carne con 1 vaso de atole.	113.0
Consumo Total		173.7

#### IV.3. Desarrollo de la aplicación y base de datos

Se desarrolló una aplicación con el objetivo de procesar los datos obtenidos por el sensor de glucosa y poder visualizar las mediciones a cada minuto, junto con la acción de las inyecciones de insulina y el consumo de carbohidratos.

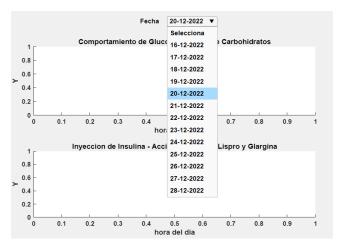
Se obtuvieron las mediciones de glucosa del paciente durante un periodo de 14 días, con un tiempo de muestreo de 15 minutos. Para adquirir el nivel de glucosa en cada minuto del día se utilizó el método de interpolación Spline cúbico. A través de esta técnica se pueden construir funciones polinómicas de tercer grado entre cada par de puntos adyacentes, garantizando que dichas funciones sean suaves y continuas en sus primeras y segundas derivadas. De esta manera, se estimaron los valores faltantes para la aproximación de todos los datos consecutivos. Se realizó el procesamiento de datos en Matlab<sup>®</sup>, importando los datos obtenidos por el sensor desde excel e interpolándolos con el comando *spline*.

#### IV.4. Interfaz gráfica

La aplicación se creó en un entorno de desarrollo interactivo llamado Matlab<sup>®</sup> App Designer, el cual está integrado en el editor de este software. Este entorno permite diseñar de manera sencilla interfaces gráficas de usuario y programar el comportamiento funcional de la aplicación en un mismo espacio. Se opta por usar Matlab<sup>®</sup> App Designer debido a su compatibilidad directa con funciones matemáticas y de procesamiento de datos, así como por su eficiencia para integrar visualizaciones interactivas con rutinas de análisis numérico.

Como se puede observar en la Figura 6, se muestra inicialmente la interfaz gráfica. En esta, podemos apreciar, en primera instancia, un selector que despliega los días de monitoreo de glucosa del paciente DMT1. Dentro de la ventana de la Figura 6, están dos subgráficas (superior e inferior) que proporcionan información adicional sobre el comportamiento de la glucosa del paciente. En la superior se hace referencia al comportamiento de la glucosa e ingesta de alimentos. En la inferior se despliega la acción de las insulinas Lispro y Glargina, así como a las inyecciones de insulina. Ambas subgráficas tienen un doble eje vertical (eje Y), los cuales presentan dos escalas de información útil. Además, el eje horizontal (eje X) representa la hora del día. Cuando se selecciona una fecha específica, como el 20 de diciembre de 2022, se despliegan en los rectángulos las curvas de información, tal como se muestra en la Figura 7. En la subgráfica superior, se despliega el nivel de glucosa en (mg/dL) en color rosa y cómo cambia su comportamiento a lo largo de las horas del día. También se puede observar en color rojo la ingesta de carbohidratos (CH) que el paciente consumió en una hora específica. El usuario,

que podría ser un médico, puede interpretar los datos de la siguiente manera: aproximadamente a las 7:30 horas, el paciente ingirió su desayuno con un contenido de carbohidratos de alrededor de 55 gramos de CH, lo cual provocó un ligero incremento en la dinámica de la glucosa (curva rosa) del paciente. En la subgráfica inferior de la Figura 7, se muestran diferentes curvas del comportamiento de las inyecciones de insulina y las dosis aplicadas. En el impulso de color verde, se puede apreciar la inyección de la dosis de insulina Glargina. La curva punteada color verde es su acción correspondiente. Es decir, la interfaz calcula la curva de acción de la insulina como volumen en miliunidades por mililitro (mU/ml) usando como dato de entrada u(t) la cantidad inyectada por el paciente. Este cálculo se lleva a cabo por



**Figura 6:** Ventana de la aplicación computacional para seleccionar el día de visualización.

la programación interna de las ecuaciones diferenciales que describen el modelo de absorción prolongada de la Figura 4. Es fácil ver cómo el efecto de la Glargina se prolonga a lo largo del día, durante casi 16 horas. Por otro lado, el impulso de color azul muestra las inyecciones de insulina Lispro. A diferencia de la Glargina, la insulina Lispro se aplica varias veces a lo largo del día, normalmente antes de cada comida. La curva punteada azul describe el comportamiento dinámico en volumen de insulina en (mU/ml). De igual forma, por el modelo de absorción rápida de la Figura 3 explicado en la sección 2. Puede observarse fácilmente cómo el efecto dura menos tiempo que la Glargina, por este motivo las inyecciones de acción rápida son usadas para compensar la comida y mantener la glucosa controlada. De nuevo, un médico puede interpretar los datos de la siguiente manera: se inyecta la insulina Glargina aproximadamente a las 7:15 horas, la concentración de insulina empieza a elevarse lentamente alcanzando el pico máximo a las 13:00 horas. La mínima concentración de Glargina es a las 24:00 horas. Respecto a la acción de Lispro tiene un máximo a las

8:45 horas y el mínimo a la 13:30 horas. Puede verse claramente cómo la glucosa desciende rápidamente de 175 mg/dL a las 8:45 horas a 70 mg/dL a las 9:50 horas, por la acción de la *Lispro*. Este comportamiento es similar para la comida de las 13:30 horas y la cena de las 20:30 horas. La insulina de acción rápida *Lispro* calculada por la interfaz, describe de manera precisa la compensación en la glucosa real monitoreada contínuamente por el sensor. Mientras que la *Glargina* ofrece estabilidad de glucosa con menor impacto durante todo el día.

