



PROYECTO DE UN GLUCÓMETRO

MEMORIA

PROYECTO DE FIN DE GRADO

ESEIAAT

Titulación:

Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Alumno:

Daniel Monleón Guerrero

Enunciado TFG:

Proyecto de un glucómetro

Director del TFG:

Víctor Manuel Suñé Socias

Codirector del TFG:

Pau Fernández Duran

Convocatoria de entrega del TFG:

Junio 2019

Resumen

El objetivo de este proyecto es diseñar un glucómetro inteligente dotado de comunicación Bluetooth que se conecta a un móvil Android, el cual dispone de una aplicación llamada SmartBlood que permite organizar y gestionar los datos recibidos del glucómetro. Este sistema permite al usuario estar siempre en contacto con los datos los cuales son cruciales para tomar las acciones necesarias para paliar los efectos negativos de la diabetes.

En la presente memoria se detalla el diseño del glucómetro y de la aplicación, desde la tira reactiva usada donde se introduce la gota de sangre, hasta la propia programación de la aplicación.

En el primer capítulo de esta memoria se desarrolla el componente hardware del glucómetro, el circuito que gestiona el cálculo de la glucosa en sangre y el diseño de la placa de circuito impreso.

El segundo capítulo se centra en la programación del microcontrolador Arduino que controla el glucómetro, el procesado de datos y la programación de la aplicación.

En el tercer capítulo se comparan los resultados obtenidos mediante el prototipo de glucómetro y un glucómetro comercial usado diariamente por diabéticos y se evalúa la precisión del prototipo construido.

Abstract

The aim of this project is the design of a smart glucometer. The device communicates via Bluetooth with an Android phone in which an app called SmartBlood has been installed. With this app, users can organize and manage the data received from the smart glucometer. This allows users to always have access to their data, a feature which is very convenient from the point of view of supervising user's glucose levels.

This report explains the complete design of the glucometer and the app, from the test strip where the blood is applied and the analog circuit, to the code of the app.

On the first chapter of this report, the hardware is described. The technology behind a blood test strip, the analog circuit and the design of the PCB are explained.

The second chapter concerns the code of the Arduino that controls the glucometer and the programming of the app. Furthermore, the data analysis needed to calculate the glucose is discussed deeply.

On the third chapter, the prototype of the glucometer that has been built is compared with a real glucometer commonly used within the diabetic community in order to assess the prototype's accuracy.

Agradecimientos

A los dos directores de este trabajo, Víctor y Pau por todas las horas dedicadas y el esfuerzo para que el proyecto saliera adelante.

A mis padres, a mi hermano y a Eli por el continuo apoyo y cariño.

Especial agradecimiento a mi abuelo por haber aportado en este proyecto de forma tan directa.

Índice de la memoria

1	Introducción	12
1.1	Objetivos	12
1.2	Alcance	12
1.3	Requerimientos	13
1.4	Justificación	13
1.5	Estado del arte	14
1.6	Planteamiento y selección de alternativas	16
2	Desarrollo de la solución propuesta	17
2.1	Diagrama de bloques del glucómetro	17
2.2	Desarrollo Hardware	19
2.2.1	Caracterización tiras reactivas	19
2.2.2	Conector de tiras reactivas.....	20
2.2.3	Circuito medidor de glucosa.....	22
2.2.4	Módulo Bluetooth	26
2.2.5	Placa de circuito impreso (PCB).....	27
2.3	Desarrollo Software.....	29
2.3.1	Caracterización de una regresión para el cálculo de glucosa	29
2.3.2	Algoritmo Arduino.....	38
2.3.3	Resumen general de la aplicación.....	39
2.3.4	Modelo de datos de la aplicación	40
2.3.5	Navegación entre pantallas de la aplicación	41
2.3.5.1	CalendarActivity	42
2.3.5.2	RegistrarAnálisis Activity	44
2.3.5.3	ResumenAnálisisActivity	46
2.3.6	Comunicación Bluetooth desde la aplicación	48
3	Conclusiones y resultados	50
3.1	Resumen de los aspectos generales del glucómetro y de la aplicación.....	50
3.2	Comparativa resultados finales.....	52
3.3	Conclusiones finales	53
3.4	Recomendaciones futuras.....	54
4	Aspectos ambientales y de seguridad	55
4.1	Montaje del prototipo glucómetro	55

4.2	Desmontaje del prototipo glucómetro	55
5	Bibliografía	56

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Glucómetro tradicional [3]	14
Ilustración 2: Glucómetro continuo [3]	15
Ilustración 3: Diagrama de bloques del glucómetro	17
Ilustración 4: Pantallas de la aplicación encargada del registro y organización de los datos enviados por el glucómetro.	18
Ilustración 5: Tira reactiva One Touch Ultra.	19
Ilustración 6: Reacción química al introducir sangre en la tira reactiva	19
Ilustración 7: Conector fabricado a partir de tres cables faston.....	20
Ilustración 8: Pieza encargada de sujetar el conector de tiras reactivas	21
Ilustración 9: Circuito medidor de glucosa.....	22
Ilustración 10: Circuito potenciostato	23
Ilustración 11: Circuito convertidor corriente tensión.....	24
Ilustración 12: Conexión módulo Bluetooth [8]	26
Ilustración 13: Diseño de la placa de circuito impreso.	27
Ilustración 14: Placa de circuito impreso. Capa inferior.	28
Ilustración 15: Placa de circuito impreso. Capa superior.....	28
Ilustración 16: Glucómetro de referencia y dispositivos necesarios	29
Ilustración 17: Evolución temporal de la tensión al aplicar una gota de sangre	30
Ilustración 18: Evolución temporal de tensión en función del nivel de glucosa	31
Ilustración 19: Glucosa en función de la tensión media. Método 1	33
Ilustración 20: Glucosa en función de la tensión media. Método 2	33
Ilustración 21: Regresión lineal. Método 1 para calcular valor medio de tensión.....	34
Ilustración 22: Valores residuales al usar regresión lineal con el método 1.....	34
Ilustración 23: Diagrama de flujo que describe el algoritmo del código de Arduino.....	38
Ilustración 24: Logo de la aplicación	39
Ilustración 25: Navegación entre pantallas de la aplicación	41
Ilustración 26: Calendar Activity	42
Ilustración 27: Registrar Analisis Activity	44
Ilustración 28: Resumen Analisis Activity.....	46
Ilustración 29: Botones para la gestión de comunicación Bluetooth	48
Ilustración 30: Aspecto final glucómetro y aplicación en funcionamiento.....	50
Ilustración 31: Aspecto final glucómetro	50

Índice de tablas

Tabla 1: Valores R^2 sin eliminar outliers	36
Tabla 2: Valores R^2 eliminando outliers.....	36
Tabla 3: Propiedades CalendarActivity	42
Tabla 4: Propiedades RegistrarAnálisis Activity	44
Tabla 5: Propiedades ResumenAnálisis Activity.....	46
Tabla 6: Resumen características físicas glucómetro.....	51
Tabla 7: Características de la aplicación.....	51
Tabla 8: Comparativa de resultados entre prototipo glucómetro y glucómetro comercial	52

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos

El objetivo de este trabajo es diseñar un glucómetro inteligente y portátil que permita comunicarse a un teléfono Android de forma inalámbrica. Mediante una aplicación Android se almacenan los datos y el usuario puede acceder a ellos de forma rápida y cómoda.

1.2 Alcance

A lo largo de este proyecto se desarrollan las siguientes actividades:

- Diseñar un circuito analógico capaz de medir glucosa.
- Establecer un tipo de comunicación inalámbrica.
- Diseñar una placa de circuito impreso que permita implementar el circuito analógico.
- Plantear y aplicar un método que permita obtener un valor de glucosa a partir de un valor de tensión de forma experimental.
- Diseñar y programar una aplicación Android con comunicación Bluetooth.
- Realización experimental para probar la precisión del dispositivo y conclusiones.

1.3 Requerimientos

Las especificaciones básicas fijadas desde el inicio de este proyecto han sido crear un glucómetro portátil alimentado por una pila, que use tiras reactivas comerciales y comunicación inalámbrica entre glucómetro y teléfono Android y una aplicación fácil de usar e intuitiva.

1.4 Justificación

La diabetes (diabetes mellitus) es una grave enfermedad que afecta a un gran porcentaje de la población mundial y que perjudica considerablemente la salud de las personas que lo padecen. Se calcula que en 2012, la cifra de personas diagnosticadas con diabetes fue de 422 millones de personas, es decir, un 8.5% de las personas adultas. En 2012 murieron 1.5 millones de personas relacionadas con esta enfermedad. [1] [2]

Algunas de las complicaciones asociadas a esta enfermedad son la pérdida de visión y de las extremidades debido al mal funcionamiento de los vasos sanguíneos y problemas cardiovasculares y cerebrales. Todas estas complicaciones pueden llevar a la muerte del paciente.

Para controlar los niveles de azúcar de los diabéticos, se utilizan los glucómetros: dispositivos que permiten calcular el nivel de azúcar a partir de una muestra de sangre del paciente.

Delante de este problema, en este trabajo se busca y se desarrolla una solución tecnológica, innovadora y actual que ayude a las personas que sufren diabetes en la gestión de los análisis de glucosa. Además, gracias a este proyecto se profundizan en aspectos que se consideran interesantes para el autor del trabajo como la electrónica analógica y digital, el diseño de placas de circuito impreso y la programación de aplicaciones de móviles Android. Todo esto permite ampliar el conocimiento adquirido durante la carrera en un proyecto impulsado por el propio estudiante.

1.5 Estado del arte

Los glucómetros son dispositivos esenciales para las personas que padecen de diabetes ya que permiten monitorizar los niveles de azúcar. Existe una gran variedad de formas de medir la glucosa y diversas marcas que ofrecen diferentes soluciones. A continuación se exponen los tipos de glucómetro más comunes [3].

Glucómetro tradicional



Ilustración 1: Glucómetro tradicional [3]

El glucómetro tradicional (ver Ilustración 1) es el dispositivo más usado por las personas diabéticas. Para medir la glucosa, se hace una punción en el dedo para la obtención de una gota de sangre, la cual se introduce en una tira reactiva insertada al glucómetro. Este tipo de glucómetro es el más barato y el más común.

Este tipo de glucómetros incorporan un circuito analógico, el cual de forma general está compuesto de un circuito potentiostato que controla valores de corriente y tensión de la tira reactiva, permitiendo conocer el valor de la glucosa.

Nuevas funcionalidades se van añadiendo a estos instrumentos, como por ejemplo un altavoz capaz de leer la medida de sangre, o comunicación Bluetooth para la transferencia de datos a ordenadores y teléfonos inteligentes. El glucómetro *Accu-Check Aviva Connect* dispone de comunicación Bluetooth y una aplicación dedicada.

Glucómetro continuo



Ilustración 2: Glucómetro continuo [3]

El glucómetro continuo (ver Ilustración 2) registra la actividad de la glucosa en sangre durante todo el día, tomando medidas cada pocos minutos. Este tipo de dispositivo permite analizar más en detalle la actividad de la glucosa a lo largo del día y evita tener que realizar una punción cada vez que se desee tomar una muestra de sangre. Este tipo de glucómetro necesita introducir el sensor debajo de la piel y presenta un coste de compra elevado. La mayoría de diabéticos no necesitan disponer de un historial tan exhaustivo de la evolución de los niveles de glucosa en sangre, por tanto los glucómetros continuos no son tan usados.

Glucómetros no invasivos

Para realizar el cálculo de glucosa en sangre de forma no invasiva, se utilizan diferentes tecnologías como por ejemplo luz infrarroja, ultrasonidos y campos magnéticos [4]. Este tipo de dispositivos evitan el uso de sangre en los análisis, haciéndolos más cómodos e indoloros.

Actualmente los glucómetros no invasivos se encuentran en fase de desarrollo e investigación y no pueden ser adquiridos. Es posible que en un futuro este tipo de dispositivos sustituyan al actual modelo de referencia.

1.6 Planteamiento y selección de alternativas

Previo al diseño y construcción del glucómetro y aplicación, se seleccionan las opciones de implementación que se consideren más adecuadas a este proyecto.

Los dos métodos más usados para conocer la concentración de glucosa son: el método colorimétrico y el método amperométrico. En el primer método, se conoce la concentración de glucosa en sangre de forma visual, debido al cambio de color de la tira reactiva al aplicar una gota de sangre, fruto de reacciones químicas. En el segundo método se calcula el valor de glucosa a partir de una corriente eléctrica debido a las reacciones electroquímicas que suceden en la tira reactiva al aplicar sangre. Se selecciona el método amperométrico ya que es el método más utilizado actualmente y resulta más preciso que el método colorimétrico.

