View metadata, citation and similar papers at core.ac.uk
brought to you by CORE
provided by Repositorio Institucional Universidad de Málaga

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INFORMÁTICA
INGENIERÍA DE LA SALUD

PROPUESTA DE ELECTROPALATÓGRAFO. UNA SOLUCIÓN ANATÓMICA UNIVERSAL E INALÁMBRICA.

PROPOSAL OF ELECTROPALATOGRAPH. AN ANATOMICAL UNIVERSAL AND WIRELESS SOLUTION.

Realizado por
Luisa María Ruiz Ruiz
Tutorizado por
Oscar Oballe Peinado
Departamento
Electrónica

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
MÁLAGA, JUNIO 2018

Fecha defensa:
El Secretario del Tribunal

Resumen

La electropalatografía es una técnica empleada en el estudio articulatorio del habla. Permite conocer las zonas de contacto de la lengua con el paladar mediante el uso de un paladar artificial formado por electrodos. Esta técnica tiene aplicaciones tanto en el ámbito clínico para desórdenes que afectan al habla como en estudios de investigación fonética.

Los sistemas de electropalatografía están compuestos por un paladar artificial localizado en el interior de la cavidad bucal, que registra los contactos de la lengua con el paladar y por una unidad de procesamiento y envío de la información a un dispositivo terminal, en el cual, mediante el uso de un software específico, el usuario puede visualizar toda la información relativa al habla.

El presente trabajo consiste en el estudio y documentación de la técnica, así como de los dispositivos existentes, y en el diseño de una propuesta de electropalatógrafo.

Los principales objetivos para el nuevo diseño consisten en buscar una solución universal para el paladar artificial de modo que satisfaga las necesidades de la mayoría de los pacientes y en estudiar la posibilidad de crear un dispositivo inalámbrico que incluya la unidad de procesamiento, envío de datos y alimentación en el propio paladar dentro de la cavidad bucal del paciente.

Como resultado de este trabajo se ha obtenido una propuesta final que cumple los objetivos descritos anteriormente y que puede servir como base para un diseño final y su futura implementación.

Palabras clave

Electropalatografía, electropalatógrafo, paladar artificial, electrodos, inalámbrico, cavidad bucal.

Abstract

Electropalatography is a technique used in the articulatory study of speech. It allows knowing the contact zones of the tongue with the palate using an artificial palate formed by electrodes. This technique has applications in the clinical field for cases which speech issues as well as in phonetic research studies.

Electropalatography systems are composed of an artificial palate located inside the oral cavity, which record the contacts of the tongue with the palate and by a processing unit that sends information to a host device, in which through the use of specific software the user can visualize all the information related to speech.

The present work consists of the study and the documentation of the technique, as well as the existing devices, as well as the design of a proposal of electropalatograph.

The main objectives for this new design are to find an universal solution for the artificial palate so it meets the needs of most patients and also to study the possibility of creating a wireless device that connects to the processing unit, sending off data and feeding on the palate itself inside the patient's oral cavity.

As a result of this work, a final proposal has been achieved that meets the basic requirements previously described and that can serve as a basis for a final design and its future implementation.

Keywords

Electropalatography, electropalatograph, artificial palate, electrodes, wireless, oral cavity.

ÍNDICE

Índice de figuras III
Índice de tablas IV
Introducción 1
Historia de la electropalatografía 1
Motivación del trabajo fin de grado 2
Objetivos 2
Estructura de la memoria 3
Capítulo 1. Estado del arte 5
1.1 Introducción 5
1.2 Dispositivos para electropalatografía 5
1.3 Paladares artificiales 8
1.4 Dispositivos de comunicación inalambrica incluidos en la cavidad bucal 10
1.5 Conclusión 12
Capítulo 2. Estudio de la anatomía de la cavidad bucal 13
2.1 Introducción 13
2.2 La lengua 13
2.3 Los dientes 15
2.4 El paladar 16
2.5 Medidas anatómicas 16
2.6 Conclusiones 17
Capítulo 3. Diseño y modelado del paladar artificial 19
3.1 Introducción 19
3.2 Características del diseño: filas, número de electrodos y localización 19
3.3 Materiales 22
3.4 Diseño de la forma 23
3.5 Modelado 3D del diseño 24
3.6 Impresión y validación del diseño 27
Capítulo 4. Estudio de compatibilidad electromagnética y consumo 29
4.1 Introducción 29
4.2 Sistemas inalámbricos. Bluetooth 29
4.3 Selección de componentes 30
4.4 Consumo 31
Capítulo 5. Propuesta final de electropalatógrafo 33

5.1 Introducción 33
5.2 Matriz de electrodos 33
5.3 Microcontrolador 34
5.4 Multiplexores 37
5.5 Alimentación 37
5.6 Tabla de componentes 38
Conclusiones y líneas futuras 39
Conclusiones 39
Líneas futuras 39
Bibliografía 41

Índice de figuras

Figura 1. Sistema SmartPalate - Complete Speech (SmartPalate International, 2018). ... 6
Figura 2. Sistema EPG Reading. ... 7
Figura 3. Esquema del Sistema LinguaGraph (Rose Medical Solutions Ltd, 2018) ... 8
Figura 4. Paladares artificiales Reading, Articulado y Kay, localización de sus electrodos según las referencias anatómicas (Wrench, 2007) ... 10
Figura 5. Intraoral Tongue Drive System (Park et al., 2012). ... 10
Figura 6. Diseño sobre un soporte de plástico biocompatible sobre un molde del maxilar (Sardini et al., 2013). ... 11
Figura 7. Distribución y diseño de los sensores (Sardini et al., 2013). ... 11
Figura 8. Anatomía de la cavidad bucal (https://www.turbosquid.com/ , modificación propia) ... 14
Figura 9. Anatomía de la lengua. ... 14
Figura 10. Representación de la dentadura humana superior y huesos implicados. (www.human.biodigital.com, modificación propia) ... 15
Figura 11. Referencias anatómicas de las medidas del paladar (www.turbosquid.com, modificación propia) ... 17
Figura 12. Representación de la posición de las filas de electrodos en un eje coordenado. ... 21
Figura 13. Superposición de una imagen anatómica (Anatomy.TV) y la Figura 12. ... 21
Figura 14. Opciones 1 y 2 de diseño implementadas en SolidWorks. ... 23
Figura 15. Opción de diseño con espacio para la parte electronica implementada en SolidWorks. ... 24
Figura 16. Diseño en SolidWorks del paladar artificial para impresión 3D. ... 26
Figura 17. Distribución de la matriz de electrodos. ... 27
Figura 18. Paladar artificial e impresión de un modelo bucal. ... 28
Figura 19. Paladar artificial e impresión de un modelo bucal. ... 28
Figura 20. Matriz de electrodos y divisor de tensión. ... 34
Figura 21. Esquema conceptual del diseño utilizando CYW2037S. ... 35
Figura 22. Esquema conceptual del diseño utilizando CY8C4127L91-BL473. ... 36
Figura 23. Diagrama de MAX14689 (MAXIM INTEGRATED, 2018). ... 37

Índice de tablas

Tabla 1. Medidas y ecuaciones de las filas del paladar artificial……...……26

Tabla 2. Componentes del diseño electrónico…….….38

Introducción

La electropalatografía (EPG) es una de las técnicas más utilizadas en el estudio del habla. Permite registrar las zonas de contacto de la lengua con el paladar mediante el uso de un paladar artificial. El paladar artificial es un dispositivo que se adapta a la parte superior de la cavidad bucal y posee electrodos para captar estos contactos.

Esta herramienta permite el estudio y diagnóstico de patologías relacionadas con el habla, en concreto, es una herramienta para el análisis instrumental articulatorio.

La electropalatografía tiene aplicaciones tanto en la investigación fonética como en fines didácticos para el proceso de aprendizaje del habla.

En la práctica clínica, la electropalatografía es utilizada en numerosos tipos de pacientes, siendo los problemas más comunes patologías como el paladar hendido, desórdenes relacionados con el desarrollo, trastornos neurológicos adquiridos o revisiones generales. También es utilizada, aunque en menor porcentaje en casos de disfluencia o glosectomía entre otros (Articulate Instruments Ltd, 2018).

Historia de la electropalatografía

Habitualmente, los estudios sobre la articulación del habla se realizaban de forma observacional e intuitiva, lo que conllevaba un gran margen de error y poca exactitud de la técnica. Con el tiempo, se han desarrollado nuevas tecnologías que han permitido la mejora de la investigación sobre este campo.

En el estudio sobre la producción del habla, la lengua cobra vital importancia, ya que, en función de la posición y localización de ésta, la caja de resonancia, en este caso, la cavidad bucal adoptará en su interior un espacio y forma diferente que permitirá la producción de distintos sonidos.

Todas las técnicas deben ser lo menos invasivas posibles, minimizando su intervención en la articulación del habla, para lograr una situación lo más natural posible para el paciente o usuario.

Las técnicas que permiten analizar la actividad de la cavidad bucal se clasifican en dos grupos, el primero de ellos se corresponde con el análisis por imagen y el segundo con el análisis mediante elementos como electrodos situados en regiones de interés. La electropalatografía se enmarca en este segundo grupo.

Inicialmente surgió la palatografía estática: indirecta, si consistía en marcar las zonas de contacto de la lengua con el paladar con el uso de una sustancia oscura sobre un paladar artificial, o directa, si se realizaba mediante el uso de espejos. Estas técnicas resultaban poco fiables y difíciles de llevar a cabo, con el inconveniente de que solo permitían el estudio de sonidos aislados sin poder estudiar la evolución temporal.

Posteriormente, surgió la electropalatografía o palatografía dinámica, mejorando la técnica anterior para permitir el estudio continuado en el tiempo de los contactos entre la lengua y el paladar (Fernández Planas, Martínez Celdrán, & Universitat de Barcelona. Departament de Lingüística General., 2010).

Las limitaciones de esta técnica se basan en no proporcionar información exacta de las distintas articulaciones, como las velares. Los paladares artificiales, además de ser personalizados, implican molestias en los pacientes ya que suponen un cuerpo extraño en la boca, el cual contiene cableado que lo conecta con otra parte del dispositivo.

Motivación del trabajo fin de grado

La motivación del presente trabajo fin de grado se fundamenta en la realización de un diseño de un sistema de electropalatografía o electropalatógrafo que mejore las limitaciones de los diseños existentes. En concreto, se buscará un diseño universal válido para todos los pacientes e inalámbrico para eliminar el cableado, buscando una solución libre de cables que invada lo menos posible la articulación del habla en el paciente.

Los doctores Rafael Urquiza De la Rosa y Rosa María Bermúdez De Alvear pertenecientes al departamento de Radiología y Medicina Física, Oftalmología y Otorrinolaringología, concretamente del área de otorrinolaringología, realizaron una consulta al departamento de electrónica de la Universidad de Málaga en busca de una solución para este problema, por lo que el presente trabajo supone una necesidad actual y representa un problema real.