En la Figura 8 se observa la ventana para el día 24 de diciembre de 2022. Pueden distinguirse 4 comidas, 9:00, 13:00, 17:00 y 20:45 horas. Respecto a las insulinas, el adolescente se invectó 45 Unidades de Glargina a las 8:50 horas, 8 Unidades de Lispro a las 8:55 horas, 8 Unidades a las 16:55 horas y 10 Unidades a las 20:40 horas. En este día de experimentación puede verse claramente que la glucosa tuvo periodos prolongados en hiperglucemia, en comparación con la del 20 de diciembre. Es interesante evaluar cómo la dinámica glucémica del 24 de Diciembre tiene pendientes descendentes y ascendentes muy pronunciadas. Los niveles de hiperglucemia alcanzados este día son de riesgo y evidentemente las dosis de insulina no son suficientes para controlar al adolescente. Por lo tanto, la información que proporciona la interfaz que evalua el efecto de dos tipos de insulina es completamente útil para que el médico especialista sugiera ajustes en la medicación de los diabéticos y de esta manera evitar escenarios de riego que puedan conducir a complicaciones más graves.

#### V. Discusión

La propuesta presentada en este artículo constituye un avance relevante en el desarrollo de herramientas computacionales para la gestión personalizada de la DMT1. A diferencia de las soluciones que se basan sólo en predicción y simulación, la aplicación de este manuscrito se centra en la integración visual de datos reales de un paciente, lo que la convierte en una herramienta interpretativa. Con la referencia de los modelos matemáticos propuestos por Schiavon et al. [6], [13] se logró estimar de manera dinámica la acción farmacocinética de las insulinas Lispro y Glargina. Esta estimación fue representada de forma visual junto con variables esenciales como el nivel de glucosa, la ingesta de carbohidratos y las dosis administradas, lo que facilita el análisis de la respuesta metabólica de una persona que vive con DMT1. La utilidad de esta integración se evidenció en los resultados presentados. Esto es, el día 24 de diciembre, donde se observaron prolongados episodios de hiperglucemia, la visualización permitió identificar rápidamente posibles fallos en la

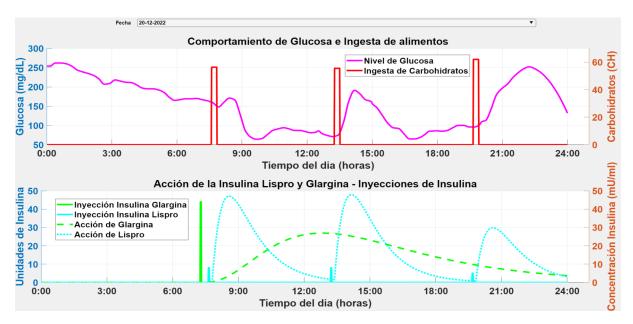


Figura 7: Ventana de la aplicación computacional que describe la dinámica completa de un adolescente DMT1 para el día 20 de diciembre de 2022.

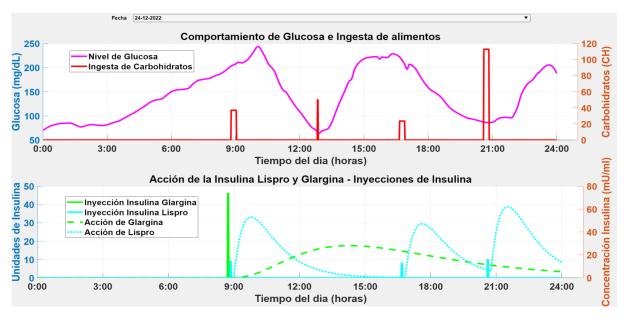


Figura 8: Ventana de la aplicación computacional que describe la dinámica completa de un adolescente DMT1 para el día 24 de diciembre de 2022.

estrategia de tratamiento. Esto es de gran valor para el profesional médico encargado o endocrinólogo. Este tipo de análisis no sería posible sin una representación fisiológica de todos los factores que intervienen en el control glucémico. Desde el punto de vista técnico, el uso de herramientas matemáticas para tratar los datos de glucosa y la implementación de modelos fisiológicos validados ofrece una aproximación interesante para la gestión de la enfermedad. Además, el desarrollo mediante MATLAB® App Designer garantiza una interfaz

robusta, clara y funcional, con enfoque en la usabilidad clínica. Los resultados obtenidos son pertinentes para avanzar hacia desarrollos computacionales enfocados en el análisis personalizado y la representación visual de variables fisiológicas. La propuesta que desarrolla este manuscrito puede fortalecer la toma de decisiones médicas mediante el análisis estructurado de datos reales.

#### VI. Conclusiones

En el presente artículo se desarrolló una aplicación computacional orientada a la visualización interpretación de datos de interés en un adolescente que vive con DMT1. A partir de información recolectada mediante un sensor FreeStyle® durante un periodo de 14 días, se integraron distintas etapas de procesamiento, como el análisis de datos de glucosa, el conteo de carbohidratos, la implementación de modelos dinámicos de la acción de la insulina y el diseño de una interfaz gráfica interactiva en MATLAB® App Designer. La herramienta propuesta permite representar de forma conjunta seis variables esenciales para el control glucémico, facilitando una interpretación visual del tratamiento aplicado y del comportamiento metabólico diario del paciente DMT1. El uso de modelos matemáticos fisiológicos validados, junto con datos reales del paciente, permite que la aplicación proporcione información de gran utilidad para el profesional médico, facilitando un análisis estructurado y personalizado del tratamiento. Los trabajos futuros de esta propuesta se orientan hacia plataformas móviles que permitan su implementación en contextos clínicos reales. Asimismo, se plantea incorporar funcionalidades predictivas mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático, así como la posibilidad de adaptar el sistema a otros perfiles de pacientes y a nuevas variables clínicas como actividad física o signos vitales. Estas mejoras podrían fortalecer el valor clínico de la herramienta y su impacto en la toma de decisiones médicas informadas.