Se replica un tipo de glucómetro tradicional de entre los tres tipos presentados en el apartado 1.5, ya que es el tipo más usado en pacientes de diabetes y a la vez, el más simple en el proceso constructivo. Se decide utilizar las tiras reactivas One Touch Ultra porque son de las más comunes.

Respecto a la comunicación inalámbrica, se decide usar comunicación Bluetooth, ya que se trata de la comunicación más usual y usada tanto en teléfonos inteligentes como en proyectos Arduino. De esta forma, la pantalla del glucómetro es el propio teléfono móvil inteligente del usuario. Esto permite tener siempre presentes los datos de los análisis y abaratar el coste final del glucómetro

La aplicación se desarrolla en el sistema operativo Android y el microcontrolador seleccionado es Arduino MEGA, debido a la experiencia del autor del trabajo y a la gran cantidad de información existente en internet.

2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

2.1 Diagrama de bloques del glucómetro

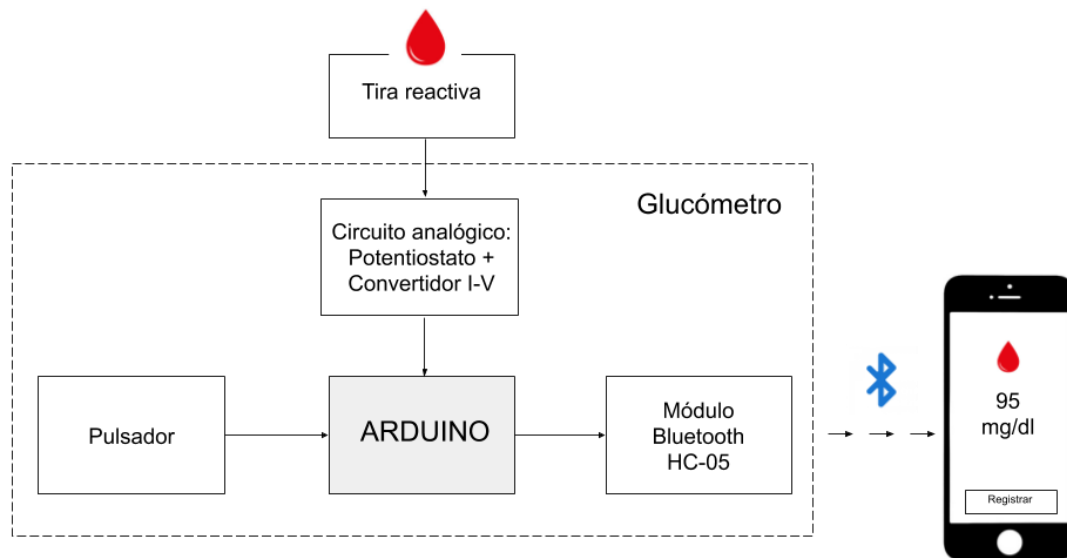


Ilustración 3: Diagrama de bloques del glucómetro

En la Ilustración 3 se observa de forma esquemática la estructura del glucómetro. La tira reactiva se conecta a un circuito analógico formado por un potenciostato y un convertidor de corriente tensión, los cuales se detallan en el apartado 2.2.3. Al aplicar una gota de sangre sobre la tira reactiva sucede una reacción electroquímica, resultando una tensión en una entrada analógica de un Arduino MEGA. Según el valor de tensión obtenido se calcula el valor de la glucosa.

También se incorpora al Arduino un pulsador que permite al sistema generar interrupciones y un módulo Bluetooth que envía el valor de glucosa al teléfono móvil inteligente.

Se implementa una aplicación Android donde se puede visualizar el valor de glucosa calculado por el glucómetro. Si se está conforme con el resultado del análisis se puede registrar en la memoria del teléfono móvil. En cualquier momento, se puede navegar por el calendario de la aplicación para poder consultar todos los valores de glucosa registrados.

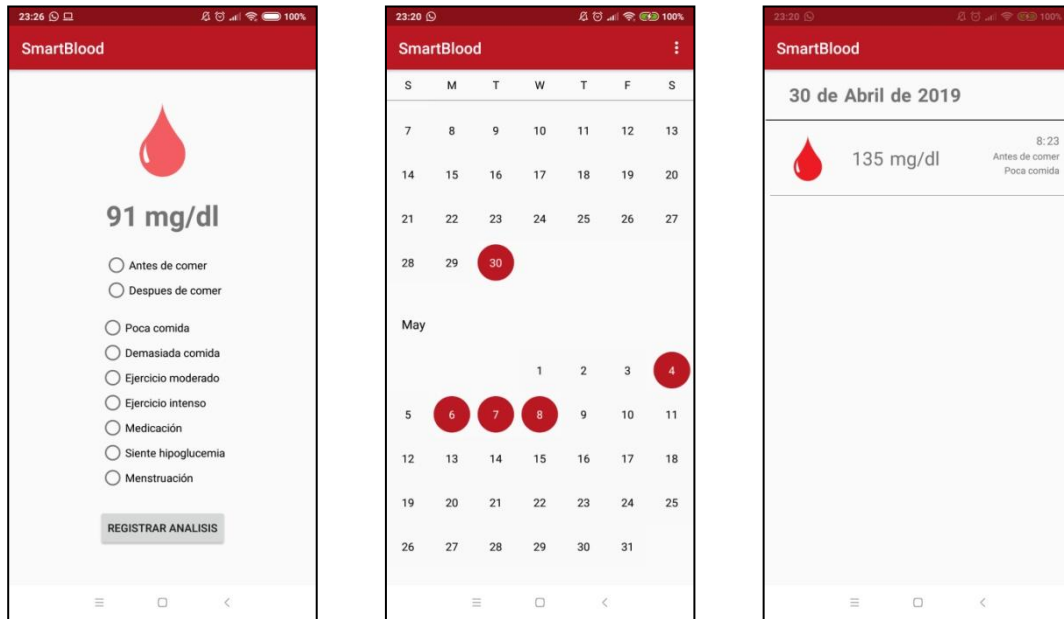


Ilustración 4: Pantallas de la aplicación encargada del registro y organización de los datos enviados por el glucómetro.

La aplicación consiste de tres pantallas navegables entre ellas (ver Ilustración 4). A continuación se explica la funcionalidad de cada pantalla:

La pantalla de la izquierda de la Ilustración 4. Permite registrar nuevos datos. En ella, se pueden marcar dos notas que caracterizan el valor de glucosa medido. Una nota para especificar si la medida se ha tomado antes o después de comer, y otra nota para indicar otros aspectos interesantes, como por ejemplo si se ha hecho ejercicio o si se han consumido medicamentos.

Pantalla central de la Ilustración 4. En ella se visualiza un calendario. Los días donde se hayan registrado análisis quedarán marcados con un pequeño círculo rojo. Mediante los 3 puntos verticales en el menú superior, se puede conectar o desconectar la conexión Bluetooth.

Pantalla de la derecha de la Ilustración 4. Se accede a ella si se hace clic sobre un día del calendario. En esta pantalla se visualizan los análisis hechos el día seleccionado. Se puede visualizar la fecha, la hora, las notas y el valor de cada análisis. Desde esta misma pantalla se puede eliminar datos manteniendo el dedo sobre la medida que se desee borrar.

En los dos siguientes apartados se profundiza en el aspecto Hardware y Software del glucómetro

2.2 Desarrollo Hardware

2.2.1 Caracterización tiras reactivas



Ilustración 5: Tira reactiva One Touch Ultra.

La tira reactiva escogida que usa el prototipo de glucómetro es la tira de la marca One Touch Ultra. Esta tira reactiva presenta tres terminales. Cogiendo de referencia la Ilustración 5, los tres electrodos son:

- R** Terminal Reference.
- C** Terminal Counter.
- W** Terminal Working.

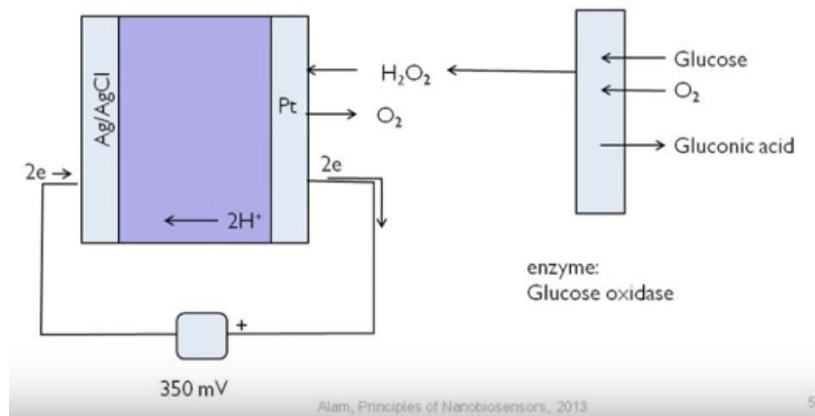


Ilustración 6: Reacción química al introducir sangre en la tira reactiva

En la Ilustración 6 se visualiza de forma esquemática las reacciones químicas que suceden al aplicar sangre en la tira reactiva. [5]

La placa de platino es usada como terminal Working, donde se ubica también la enzima glucosa oxidasa. La placa de plata o cloruro de plata es usada como electrodo Counter.

La glucosa de la sangre reacciona con el oxígeno al entrar en contacto con la enzima. Esto provoca la creación de ácido glucónico y peróxido de hidrógeno. A su vez, al entrar en contacto con la placa de platino, reacciona y genera oxígeno, dos protones y dos electrones. En caso que una tensión de +350mV se aplique entre el terminal *Working* y el terminal *Counter*, los electrones circulan entre estos dos electrodos.

Al aplicar mayor glucosa en la tira, se provocan más reacciones químicas, incrementando el número de electrones que circulan. Es decir, que a mayor glucosa, mayor circulación de electrones y por tanto, mayor corriente circulante por el electrodo *Working* de la tira reactiva.

Se decide aplicar una tensión de +400mV debido a una mayor comodidad al diseñar los puentes de tensión, suficiente para generar la corriente de electrones a partir de las reacciones electroquímicas.

2.2.2 Conector de tiras reactivas

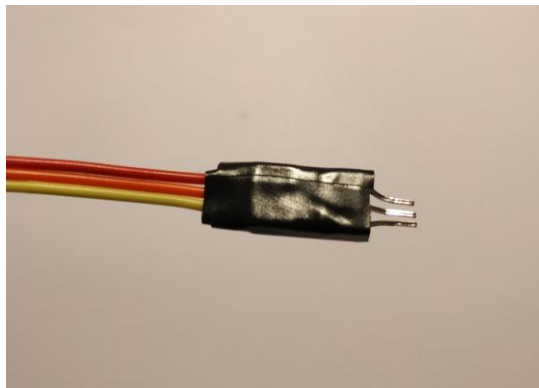


Ilustración 7: Conector fabricado a partir de tres cables faston.

El glucómetro hace uso de varias tiras reactivas, ya que solo se puede usar una por cada análisis de sangre. Es por ello que para acceder a los terminales de cada tira reactiva de forma cómoda y fácil se fabrica un conector formado a partir de tres cables *faston*, dando forma a su parte conductora de tal forma que la parte metálica del cable haga un contacto rígido en los tres terminales de la tira reactiva. Ver pliego de condiciones, apartado 1, para una explicación más exhaustiva del proceso constructivo del conector de tiras reactivas.

Para que la medida de glucosa sea correcta, es importante que el conector esté bien fijado a la placa y que ejerza una presión suficiente sobre los terminales de la tira reactiva.

En la Ilustración 7 se visualiza el aspecto del conector.



Ilustración 8: Pieza encargada de sujetar el conector de tiras reactivas

La pieza encargada de sujetar el conector de la tira reactiva se observa en la Ilustración 8. Consiste en una pieza metálica de 1.8x1mm, con dos agujeros de 1mm de separación. Para sujetarla a la placa de circuito impreso se utilizan dos tornillos de 0.3x1mm de paso.