Objetivos

Para cumplir con los objetivos de este trabajo fin de grado, se ha seguido la planificación que se describe a continuación:

- Estudio de los dispositivos existentes. Esta fase consiste en el estudio y revisión bibliográfica de los dispositivos y publicaciones sobre las técnicas existentes.
- Estudio de la anatomía de la cavidad bucal y de los órganos del habla. Para el diseño del dispositivo es necesario conocer previamente la anatomía y morfología del espacio de trabajo, en este caso de la cavidad bucal, siendo necesario conocer las dimensiones del paladar que condicionará el tamaño y la forma del nuevo diseño.
- Diseño e impresión de un paladar artificial universal, a partir de la información obtenida en las fases de estudio previas. Se llevará a cabo una propuesta de diseño del paladar artificial, donde se estudiarán las distintas posibilidades. La solución final se implementará en SolidWorks para su posterior impresión.
- Estudio de compatibilidad electromagnética. Para el diseño inalámbrico es necesario conocer las limitaciones y características de emisión, así como las

distintas tecnologías de comunicación que se pueden emplear. Se estudiarán las ventajas del Bluetooth y las posibilidades de elección de componentes.

- Estudio de consumo, el dispositivo debe contar con su propia fuente de alimentación.
- Propuesta final. Consiste en la integración de toda la información obtenida y recabada en las fases anteriores, y la descripción del diseño electrónico.

Estructura de la memoria

La primera parte de la memoria se ha planteado como una breve introducción sobre la técnica de electropalatografía y los objetivos del presente trabajo fin de grado. La parte central de la memoria se divide en 5 capítulos correspondientes con las distintas fases de la planificación. Por último, se incluyen las conclusiones y las líneas de trabajo futuras.

El capítulo 1, estado del arte, y el capítulo 2, anatomía de la cavidad bucal, se corresponden con un trabajo de documentación cuyo objetivo es recabar la información necesaria para las primeras fases de diseño; estudiando, en el primero, el estado de la técnica y, en el segundo, la anatomía implicada.

El capítulo 3 implica la utilización de los conocimientos adquiridos en los dos capítulos anteriores, y consiste en el estudio de un diseño del paladar artificial adaptable a todos los pacientes, contemplando un espacio para la parte electrónica de procesado, comunicación y alimentación. Para la validación, el diseño se imprimirá utilizando una impresora 3D y se probará sobre un molde de una boca real.

El capítulo 4 se corresponde con el estudio de compatibilidad electromagnética y de consumo del dispositivo. Consistirá en describir los requisitos y características que debe tener el diseño en relación a la electrónica de comunicación inalámbrica y alimentación.

El capítulo 5 consistirá en la propuesta final del electropalatógrafo, integrando los diseños y características descritas en capítulos anteriores.

Finalmente, se detallan las conclusiones del trabajo fin de grado, así como las líneas de trabajo futuras.

Capítulo 1. Estado del arte

1.1 Introducción

En este capítulo se va a realizar un estudio de la situación actual de la técnica de electropalatografía. Consistirá en una investigación documental de los principales dispositivos y diseños existentes en el mercado que permitirá adoptar una perspectiva teórica de esta técnica a partir de la revisión, el análisis y la interpretación de los documentos existentes.

El objetivo de este estudio es proporcionar información útil que sirva de guía para la planificación y la implementación de un nuevo diseño.

En el estudio del estado del arte se van a distinguir dos enfoques: el primero se corresponde con el estudio del dispositivo en su conjunto, es decir, las distintas partes que integran el sistema y como se relacionan y conectan entre ellas; el segundo enfoque, consiste en el estudio de los distintos paladares artificiales que existen, su configuración, morfología y distribución de los electrodos.

Por último, se van a estudiar dispositivos de comunicación inalambrica que operan dentro de la cavidad bucal porque, aunque su funcionalidad no esté relacionada con la electropalatografía, pueden ser de utilidad para el nuevo diseño.

1.2 Dispositivos para electropalatografía

Actualmente en el mercado existen diversas empresas que desarrollan sistemas de electropalatografía compatibles con varios diseños de paladares, por lo que, en este apartado, se lleva va a llevar a cabo un análisis de los distintos diseños existentes.

Un sistema de electropalatografía se compone de distintas partes que se integran para lograr la funcionalidad del dispositivo. En primer lugar, debe contar con un sensor que capte la información de las zonas de contacto de la lengua con el paladar. Este sensor se corresponde con lo que se denomina paladar artificial. La información recabada por el sensor debe ser procesada e integrada por una segundad unidad y enviada a un dispositivo terminal en el cuál, mediante la utilización de un software, el usuario puede visualizar dicha información.

En la actualidad, en el mercado existen tres sistemas principales: SmartPalate de Complete Speech, WinEPG y LinguGraph de Rose Medical. Todos ellos constan de las partes mencionadas anteriormente y van a ser analizados a continuación.

Sistema SmartPalate – Complete Speech

El sistema SmartPalate, (SmartPalate International, 2018), se compone principalmente de tres partes: el paladar artificial, la unidad DataLink y un software.

El paladar artificial se coloca sobre un molde, a modo de funda, de la parte superior de la boca que el usuario debe obtener previamente. Este paladar artificial se conecta mediante un cable con un puerto micro USB a la unidad de DataLink.

La unidad de DataLink consiste en un procesador que se coloca colgado del cuello del paciente; posee un micrófono que registra la voz del usuario y la sincroniza con los datos obtenidos del paladar artificial. Esta unidad se conecta a un ordenador mediante un cable USB.

Por último, el software permite al usuario ver en el terminal todas las zonas de contacto de la lengua con el paladar a medida que el paciente habla, ver Figura 1.

El coste de todo el sistema asciende a unos 1.074 euros, siendo el coste del paladar artificial solamente unos 258 euros.

Figura 1. Sistema SmartPalate - Complete Speech (SmartPalate International, 2018)**.**

WinEPG

El sistema WinEPG, (Articulate Instruments Ltd, 2018), al igual que el sistema anterior, consta de diferentes partes que se integran para recoger la información de las zonas de contacto de la lengua con el paladar y la voz, procesarlas, unirlas y permitir al usuario una visualización de la información obtenida.

El paladar artificial no se vende como parte de este sistema y se debe fabricar a medida para cada usuario, actualmente son desarrollados por dos empresas diferentes en Reino Unido.

Contiene un multiplexor que se cuelga alrededor del cuello del paciente y se conecta al paladar artificial y a la unidad de escáner siguiendo una configuración cableada. La unidad de escáner EPG3 se conecta al multiplexor y al ordenador. Además, posee una interfaz de puerto serie que combina los datos de la unidad de escáner con el audio procedente de un micrófono y los transmite al ordenador, ver Figura 2.

Este sistema posee una opción para su utilización en un entorno clínico, un transformador de aislamiento médico, esta parte del sistema se conecta a la red eléctrica y es la que

proporciona alimentación a todos los equipos eléctricos asociados al sistema de electropalatografía WinEPG. Este parte del sistema permite que el dispositivo sea seguro para su uso en hospitales y centros médicos.

Figura 2. Sistema EPG Reading.

LinguaGraph – Rose Medical

En este diseño de LinguaGrapah, (Rose Medical Solutions Ltd, 2018), el paladar artificial es personalizado y fabricado a medida para cada usuario, posee cuatro sujeciones en los dientes superiores. Este paladar se conecta mediante dos cables a la unidad de LinguGraph.

La unidad de LinguaGraph se cuelga alrededor del cuello del paciente y se encarga del procesado e integración de la información.

Por último, este dispositivo posee un software, LinguaView, que permite al usuario la visualización de la información en un ordenador o Tablet, en la Figura 3 se muestra un esquema completo de las partes que integran este sistema.

Posee una versión especial, icSpeeh Professional Edition, creada para el uso clínico.

El coste aproximado de este sistema es de aproximadamente 4.480 euros, de los cuales, el paladar artificial tiene un coste de unos 573 euros.

Este dispositivo fue diseñado por un equipo de profesionales tanto del ámbito sanitario como tecnológico y su objetivo era crear un diseño apto para la práctica clínica, por lo que posee unas características destacables: posee una gran pantalla de colores brillantes, que se ve fácilmente en pacientes ancianos y estimulante para los niños, permite una visualización simultánea de dos canales que facilita la interacción paciente-médico, los datos se reproducen de manera instantánea durante la terapia, permite un largo tiempo de grabación lo que facilita la evaluación y análisis de datos, y gracias a su diseño portátil se puede usar tanto en la clínica como en el hogar lo que permite la portabilidad de la técnica (Kelly, Main, Manley, & McLean, 2000).

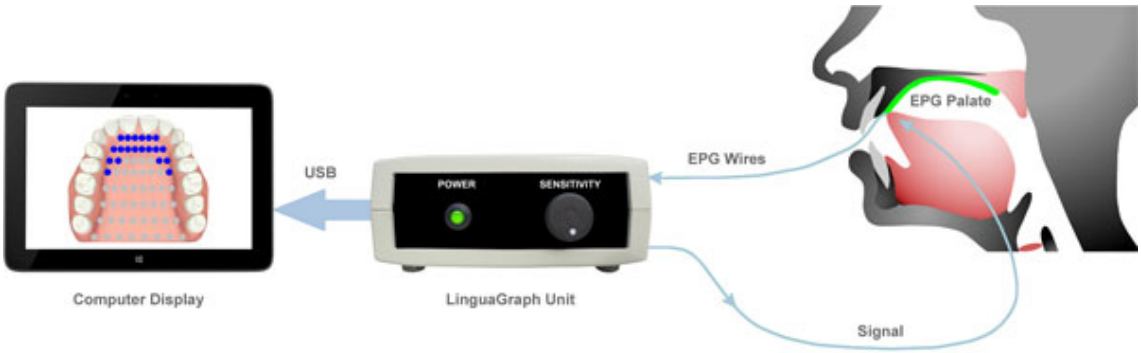


Figura 3. Esquema del Sistema LinguaGraph (Rose Medical Solutions Ltd, 2018)

1.3 Paladares artificiales

El paladar artificial es la parte del sistema que actúa como sensor para capturar la información. Se introduce en la cavidad bucal y posee electrodos que captan las zonas de contacto de la lengua con el paladar.

Existen diversos diseños que se diferencian por el número de electrodos y su distribución. En el apartado anterior se han estudiado diferentes sistemas de electropalatografía, algunos de ellos son compatibles con distintos diseños de paladares siempre y cuando respeten la localización de los electrodos según referencias anatómicas establecidas.

A continuación, se analizarán los tres diseños más destacados actualmente y con los que se han realizado la mayoría de los estudios existentes.

Sistema Kay Palatometer

El sistema Kay un paladar acrílico, delgado y flexible hecho a medida para cada individuo, que se ajusta sobre los dientes superiores para asegurarlo en su lugar.

En función del diseño y de la posición de los electrodos se encuentran varias configuraciones: la primera consiste en una red uniforme de electrodos que cubre todo el paladar y que varía en función del tamaño del usuario; la segunda consiste en una red de 96 electrodos concentrados mayoritariamente en la zona alveolar pero que se extiende hasta la región velar; la tercera configuración al igual que la segunda consiste en una red de 96 electrodos en la región alveolar y prepalatal; y por último, 96 electrodos concentrados en la región alveolar pero que se extienden posteriormente a lo largo del arco dental (Planas, 2008).

Los electrodos son toroides de oro de 1 milímetro de diámetro, siendo el espacio entre los electrodos es variable. En la región alveolar hay una mayor densidad para proporcionar una resolución relativamente mayor por lo que la separación es menor de 3 milímetros. Por el contrario, en las regiones palatal y velar la separación entre electrodos es mayor de 3 milímetros (Wrench, 2007).

Los cables que conectan el paladar con el resto del sistema se dirigen desde los molares hasta el exterior por los laterales de la cavidad bucal, este dispositivo se muestra en la Figura 4.A.