#### Referencias

- [1] Steven E. Kahn, Mark E. Cooper y Stefano Del Prato. «Pathophysiology and treatment of type 2 diabetes: Perspectives on the past, present, and future». English. En: *The Lancet* 383.9922 (2014), págs. 1068-1083. ISSN: 0140-6736. DOI: 10.1016/S0140-6736(13)62154-6.
- [2] Nicole C. Foster et al. «State of type 1 diabetes management and outcomes from the T1D Exchange in 2016-2018». En: *Diabetes Technol. Ther.* 21.2 (2019), págs. 66-72.
- [3] American Diabetes Association. «Introduction: Standards of Medical Care in Diabetes-2020». En: Diabetes Care 43.Supplement\_1 (dic. de 2019), S1-S2. ISSN: 0149-5992. DOI: 10.2337/dc20-Sint.eprint: https://diabetesjournals.org/care/article-pdf/43/Supplement\\_1/S1/551683/dc20sint.pdf. URL: https://doi.org/10.2337/dc20-Sint.

- [4] Lefever E, Vliebergh J y Mathieu C. «Improving the treatment of patients with diabetes using insulin analogues: current findings and future directions». En: *Expert Opinion on Drug Safety* 20.2 (2021), págs. 155-169.
- [5] Hanne Haahr y Tim Heise. «Fast-acting insulin aspart: a review of its pharmacokinetic and pharmacodynamic properties and the clinical consequences». En: *Clinical Pharmacokinetics* 59 (2020), págs. 155-172.
- [6] Michele Schiavon et al. «Modeling subcutaneous absorption of long-acting insulin glargine in type 1 diabetes». En: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 67.2 (2019), págs. 624-631.
- [7] Hirsch Irl B. et al. «The evolution of insulin and how it informs therapy and treatment choices». En: *Endocrine reviews* 41.5 (2020), págs. 733-755.
- [8] Owens David R et al. «Clinical relevance of pharmacokinetic and pharmacodynamic profiles of insulin degludec (100, 200 U/mL) and insulin glargine (100, 300 U/mL)—a review of evidence and clinical interpretation». En: *Diabetes & Metabolism* 45.4 (2019), págs. 330-340.
- [9] Dene Simpson et al. «Insulin lispro: a review of its use in the management of diabetes mellitus». En: *Drugs* 67 (2007), págs. 407-434.
- [10] Melo K.F.S. et al. «Short-acting insulin analogues versus regular human insulin on postprandial glucose and hypoglycemia in type 1 diabetes mellitus: a systematic review and meta-analysis». En: Diabetology & metabolic syndrome 11.1 (2019), págs. 1-13.
- [11] C. Dalla Man, M. Camilleri y C. Cobelli. «A System Model of Oral Glucose Absorption: Validation on Gold Standard Data». En: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 53.12 (2006), págs. 2472-2478. DOI: 10.1109/TBME. 2006.883792. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/4015600 (visitado 10-10-2024).
- [12] Chiara Dalla Man, Robert A. Rizza y Claudio Cobelli. «Meal Simulation Model of the Glucose-Insulin System». En: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 54.10 (2007), págs. 1740-1749. DOI: 10.1109/TBME.2007.893506. URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/4303268/(visitado 10-10-2024).
- [13] Michele Schiavon, Chiara Dalla Man y Claudio Cobelli. «Modeling subcutaneous absorption of fast-acting insulin in type 1 diabetes». En: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 65.9 (2017), págs. 2079-2086.

- [14] Maximilian Reymann et al. «Blood glucose level prediction based on support vector regression using mobile platforms». En: vol. 2016. Ago. de 2016, págs. 2990-2993. DOI: 10 . 1109 / EMBC . 2016.7591358.
- [15] Juan Li y Chandima Fernando.

  «Smartphone-based personalized blood glucose prediction». En: ICT Express 2.4 (2016). Special Issue on Emerging Technologies for Medical Diagnostics, págs. 150-154. ISSN: 2405-9595. DOI: https://doi.org/10.1016/j.icte.2016.10.001. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959516301126.
- [16] Josep Vehí et al. «Prediction and prevention of hypoglycaemic events in type-1 diabetic patients using machine learning». En: Health Informatics Journal 26.1 (2020). PMID: 31195880, págs. 703-718. DOI: 10.1177/1460458219850682. eprint: https://doi.org/10.1177/1460458219850682. URL: https://doi.org/10.1177/1460458219850682.
- [17] David C Klonoff, David Ahn y Andjela Drincic. «Continuous glucose monitoring: a review of the technology and clinical use». En: *Diabetes Research and Clinical Practice* 133 (2017), págs. 178-192.
- [18] Ayman A Al Hayek, Asirvatham A Robert y Mohamed A Al Dawish. «Acceptability of the FreeStyle libre flash glucose monitoring system: the experience of young patients with type 1 diabetes». En: Clinical Medicine Insights: Endocrinology and Diabetes 13 (2020), pág. 1179551420910122.
- [19] Ana B. Pérez Lizaur et al. *Sistema mexicano de alimentos equivalentes*. Cuadernos De Nutrición (Fomento De Nutrición y Salud), 2014. ISBN: 9786070079283.