2.2.3 Circuito medidor de glucosa

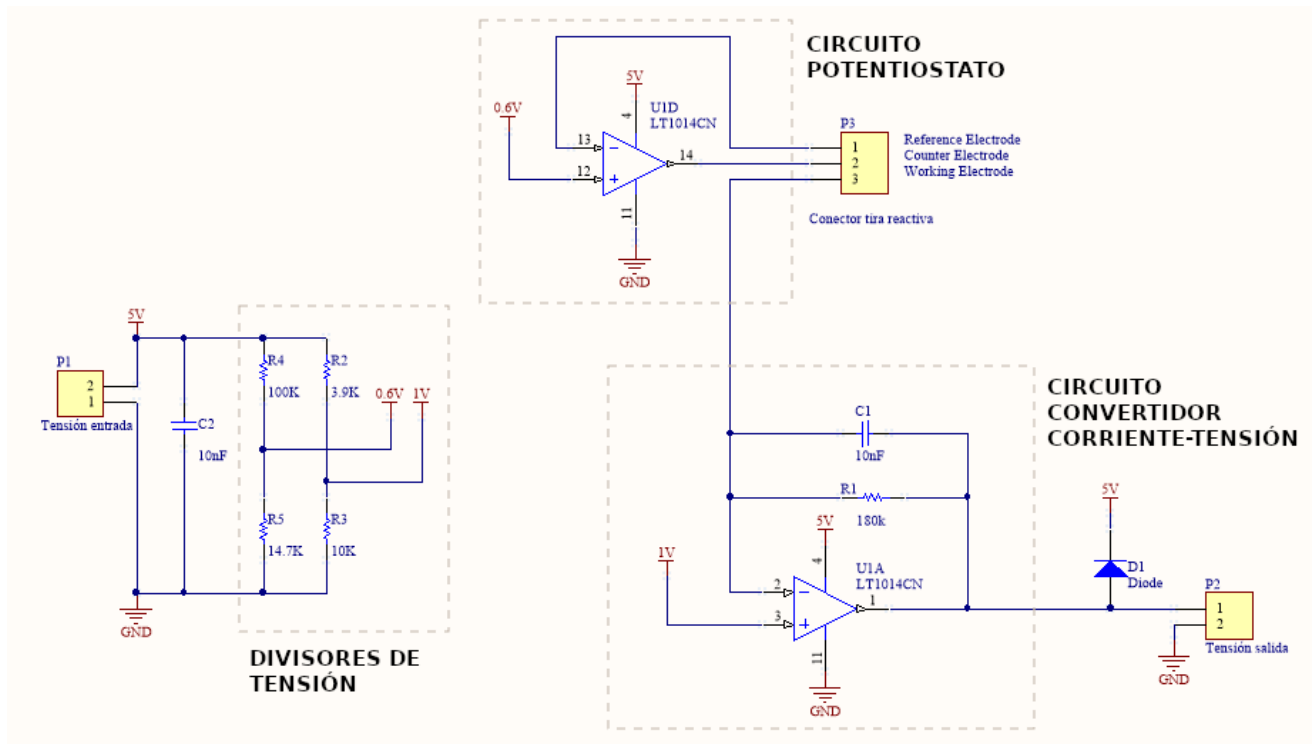


Ilustración 9: Circuito medidor de glucosa

El circuito analógico encargado de producir un valor de tensión en función de la cantidad de glucosa en sangre es el mostrado en la Ilustración 9 [6]. Se visualiza a la izquierda del circuito dos divisores de tensión, en la parte superior derecha el circuito potenciostato y en la parte inferior derecha el circuito convertidor corriente-tensión.

Los divisores de tensión y los amplificadores operacionales U1D y U1A del LT1014CN están alimentados a 5V y 0V (masa) mediante los pines de Arduino correspondientes. El divisor de tensión de la izquierda genera una tensión de 0.6V y el divisor de tensión de la derecha genera una tensión de 1V los cuales alimentan las entradas no inversoras de los amplificadores operacionales U1D y U1A respectivamente. Esto permite establecer una tensión de +400mV entre los electrodos *Working* y *Counter*, tal y como se especifica en el apartado 2.2.1, de forma que los electrones pueden circular entre los dos electrodos al aplicar sangre en la tira reactiva.

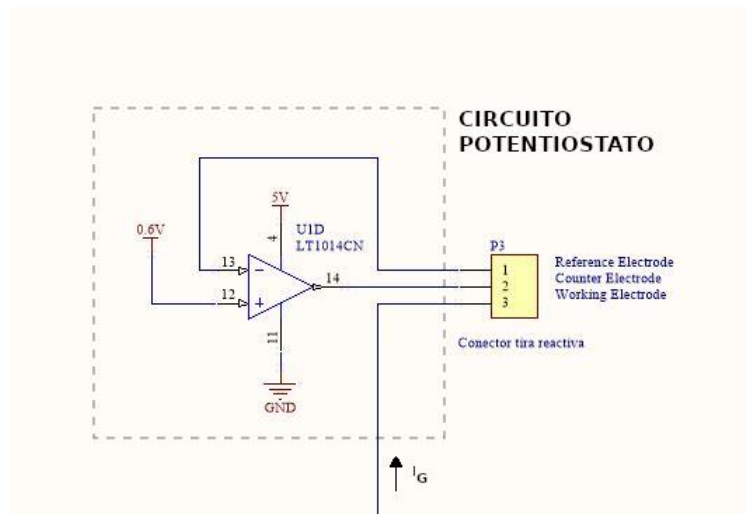
Circuito potentiostato.

Ilustración 10: Circuito potentiostato

El potentiostato (ver Ilustración 10) es un circuito compuesto de un amplificador operacional y de una fuente de tensión de 0.6V que se conecta a los terminales de Reference y Counter de la tira reactiva, cuyo objetivo es garantizar que la tensión en el terminal Counter sea de 0.6V. Ello, junto con la tensión de 1V el terminal Working, debido al convertidor corriente-tensión (véase Ilustración 9) da lugar a una diferencia de potencial de $1V - 0.6V = 400mV$ entre los electrodos Working y Counter. Esta diferencia de tensión provocará la circulación de una corriente I_G del orden de μA , proporcional al nivel de glucosa, que será convertida a tensión por el circuito convertidor corriente-tensión (ver Ilustración 9).

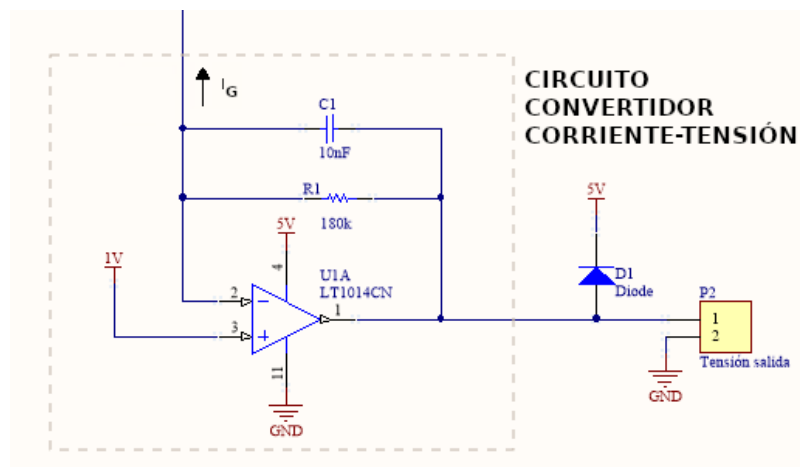
Circuito convertidor corriente-tensión.

Ilustración 11: Circuito convertidor corriente tensión

El circuito convertidor corriente tensión (ver Ilustración 11) lleva a cabo dos funciones a la vez:

Aplica sobre el terminal `Working` de la tira reactiva una tensión de 1V, de tal forma que la diferencia de potencial entre los terminales `Working` y `Counter` es de +400mV tal y como se explica en el apartado 2.2.1.

Convierte la corriente del terminal `Working` a tensión mediante la acción de la resistencia R1 de forma que la tensión de salida se aplica al microcontrolador tiene por expresión:

$$V_{salida} = 1V + 180k \cdot I_G$$

El valor de la resistencia se ha escogido de forma experimental. Se ha comprobado que para valores altos de R1, el amplificador operacional se satura. Pero si el valor de la resistencia es bajo, la amplificación del corriente resulta insuficiente ya que no se puede distinguir la diferencia de tensión entre dos valores de glucosa diferente. El valor de R1 con los mejores resultados obtenidos ha sido de 180kΩ, con el cual se pueden diferenciar valores de glucosa en un rango amplio: entre 60 y 260 mg/dl (ver Ilustración 18).

El condensador C1 paralelo a la resistencia R1 filtra el posible ruido del circuito. Teniendo en cuenta que se trata de un circuito que utiliza corriente continua y cuya dinámica no es muy rápida se considera que la frecuencia del filtro debe de ser de aproximadamente 100Hz. Con un condensador de 10nF se consigue un filtro cuya frecuencia de corte es de:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 180k \cdot 10n} = 88.41 \text{ Hz}$$

Se considera que una frecuencia de corte de 88.41Hz es aceptable para este circuito.

Junto al puerto P2 de tensión de salida se añade un diodo el cual impide que el Arduino reciba en la entrada analógica un valor superior a 5V. De esta forma se evitan posibles averías en el microcontrolador. El modelo de diodo escogido es el 1N4148.

El amplificador operacional escogido ha sido el LT1014CN debido a su baja corriente máxima de offset de 0.8nA y un valor bajo de tensión máxima de offset de 150μV [7]. No obstante, este amplificador operacional se satura a 4V, a pesar de no haber encontrado ningún problema con esta característica, escoger un amplificador operacional con una saturación menor mejoraría la precisión del glucómetro.

2.2.4 Módulo Bluetooth

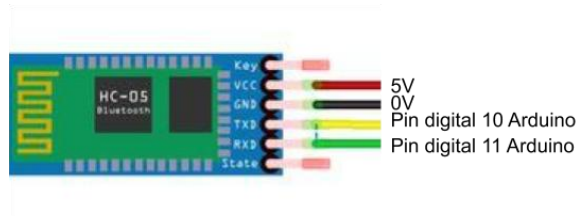


Ilustración 12: Conexión módulo Bluetooth [8]

Una vez obtenido un valor de glucosa, se procede a la transferencia del dato al teléfono inteligente mediante tecnología Bluetooth. Para este proyecto se ha escogido el módulo Bluetooth HC-05 porque se trata de un elemento muy utilizado y con mucha información presente en internet.

La conexión eléctrica realizada entre módulo y Arduino queda representada en la Ilustración 12.

En el anexo A 1.1 se detalla el código que gestiona la comunicación con el módulo HC-05 entre el microcontrolador y el teléfono móvil.

2.2.5 Placa de circuito impreso (PCB)

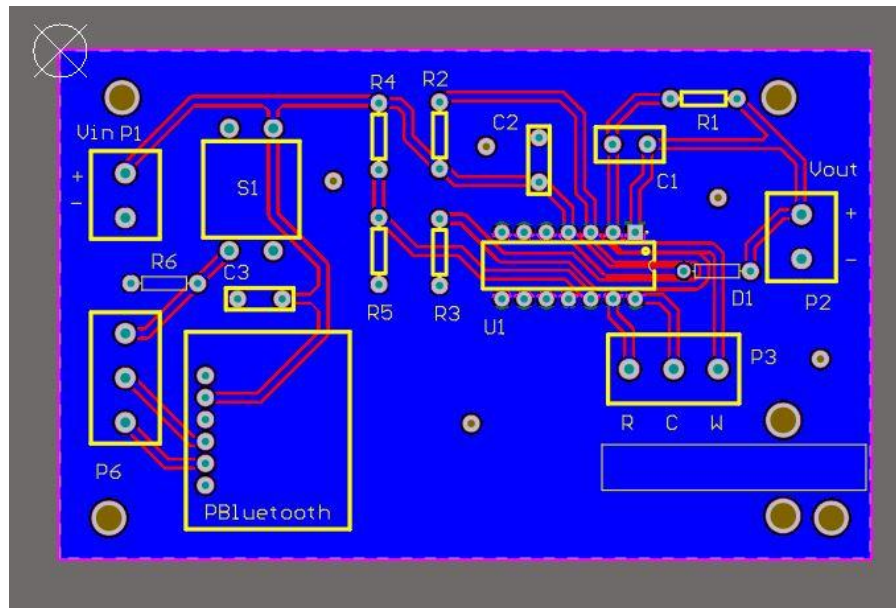


Ilustración 13: Diseño de la placa de circuito impreso.

Para el diseño de la placa se ha utilizado el programa Altium Designer [9] [10].

La placa de circuito impreso (ver Ilustración 13) está diseñada según las medidas del Arduino MEGA de tal forma que se pueda montar encima de ella gracias a cuatro agujeros para los tornillos de métrico 3.

Para simplificar el montaje y la soldadura de la placa, todas las pistas se ubican en la capa inferior. Los componentes se ubican en la capa superior y se sueldan por la capa inferior.