EPG Reading

Son paladares rígidos hechos a medida con 62 electrodos repartidos en 8 filas correspondientes a puntos de referencia articulatorios fonéticamente importantes. En consecuencia, como el número de electrodos es constante, el espaciado de estos varía de acuerdo con el tamaño y la forma de la boca. La mayor concentración de electrodos se encuentra en la región alveolar, por lo que en esta zona la separación es menor de 3 milímetros y las demás zonas mayor de 3 milímetros (Wrench, 2007), ver Figura 4.C.

Sus electrodos están formados por discos de plata de 1,4 milímetros de diámetro.

Si hacemos una comparación con el ejemplo anterior, Kay posee 34 electrodos más, por lo que agrega más información en las regiones dental, palatal y velar, aunque en las regiones alveolar y post- alveolar los dispositivos son muy similares.

Una mejora para este paladar sería añadir una fila de electrodos en la región velar, y añadir más electrodos en las filas correspondientes con la región palatina. Finalmente, si se quiere capturar más información, se podría añadir una pequeña extensión en el frente de la boca para capturar las articulaciones dentales.

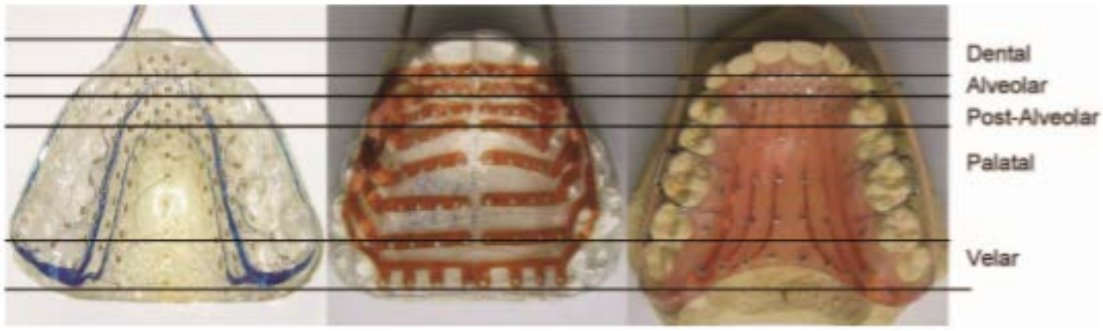
Articulate Palate

En el estudio realizado por Alan A. Wrench (Wrench, 2007) se lleva a cabo la descripción del diseño de un nuevo paladar articulado que mejora los dispositivos existentes hasta entonces.

Este nuevo diseño articulado está formado por 62 electrodos de plata de 1,5 milímetros de diámetro. El diseño de la disposición de los electrodos sigue un patrón intermedio entre cuadriculado y normalizado. Se disponen en tiras delgadas de 4 electrodos con una separación determinada y existen dos prototipos uno para adultos y otro para niños, ver Figura 4.B.

Para cumplir los estándares de seguridad, los electrodos se encuentran recubiertos de una capa de epoxi, y el circuito está sellado entre dos capas de acrílico.

Para mejorar este diseño se propone añadir una fila adicional que cubra la zona dental con 4 electrodos y añadir una final en la zona velar con 8 electrodos, esto haría un total de 74 electrodos. Un mayor número de electrodos permite una mayor resolución, pero implica un aumento del costo, mayor número de cables y la necesidad de un área más grande.



(A) **(B)** **(C)**

Figura 4. Paladares artificiales Reading, Articulado y Kay, localización de sus electrodos según las referencias anatómicas (Wrench, 2007).

1.4 Dispositivos de comunicación inalambrica incluidos en la cavidad bucal

Tongue Drive System (TDS)

Este sistema, (Park et al., 2012), permite detectar los movimientos voluntarios de la lengua de los usuarios y los traduce en comandos definidos por ellos mismos. Es un dispositivo inalámbrico y mínimamente invasivo diseñado para mejorar la independencia de personas con discapacidades, ya que les permite controlar un smartphone, un ordenador e incluso una silla de ruedas.

Su diseño electrónico (Figura 5) está basado en un System on a Chip (SoC). La transmisión de datos se realiza mediante radiofrecuencia. La alimentación del sistema viene dada por una batería de Li-ion de 50 mAh que proporciona una tensión de 4.2 V.

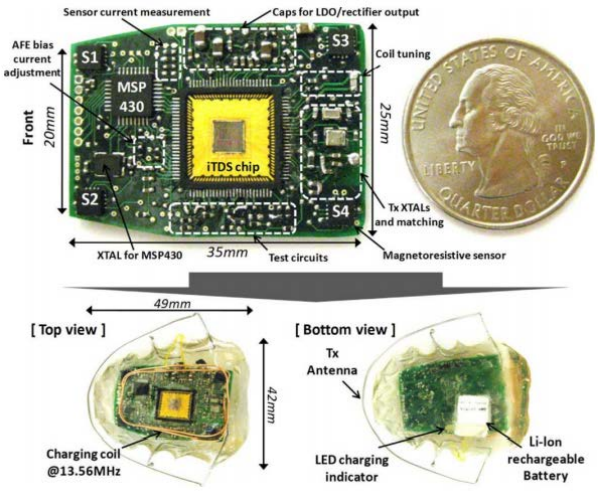


Figura 5. Intraoral Tongue Drive System (Park et al., 2012).

Sensor inalambrico intraoral de presión lingual

Este dispositivo (Sardini, Serpelloni, & Fiorentini, 2013) está diseñado con el propósito de monitorizar la presión ejercida por la lengua sobre el paladar en pacientes que poseen daños cerebrovasculares debidos a accidentes o enfermedades, y que a causa de esto presentan desórdenes en el habla o falta de coordinación en la lengua.

Es un diseño mínimamente invasivo e inalámbrico que se coloca sobre un molde de la parte superior de la boca del paciente.

El circuito posee un pequeño tamaño (18 x 20 x 5 milímetros) y se localiza en la parte posterior de modo que no interfiere en la medida de presión, ver Figura 6. Contiene seis sensores de fuerza resistivos de un diámetro de 3.2 milímetros distribuidos uniformemente entre dos láminas de Kapton, esto se observa en la Figura 7.

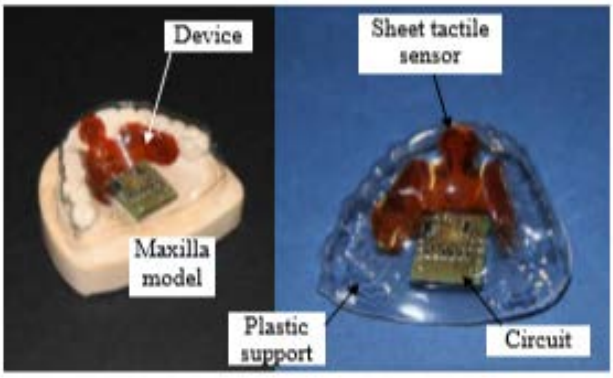


Figura 6. Diseño sobre un soporte de plástico biocompatible sobre un molde del maxilar (Sardini et al., 2013).

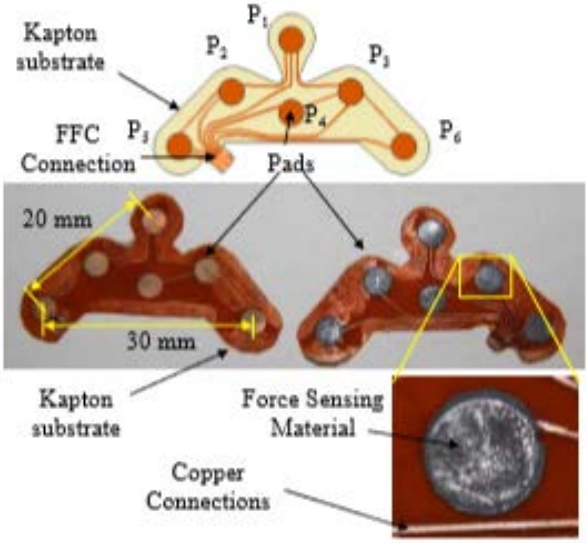


Figura 7. Distribución y diseño de los sensores (Sardini et al., 2013)**.**

El acondicionamiento y trasmisión del circuito está basado en un microcontrolador de baja potencia (FreescaleS08QB8) alimentado por una batería de botón de 3 V. El voltaje de la batería es estabilizado por un regulador DC-DC con una salida 2,5 V; esta tensión

se utiliza como una referencia fija para el conversor analógico-digital y como voltaje de referencia para el divisor resistivo.

La comunicación se realiza mediante un módulo Bluetooth (ParaniESD210), de forma que la presión detectada por los sensores es transmitida en tiempo real a un ordenador.

1.5 Conclusión

En la revisión realizada se observa que los dispositivos de electropalatografía existentes utilizan una configuración cableada para conectar las distintas partes que integran el sistema.

Esto supone un inconveniente, dado que el paladar artificial contiene uno o varios cables que lo comunican con el resto del sistema. En el caso del sistema SmartPalate, existe un único cable central. Esta configuración impide que el flujo de aire salga correctamente ya que cuelga delante de la boca. En los otros casos, encontramos una configuración con dos cables dirigidos por los laterales de la boca desde los molares hasta el exterior. Estos diseños pueden impedir la mordida completa de la boca.

La mayoría de los paladares existentes se fijan mediante fundas que cubren la dentadura superior por completo, esto evita que el aire salga a través de los espacios entre los dientes y puede impedir cerrar por completo la mandíbula.

Por otra parte, los diseños existentes son personalizados para cada paciente lo que supone un aumento del coste de la técnica. La cantidad de electrodos necesaria varía de una persona a otra dependiendo del tamaño y de la forma del paladar. Los diseños actuales tienen un número de electrodos fijos para que el sistema del software sea común para todos.

Del estudio de dispositivos inalámbricos incluidos en la cavidad oral se puede concluir que es posible realizar un nuevo diseño inalámbrico utilizando tecnologías de comunicación como el Bluetooth.

Por estas razones, el principal objetivo del presente trabajo será el diseño de un paladar artificial que permita una solución inalámbrica lo más universal posible para evitar que sea personalizado para cada paciente y sirva para la mayoría de ellos.

Capítulo 2. Estudio de la anatomía de la cavidad bucal

2.1 Introducción

Este capítulo describe brevemente la anatomía implicada en la técnica de electropalatografía. Para abordar un nuevo diseño es necesario contemplar el espacio de trabajo con el objetivo de establecer los requisitos morfológicos y físicos de éste. Es importante, tener en cuenta que el tamaño de la anatomía limitará y condicionará todo el diseño.

La cavidad bucal u oral constituye la primera parte del canal alimentario, actúa principalmente en tres funciones, la digestión, la respiración y el habla. Esta última es en la que se enmarca este trabajo.

En la cavidad bucal se distinguen dos partes, la zona externa o vestíbulo y la zona interna o cavidad bucal propiamente dicha.

El vestíbulo se encuentra entre los labios y mejillas y las arcadas gingivodentales. Estas últimas están formadas por las encías y los dientes y constituyen la barrera que separa el vestíbulo de la cavidad bucal. Se abre al exterior por medio del orificio bucal que está constituido por los labios superior e inferior.

La cavidad bucal se sitúa por dentro de las arcadas gingivodentales y se extiende hasta su límite posterior, el istmo de las fauces, formado por la úvula, los pilares anteriores del velo del paladar y el dorso de la lengua (Rodríguez, Smith-Agreda, & García Atarés, 2003).

La parte superior o techo de la cavidad bucal es el paladar, distinguiéndose entre paladar duro y paladar blando.