 $\mathcal{DIFU}_{100}ci$  Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías Vol. 19, No. 1, Ene - Dic 2025

ISSN:2007-3585 Artículo arbitrado

Publicado: 27 de octubre de 2025



# Development of a real-time geolocation and statistical processing prototype for detecting impacts and rollovers in automobiles

Desarrollo de un prototipo de geolocalización y procesamiento estadístico en tiempo real para la detección de impactos y volcaduras en automóviles

Sergio Daniel Rodríguez Suárez 🎳 1, Víktor Iván Rodríguez Abdalá 🐧 1, Salvador Ibarra Delgado 🐧 1, José Ricardo Gómez Rodríguez 🐧 1, Cristian Eduardo Boyain y Goytia Luna 🐧 1, and Fermín Marcelo Rubén Maciel Barboza 🐧

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica,
Posgrado en Ingeniería para la Innovación Tecnológica,
Carretera Guadalajara-Zacatecas, Campus Siglo XXI, La Escondida, Zacatecas, Zacatecas, México, 98160.
{sdanielrs,abdala,sibarra,jrgrodri,cristian.boyain}@uaz.edu.mx
<sup>2</sup> Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Carretera Colima-Coquimatlán, Coquimatlán, Colima, México, 28400.
fermin\_maciel@ucol.mx

#### **Abstract**

Impact and rollover detection systems are essential for an immediate response to accidents, but not all vehicles incorporate them. This work presents a prototype based on descriptive statistics programmed in a microcontroller with sensors for geolocation and event detection. Laboratory tests were carried out under normal and impact conditions, which allowed to distinguish events. The results demonstrate that the system identifies them, offering a viable solution.

Keywords— Vehicle impacts, vehicle rollovers, descriptive statistics, embedded systems

#### Resumen

Los sistemas de detección de impactos y volcaduras son esenciales para una respuesta inmediata ante accidentes, pero no todos los vehículos los incorporan, este trabajo presenta un prototipo basado en estadística descriptiva programada en un microcontrolador con sensores de geolocalización y detección de eventos, se realizaron pruebas de laboratorio en condiciones normales y de impacto, lo que permitió distinguir los eventos, los resultados demuestran que el sistema los identifica, ofreciendo una solución viable.

Palabras clave— Impactos vehiculares, volcaduras vehiculares, estadística descriptiva, sistemas embebidos

#### I. Introducción

l incremento significativo del parque vehicular y el uso intensivo de los vehículos en las organizaciones, tanto en funciones administrativas como en actividades operativas, ha dado lugar también a tener

un mayor número de incidentes automovilísticos, desde fallas mecánicas, hasta accidentes durante los recorridos, los cuales deben ser atendidos de manera inmediata. En virtud de que la atención a los afectados es tardía, hace que las organizaciones realicen costosas erogaciones para atender las consecuencias, además de verse afectadas las funciones de la misma [1].

<sup>\*</sup>Autor de correspondencia

En estudios sobre accidentes automovilísticos [2, 3, 4] se ha evidenciado que de 2010 a 2019, el número de personas fallecidas y heridas graves en accidentes ha disminuido, observándose que esto se atribuye a una atención más rápida y a las mejoras en los sistemas de seguridad vehicular con que están dotados. Para responder rápidamente a un incidente, se debe conocer la ubicación del vehículo, así como el estado en que se encuentra, para lo cual, estos sistemas proporcionan dicha información, siendo cada vez más comunes en los vehículos modernos, sin embargo, no todos los vehículos se encuentran equipados con ellos, siendo necesario equipar a los que no los tienen.

Los impactos vehiculares son aquellos eventos dinámicos resultantes de la colisión de un automóvil, con un objeto fijo u otro vehículo en movimiento, caracterizado por cambios abruptos de aceleración o desaceleración. Para una volcadura, el vehículo es considerado un cuerpo sólido con un marco de referencia, empleándose el marco de referencia vehicular ISO 8855 [5], que define un eje longitudinal X, un eje lateral Y, así como un eje vertical Z, como se muestra en la Fig. 1. Se considera una volcadura cuando el giro del vehículo en alguno de los ejes X o Y sobrepasa un umbral.

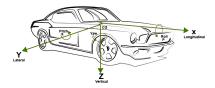


Figura 1: Vehículo sobre marco de referencia ISO 8855

La detección de impactos y volcaduras vehiculares es fundamental para agilizar la respuesta ante accidentes, los sistemas embebidos, que integran sensores inerciales y algoritmos en microcontroladores, ofrecen soluciones compactas y prácticas para esta tarea, además, su demanda crece constantemente debido a la necesidad de mejorar la seguridad.

Con la finalidad de integrar en un vehículo, que carece del sistema de detección, un sistema embebido de detección, que además no interfiera con los sistemas que ya posee, se diseñó un dispositivo embebido, de bajo costo, que detecta eventos de impacto y volcadura, mediante el análisis estadístico en tiempo real del comportamiento dinámico del vehículo, este se diferencia de los sistemas existentes al integrar en un solo dispositivo el procesamiento y el sensado.

Este artículo se estructura de la siguiente forma: la Sección II presenta el panorama de la investigación, la Sección III describe el desarrollo de un nodo de detección, la Sección IV muestra el modelo del sistema y finalmente las secciones V y VI exponen los resultados obtenidos y las conclusiones.

#### II. Panorama de investigación

De acuerdo con [6], la fabricación de automóviles en México se ha incrementado y por ende la necesidad de contar con dispositivos tecnológicos para mejorar la seguridad de los mismos [7], por lo cual, gracias a las capacidades de los sensores actuales y a un mayor procesamiento computacional en dispositivos de menor tamaño, se puede contar con sistemas embebidos para obtener la ubicación y detectar el comportamiento dinámico del vehículo.