Los elementos que conforman una misma familia se agrupan en el mismo espacio para simplificar la placa y evitar pistas largas. Por ejemplo, el módulo Bluetooth, el pulsador, el puerto de alimentación P1 y el puerto de datos P6 se agrupan en la parte izquierda de la placa. El resto de elementos, como el amplificador operacional, las resistencias, los condensadores y los puertos P2 y P3, se agrupan en la parte derecha superior.

En la parte inferior derecha se ubica el conector de las tiras reactivas, que es sujetado mediante dos tornillos y una placa metálica para asegurar una sujeción fuerte y segura tal y como se ha especificado en el apartado 2.2.1.

Se utiliza un plano de masa en la capa inferior de forma que se consigue una masa (0V) más uniforme, además de evitar problemas de ruido y un gasto innecesario de cobre en el fresado de la placa.

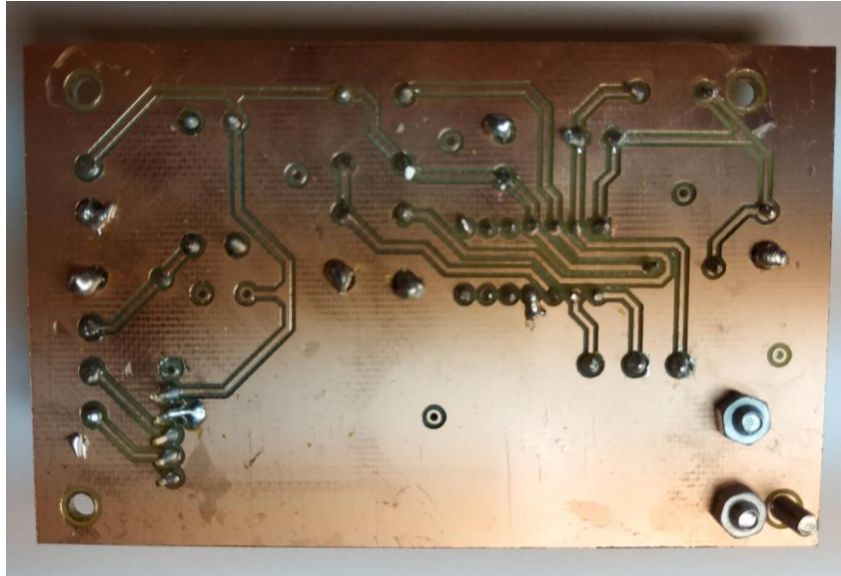


Ilustración 14: Placa de circuito impreso. Capa inferior.



Ilustración 15: Placa de circuito impreso. Capa superior

En la Ilustración 14 se visualiza la capa inferior de la placa de circuito impreso, y en la Ilustración 15 la capa superior con todos los componentes soldados a la placa.

2.3 Desarrollo Software

2.3.1 Caracterización de una regresión para el cálculo de glucosa

Al introducir una gota de sangre en la tira reactiva One Touch Ultra, el circuito analógico devuelve un valor de tensión en función del tiempo, que es analizado por el microcontrolador. Para poder conocer el valor de glucosa correspondiente al valor de tensión obtenido es necesario disponer de una regresión que permita relacionar ambas variables.

Para ello, en la fase de experimentación y diseño de la regresión, cada vez que se realice un análisis con el prototipo del glucómetro, se realiza otro análisis con un glucómetro comercial para conocer el valor de glucosa de la sangre medida.

De esta forma, una tabla relacionará el valor de tensión aportado por el prototipo de glucómetro y el índice de glucosa aportado por el glucómetro comercial.



Ilustración 16: Glucómetro de referencia y dispositivos necesarios

El glucómetro comercial de referencia seleccionado es el glucómetro One Touch Ultra 2, ya que utiliza las mismas tiras reactivas que el prototipo y es un dispositivo real usado en pacientes de diabetes. En la Ilustración 16 se puede observar los instrumentos utilizados cuando se realiza un análisis: el glucómetro comercial One Touch Ultra 2, un dispositivo dispara-lancetas, un bote con 25 tiras reactivas One Touch Ultra, una tira reactiva de la misma marca, y una lanceta.

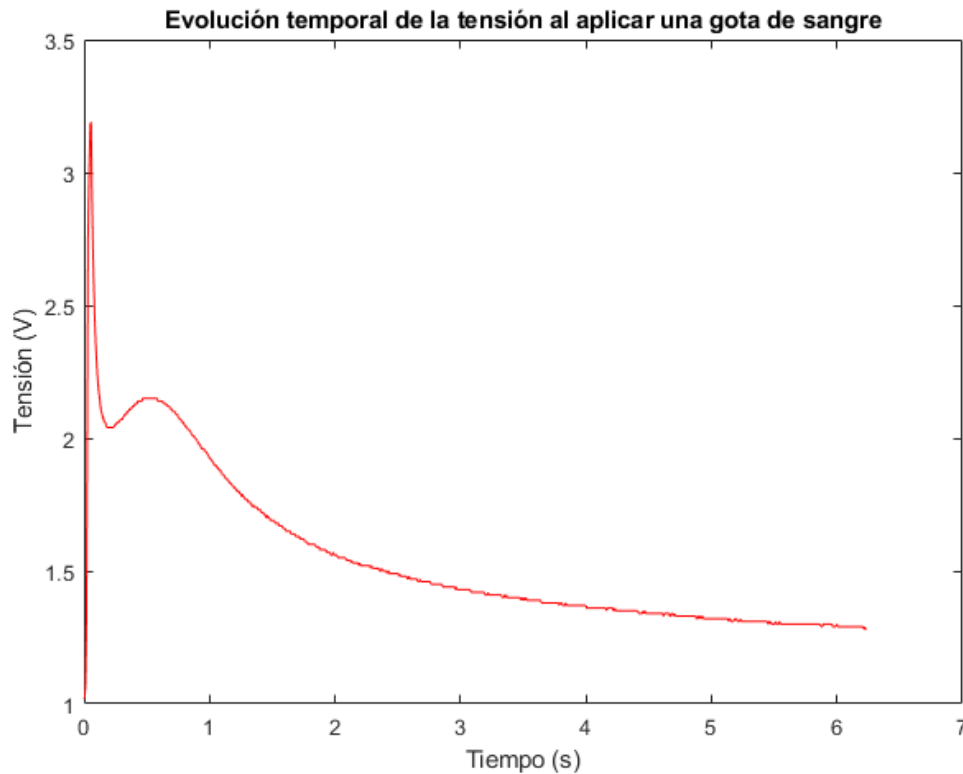


Ilustración 17: Evolución temporal de la tensión al aplicar una gota de sangre

Para poder representar la evolución de la tensión en función del tiempo, se programa el Arduino de tal forma que permita capturar todos los valores de tensión durante los 6 segundos posteriores a la aplicación de sangre en la tira reactiva. Una vez adquiridos los datos, se exportan los valores a Matlab se grafican y se guardan para analizarlos.

Cada experimento realizado es muy valioso, ya que se necesitan dos tiras reactivas y dos lancetas para poder obtener una sola gráfica. Es por ello que si se detecta alguna anomalía en algún experimento, no se debe borrar, ya que no se disponen de grandes cantidades de datos.

El código usado para capturar valores de tensión se puede consultar en el anexo, apartado 1.2.

En la Ilustración 17 se ejemplifica la evolución temporal de la tensión al introducir una gota de sangre en la tira reactiva. En todos los casos analizados, se ha apreciado un pico de tensión justo al introducir la gota de sangre. El pico de tensión siempre se producía antes de $t = 1s$. Por ello, para realizar la regresión siempre se ha descartado los valores de tensión entre $t = 0s$ y $t = 1s$.

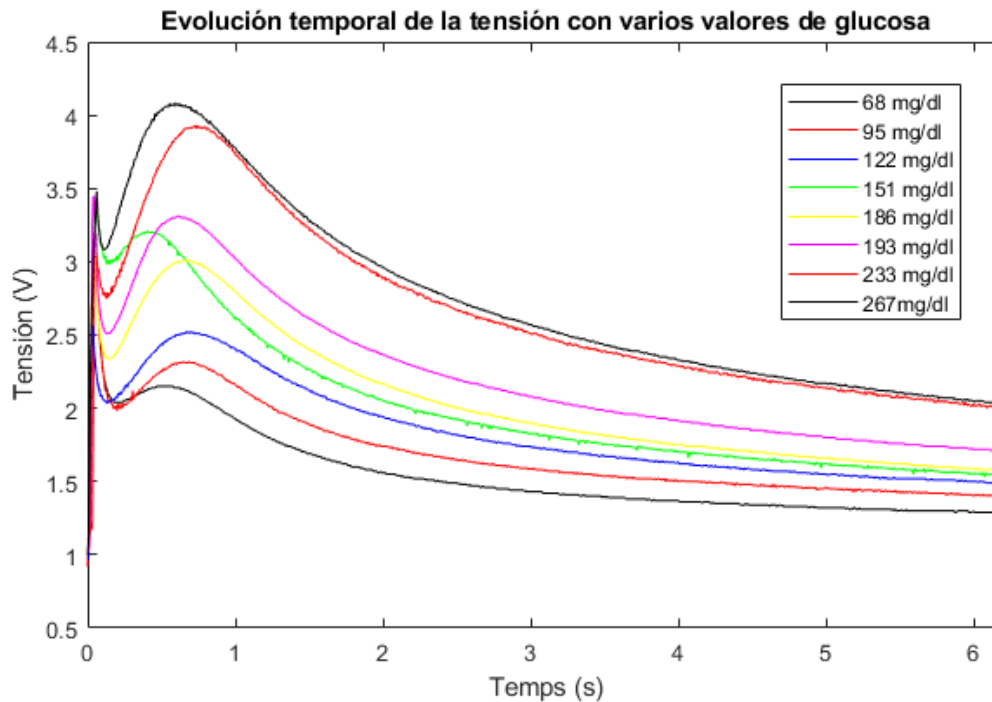


Ilustración 18: Evolución temporal de tensión en función del nivel de glucosa

Para poder obtener una regresión que relacione tensión y glucosa, se realizan varios análisis (ver Ilustración 18), con la mayor variedad de datos posibles, desde valores más bajos de glucosa, hasta los más altos, con una separación aproximada de 20 mg/dl.

- El mínimo valor conseguido corresponde a la línea negra de menor amplitud, de valor 68mg/dl.
- El máximo valor conseguido corresponde a la línea negra de mayor amplitud, de valor 267mg/dl.

Se puede apreciar que la línea correspondiente a un índice de glucosa de 233 mg/dl es muy cercana a la línea correspondiente a un índice de glucosa de 267 mg/dl, cuando debería haber una ligera separación entre ellas. Durante el procesado de datos para calcular la ecuación de regresión, se podrá eliminar este dato declarándolo como `outlier` si se considera oportuno.

De forma general, se puede apreciar que a mayor concentración de glucosa se recibe mayor tensión.

Se puede comprobar que el pico de tensión inicial no guarda ninguna relación con el valor de glucosa.

Se han seleccionado dos posibles métodos para adquirir un valor medio de tensión para cada señal de cada glucosa dentro de la zona estacionaria:

- Método 1: Capturar 10 muestras después de 2 segundos de haber aplicado la gota de sangre en la tira reactiva.
- Método 2: Capturar tantas muestras como sea posible, entre el segundo 2 y el segundo 3 desde la aplicación de la gota de sangre en la tira recta.

Para calcular el valor medio, se suman todas las muestras y se divide el resultado por la cantidad de muestras. El código de Matlab para el procesado de los valores medios, se puede encontrar en el Anexo, apartado B.

Para cada método, se calculará una regresión lineal y una regresión polinómica de segundo grado. Se comparan todos los resultados y se escoge la regresión que se considere que pueda predecir mejor el comportamiento del sistema.