La parte inferior o suelo de la cavidad bucal es un tejido blando y muscular en el que se encuentra la lengua, ver Figura 8.

2.2 La lengua

Se encuentra en el interior de la cavidad bucal, está compuesta por músculo esquelético recubierto de mucosa. Junto con sus músculos asociados forman el suelo de la cavidad bucal.

En la lengua se distinguen tres partes: raíz, cuerpo y punta. La raíz, parte fija, se une mediante numerosos músculos al hueso hioides, a la mandíbula, a la apófisis estiloides y al paladar. La parte libre de la lengua, cuerpo y punta; llena la cavidad bucal y la ocupa totalmente en reposo (Rodríguez et al., 2003).

En el cuerpo o dorso se pueden, a su vez, distinguir tres zonas: predorso, mediodorso y postdorso, ver Figura 9.

En la lengua se distinguen músculos extrínsecos e intrínsecos. Los músculos extrínsecos se ocupan de determinar la posición de la lengua y la acción de los músculos intrínsecos consiste principalmente en modificar la forma de lengua.

La lengua interviene en la articulación de las palabras, al ser un órgano extremadamente móvil puede adoptar diferentes posiciones y formas. Esto hace que la cavidad de resonancia sea distinta y permite producir distintos sonidos (Fernández Planas et al., 2010).

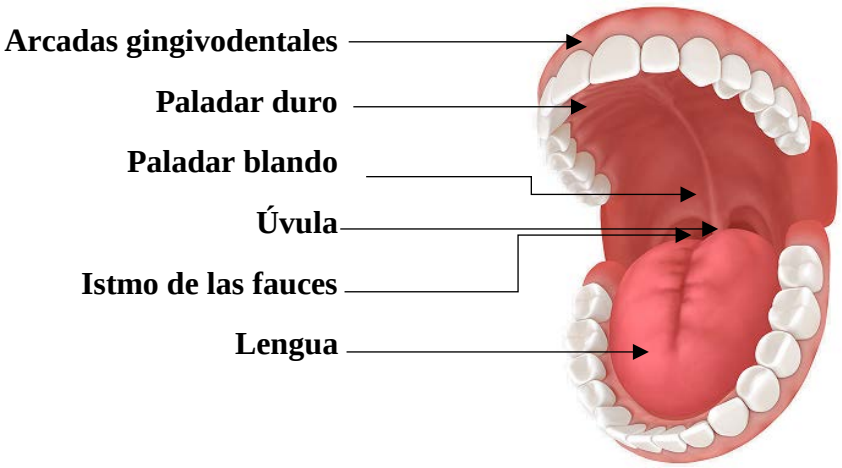


Figura 8. Anatomía de la cavidad bucal (https://www.turbosquid.com/ , modificación propia)

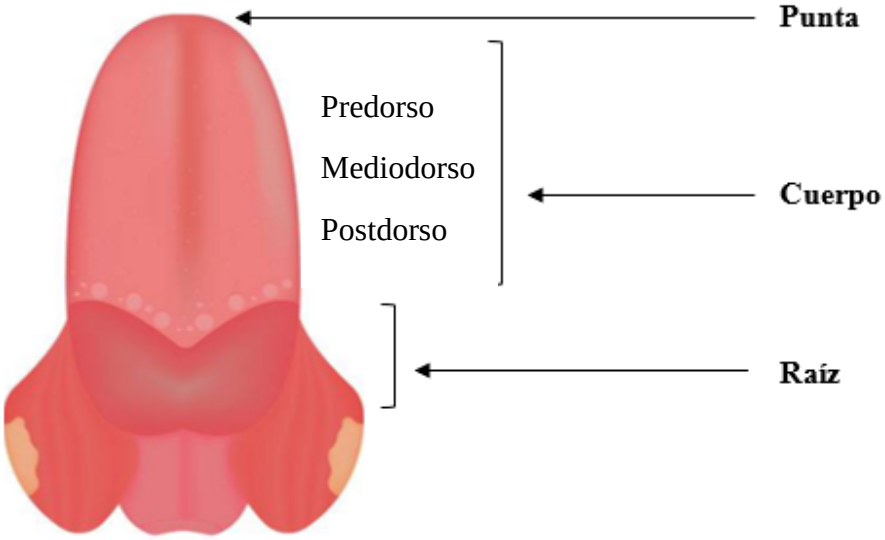


Figura 9. Anatomía de la lengua.

2.3 Los dientes

Los dientes se localizan en las apófisis alveolares de cada maxilar. Las apófisis alveolares están cubiertas por las encías, que se extienden ligeramente por cada alveolo. Las cavidades alveolares están revestidas por el ligamento o membrana periodontal, que consiste en tejido conectivo fibroso denso que fija el diente a las paredes alveolares.

Un diente típico tiene tres regiones externas principales: la corona (es la parte visible), la raíz (se inserta en el alveolo) y el cuello (porción externa que une la corona con la raíz). En el interior la dentina forma la mayor parte del diente, es una membrana de tejido conectivo calcificado que le otorga al diente forma y rigidez. La dentina de la corona está recubierta por el esmalte y la dentina de la raíz por el cemento (Tortora & Derrickson, 2013).

En los seres humanos se distinguen dos denticiones, la infantil compuesta por 20 piezas y la adulta por 32, esta última está formada por:

- Incisivos: dos en cada cuadrante maxilar, uno central y otro lateral, en total cuatro superiores y cuatro inferiores.
- Caninos: dos superiores y dos inferiores; uno al lado de cada incisivo lateral
- Premolares: cuatro superiores y cuatro inferiores; dos al lado de cada canino.
- Molares: seis superiores y seis inferiores; tres detrás de cada segundo premolar.

La dentición adulta, así como la apófisis alveolar, el arco dental maxilar y el maxilar se pueden observar en la Figura 10.

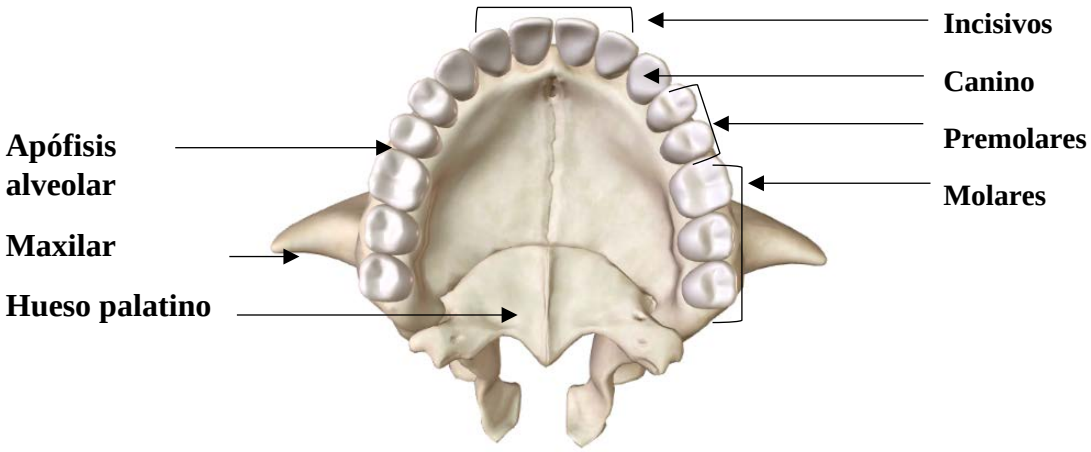


Figura 10. Representación de la dentadura humana superior y huesos implicados.
(www.human.biodigital.com, modificación propia)

2.4 El paladar

El paladar es una pared o tabique que separa la cavidad bucal de la cavidad nasal y forma el techo de la boca, se divide en paladar duro y paladar blando.

El paladar duro (la parte anterior) está formado por las apófisis palatinas de los maxilares y las láminas horizontales de ambos huesos palatinos. Está recubierto por periostio y una membrana mucosa. Podemos distinguir tres zonas: pre-palatal o post-alveolar, medio palatal y post-palatal.

El paladar blando o velo del paladar representa la porción posterior del techo de la boca, es un tabique muscular en forma de arco, entre la bucofaringe y la nasofaringe, revestido por una mucosa. Pendiendo del borde libre del paladar blando existe un tejido muscular cónico llamado úvula (Rodríguez et al., 2003).

2.5 Medidas anatómicas

Para determinar el tamaño del diseño es necesario conocer las medidas anatómicas del paladar con el fin de adaptarlo y que tenga la forma más natural posible. De la revisión bibliográfica realizada en varios artículos y estudios se han concretado las medidas medias que se van a utilizar respecto del ancho, longitud y profundidad del paladar (Marunick & Menaldi, 2000).

La anchura del paladar va aumentando desde los incisivos hasta los molares donde alcanza su máximo valor, 37 milímetros. Se ha obtenido también una medida que corresponde a la anchura existente entre los caninos, ésta es de 21,2 milímetros.

La longitud del paladar es de 43,4 milímetros, línea media que divide el paladar en dos partes iguales desde los incisivos hasta el final de los molares.

Por último, la profundidad del paladar también aumenta progresivamente, de modo que la profundidad a la altura de los incisivos se corresponde con 19,8 milímetros y la profundidad en los molares es de 20,1 milímetros.

Utilizando estas medidas se calcularán todos los datos necesarios para determinar el tamaño del diseño del paladar artificial.

La representación anatómica de las medidas se puede observar en la Figura 11 donde *L* es la longitud total del paladar, *A1* y *A2* son las medidas del ancho del paladar, y *P1* y *P2* se corresponden con las líneas donde se ha medido la profundidad del paladar.

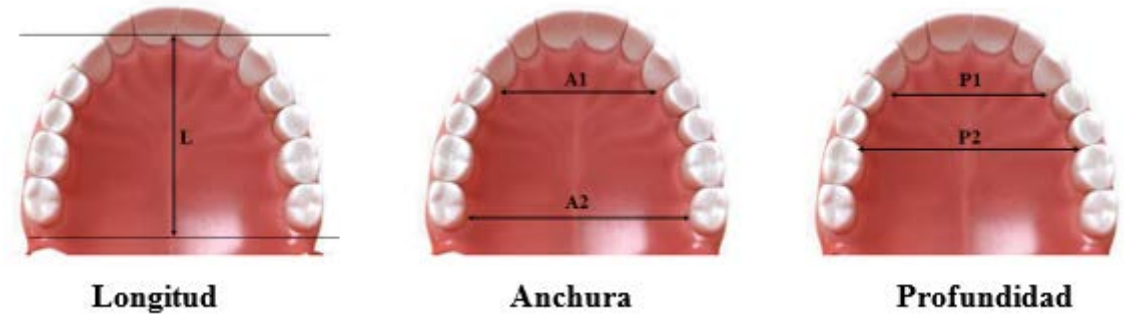


Figura 11. Referencias anatómicas de las medidas del paladar
(www.turbosquid.com, modificación propia).

2.6 Conclusiones

En el aspecto articulatorio del habla humana, todas las acciones de los articuladores deben ser tenidas en cuenta y analizadas con métodos experimentales, pero es especialmente importante atender a la acción de la lengua con el paladar duro y con los dientes incisivos porque, de la relación que mantengan estos elementos y en qué punto y cómo se produzca la constricción, resultarán buena parte de los sonidos consonánticos de las lenguas.

Capítulo 3. Diseño y modelado del paladar artificial

3.1 Introducción

En los capítulos anteriores se ha realizado un estudio sobre los dispositivos existentes y sobre la anatomía de la cavidad bucal. Estos estudios han permitido conocer las características de los distintos diseños, las cualidades de la cavidad bucal y las medidas anatómicas medias que determinarán el tamaño del nuevo diseño.