La ubicación de los vehículos es importante para las organizaciones, la manera de realizarlo es diverso y se apoya de los avances tecnológicos existentes [8], entre los que se pueden observar: la Identificación por Radio Frecuencia (RFID, siglas en inglés de Radio Frequency Identification), la ubicación mediante Redes Móviles Celulares y el uso del Sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS, siglas en inglés de Global Navigation Satellite System), siendo el sistema GNSS el de mayor tendencia.

La detección de impactos y volcaduras en automóviles es un aspecto de seguridad reconocido como un tema relevante [9], existiendo en la actualidad directivas y objetivos que las empresas armadoras de vehículos deben cubrir y los países deben supervisar que se adopten, a fin de apegarse a los objetivos mundiales para incrementar la seguridad en los automóviles y de esta manera disminuir los daños que las personas sufren en los accidentes [7].

En [10, 11, 12, 13, 14] se estudia el uso de GNSS para determinar la ubicación de un vehículo y en [15, 16, 17] se han estudiado los sensores inerciales para obtener el comportamiento de la dinámica del vehículo para determinar eventos como impactos y vuelcos.

A partir del análisis de las fuentes consultadas y el criterio de costo-beneficio, se seleccionó el microcontrolador ESP32, junto con el receptor satelital GPS NEO-6M, la unidad de medición inercial MPU-9250, además de un algoritmo de detección basado en estadística descriptiva, con los cuales es posible construir un nodo para determinar la ubicación de un vehículo y detectar eventos como impactos y volcaduras [18].

#### III. Diseño del Nodo de detección

La arquitectura propuesta para el nodo se basa en un microcontrolador ESP32, el receptor GPS NEO-6M y el sensor inercial MPU-9250. El ESP32 es el núcleo de procesamiento en un Sistema en Chip (SoC, siglas en inglés de System on a Chip) que incorpora un microprocesador Tensilica Xtensa LX6 de dos núcleos, es un dispositivo programable en múltiples plataformas de desarrollo, una de las presentaciones más utilizada es el ESP32 Devkit [19], la selección de este dispositivo destaca frente a

otros microcontroladores por su equilibrio entre potencia, conectividad y bajo costo.

El receptor satelital GPS NEO-6M es adoptado por su manejo sencillo y funcionalidad adecuada, incorpora un chip de posicionamiento u-blox 6 de 50 canales y antena, proporciona tramas NMEA (siglas en inglés de National Marine Electronics Association) con los datos de ubicación, se conecta al microcontrolador por el puerto UART.

El sensor inercial MPU-9250 es un sensor compuesto por un acelerómetro y giroscopio de 3 ejes, útil para aplicaciones de navegación inercial y medición de comportamiento dinámico, se conecta al microcontrolador por el puerto I2C [20].

El desarrollo del nodo comprende el obtener las coordenadas de ubicación en latitud y longitud, así como medir la aceleración lineal y velocidad angular en los ejes X,Y y Z, datos con los cuales se realiza el análisis estadístico para determinar los eventos de impacto y volcadura. En la Fig. 2 se muestra la interconexión de los dispositivos.

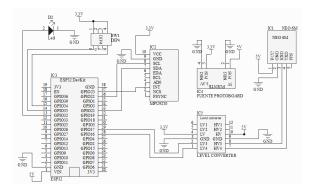


Figura 2: Diagrama de conexión

La programación del nodo se realiza utilizando FreeR-TOS, el cual es un sistema operativo de tiempo real diseñado para sistemas embebidos, su gestión de procesos permite la ejecución concurrente de tareas, además de la comunicación entre procesos y manejo de recursos.

Para efectuar las pruebas y mediciones se utilizó un vehículo a escala 1:12, de radio control, con suspensión y control de dirección, como el que se muestra en la Fig. 3, con el cual, bajo condiciones controladas de laboratorio, se recrearon eventos de impacto y volcadura para observar el comportamiento del nodo, así como el desempeño de los algoritmos implementados.

En la Fig. 4 se describe el proceso general propuesto para llevar a cabo el procesamiento y análisis de los datos obtenidos de los sensores.



Figura 3: RC H1 Hurtle, vehículo de pruebas y simulación

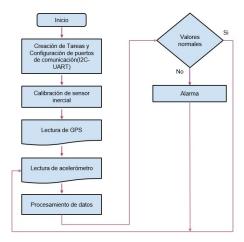


Figura 4: Diagrama de flujo para configuración y detección

#### IV. Modelo de sistema

#### IV.1. Detección de impactos

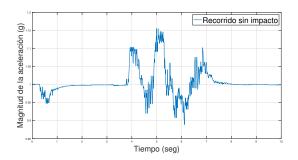
La duración de un impacto vehicular, esto es, desde que hace contacto con el objeto, hasta que se detiene por completo, se denomina Pulso de colisión, el cual varía de acuerdo a factores como la velocidad inicial, la masa del vehículo y el tipo de objeto contra el que se impacta [21], por lo cual no hay un valor fijo. Tomando en cuenta [22], donde se muestran diversos experimentos de impacto con varios tipos de vehículos, en este estudio se considera que el impacto tiene una duración promedio de 120 ms, y que durante este intervalo de tiempo el vehículo sufre cambios bruscos de aceleración, por lo que para detectar el impacto, se debe de ajustar la tasa de muestreo del sensor.

Configurando la tasa de muestreo del sensor inercial MPU9250 a 1,000 Hz, este proporciona 1,000  $\frac{muestras}{seg}$ , debido que estas muestras son datos crudos se aplica un filtro de promedio móvil para suavizar las fluctuaciones y el ruido, reduciéndose a  $100 \ \frac{muestras}{seg}$ , con este número de muestras se dispone de las  $12 \ \text{muestras}$  que representan los  $120 \ \text{ms}$  del pulso de colisión, de esta manera, con el fin de realizar la detección de cambios abruptos de aceleración, el algoritmo programado toma vectores de  $10 \ \text{muestras}$  ( $100 \ \text{ms}$ ) para analizarlos estadísticamente mediante la desviación estándar y el rango.