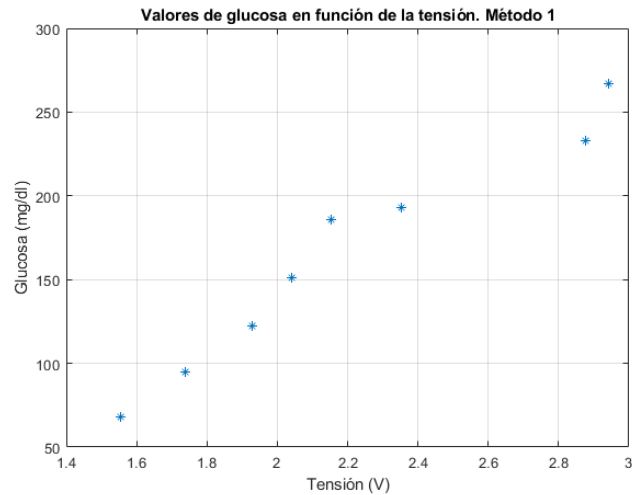


Ilustración 19: Glucosa en función de la tensión media. Método 1

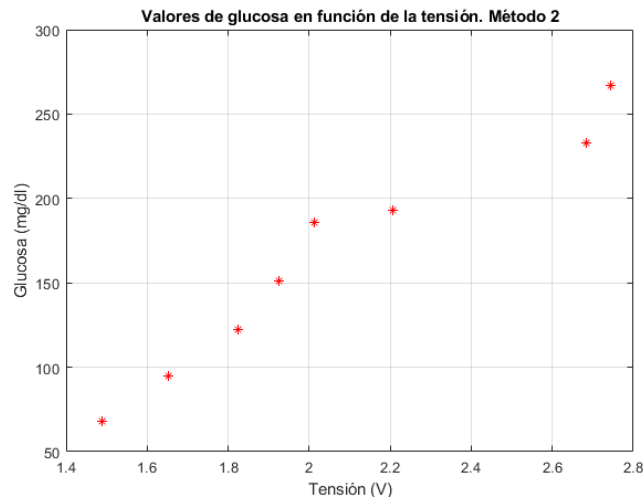


Ilustración 20: Glucosa en función de la tensión media. Método 2

Una vez calculado el valor de tensión media de cada señal mostrada en la Ilustración 18, se grafica en la Ilustración 19, usando el método 1, y en la Ilustración 20, usando el método 2.

Comparando la Ilustración 19 y la Ilustración 20, se puede apreciar poca diferencia en los valores de tensión media entre los dos métodos. A simple vista se puede distinguir una posible relación lineal para los dos métodos, pero para llegar a una conclusión hace falta hacer uso de las herramientas que nos ofrece Matlab para poder escoger la mejor opción.

La herramienta usada en este caso para calcular la ecuación que relaciona la glucosa según la tensión es la herramienta `Curve Fitting Toolbox`.

Tras importar los datos a la herramienta, se plantean distintas opciones para encontrar una regresión adecuada a los datos.

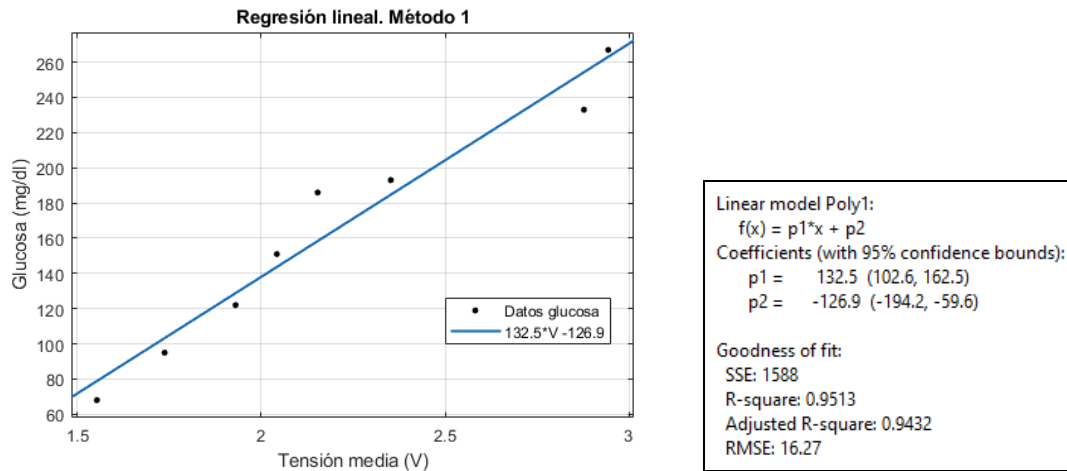


Ilustración 21: Regresión lineal. Método 1 para calcular valor medio de tensión

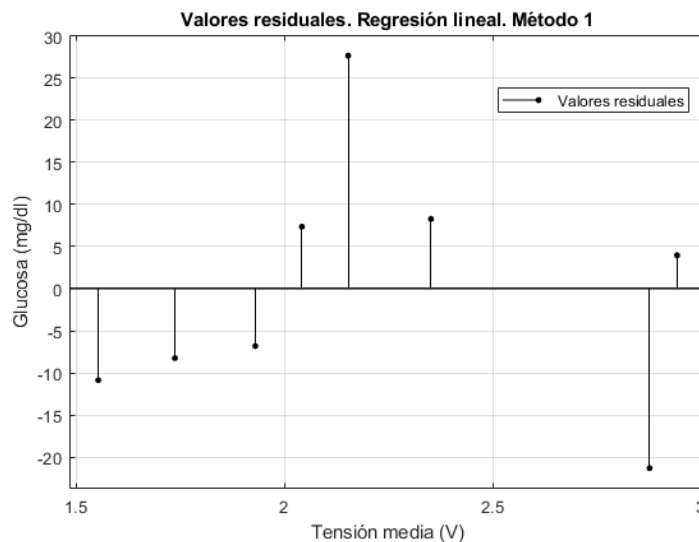


Ilustración 22: Valores residuales al usar regresión lineal con el método 1.

En la Ilustración 21 se visualiza la regresión lineal obtenida mediante la herramienta *Curve Fitting Toolbox*. A su derecha, un resumen de los parámetros de la regresión, como los coeficientes $p1$ y $p2$, el valor R^2 (*R-squared*), el valor ajustado de R^2 y el RMSE. El valor R^2 servirá posteriormente para comparar y analizar la calidad de predicción de todas las regresiones calculadas [11].

El valor de R^2 se encuentre entre el 1 si se trata de una regresión que predice perfectamente el comportamiento del sistema y el 0 si la capacidad de predicción de la regresión es nula.

En la Ilustración 22 se representan de forma gráfica los valores residuales. Los valores residuales se definen como la diferencia entre la predicción de la regresión y los datos reales. Queda remarcado que hay dos valores que destacan por tener unos valores altos residuales.

En este caso se trata de los valores de 186 y 233 mg/dl los cuales tienen un valor residual mayor a 15mg/dl.

Dado que se obtienen valores residuales altos en los casos de 186mg/dl y 233mg/dl, se consideran estos valores como *outliers* y se vuelve a obtener, para todos los casos, la regresión lineal y la regresión polinómica de segundo orden para comparar si el resultado mejora.

Resumiendo, se tratan los datos en ocho escenarios:

- Método 1 valores medios, regresión lineal. Sin eliminar *outliers*.
- Método 1 valores medios, regresión polinómica segundo grado. Sin eliminar *outliers*.
- Método 2 valores medios, regresión lineal. Sin eliminar *outliers*.
- Método 2 valores medios, regresión polinómica segundo grado. Sin eliminar *outliers*.

- Método 1 valores medios, regresión lineal. Eliminar *outliers*.
- Método 1 valores medios, regresión polinómica segundo grado. Eliminar *outliers*.
- Método 2 valores medios, regresión lineal. Eliminar *outliers*.
- Método 2 valores medios, regresión polinómica segundo grado. Eliminar *outliers*.

Las ilustraciones correspondientes a los escenarios que no aparecen en la memoria se pueden consultar en el Anexo, apartado C.

Sin eliminar outliers		
Método y regresión utilizados		Valor R^2
Método 1	Regresión lineal	0.9513
	Regresión polinómica segundo orden	0.9719
Método 2	Regresión lineal	0.9470
	Regresión polinómica segundo orden	0.9697

Tabla 1: Valores R^2 sin eliminar outliers

Eliminando outliers		
Método y regresión utilizados		Valor R^2
Método 1	Regresión lineal	0.9931
	Regresión polinómica segundo orden	0.9970
Método 2	Regresión lineal	0.9927
	Regresión polinómica segundo orden	0.9971

Tabla 2: Valores R^2 eliminando outliers

La Tabla 1 y la Tabla 2 resumen todos los experimentos realizados, indicando en cada caso el valor de R^2 , el cual permite analizar la calidad de predicción de la regresión.

Analizando los resultados de las dos tablas anteriores se observa que de forma sistemática el valor de R^2 de la regresión polinómica de segundo grado es ligeramente superior al valor de R^2 de regresión lineal.

El método 2 para la adquisición de valores de tensión medio empeora en casi todos los casos respecto el método 1. Además, el método 2 necesita un segundo para obtener los datos para realizar el valor medio de tensión. En cambio, el método 1 mejora este aspecto, ya que solo obtiene 10 valores para calcular un valor medio de tensión, y por tanto es mucho más rápido.

Considerando los valores de 186 y 233 mg/dl como *outliers* se observa un incremento en el valor de R^2 y valores residuales menores. A pesar de mejorar la calidad de predicción de la regresión, no se considera buena práctica eliminar valores en este experimento debido a la poca cantidad de datos disponibles que permiten caracterizar el sistema.

Se concluye en utilizar las regresiones calculadas sin eliminar valores *outliers*, usando el método 1 y mediante regresión polinómica de segundo grado.

Por tanto, la ecuación considerada que relaciona tensión y glucosa de la mejor forma en el prototipo de glucómetro es la siguiente:

$$\text{Glucosa} \left(\frac{\text{mg}}{\text{dl}} \right) = -48.16 \cdot V_m^2 + 353.5 \cdot V_m - 369.4$$

V_m equivale al valor medio de tensión al transcurrir 2 segundos desde el pico de tensión inicial.

2.3.2 Algoritmo Arduino

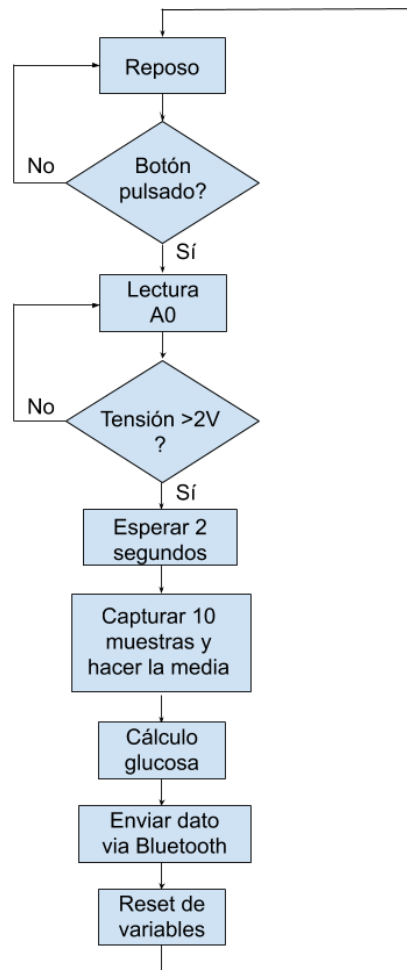


Ilustración 23: Diagrama de flujo que describe el algoritmo del código de Arduino

En la Ilustración 23 se observa el diagrama de flujo el cual describe las acciones que realiza el Arduino paso por paso cuando está en funcionamiento.

Arduino se encuentra en reposo hasta que recibe una interrupción provocada por la acción de pulsar el botón. Desde ese momento, se lee cíclicamente la entrada analógica A0, hasta que se detecta un pico de tensión (2V). Se espera dos segundos y se capturan 10 muestras para posteriormente efectuar la media aritmética. Posteriormente se calcula el índice de glucosa a partir de la regresión polinómica y se envía el dato vía Bluetooth. Una vez se ha emitido el dato, se borra el valor de todas las variables para asegurar un funcionamiento cíclico.

El código completo del Arduino se encuentra en el Anexo, apartado A 1.1

2.3.3 Resumen general de la aplicación



Ilustración 24: Logo de la aplicación

La aplicación (cuyo logo se muestra en la Ilustración 24) consiste de tres pantallas, también llamadas *Activities*, las cuales se comunican entre ellas y juntas cumplen la función de organizar y gestionar los datos recibidos del glucómetro de forma cómoda, sencilla y visual.

El modelo de datos de la aplicación gestiona los datos de los análisis, como el valor de la glucosa, el día y la hora y los comentarios.

La salvaguarda de los datos se realiza de forma interna dentro del terminal móvil Android, escribiendo en un fichero el cual la aplicación puede acceder. Cada vez que la aplicación se cierra, el sistema realiza una copia de seguridad de los datos. Incluso cuando la aplicación es eliminada del teléfono y se vuelve a instalar, los datos asociados no son eliminados ya que el móvil realiza una copia de seguridad.