A partir de toda la información recabada se propone un diseño universal con el fin de adaptarse al mayor número de pacientes posible.

3.2 Características del diseño: filas, número de electrodos y localización

En los diseños iniciales se estudió la posibilidad de que el paladar artificial cubriera toda la superficie posible para así obtener el mayor número de información y mantener el formato de los diseños ya existentes con 8 filas de electrodos en la mayoría.

Esta idea inicial no reunía los requisitos del presente trabajo ya que uno de los objetivos principales era conseguir un paladar inalámbrico. Esto supone que dentro de la cavidad bucal debe existir un espacio destinado a la electrónica del dispositivo.

Anteriormente se determinó que las zonas más importantes de contacto con la lengua en la articulación del habla son los incisivos y el paladar duro. Por esta razón, el diseño cubrirá con electrodos las zonas: dental, alveolar, pre-palatal y palatal.

Quedando libre así la zona post-palatal o velar para la inclusión de la electrónica correspondiente al procesado de la señal procedente de los electrodos y al envío de dicha información hasta un dispositivo terminal, como un ordenador, donde los profesionales y usuarios puedan analizarla. En esta parte es importante tener en cuenta que el paladar artificial no debe invadir más allá del final de los molares, ya que podría causar reflejo de nausea en el paciente.

El diseño incluye 6 filas con un total de 46 electrodos repartidos por la superficie a cubrir. La fila 1 se encontrará en la zona dental y contará con 6 electrodos para capturar los contactos de la articulación dental, la fila 2 cubrirá la zona alveolar con 8 electrodos, las filas 3 y 4 se encontrarán en la zona post-alveolar o pre-palatal con 8 electrodos cada una y, por último, las filas 5 y 6 cubrirán la zona del paladar con un total de 16 electrodos entre ambas.

La distribución y la localización de las filas de electrodos se ha realizado teniendo en cuenta las siguientes reglas de diseño:

- La fila 1 se coloca en la base de los incisivos.
- La fila 4 se coloca en la ruga posterior del paladar, esta se encuentra aproximadamente a un tercio de la longitud total del paladar.

- Las filas 2 y 3 se colocan uniformemente en el espacio sobrante entre las filas 1 y 4.
- Las filas 5 y 6 se colocan uniformemente en el espacio que queda a cubrir.

Para determinar las posiciones anteriores y la separación entre las filas se ha tenido en cuenta las medidas estudiadas en el capítulo 2 correspondiente con el estudio de la anatomía.

La longitud del paladar es de aproximadamente 43,4 milímetros, por lo que siguiendo las reglas anteriores y situando el origen de referencia en la fila 1 junto a la base de los incisivos, la fila 4 se encontrará a 14,667 milímetros (un tercio de la longitud total).

Para determinar la separación entre las filas no solo hay que tener en cuenta las dimensiones del paladar, sino que además hay que considerar el ancho de las filas de electrodos.

La anchura de la fila debe tener el tamaño adecuado para albergar a los electrodos y a los respectivos cables o pistas que unirán cada electrodo a la parte electrónica del sistema. Estudiando las características de los circuitos flexibles existentes en el mercado ("Grupo SEMI-FLEX - Eurocircuitos," 2018) que permiten un ancho de pista de 0,1 milímetros con una separación entre pista de 0,1 milímetros, se ha determinado que una anchura de 2 milímetros para cada fila de electrodos es suficiente.

El tamaño de los electrodos debe ser lo suficientemente pequeño para que cada punto de contacto muestre una ubicación precisa y lo suficientemente grande para garantizar una buena conductividad. Los diseños existentes utilizan tamaños de entre 1 milímetros y 1,5 milímetros de diámetro. En nuestro diseño vamos a emplear electrodos de 1 milímetros de diámetro para proporcionar una ubicación lo más precisa posible.

Con los datos anteriores se ha determinado que la separación entre las filas 1,2,3 y 4 será de, aproximadamente, 2,15 milímetros y la separación entre las filas 4, 5 y 6 será de 4,98 milímetros. En la Figura 12 se puede observar una representación de la posición de las filas de electrodos.

Los electrodos no deben estar demasiado cerca ya que si esto ocurre se unirán por medio de la saliva provocando que se acoplen y se "enciendan" y se "apaguen" juntos. Por el contrario, si se encuentran demasiado lejos se pierde información ya que hay zonas no cubiertas. Se ha estudiado que una distancia mínima de 1 milímetro es suficiente (Wrench, 2007)

Así pues, la distancia entre los electrodos se calculará de acuerdo a la longitud de la fila y al número de eletrodos de modo que estén repartidos de manera uniforme y respetando la regla anterior.

La fila 1 tendrá un total de 6 electrodos mientras que las filas restantes poseerán 8 electrodos, esto hace un total de 46 electrodos. De esta forma, en la zona dental la distancia entre los electrodos es menor que en las filas posteriores donde esta distancia aumenta progresivamente, aunque siempre respetando la distancia mínima entre electrodos de 1 milímetro.

La longitud de las filas de electrodos depende de la anchura del paladar, siendo ésta variable a lo largo de su longitud. Por esto, es más estrecha en la parte anterior y más ancha en la parte posterior, alcanzando su maxima anchura en la zona posterior de los molares.

Además la altura o profundidad del paladar tambien debe ser considerada para determinar el grado de curvatura de las filas de electrodos y del paladar artificial. Este parametro no es constante en todo el paladar, por lo que cada fila de electrodos deberá tener unas dimensiones distintas, según su localización dependiendo de la anchura y de la altura del paladar, con el fin de adaptarse lo máximo posible a la anatomía.

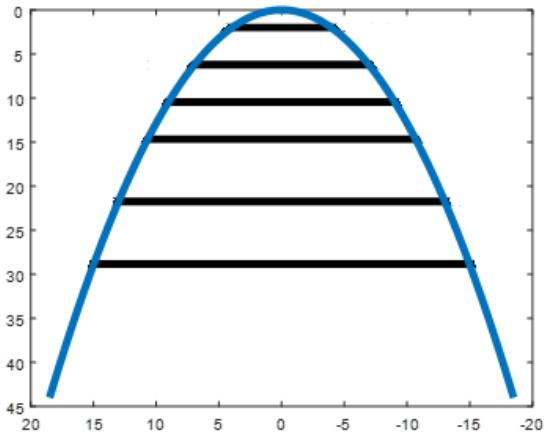


Figura 12. Representación de la posición de las filas de electrodos en un eje coordenado.

Al superponer la Figura 12 con una imagen de la anatomía bucal, se observa como las filas de electrodos cubren las zonas dental, alveolar, pre-palatal y palatal; dejando libre las zonas post-palatal y velar donde se incluirá posteriormente la parte electrónica del diseño, ver Figura 13.

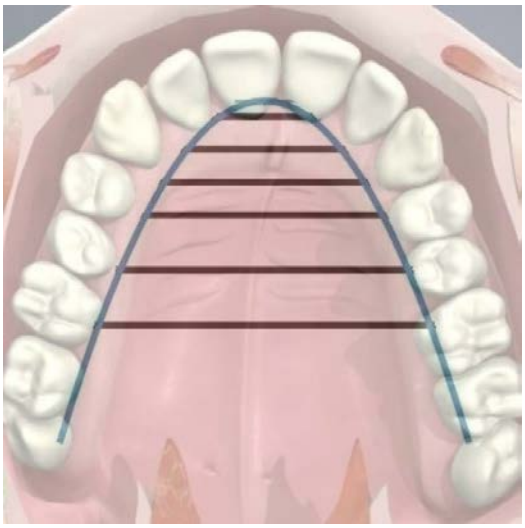


Figura 13. Superposición de una imagen anatómica (Anatomy.TV) **y la Figura 12.**

3.3 Materiales

Los materiales propuestos para la futura implementación del paladar deben permitir el diseño curvado siguiendo la forma anatómica y al ser utilizados en dispositivos médicos deben ser seguros y estar aprobados para su uso.

La directiva de productos sanitarios implantables activos (AIMD) 90/385 /CEE establece que los productos deben diseñarse y fabricarse prestando especial atención a la toxicidad de los materiales elegidos y a la compatibilidad con los tejidos biológicos, células y líquidos corporales según su uso previsto. Se deben tener en cuenta otros aspectos como la ingesta accidental de los materiales que lo componen o la infección y la contaminación microbiana.

Todas las directrices respecto al diseño se encuentran en la directiva anterior.

Se deben considerar diversos aspectos, así pues, el material debe ser biocompatible, sin toxicidad, no debe generar reacciones inflamatorias u otros mecanismos de defensa del organismo, se debe tener en encuentra la estructura y función del tejido, así como los requisitos mecánicos y rendimiento físico.

En el diseño del paladar artificial, al encontrarse dentro de la cavidad bucal, hay que tener en cuenta distintos factores como la saliva o la acción de la lengua.

La saliva es una secreción ligeramente ácida (pH=6,35-6,85), las glándulas salivales la secretan hacia la cavidad bucal de forma continua. La salivación se incrementa en los pacientes cuando se les coloca el paladar artificial y necesitan un pequeño tiempo de adaptación para acostumbrarse. Por esta razón, a la hora de elegir los materiales la saliva debe ser considerada de modo que el dispositivo no se dañe y el material no interaccione con la saliva.

La lengua ejerce presión sobre el paladar y los dientes para articular los distintos sonidos producidos durante el habla, de este modo, el material debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse al paladar y blando para no ocasionar daño al paciente, pero a la vez debe ser resistente para no deformarse con facilidad y así alargar su vida útil.

Respecto a los electrodos, los materiales más utilizados son la plata y el oro por su conducción. La plata se deslustre cuando se expone a sulfatos por largos periodos de tiempo, aunque en la práctica, los paladares EPG solo se exponen a la saliva por períodos cortos de tiempo y si se lleva a cabo una correcta higiene y mantenimiento del dispositivo esto no supondría un inconveniente. Por otra parte, el oro es menos susceptible a dañarse (Wrench, 2007).

Los electrodos al estar en contacto con la lengua deben estar recubiertos por una capa de resina epoxi que los aísle del contacto con los tejidos humanos.

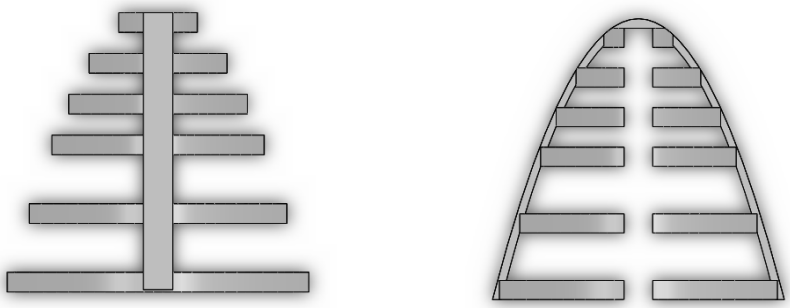
Para el diseño de la parte electrónica se utilizarán circuitos flexibles que permiten adaptarse a la forma curvada del paladar. Estos circuitos deben estar aislados entre dos capas de materiales aprobados y seguros, ambas capas estarán selladas por un adhesivo igualmente seguro y apto.

3.4 Diseño de la forma

Para el diseño de la forma del paladar se estudiaron varias posibilidades teniendo en cuenta las características anteriores de número de filas y medidas del paladar.