La primera etapa del proceso de análisis consistió en identificar, mediante la experimentación, un dominio de valores de aceleración en condiciones normales (sin impactos), con el fin de aplicarlo para establecer un umbral a partir del cual de pueda diferenciar una condición normal de una anormal (con impacto). Para este proceso se obtuvo una muestra de valores de la magnitud de aceleración, la cual se obtiene con la Ec. (1).

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$
 (1)

En la Fig. 5 se muestra el comportamiento de la magnitud de la aceleración durante un experimento en condiciones normales.



**Figura 5:** Comportamiento de la magnitud de la aceleración en experimento sin impacto

Posteriormente con los datos de magnitud de aceleración se realizó el siguiente proceso de análisis:

- 1) se forma un vector de 10 valores de magnitud de aceleración  $x_1, x_2, ..., x_{10}$ ,
- 2) se estima la media de este conjunto (Ec. (2)),

$$\bar{x} = \frac{1}{10}(x_1 + x_2 + \dots + x_{10})$$
 (2)

3) se estima la varianza (Ec. (3)),

$$\sigma^2 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2 \tag{3}$$

4) se estima la desviación estándar (Ec. (4)),

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}$$
 (4)

5) se estima el máximo (Ec. (5)) y mínimo (Ec. (6)) del vector para obtener el rango (Ec. (7)),

$$\max(x_1, x_2, \dots, x_{10})$$
 (5)

$$\min(x_1, x_2, \dots, x_{10})$$
 (6)

$$Rango = \max(x_1, x_2, \dots, x_{10}) - \min(x_1, x_2, \dots, x_{10})$$

Los datos obtenidos fueron analizados mediante la Ec. (8), para observar la densidad de probabilidad normal de los valores calculados de desviación estándar y de rango, conociendo de esta función, que el 99.73 % de probabilidad de aparición de los valores se concentra en el intervalo determinado por  $\pm 3\sigma$ , llamado intervalo de confianza, se estableció que los valores fuera de este intervalo se pueden interpretar como condiciones de anomalía.

$$f_{|\mathbf{a}|}(a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(a-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$
 (8)

Efectuándose experimentos en condiciones normales, se calculó la desviación estándar en el intervalo de 0.082 a 0.108, como se ve en la Fig. 6, mientras que para el Rango, en el intervalo de 0 a 0.10, como se observa en la Fig. 7.



Figura 6: Análisis de la desviación estándar

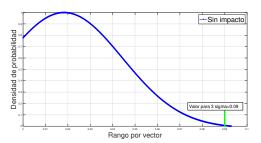
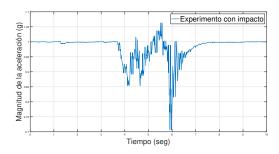


Figura 7: Análisis de rango

Los valores extremos del intervalo de confianza determinados en los experimentos anteriores son los valores de umbral programados en el algoritmo de detección.

Cuando se presentan condiciones de impacto, el comportamiento de la magnitud de la aceleración describe características singulares, las cuales se pueden observar gráficamente en la Fig. 8, donde se puede visualizar un cambio abrupto en los valores de la aceleración.

Aplicando el mismo proceso de análisis hecho para los datos en condiciones sin impacto, se obtienen los valores de desviación estándar y rango fuera de los intervalos determinados por  $3\sigma$  para condiciones normales, observándose gráficamente estas variaciones en las mediciones



**Figura 8:** Comportamiento de la magnitud de aceleración en eventos sin y con impacto

sin impacto y con impacto en las gráficas de la Fig. 9 para la desviación estándar y en la Fig. 10 para el rango.



**Figura 9:** Comparación de la desviación estándar sin y con impacto

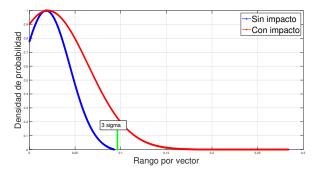


Figura 10: Comparación de rango sin y con impacto

#### IV.2. La detección de volcaduras

Para considerar la inclinación de riesgo de volcadura o a partir de la cual el vehículo se puede considerar volcado, se calcula el ángulo máximo de inclinación lateral ( $\Theta_{max}$ ) de acuerdo al tipo de vehículo, el cálculo se basa en la Ec. (9) [23], que indica un valor de inclinación de riesgo basado en la distancia entre llantas del mismo eje del vehículo y la altura del centro de masa. Para esta investigación se consideró un camión de carga unitario

de tipo C3 (tres ejes, delantero y 2 traseros), de acuerdo a la norma mexicana NOM-012-SCT-2-2017, para el cual la distancia entre llantas del mismo eje es 2 metros y la altura del centro de masa es 1.5 metros.

Los valores de los ángulos son aproximados debido a que el peso y dimensiones de la carga pueden variar.

$$\Theta_{max} = \arctan \frac{T}{2h} = \arctan \frac{2m}{2(1.5m)} = 33^{\circ}$$
 (9)

Donde:

- lacktriangle T es la distancia entre ruedas del mismo eje,
- h es la altura del centro de masa del vehículo.

De esta manera cuando los ángulos de inclinación pitch y roll (ver Fig. 1) son superiores a  $\pm 33$  grados se considera que es una volcadura, este puede no ser un valor fijo, depende del vehículo, sin embargo el valor calculado en Ec. (9) se pueden tomar como umbral, programado en el algoritmo y a partir del cual el nodo genere una alerta.