La comunicación inalámbrica con el glucómetro es realizada gracias a la tecnología Bluetooth, la cual está implantada en la aplicación mediante dos clases. Una clase realiza las gestiones para buscar y conectarse a un módulo Bluetooth. La otra clase realiza la conexión y la transferencia de datos.

La programación de la aplicación se ha realizado con la ayuda de GitHub, una plataforma ampliamente usada para almacenar y compartir código. Esta plataforma ofrece también alojar el proyecto y gestionar sus versiones ayudando a la creación de esta aplicación.

La dirección de GitHub que contiene el proyecto es la siguiente:

<<https://github.com/danielmonleonguerrero/SmartBlood>>

El código referente a la programación de la aplicación se puede encontrar en el Anexo, apartado D.

La aplicación SmartBlood se respalda también de otros proyectos Open Source provenientes de la plataforma Github. Estos proyectos han brindado una mayor eficiencia y fiabilidad a la aplicación, ya que han sido usados para la creación del calendario y para realizar la comunicación Bluetooth.

Sin estos proyectos, la realización de la aplicación hubiese requerido más tiempo, y el resultado no hubiera sido igual de satisfactorio. Los proyectos mencionados son los siguientes:

- “Scroll Calendar” creado por Rafal Manka [12].
- “Sending and receiving data with Bluetooth” creado por mitchtabian [13].

2.3.4 Modelo de datos de la aplicación

La aplicación hace uso de dos clases, `Analisis` y `DiaAnalisis`.

Analisis

Dentro de la clase `Analisis` se encuentran los valores necesarios para registrar el análisis en la aplicación. Las variables que usa esta clase son las siguientes:

- `tiempo` de tipo `Date`, el cual contiene un dato compuesto por el año, el mes, el día, la hora y el minuto.
- `nivelGlucosa` de tipo `int`, el cual contiene el valor que se ha transferido desde el glucómetro.
- `nota1` de tipo `String`, el cual contiene el valor de la primera nota marcada.
- `nota2` de tipo `String`, el cual tiene el valor de la segunda nota marcada.

La clase `Analisis` también implementa los métodos `getters` para las variables `nivelGlucosa`, `nota1`, `nota2`, `tiempo`. Con estos métodos, se puede recibir el valor de los campos del objeto.

El sistema guarda todos los objetos de la clase `Analisis` en una lista ordenada según el orden de llegada de los datos.

DiaAnalisis

`DiaAnalisis` está constituido por una lista de objetos de la clase `Analisis`. Es necesaria la existencia de esta clase porque de esta forma se permite la transferencia de varios objetos de la clase `Analisis` entre actividades encapsulados en un mismo objeto. Por ejemplo, un objeto de esta clase ha sido usado para la transferencia de varios objetos de la clase `Analisis` entre `Calendar Activity` y `ResumenAnalisis Activity`.

2.3.5 Navegación entre pantallas de la aplicación

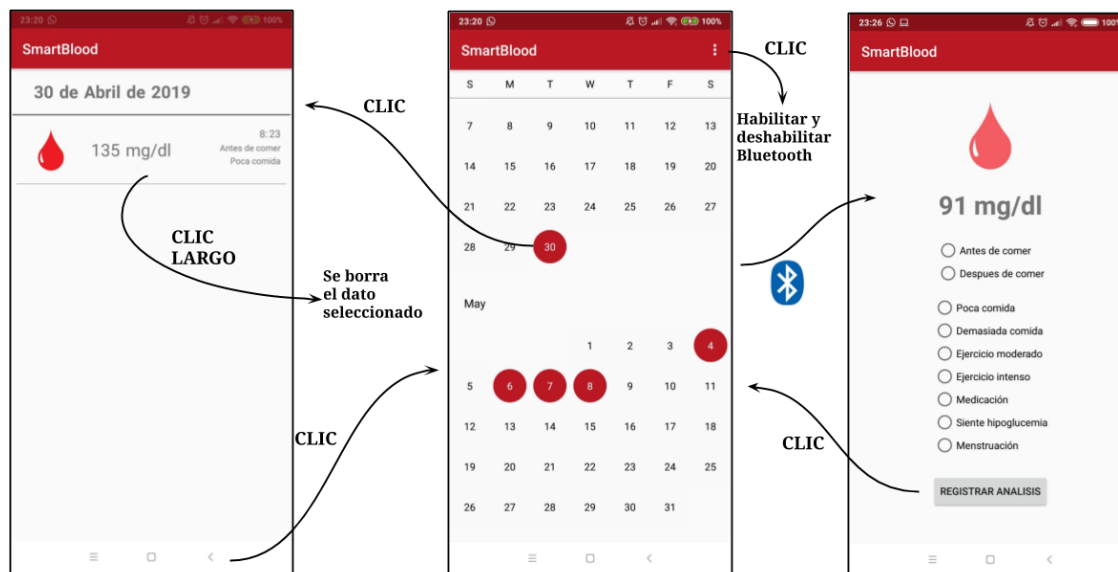


Ilustración 25: Navegación entre pantallas de la aplicación

La aplicación se ha diseñado de tal forma que la navegación entre las tres pantallas sea intuitiva. En la Ilustración 25 se visualiza la interacción entre las tres pantallas de forma esquemática.

En la pantalla central, se resaltan los días donde se ha realizado un análisis marcando el día en un círculo rojo. De esta forma, es fácil identificar si se ha realizado un análisis o no.

Mediante los tres puntos verticales en la barra superior, se accede a los botones para habilitar y deshabilitar la conexión Bluetooth.

Haciendo clic sobre cualquiera de los días en la pantalla del calendario, aparecerá la pantalla de la izquierda. En esta pantalla, se visualizan los análisis realizados en el día seleccionado. Cada análisis tiene el valor de glucosa medido, la hora en la que se ha realizado, y las dos notas que sirven para caracterizar la medida. No hay límite para registrar análisis por día. Desde esta misma pantalla, si se mantiene presionado cualquier análisis durante un breve momento, aparecerá un cuadro de diálogo confirmando si deseamos borrar el análisis seleccionado.

Si la aplicación ha sido conectada con el glucómetro vía Bluetooth con éxito, y se ha realizado un análisis, aparecerá la pantalla de la derecha. En esta pantalla, se nos muestra el valor de glucosa del análisis realizado, y se nos permitirá marcar dos comentarios que ayudarán a caracterizar la medida. Por ejemplo, es posible que se haya obtenido un valor de glucosa alto debido a la consumición de medicamentos. Si estamos conformes con el análisis y deseamos registrarlo en el sistema, hace falta apretar el botón inferior "Registrar análisis", la aplicación volverá a la pantalla del calendario, donde será posible visualizar el nuevo análisis si clicamos el día en el que se hizo el análisis.

2.3.5.1 CalendarActivity

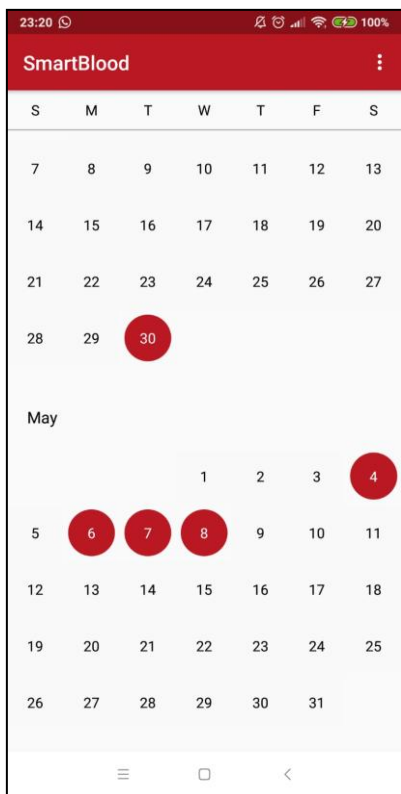


Ilustración 26: Calendar Activity

Calendar Activity	
Modelo de datos	BluetoothConnection bluetoothConnection List<Analysis> ListAnalysis
Métodos	onCreate() onBackPressed() onStop() onOptionsItemSelected(Menu menu) onOptionsItemSelected(Menuitem item) estaMarcado(int year, int month, int day) CargarDatosAnalysis() GuardarDatosAnalysis() crearStringSalvaguarda() onActivityResult(int requestCode, int resultCode, Intent data)

Tabla 3: Propiedades CalendarActivity

Calendar Activity (ver Ilustración 26 y Tabla 3) es la pantalla inicial y principal de la aplicación, la primera que se visualiza al abrir la aplicación. En ella se aprecia un calendario que ocupa toda la pantalla y una pequeña barra superior donde aparece el nombre de la aplicación y tres puntos a la derecha que permiten abrir el menú Bluetooth.

Esta aplicación gestiona una lista de objetos de la clase Analysis donde guardar todos los análisis registrados y permite visualizar los datos necesarios en el momento de lanzar ResumenAnalysisActivity.

Si se recibe un dato proveniente de RegistrarAnalysisActivity, se introduce el nuevo análisis en la lista.

Métodos usados en esta actividad.

Al iniciar esta actividad, se ejecuta el código presente en el método onCreate(). En este método se configura el calendario y se programa el listener¹, el cual genera una interrupción cada vez que se hace clic sobre un día del calendario.

¹ Interrupciones que ejecutan código cuando se hace clic sobre un elemento. [14]

Los métodos `onCreateOptionsMenu` y `onOptionsItemSelected` crean un pequeño menú superior con dos opciones que permiten encender y apagar la comunicación Bluetooth del teléfono Android. Cuando se necesite hacer un análisis, simplemente se accede a la aplicación, se abre el menú, y se habilita la comunicación inalámbrica. En caso que no sea necesario realizar un análisis se recomienda deshabilitar la comunicación Bluetooth de tal forma que el consumo de energía del teléfono móvil sea el mínimo posible.

El método `setDateWatcher()` permite al calendario saber qué días se tienen que marcar con el círculo de color rojo. Con el método `estaMarcado()` se recorre todos los objetos de la clase `Analisis` presentes en el modelo de datos e informa a `setDateWatcher()` si se necesita marcar el día.

Los métodos `onBackPressed()` y `onStop()` se sobreescriben de tal forma que realicen un copia de seguridad antes de cerrar la aplicación. La gestión de la salvaguarda requiere de los siguientes métodos:

- `GuardarDatosAnalisis()`
- `crearStringSalvaguarda()`
- `CargarDatosAnalisis()`

`GuardarDatosAnalisis()` abre un fichero y mediante el método `crearStringSalvaguarda()` se crea una variable del tipo `string` con los datos ordenados de cada análisis, de tal forma que posteriormente sea posible recuperar los datos. Se usa el mecanismo `try/catch` para gestionar las posibles excepciones que puedan ocurrir al usar métodos que permiten abrir archivos y escribirlos.

`crearStringSalvaguarda()` genera un `string` con los datos de cada análisis separados por el carácter `"/"` en el siguiente orden:

1. Nivel de glucosa
2. Nota1
3. Nota2
4. Año
5. Mes
6. Día
7. Hora
8. Minuto

Al final de cada análisis se escribe un salto de línea `"\n"`. A continuación se muestra un ejemplo del `string`:

```
102/Después de comer/Medicación/2019/4/16/20/06
```

`CargarDatosAnalisis()` permite leer el fichero usado por el método `GuardarDatosAnalisis()` para poder recuperar los valores guardados. Este método hace uso de la herramienta `Scanner`, la cual lee un `string` y lo divide en varias partes de tal

forma que se pueda acceder a ellas de forma independiente, especificando que el carácter separador es “/”.

El método `onActivityResult()` recibe un objeto de la clase `DiaAnalysis`, el cual contiene una lista de objetos de la clase `Analysis`. Los análisis recibidos en este método son los que el usuario ha especificado borrar desde `ResumenAnalysisActivity`. De esta forma, se mantienen los datos siempre actualizados.