En la primera opción (Figura 14.A), las filas se encontraban unidas entre ellas por la parte central. El problema de esta opción es que no se adaptaba a distintas anchuras de la boca, es decir, la parte central siempre estaría cubierta pero las partes laterales podrían no estarlo en el caso de que el paladar del paciente fuese demasiado ancho; es importante cubrir la zona lateral y que el primer electrodo se encuentre pegado a las piezas dentales, esto no es posible utilizando este diseño por lo que ha sido descartado. Como ventaja destaca la mayor facilidad para guiar el cableado de los electrodos por esta parte central.

La segunda opción (Figura 14.B) surge como alternativa para solucionar el problema anterior, en ella las filas de electrodos se encuentran unidas por los laterales y dividas en su parte media, esto permite que al ser de un material flexible el paladar se pueda adaptar a distintos pacientes manteniendo siempre los primeros electrodos cercanos a los dientes. Este diseño incrementa la dificultad para guiar el cableado de todos los electrodos.



(A) **(B)**

Figura 14. Opciones 1 y 2 de diseño implementadas en SolidWorks.

Se optó por elegir una opción híbrida a partir de las dos anteriores (Figura 15) por su mejor adaptación a los distintos pacientes.

Esta opción además de la flexibilidad a la anchura de los distintos paladares permitiría incluir electrodos en la parte central si fuese necesario para captar más información, por ejemplo, en un caso en que el paciente tuviese un paladar demasiado ancho y las filas quedaran demasiadas alejadas del centro de la boca, o para otros diseños futuros.

En este diseño inicial debe ser incluida la parte destinada a albergar la parte electrónica del dispositivo, para el diseño de esta zona se ha ocupado el máximo espacio posible con el fin de conseguir una mayor flexibilidad para el diseño y la elección de los circuitos electrónicos. Esta parte, a diferencia de las filas de electrodos y del resto del paladar, es

rígida por lo que no sigue la curvatura del paladar, aunque iría adaptada sobre un molde con la forma del paladar del sujeto.

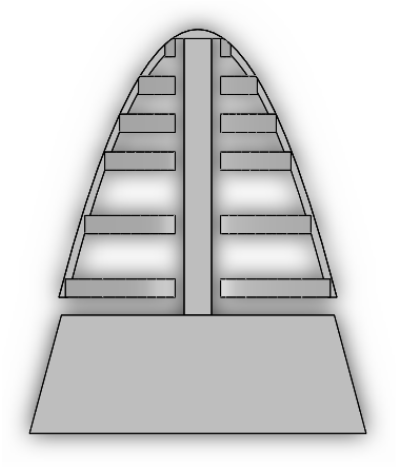


Figura 15. Opción de diseño con espacio para la parte electronica implementada en SolidWorks.

3.5 Modelado 3D del diseño

La forma en arco del paladar se puede de modelar en forma de parábola siguiendo la Ecuación 1:

$$y = ax^2 + b \tag{1}$$

Donde b se corresponde con la altura del paladar y a (Ecuación 2) es una variable que depende de la altura y de la anchura máxima del paladar.

$$a = \frac{-b}{\left(\frac{anchura}{2}\right)^2} \tag{2}$$

Cada fila se modelará siguiendo la ecuación anterior con sus correspondientes dimensiones.

El diseño se va a implementar utilizando el software SolidWorks ("Software de diseño CAD en 3D | SOLIDWORKS," 2018) y será impreso utilizando una impresora 3D ("BQ - Witbox," 2018.). El material que va a ser utilizado para la impresión es un material flexible ("Filaflex®Original 82A," 2018.) por lo que el prototipo necesita ser diseñado en dos dimensiones de forma que se pueda imprimir correctamente y posteriormente pueda ser plegado para que adquiera la forma del curvada del paladar.

Para esto, es necesario rediseñar el plano del paladar artificial teniendo en cuenta el diseño adoptado en el apartado anterior (Figura 15). Para calcular la longitud de la curva de cada

fila de electrodos del paladar se hará uso de integrales de superficie definidas aplicadas a la ecuación parabólica de cada fila de electrodos.

Es importante, tener en cuenta que las filas no estarán unidas en su parte central, si no que estarán divididas por la mitad con un espacio de 6 milímetros y unidas por sus extremos de modo que el paladar pueda adaptarse a pacientes con distintas dimensiones de anchura de la cavidad bucal. Esto se refleja en los límites de la integral.

Las seis filas van unidas por los extremos a un arco que sigue la forma del paladar vista desde un plano axial, este arco se determinará de la misma forma que las filas de electrodos.

Para calcular la longitud de la curva de cada fila se ha empleado el procedimiento descrito en la Ecuación 3, Ecuación 4 y Ecuación 5.

$$y = ax^2 + b \tag{3}$$

$$\frac{dy}{dx} = 2ax \tag{4}$$

$$longitud = \int_{x1}^{x2} \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{1/2} dx \tag{5}$$

Para el diseño del espacio de la parte electrónica se ha seguido el mismo procedimiento que para las filas de electrodos, de modo que esta parte se extiende desde el final de la fila 6 hasta el final del paladar que se correspondía con 43,4 milímetros desde la fila 1.

Para calcular sus dimensiones se han descrito dos parábolas correspondientes con el inicio y el final del espacio, la primera de anchura 30,7 milímetros y la segunda de anchura 37 milímetros, ambas con una altura de 20,1 milímetros y separadas entre ellas 13,4 milímetros. A partir de esto, se ha determinado la longitud de las curvas que compondrán las aristas del trapecio que da forma a este espacio.

El espacio de la parte electrónica va unido al resto del paladar por una fila longitudinal que atraviesa el paladar por la mitad. Por esta fila, irán los cables procedentes de los electrodos. Como en apartados anteriores, se han considerado las características de los circuitos flexibles existentes en el mercado (“Grupo SEMI-FLEX - Eurocircuitos,” 2018) para determinar la anchura y las medidas de este espacio considerando un ancho de pista de 0,1 milímetro con un espacio mínimo de separación de 0,1 milímetro y la posibilidad de un diseño en dos capas.

Utilizando todos los datos calculados representados en la Tabla 1 y los datos calculados del espacio de la parte electrónica se ha diseñado el paladar artificial que se observa en la Figura 16.

Todos los bordes han sido redondeados para que sean lo más cómodo posible para el paciente.

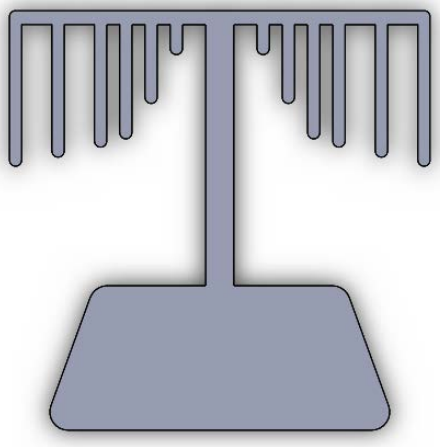


Figura 16. Diseño en SolidWorks del paladar artificial para impresión 3D.

Tabla 1. Medidas y ecuaciones de las filas del paladar artificial.

Fila	Ancho *	Altura *	Ecuación parabólica	Longitud curva **
1	8,0000	11	$y = -0{,}6875x^2 + 11$	9,84
2	14,0354	15	$y = -0{,}3046x^2 + 15$	21,86
3	18,1647	19,8	$y = -0{,}24x^2 + 19{,}8$	37,48
4	21,5904	19,9	$y = -0{,}1708x^2 + 19{,}9$	40,22
5	26,1992	20	$y = -0{,}1166x^2 + 20$	43,52
6	30,6898	20,1	$y = -0{,}0854x^2 + 20{,}1$	46,48

*Expresado en milímetros.

** La longitud se ha calculado eliminando la parte central de la curva que no se encuentra en el diseño y ha de ser divida en dos, una para cada rama que compone la fila; y está expresada en milímetros.

Los electrodos se reparten uniformemente por el paladar artificial formando la matriz de electrodos como se ha desarrollado en el punto 3.2 del presente trabajo. Así pues, la distribución de los electrodos se puede observar en la Figura 17.

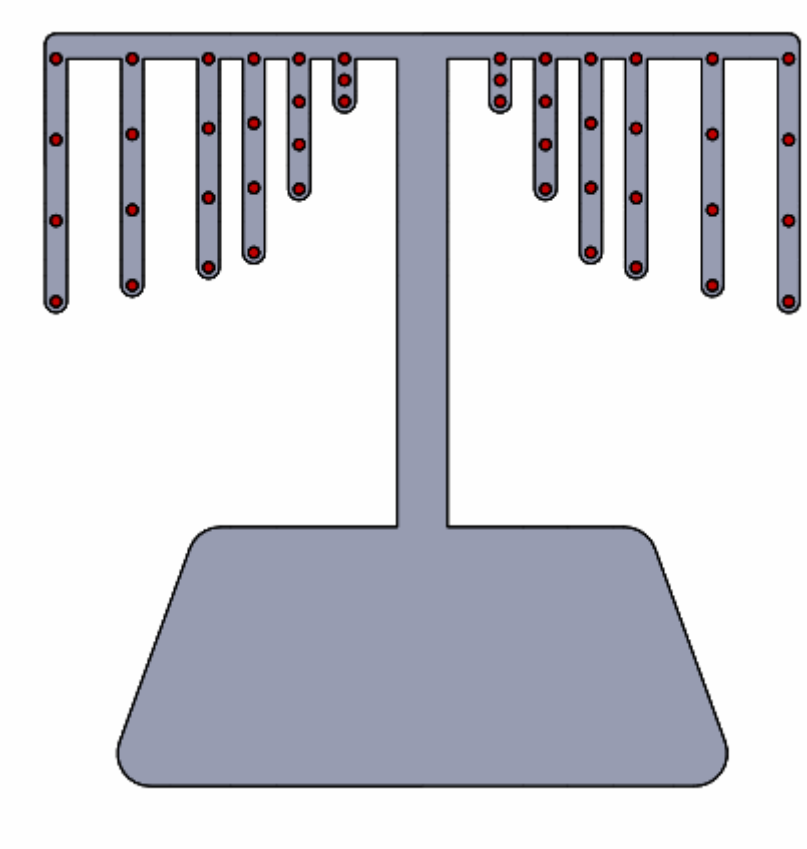


Figura 17. Distribución de la matriz de electrodos.

3.6 Impresión y validación del diseño

Para la impresión del paladar artificial se ha empleado un material flexible que permitirá adaptar el paladar artificial al paladar del paciente simulando las características de los circuitos impresos flexibles.

Utilizando la impresora 3D ("Soporte - Witbox," 2018) se ha impreso un modelo tridimensional de la boca de una persona real para validar el diseño.

Las impresiones del paladar y del modelo de la boca se pueden observar, respectivamente, en la Figura 18.

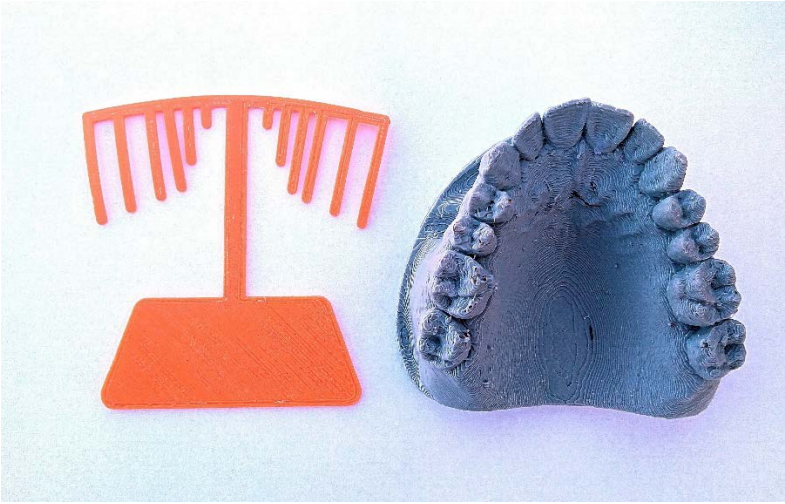


Figura 18. Paladar artificial e impresión de un modelo bucal.