Para medir los ángulos de inclinación, el nodo fue sometido a inclinaciones frontal y lateral, observándose en la Fig. 11 los valores de inclinación frontal y en la Fig. 12 los valores de inclinación lateral, hasta superar el umbral.

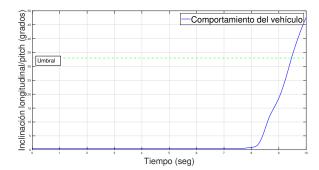


Figura 11: Inclinación longitudinal (Pitch)

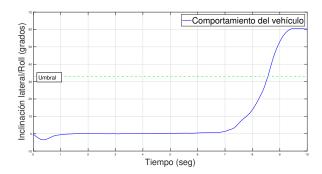


Figura 12: Inclinación lateral (Roll)

#### V. Resultados

Para la presentación de los resultados, se consideraron 5 experimentos de prueba en condiciones normales y 5 experimentos con impacto.

#### V.1. Experimentos en condiciones normales

Se realizó la gráfica de las aceleraciones para identificar su respuesta, observándose que coinciden en el comportamiento como se muestran en la Fig. 13.

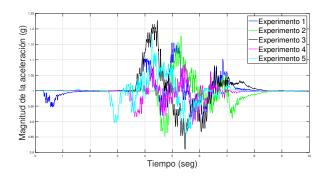


Figura 13: Aceleraciones en experimentos sin impacto

Posteriormente se procesaron los datos para obtener la desviación estándar y el rango de vectores de 10 muestras, graficándose los resultados con los umbrales encontrados para los valores en condiciones normales, observándose que la mayoría de las lecturas se encuentran dentro del intervalo  $\pm 3\sigma$ , como se muestra en la Fig. 14 para la desviación estándar y en la Fig. 15 para el rango.

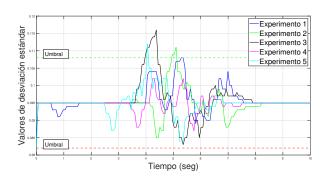


Figura 14: Desviación estándar en experimentos sin impacto

#### V.2. Experimentos en condiciones de impacto

Aplicando el mismo procedimiento se realizaron los experimentos con impacto, en la Fig. 16 se muestra el comportamiento de la aceleración, como se puede observar en las gráficas obtenidas se percibe un comportamiento diferente a los que se obtuvieron sin impactos,

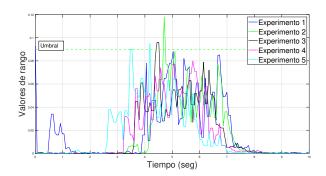


Figura 15: Rango en experimentos sin impacto

así mismo es posible advertir un comportamiento en el que se presentan cambios abruptos de aceleración con un cierto patrón, donde se deduce que el vehículo sufrió una desaceleración abrupta causada por el impacto.

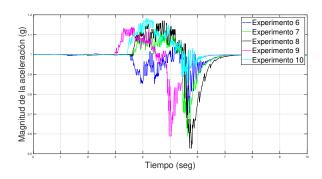


Figura 16: Aceleraciones en experimentos con impacto

En la Fig. 17 se muestra la gráfica de la desviación estándar de los experimentos, observándose que superan con mayor frecuencia los umbrales de condiciones normales.

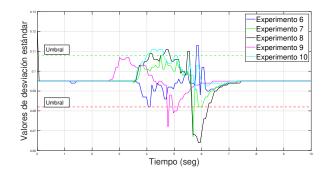


Figura 17: Desviación estándar en experimentos con impacto

En la Fig. 18, se grafican los valores de rango, observándose como las magnitudes pueden superar el umbral para condiciones normales.

Los valores de umbral para impacto y volcadura, deter-

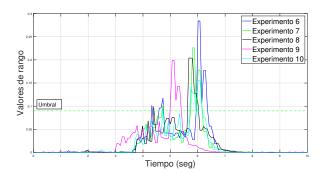


Figura 18: Rango en experimentos con impacto

minados en el análisis, fueron programados en el algoritmo del nodo, son valores fijos, y solo se deben actualizar si se cambia el tipo de vehículo, realizando el análisis y obtención de los nuevos umbrales se forma similar.

#### VI. Conclusiones

Durante el desarrollo del prototipo para la identificación de impactos y volcaduras, mediante análisis estadístico, se midió en tiempo real las aceleraciones que experimenta un vehículo durante su desplazamiento, los experimentos realizados mostraron que en condiciones normales de operación, —es decir, sin cambios bruscos de aceleración—, el comportamiento de las aceleraciones en los tres ejes  $(X,Y\mid Z)$  varía constantemente dentro de un intervalo, las variaciones que sufren durante el movimiento tienen dos características principales, la primera es que los cambios de magnitud son suaves en el tiempo y la segunda, que la magnitud se mantiene dentro de un intervalo determinado de valores la mayor parte del tiempo.

Al realizar los experimentos con condiciones de impacto, estos salen de los umbrales, por lo cual, para determinar el evento de siniestro se realiza un proceso de decisión basado en los siguientes aspectos: que exista un valor de desviación estándar fuera de los umbrales, que exista un valor de rango superior al umbral y que ocurran en el mismo vector de mediciones analizadas.

Los experimentos con impacto se realizaron utilizando un vehículo a escala, siendo necesario adecuar los valores de umbral en el caso de que sea factible instalar el nodo en un vehículo real, realizando el mismo proceso de análisis a fin de determinar los umbrales específicos para el vehículo utilizado.