2.3.5.2 RegistrarAnalysis Activity

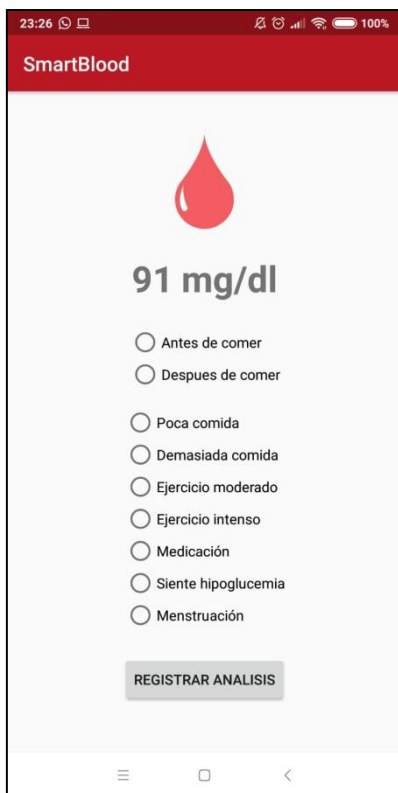


Ilustración 27: Registrar Analysis Activity

RegistrarAnalysis Activity	
Modelo de datos	String glucosa
Métodos	onCreate() onRegistrar() String PathImageGenerator (int nivelGlucosa)

Tabla 4: Propiedades RegistrarAnalysis Activity

`RegistrarAnalysisActivity` (ver Ilustración 27 y Tabla 4) es la pantalla que aparece al recibir un dato de glucosa desde el módulo Bluetooth del glucómetro. En esta pantalla, se visualiza una pequeña barra superior donde aparece el nombre de la aplicación. En el cuerpo de la pantalla, aparece una imagen con una gota de sangre y debajo de ella, la medida de glucosa que el glucómetro ha realizado, además de un par de items que podemos seleccionar para dar un contexto al análisis realizado.

Se permite especificar si el análisis ha sido realizado antes o después de comer, también se puede añadir si se ha realizado una actividad que pueda afectar a la medida. La lista de las opciones posibles es la siguiente:

- Poca comida
- Demasiada comida
- Ejercicio moderado
- Ejercicio intenso
- Medicación
- Siente hipoglucemia
- Menstruación

Todas estas actividades pueden afectar a la medida de la glucosa, haciendo que sea mayor o menor de lo habitual. Es por esto que es recomendable añadir los dos comentarios a cada análisis.

En la parte inferior de la pantalla existe un botón que al ser apretado, registrará el análisis y aparecerá la pantalla `CalendarActivity`.

Métodos usados en esta actividad.

Cada vez que se recibe un dato vía Bluetooth esta pantalla aparece y se ejecuta el código presente en el método `onCreate()`. En este método, se recibe el dato de glucosa mediante un `intent`², y los escribe por pantalla. Para generar la imagen, se llama al método `PatchImageGenerator()`.

`PathImageGenerator()` es un método llamado desde `onCreate()` que permite obtener un `string` con la dirección de la imagen de la gota de sangre, de tal forma que la aplicación es capaz de localizarla y mostrarla por pantalla. El `string` generado por este método es el siguiente:

```
"file:///android_asset/bloodrop100.png"
```

El método `onRegistrar()` es el método que se ejecuta cuando se pulsa sobre el botón "Registrar Análisis". Al hacer clic sobre este botón, se crea un objeto nuevo de la clase `Analisis` y se introducen los valores de nivel de glucosa, la fecha presente en el teléfono móvil, y los comentarios seleccionados y se envía el objeto a `CalendarActivity` el cual lo recibirá y lo incluirá en la lista de objetos de la clase `Analisis`.

² Un `intent` se define como una descripción abstracta de una operación pendiente de ser realizada. Es usado principalmente para iniciar otras `Activities` [15].

2.3.5.3 ResumenAnalysisActivity



Ilustración 28: ResumenAnalysis Activity

ResumenAnalysis Activity	
Modelo de datos	List<Analysis> ListAnalysis DiaAnalysis diaAnalysis
Métodos	onCreate() onBackPressed() onLongClickItem(final int position) borrarAnalysis(int position) PathImageGenerator(int nivelGlucosa)

Tabla 5: Propiedades ResumenAnalysis Activity

ResumenAnalysisActivity (ver Ilustración 28 y Tabla 5) es la pantalla encargada de mostrar los análisis registrados en el día seleccionado desde CalendarActivity. Se visualiza una barra superior con el nombre de la aplicación. Más abajo, se indica el día, mes y año de la fecha seleccionada previamente, seguidamente de los análisis tomados el día especificado.

No hay un número máximo de análisis por cada día. Por tanto, en caso de existir muchos análisis en un mismo día, basta con deslizar el dedo por la pantalla para visualizarlos todos.

En cada análisis, se puede observar la figura de una gota de sangre, el valor de glucosa y las anotaciones correspondientes y finalmente la hora y el minuto del momento del análisis realizado en la esquina superior.

Desde esta misma pantalla, si se desea eliminar un análisis, se mantiene pulsado durante un breve momento el análisis correspondiente. Seguidamente aparecerá un cuadro de diálogo que preguntará al usuario si desea borrar el dato.

Métodos usados en esta actividad.

Cuando esta pantalla aparece, la programación existente en el método `onCreate()` se ejecuta. En este método, se recibe un objeto de la clase `DiaAnalisis` mediante un `intent`. Dentro del objeto `diaAnalisis` se encuentra una lista de objetos de la clase `Analisis`. Estos objetos corresponden a los análisis realizados el día que se ha seleccionado desde `CalendarActivity`.

Estos análisis se muestran mediante una herramienta llamada `RecyclerView`. Esta herramienta permite tener una lista deslizable por la pantalla. De esta forma, se pueden visualizar tantos datos como se quiera en la pantalla del teléfono. Para implementar esta herramienta, es necesaria la creación de las clases `ViewHolder` y `Adapter`. La primera clase se encarga de la visualización, distribución y programación de un solo elemento de la lista. La clase `Adapter`, recoge la programación en la clase `ViewHolder` y la repite para todos los elementos de la lista, gestionando los datos de tal forma que se actualiza cada vez que se desliza por la lista.

La herramienta `RecyclerView` es llamada así porque gestiona los datos, reciclando los recursos disponibles.

El método `onLongClickItem()` está programado dentro de la clase `ViewHolder`. Se ejecuta cuando se pulsa durante un tiempo concreto un análisis de la lista mostrada. Desde este método se llama a `borrarAnalisis()`, la cual se encarga de eliminar la visualización del dato en el `RecyclerView` y añade el análisis especificado a una lista de `Analisis`, la cual pasará a `CalendarActivity` para que lo borre del modelo de datos al pulsar el botón "Atrás" de la botonera del teléfono móvil, es decir, desde el método `onBackPressed()`.

`PathImageGenerator()` es un método llamado desde `onCreate()` que permite obtener un `string` con la dirección de la imagen de la gota de sangre, de tal forma que la aplicación es capaz de localizarla y mostrarla por pantalla. El `string` generado por este método es el siguiente:

```
"file:///android_asset/bloodrop100.png"
```

2.3.6 Comunicación Bluetooth desde la aplicación

La comunicación Bluetooth está dividida en dos clases dentro la aplicación. Las clases usadas para la comunicación inalámbrica están ubicadas en la carpeta (también llamado `package`) `ConexionBT` y son las siguientes:

- `BluetoothConnection`.
- `BluetoothConnectionService`.

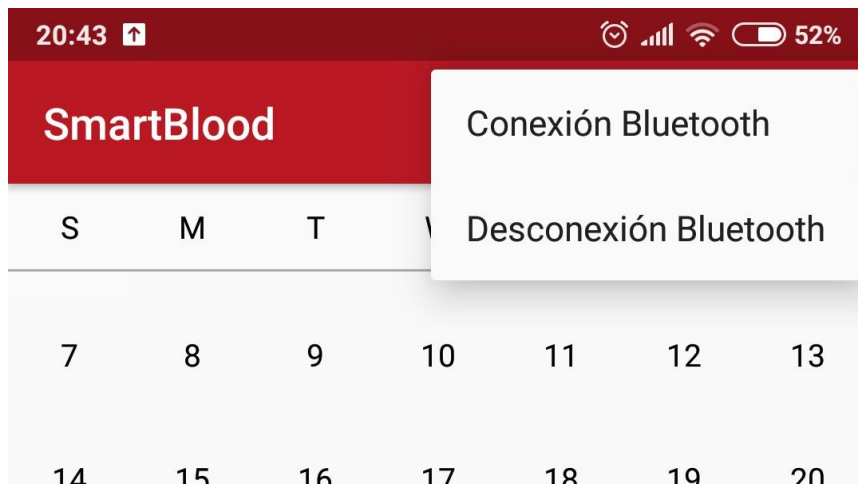


Ilustración 29: Botones para la gestión de comunicación Bluetooth

Para empezar la comunicación con el glucómetro, se accede a la pantalla principal de la aplicación SmartBlood, se hace clic sobre los tres puntos verticales, apareciendo el menú de la Ilustración 29.

Al hacer clic sobre el botón “Conexión Bluetooth”, el método `startConnection()` del objeto `bluetoothConnection` es llamado. En este método busca si existen dispositivos emparejados con la dirección “00:14:03:05:F3:AA”. Esta dirección es única y pertenece a la dirección del módulo Bluetooth instalado en la placa de circuito impreso del glucómetro. En caso afirmativo, se crea un nuevo objeto de la clase `BluetoothConnectionService` y se llama al método `startClient()`.

Si se selecciona la opción “Desconexión Bluetooth” se deshace la comunicación inalámbrica y no se podrán recibir los datos desde el glucómetro. Se recomienda desconectar la comunicación Bluetooth si no se desea hacer un análisis de sangre.

Para conseguir una transferencia de datos satisfactoria entre dos dispositivos mediante tecnología Bluetooth, es necesario que tanto servidor como cliente tengan un `socket Bluetooth` conectado al mismo canal `RFCOMM`³. Cuando esto sucede, cliente y servidor tienen a su disposición un flujo de entrada y salida de datos a los cuales pueden acceder.

En este caso, el teléfono móvil Android inicia la comunicación como cliente y como servidor. La clase `BluetoothConnectionService` implementa 3 `Threads`⁴ distintos: `AcceptThread()`, `ConnectThread()` y `ConnectedThread()`, que permiten realizar la conexión como servidor y como cliente.

`AcceptThread()` es el `Thread` correspondiente a la creación de comunicación considerando el teléfono Android como servidor, y el módulo HC-05 del glucómetro como cliente. Una vez que el módulo Bluetooth del glucómetro se conecta al `server socket` del teléfono, la aplicación recibe un `socket` que permite establecer una conexión válida y a partir de `ConnectedThread()` se obtienen los valores enviados vía Bluetooth por el glucómetro.

`ConnectThread()` es el `Thread` correspondiente a la creación de comunicación considerando el teléfono Android como cliente, y el módulo HC-05 del glucómetro como servidor. Una vez que el teléfono se conecta al `server socket` del módulo, se establece una conexión válida y a partir de `ConnectedThread()` se obtiene los valores enviados vía Bluetooth por el glucómetro.

³ RFCOMM es un protocolo utilizado en la comunicación Bluetooth. [16].

⁴ `Thread` es código que puede ser ejecutado de forma simultánea a otros `threads` [17].

3 CONCLUSIONES Y RESULTADOS

3.1 Resumen de los aspectos generales del glucómetro y de la aplicación

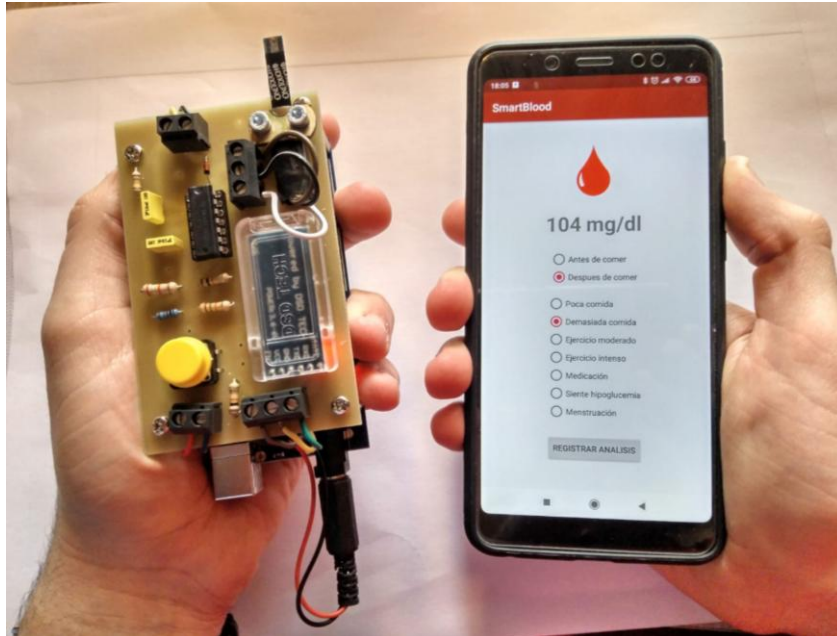


Ilustración 30: Aspecto final glucómetro y aplicación en funcionamiento

El aspecto final del proyecto, se visualiza en la Ilustración 30. A mano izquierda, el glucómetro justo después de haber realizado un análisis de sangre. A mano derecha, la aplicación muestra por pantalla el resultado del análisis.