Para verificar que el diseño se adapta a la cavidad bucal de un paciente, el paladar artificial se ha colocado sobre el modelo bucal impreso y se ha sujetado con un adhesivo a modo de prueba en la Figura 19.

Figura 19. Paladar artificial e impresión de un modelo bucal.

En la Figura 19 se observa que las filas de electrodos se adaptan a la forma de la boca. Este sujeto carece del último molar en ambos lados de la boca por lo que la parte destinada a la electrónica sobresale por detrás de los dientes existentes, esto no debería suponer un problema ya que el diseño está pensado para que no invada en exceso el paladar blando. Además, cabe destacar que el espacio de la parte electronica se ha maximizado para tener más flexibilidad a la hora de su diseño, pero si en el diseño final ocupa un menor tamaño el diseño sería reducido.

Capítulo 4. Estudio de compatibilidad electromagnética y consumo.

4.1 Introducción

Un objetivo del presente trabajo consiste en la búsqueda de una solución inalámbrica para el diseño del dispositivo de electropalatografía con el fin de que sea lo más cómodo y natural posible para el paciente.

Para lograr este objetivo el dispositivo debe incluir una parte destinada a la comunicación y envío de datos, por lo que es importante considerar la compatibilidad electromagnética desde las primeras etapas del diseño.

La compatibilidad electromagnética se define como la capacidad de un dispositivo de funcionar correctamente en su entorno electromagnético sin ser interferido por otros sistemas de ese entorno y sin interferir sobre los mismos. Es decir, se debe considerar tanto su inmunidad como sus emisiones.

El correcto funcionamiento está especificado en normativas específicas. En este caso, al tratarse de un dispositivo de uso médico, está regulado por la norma específica IEC-EN 60601-1-2 (Equipos electromédicos. Parte 1-2: Requisitos generales para la seguridad básica y características de funcionamiento esencial. Norma colateral: Compatibilidad electromagnética. Requisitos y ensayos) y otras normas como la norma CISPR 11 (Equipos industriales, científicos y médicos (ISM). Características de las perturbaciones radioeléctricas. Límites y métodos de medición).

4.2 Sistemas inalámbricos. Bluetooth

Existen diversas tecnologías que permiten una comunicación inalámbrica mediante el uso de radiofrecuencias, entre las más utilizadas podemos encontrar Wi-Fi, Bluetooth y ZigBee.

La tecnología Bluetooth es un protocolo de comunicaciones diseñado para Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN) que permite la transmisión de voz y datos entre dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia con bandas de frecuencia de 2,4 GHz.

Para el diseño del dispositivo se ha escogido esta tecnología ya que está diseñada para dispositivos de bajo consumo que requieren un corto alcance de emisión y utiliza transceptores de bajo coste.

El dispositivo de electropalatografía cumple todas estas características, debe tener un bajo consumo, el alcance se limitará al interior de la consulta del médico y será de unos pocos metros, y, por último, se pretenden abaratar los costes de los dispositivos existentes.

Los dispositivos que utilizan esta tecnología se clasifican en tres clases en referencia a su potencia de transmisión. En este caso, el dispositivo estaría enmarcado en la clase 2, cuyo alcance aproximado varía entre los 5 y los 10 metros.

Los límites recomendados y niveles de exposición para Bluetooth clase 2 se recogen en la normativa mencionada anteriormente y son los siguientes: 2.5 mW (4 dBm) para un alcance de 5-10 metros.

Las radiaciones generadas por las redes de Bluetooth son demasiado débiles para provocar absorción, subida de temperatura o efectos agudos detectables. Dado que las dosis y potencias de emisión de las bases de los aparatos de Bluetooth son muy bajas no se temen efectos negativos para la salud (Alonso Fustel, Garcia Vázquez, & Onaindia Olalde, 2011).

Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy es una tecnología de red inalámbrica de área personal diseñada y desarrollada por Bluetooth para aplicaciones que requieran un bajo consumo.

Las características de esta tecnología la hacen idónea para utilizarla en el nuevo diseño de electropalatógrafo, ya que está diseñada para aplicaciones en la que el dispositivo deba funcionar un largo periodo de tiempo con una pequeña batería, con una tasa baja de envío de datos o a una baja velocidad y en las que el coste deba ser reducido como es en el caso de los sensores.

4.3 Selección de componentes

Para el diseño del circuito electrónico existen diversas posibilidades, que han sido estudiadas teniendo en cuenta las características de los componentes existentes, el espacio disponible y las prestaciones.

La primera opción consiste en utilizar un chip bluetooth independiente que requiera un microcontrolador externo. La ventaja de usar este dispositivo consiste en la libre elección de un microcontrolador siempre que cumpla con los requisitos. Sin embargo, el uso de un microcontrolador externo puede significar un aumento del coste de la solución y del área empleada por la electrónica, así como del consumo.

La segunda opción consiste en una solución integrada, en la que el microcontrolador posee su propio módulo bluetooth sin necesidad de incluir en el diseño uno externo. La ventaja de esta solución es el menor coste total del diseño, sin embargo, todo el diseño está condicionado al microcontrolador que posee el sistema.

Tras analizar los componentes existentes y sus características se ha determinado que esta solución es la más conveniente. En el próximo capítulo se describirá en mayor detalle la propuesta final.

4.4 Consumo

El dispositivo ha sido diseñado de forma que su tasa de consumo sea lo más baja posible para garantizar su autonomía durante un periodo más largo de tiempo.

Teniendo en cuenta los requisitos de espacio disponible y la baja tasa de consumo de los componentes escogidos se ha determinado que la alimentación del sistema vendrá dada por una pila de botón del tamaño más reducido posible que cumpla con los requisitos de alimentación de los componentes escogidos.

Capítulo 5. Propuesta final de electropalatógrafo

5.1 Introducción

En este capítulo se va a describir detalladamente el diseño electrónico básico del sistema, los componentes seleccionados y sus características.

Concluyendo así con una propuesta final de electropalatógrafo, suponiendo ésta un diseño inicial que podrá servir como base para futuras investigaciones y la creación e implementación de un diseño final.

Para el diseño de la electrónica las principales necesidades que hay que hacer frente para el funcionamiento del electropalatógrafo son las siguientes:

- Determinar los componentes de la matriz de electrodos y la medida de esta señal.
- Determinar y seleccionar qué microcontrolador se va a utilizar y cuáles son sus características.
- Determinar si se necesita un circuito electrónico previo al microcontrolador.
- Determinar qué potencia es necesaria y cómo va a ser suministrada.

Así como los requisitos qué debe cumplir el sistema:

- Los límites de emisión de Bluetooth deben ser los descritos en el Capítulo 4 de este trabajo.
- Se debe considerar en todo momento el espacio disponible para la elección del tamaño de los componentes.
- La tasa de consumo debe ser baja para proporcionar una mayor autonomía del dispositivo.
- El coste es un factor a tener en cuenta si se pretende disminuir el coste de los diseños actuales.

5.2 Matriz de electrodos

La matriz de electrodos está compuesta por un conjunto de resistencias variables, cada resistencia variable constituye un electrodo, así pues, la matriz de electrodos se compondrá de 46 resistencias variables.

Para realizar la medida de las resistencias se va a hacer uso de un método de deflexión, este se basa en medir el valor de la resistencia empleando un divisor de tensión.

En la Figura 20 se observa un esquema general de la matriz de electrodos y un divisor de tensión.

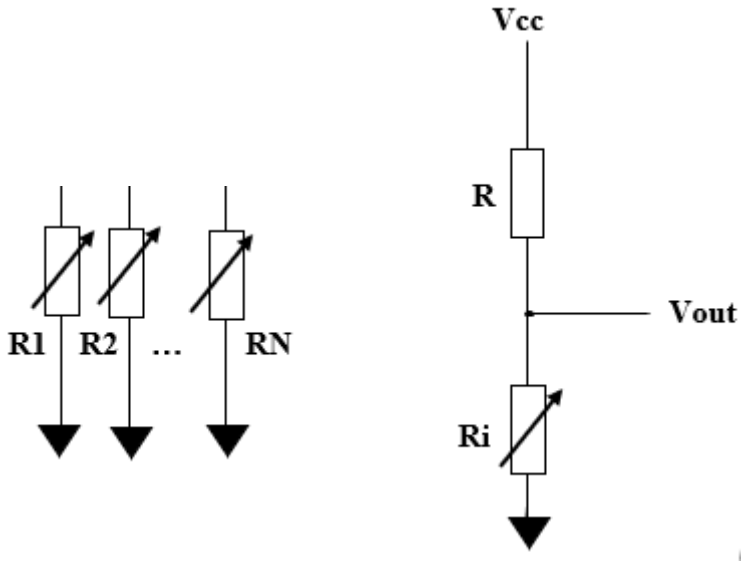


Figura 20. Matriz de electrodos y divisor de tensión.

5.3 Microcontrolador

Tras la elección de una solución integrada utilizando microcontrolador que posea un módulo bluetooth, se han planteado varias alternativas que van a ser desarrolladas a continuación:

- **CYW2037S** (Cypress Semiconductors, 2018b). Entre las ventajas de este dispositivo cabe destacar que integra la parte de comunicación bluetooth y la antena de radiofrecuencia, su reducido tamaño y coste, posee una memoria interna y se puede reprogramar vía bluetooth.
  La antena de radiofrecuencia cumple con las normas FCC y CE.
  Posee 9 entradas analógicas a un conversor analógico-digital.
  Como inconveniente el dispositivo no posee la etapa de acondicionamiento, porque lo que habría que incluirla en el diseño externo, incluyendo así diversos amplificadores que aumentarían el tamaño y el coste.

  En la Figura 21 se puede observar un esquema conceptual del diseño en el caso de incluir este dispositivo como parte del diseño.

- **CY8C4127L91-BL473** (Cypress Semiconductors, 2018c). Este dispositivo es un PSoC (Programable System on Chip) que integra Bluetooth Low Energy (BLE), posee 8 entradas analógicas y al igual que el diseño anterior tiene un bajo coste y un reducido tamaño.

La principal ventaja sobre el diseño anterior es que posee la etapa de acondicionamiento de la señal integrada por lo que no sería necesario incluirla externamente.
El único inconveniente consiste en qué no posee una antena de radiofrecuencia integrada por lo que habría que incluirla en el diseño. Los propios fabricantes ofrecen una guía (Cypress Semiconductors, 2018a) al usuario para el diseño de estas antenas. Siguiendo las directrices incluidas en esta guía se conseguirá un diseño funcional y que cumpla con los requisitos de la normativa vigente, por lo que incluirla no supondría un problema. En la Figura 22 se puede observar un esquema conceptual del diseño utilizando este dispositivo.