Como trabajo futuro es la incorporación de un canal de radiocomunicación para la transmisión de la señal de alerta, de esta manera no solo se contemplaría para un uso en vehículos oficiales, se puede proyectar para uso en flotas de empresas o inclusive en autos particulares, en virtud que no es un sistema invasivo con los sistemas de

los vehículos y puede adaptarse como un accesorio, sin que afecte de ninguna manera a la operación y seguridad de vehículo.

#### Referencias

- [1] P. Huang et al. «Effect of emergency medical service response time on fatality risk of freeway crashes: Bayesian random parameters spatial logistic approach». En: *Frontiers in Public Health* 12 (2024), pág. 1453788. DOI: 10.3389/fpubh. 2024.1453788.
- [2] Fuentes José de Jesús Galindo. «Perfil epidemiológico de los accidentes de tránsito en México, 2010-2019». En: *Horiz. sanitario [online]* 22.1 (mar. de 2023), págs. 45-52.
- [3] INEGI. Accidentes de Tránsito Terrestre en Zonas Urbanas y Suburbanas (ATUS) 2020-2023. https://www.inegi.org.mx/programas/atus/. 2023.
- [4] SATECH. ¿Cómo impacta un accidente vehicular en tu negocio? https://satech.mx/como-impacta-un-accidente-vehicular-en-tu-negocio/. 2025
- [5] de la Peña Nelson Arzola y Torres César Andrés Castro. «Análisis del comportamiento dinámico de una suspensión de vehículo independiente de doble horquilla.» En: *LogosCyT [online]* 11.2 (mar. de 2019), págs. 10-33.
- [6] Montoya Godínez et al. «Análisis del mercado interno y externo del sector automotriz en México». En: *Revista cartográfica 106* (2020).
- [7] Wallbank Caroline et al. «El potencial de los estándares de seguridad vehicular para evitar muertes y lesiones en Argentina, Brasil, Chile y México: actualización 2018». En: *TRL The future of transport* (mar. de 2019).
- [8] Chindhe Gaurav et al. «A Survey on Various Location Tracking Systems». En: *International Research Journal of Engineering and Technology* 5.12 (dic. de 2018), págs. 671-675.
- [9] Noushin Behboudi, Sobhan Moosavi y Rajiv Ramnath. «Recent Advances in Traffic Accident Analysis and Prediction: A Comprehensive Review of Machine Learning Techniques». En: *arXiv preprint arXiv:2406.13968* (2024).
- [10] Andrew R Robinson, Michael Esty y Charles E Tilburg. A Compact GPS Surface Drifter with Lo-Ra Telemetry and Self-Contained Tracking System. 2021.

- [11] Alejandro González, José Luis Olazagoitia y Jordi Vinolas. «A low-cost data acquisition system for automobile dynamics applications». En: *Sensors* (*Switzerland*) 18 (2 feb. de 2018). ISSN: 14248220. DOI: 10.3390/s18020366.
- [12] Norhafizah et al. «An open source LoRa based vehicle tracking system». En: Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics 7 (2 jun. de 2019), págs. 221-228. ISSN: 20893272. DOI: 10. 11591/ijeei.v7i2.1174.
- [13] Angie Paola y Marriaga Barroso. Device design for vehicle tracking with Lora-IoT module oriented to public transport systems in smart cities. 2021.
- [14] Alejandro Saniger et al. «Mobile data for studying public space, and trips in Mexico City: a study case of six suburban zones». En: Data & Policy (2024). URL: https://www.cambridge.org/core/journals/data-and-policy/article/mobile-data-for-studying-public-space-and-trips-in-mexico-city-a-study-case-of-six-suburban-zones/C913EF8166D0183E517349BF6D15EC24.
- [15] F. Garcia et al. «Sensor Fusion Methodology for Vehicle Detection». En: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 9.1 (mayo de 2017). doi: 10.1109/MITS.2016.2620398., págs. 123-133.
- [16] Ying Shuh Jing, Dubey Rajiv y Sundarrao Stephen. *Gyroscope for Robot to Sense the Balance*. Dic. de 2018. DOI: 10.35840/2631-5106/4112. URL: https://doi.org/10.35840/2631-5106/4112.
- [17] Mazhar Malik Kamal et al. «A Novel Roll and Pitch Estimation Approach for a Ground Vehicle Stability Improvement Using a Low Cost IMU». En: Sensors 20.2 (2020). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/ s20020340. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/2/340.
- [18] Gabriel Pérez Campoy. «Estudio de la viabilidad de dispositivos IMU low-cost para usos de navegación y rastreo con Arduino/ESP32, y construcción de su prototipo». Tesis de mtría. Universitat Politècnica de Catalunya, oct. de 2023. URL: https://upcommons.upc.edu/handle/2117/396584.
- [19] Zerynth. DOIT ESP32 DevKit v1. Zerynth. 2017. URL: https://olddocs.zerynth.com/r2.3.3/official/board.zerynth.doit%5C\_esp32/docs/index.html.
- [20] InvenSense. *Register Map and Descriptions MPU* 9250. 1.6. InvenSense. Jul. de 2015.

- [21] Joseph Olberding, Karla Petroskey y Tara Leipold. Coefficient of Restitution and Collision Pulse Duration in Low-Speed Vehicle-to-Barrier Impacts. Inf. téc. SAE Technical Paper 2023-01-0624. SAE International, 2023. DOI: 10.4271/2023-01-0624.
- [22] Tso-Liang Teng et al. «Application of Crash Pulse on the Car Crashworthiness Design». En: *Advances in Mechanical Engineering* 9.9 (2017), págs. 1-11. DOI: 10.1177/1687814017700096.
- [23] Thomas D. Gillespie. Fundamentals of Vehicle Dynamics, Revised Edition. Warrendale, PA: SAE International, 2021. ISBN: 978-1-4686-0176-3.