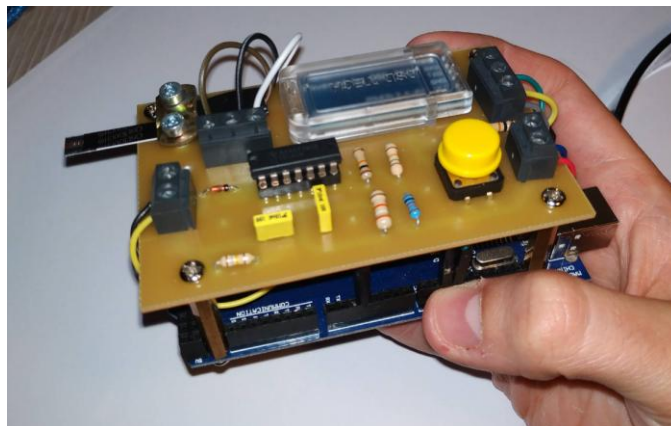


Ilustración 31: Aspecto final glucómetro

En la Ilustración 31 se visualiza el aspecto final del glucómetro.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GLUCÓMETRO	
Largo	10.6 cm
Ancho	5.8 cm
Alto	4.5 cm
Microcontrolador	Arduino MEGA
Marca tiras reactivas	One Touch Ultra
Comunicación inalámbrica	Bluetooth
Alimentación	Pila 9V
Peso	142 g

Tabla 6: Resumen características físicas glucómetro

Las características del glucómetro quedan listadas en la Tabla 6

CARACTERÍSTICAS APLICACIÓN	
Sistema Operativo	Android
Mínima versión Android	Android 4.0.3 (API 15)
Tamaño aplicación	2.69 MB
Comunicación	Bluetooth
Conexión internet	No

Tabla 7: Características de la aplicación

Las características de la aplicación SmartBlood quedan listadas en la Tabla 7.

3.2 Comparativa resultados finales

PROTOTIPO GLUCÓMETRO	GLUCÓMETRO COMERCIAL	RANGO ACEPTABLE SEGÚN ISO 2013
78 mg/dl	84mg/dl	[99, 69] mg/dl
103 mg/dl	120 mg/dl	[138, 102] mg/dl
116 mg/dl	135mg/dl	[155, 115] mg/dl
183 mg/dl	189 mg/dl	[217, 160] mg/dl

Tabla 8: Comparativa de resultados entre prototipo glucómetro y glucómetro comercial

En la Tabla 8 se observan las medidas de glucosa obtenidas mediante el prototipo de glucómetro construido y el glucómetro comercial One Touch Ultra.

Los glucómetros comerciales deben cumplir la normativa ISO 2013. [18] En esta normativa, se establece que los glucómetros deben tener, en el 95% de los casos, una margen de error de:

$\pm 15 \text{ mg/dl}$ en concentraciones menores a 100 mg/dl.

$\pm 15\%$ en concentraciones superiores a 100 mg/dl.

Comparando los resultados de la Tabla 8 y cogiendo de referencia el glucómetro comercial, los resultados del prototipo de glucómetro cumplen las especificaciones regladas por la normativa ISO 2013 [13]. Es por ello, que podemos determinar que el glucómetro construido tiene buena precisión. No obstante, el glucómetro diseñado para este proyecto ha sido realizado con fines académicos y no debería substituirse por un glucómetro comercial para supervisar los valores de glucosa en caso de que se padeciera de diabetes. El uso de este glucómetro es meramente experimental y para fines académicos y recreativos.

3.3 Conclusiones finales

Una vez construido el glucómetro, acabada la programación de la aplicación y el análisis de los resultados obtenidos, se extraen las conclusiones referentes a este proyecto.

Se ha construido un dispositivo alimentado con una pila de 9V, capaz de calcular la concentración de glucosa en sangre y enviar los datos a una aplicación de un teléfono Android vía Bluetooth. La aplicación creada permite guardar y gestionar los datos de forma visual e intuitiva.

Los resultados analíticos de sangre obtenidos con el prototipo se consideran aceptables según la normativa ISO 2013 tal y como se observa en el apartado anterior.

Por las dimensiones del glucómetro, se puede considerar que es un dispositivo portátil, a pesar que no es lo suficientemente cómodo para ser transportado en el día a día por personas diabéticas.

El glucómetro admite modificaciones de software. En caso que se desee, se puede reprogramar el microcontrolador del glucómetro de tal forma que se implementen otros algoritmos y otro tipo de procesado de datos. Esto permite experimentar y mejorar los resultados del glucómetro actual.

La aplicación realizada permite registrar valores de glucosa y almacenarlos. La navegación de pantallas es intuitiva y gráfica. La comunicación inalámbrica es fiable y permite recibir los análisis realizados por el glucómetro.

Por tanto, teniendo todos estos aspectos del glucómetro y de la aplicación, se puede considerar que los objetivos especificados al inicio del proyecto han sido cumplidos. Además, el autor de este trabajo ha podido profundizar en muchos ámbitos introducidos en el grado, como la electrónica analógica y digital, diseño de placas de circuito impreso y programación Android gracias a este proyecto.

3.4 Recomendaciones futuras

Los resultados de la construcción de un prototipo de glucómetro y una aplicación capaz de gestionar los datos han sido satisfactorios. No obstante, el proyecto se puede ampliar y mejorar de muchas maneras en caso que así se desee. A continuación se describe una colección de futuras ampliaciones y mejoras tanto en el aspecto del software, como del hardware:

- Disminuir el tamaño del glucómetro, substituyendo el microcontrolador Arduino Mega por un microcontrolador Arduino Nano o similar. Este cambio permitiría usar una pila de menor voltaje y de menor medida y peso. También se podría utilizar un módulo Bluetooth más compacto y perfeccionar la placa de circuito impreso para reducir el tamaño constructivo y peso del dispositivo.
- Guardar los datos en una base de datos online. Una opción recomendable es usar la herramienta `Firestore` y realizar un sistema de usuarios que permitiera registrarse, y acceder a los datos desde una página web.
- Mejorar la comunicación Bluetooth desde el terminal Android, creando una comunicación más sólida y con capacidad de comunicarse con otros glucómetros.
- Mejorar el diseño de la aplicación. Por ejemplo, el color de la imagen de la gota de sangre es función del valor de glucosa. Si se obtiene un análisis bajo, la gota de sangre se visualiza de un color rojo más claro. En caso de obtener un análisis con alta glucosa, se visualiza una gota de sangre de un color rojo más intenso.
- Crear una carcasa mediante impresión 3D con un pequeño orificio para introducir la tira reactiva. Esto ofrece a la parte electrónica del glucómetro una mayor protección. Es recomendable incluir en la carcasa un espacio para alojar la pila.

4 ASPECTOS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD

4.1 Montaje del prototipo glucómetro

Para el montaje del prototipo, se han usado componentes electrónicos presentes en el laboratorio: resistencias, condensadores, el diodo, el pulsador y los `headers`. Componentes más específicos como el módulo Bluetooth se han comprado expresamente para el uso de este proyecto.

La placa de circuito impreso ha sido fabricada por el laboratorio de mecanizado en la propia universidad, lo que ha permitido obtener la placa en un período corto de tiempo y sin costes de distribución ni contaminación por transporte.

Un aspecto importante en la fase de construcción del glucómetro ha sido el gran uso de tiras reactivas. Se requiere de una tira reactiva y de una lanceta por cada experimento. A pesar del pequeño tamaño de estos componentes también son considerados residuos.

4.2 Desmontaje del prototipo glucómetro

En caso que se desee desmontar el prototipo, se desatornillan los ocho tornillos de las esquinas de la placa de circuito impreso y del microcontrolador. Los componentes electrónicos pueden ser desoldados y reusados en cualquier otro proyecto electrónico si así se desea en caso que no hayan sufrido ningún tipo de daño. Los 10 tornillos y los 4 alzadores también son fácilmente reusables en otros proyectos.

El amplificador operacional LT1014CN no está soldado directamente a la placa. Una pieza llamada zócalo, está soldada, y permite la conexión y desconexión del amplificador operacional de forma sencilla. De esta forma, en caso que se considere que el amplificador operacional no funcione correctamente, se puede substituir sin manipular la placa de circuito impreso.

Si se desea deshacerse de la placa de circuito impreso, se recomienda llevar a un punto de recogida de residuos para asegurarse de la gestión óptima de la placa.

5 BIBLIOGRAFÍA

[1] World Health Organization *Diabetes / Fact Sheets* [En línea]. 2018. [Fecha de consulta: mayo 2019]. Disponible en: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>>

[2] World Health Organization *10 facts on diabetes* [En línea]. 2016. [Fecha de consulta: mayo 2019]. Disponible en: <<https://www.who.int/features/factfiles/diabetes/en/>>

[3] dignified.com *Which glucometer is best for you?* [En línea]. 2017. [Fecha de consulta: mayo 2019]. Disponible en: <<https://www.dignified.com/best-glucometer-type-for-you-review-45.html>>

[4] Franco Pérez Muñoz. *Glucómetro no invasivo*. [En línea]. [Fecha de consulta: mayo 2019]. Disponible en: <https://www.academia.edu/13515263/GLUC%C3%93METRO_NO_INVASIVO>

[5] Muhammad A. Alam *Nanobiosensors L3.7 Sensitivity - Amperometric Sensors – Glucose Sensors I* [en línea] Indiana: Purdue University, 2014 [Fecha de consulta: marzo 2019] Disponible en: <<https://www.youtube.com/watch?v=FQfOyU06Cdw>>

[6] M.Bindhammer. *Open source Arduino blood glucose meter shield*. [En línea]. 2016. [Fecha de consulta: enero 2019] Disponible en: <<https://hackaday.io/project/11719-open-source-arduino-blood-glucose-meter-shield>>

[7] Linear Technology. *Quad Precision Op Amp Datasheet*. [En línea]. [Fecha de consulta: febrero 2019]. Disponible en: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LT1013-LT1014.pdf>>

[8] Interaction Design Lab. *Fritzing*. (Versión 0.9.3b). [Fecha de consulta: mayo 2019]. Disponible en: <<http://fritzing.org/home/>>

[9] Altium. *How to create a schematic in Altium designer*. [En línea]. 2018. [Fecha de consulta: mayo 2019] Disponible en: <<https://resources.altium.com/pcb-design-blog/how-to-create-a-schematic-in-altium-designer-the-journey-of-a-thousand-pcbs>>

[10] Altium. *From idea to manufacture. Driving a PCB design through Altium Designer*. [En línea]. 2018. [Fecha de consulta: marzo 2019]. Disponible en: <<https://www.altium.com/documentation/15.1/display/ADES/From+Idea+to+Manufacture+-+Driving+a+PCB+Design+through+Altium+Designer>>

[11] Adam Hayes. *R-squared definition*. Investopedia. [En línea]. Mayo 2019. [Fecha de consulta: marzo 2019]. Disponible en: <<https://www.investopedia.com/terms/r/r-squared.asp>>

[12] RafalManka. ScrollCalendar (2.1.0) [Programa de aplicación móvil]. [Fecha de consulta: enero 2019]. Disponible en: <https://github.com/RafalManka/ScrollCalendar>

[13] mitchtabian. Sending and Receiving Data with Bluetooth [Programa de aplicación móvil]. [Fecha de consulta: enero 2019]. Disponible en: <<https://github.com/mitchtabian/Sending-and-Receiving-Data-with-Bluetooth>>

[14] Android Developers. *Inputs events overview*. [En línea]. [Fecha de consulta: mayo 2019]. Disponible en: <<https://developer.android.com/guide/topics/ui/ui-events>>

[15] Android Developers. *Intent*. [En línea]. [Fecha de consulta: enero 2019]. Disponible en: <<https://developer.android.com/reference/android/content/Intent>>

[16] Bluetooth. *Protocol Specifications*. [En línea]. [Fecha de consulta: mayo 2019]. Disponible en: <<https://www.bluetooth.com/specifications/protocol-specifications/>>

[17] Android Developers. *Thread*. [En línea]. [Fecha de consulta: marzo 2019]. Disponible en: <<https://developer.android.com/reference/java/lang/Thread>>

[18] Diabetes.co.uk. *Blood Guucose Meter Accuracy*. [En línea]. [Fecha de consulta: mayo 2019]. Disponible en <<https://www.diabetes.co.uk/blood-glucose-meters/blood-glucose-meter-accuracy.html>>