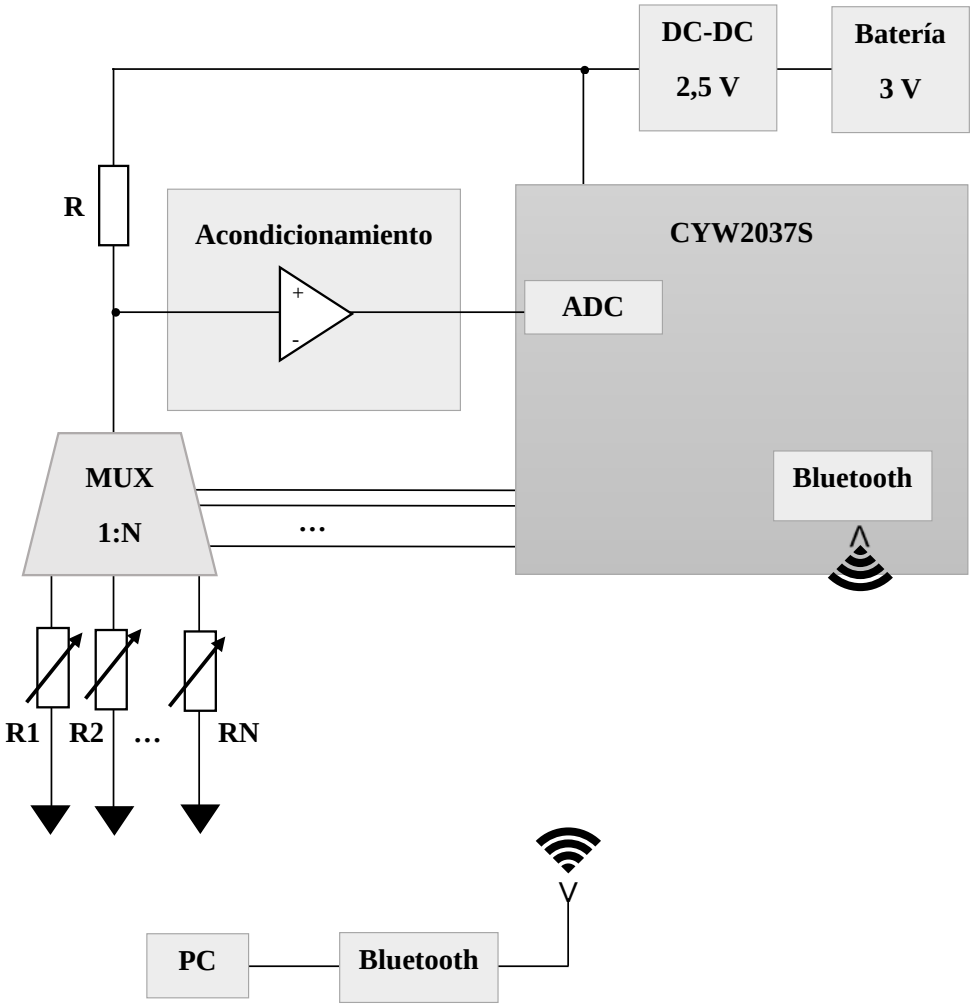


Figura 21. Esquema conceptual del diseño utilizando CYW2037S.

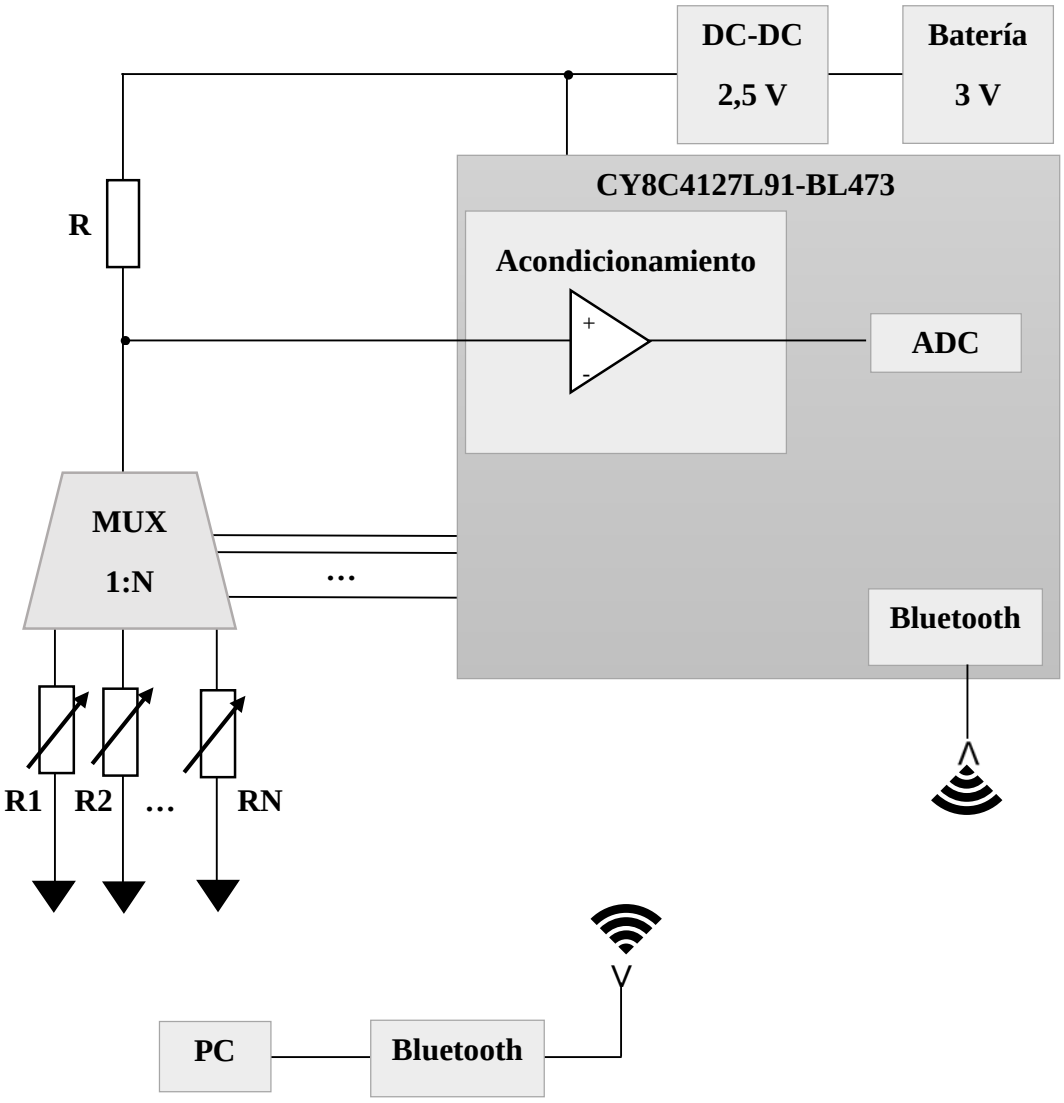


Figura 22. Esquema conceptual del diseño utilizando CY8C4127L91-BL473.

Las principales diferencias entre las Figura 21 y Figura 22 consisten en que el primer caso la electrónica de acondicionamiento se encuentra fuera del microcontrolador por lo que supone un espacio y un coste extra y en el segundo caso, habría que incluir una antena de radiofrecuencia.

Se ha determinado que el dispositivo elegido debido a sus características es el CY8C4127L91-BL473 por lo que el diseño básico del electropalatógrafo se corresponde con la Figura 22.

Antena

Para la elección de la antena de radiofrecuencia se ha seguido la guía recomendada (Cypress Semiconductors, 2018a), en ella aparecen varias opciones, implementar la antena en la propia PCB utilizando distintas pistas o utilizar un chip.

Considerando el tamaño disponible en el diseño y las distintas características se ha determinado que la antena a utilizar será el modelo 2450AT18B100E de Johanson Technology (Johanson Technology, 2018). Esta antena está integrada en un chip de tamaño 3,2 mm x 1,6 mm y área 5,12 mm²; posee una frecuencia de 2450 MHz y un bajo coste.

5.4 Multiplexores

El diseño posee en total 46 electrodos, esto quiere decir, que necesitamos introducirle al microcontrolador 46 entradas analógicas pero el diseño elegido solo posee 8 entradas. Por esta razón, hay que hacer uso de multiplexores que seleccionen la entrada deseada en cada momento mediante señales de control.

Para esto se ha elegido el multiplexor analógico MAX14689 (MAXIM INTEGRATED, 2018).

Este multiplexor está formado a su vez por dos multiplexores 2:1, esto se muestra en la Figura 23.

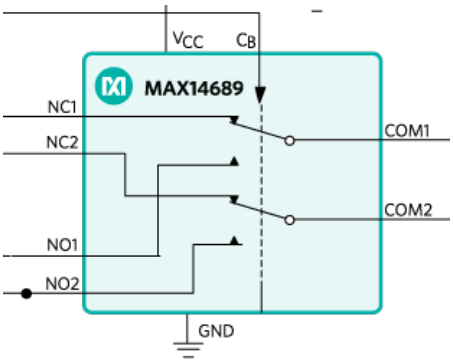


Figura 23. Diagrama de MAX14689 (MAXIM INTEGRATED, 2018).

Para poder abarcar los 46 electrodos es necesario utilizar 21 multiplexores analógicos colocados jerárquicamente.

5.5 Alimentación

El circuito de alimentación estará formado por una batería que proporcione la energía suficiente para el correcto funcionamiento del diseño y por un regulador de tensión que

garantice un valor de tensión de salida nominal en el caso de que existan variaciones en la tensión de alimentación.

La batería se corresponde con una pila de botón de litio CR927 de Camelion ("Boton Litio CR927" Camelion, 2018) de 30 mAh que proporciona una tensión de 3V y tiene un diámetro de 9 milímetros.

El regulador DC-DC es el modelo LP5907SNX-2.5/NOPB de Texas Instruments (Texas Instrument, 2018) que proporciona una tensión de salida de 2,5 V. Posee un reducido tamaño de 1 milímetro x 1 milímetro y un bajo coste.

5.6 Tabla de componentes

Tabla 2. Componentes del diseño electrónico.

Dispositivo	Nº	Tamaño	Consumo	Coste
Microcontrolador **CY8C4127L91-BL473**	1	3,51 mm × 3,91 mm 13,73 mm^2	16,4 mA	4,18 € (1 unidad) 2,26 € (2500 unidades)
Multiplexor analógico **MAX14689**	21	1,2 mm x 1,2 mm 1,44 mm^2	40 uA	1,81 € (1 unidad) 0,874 € (2500 unidades)
Regulador de tensión **LP5907SNX-2.5/NOPB**	1	1 mm x 1 mm 1 mm^2	250 uA	0,443 € (1 unidad) 0,172 € (1000 unidades)
Antena **2450AT18B100E**	1	3,2 mm x 1,6 mm 5,12 mm^2	-	0,517 € (1 unidad) 0,203 € (1000 unidades)
Pila de botón **CR927 Camelion**	1	Diámetro 9 mm 63,62 mm^2	-	0,60 € (1 unidad) 0,12 € (2000 unidades)

Conclusiones y líneas futuras

Conclusiones

Durante el desarrollo de la memoria se han expuesto las tareas realizadas durante el presente trabajo fin de grado, mostrando como se han alcanzado los objetivos propuestos.

En primer lugar, se expuso una introducción para conocer el estado de la técnica, así como la estructura y objetivos del trabajo.

En segundo lugar, se realizó un estudio para analizar los dispositivos existentes en el mercado. Además, se describió tanto la anatomía implicada como su tamaño condicionante para el diseño.

En tercer lugar, se diseñó un paladar artificial que supone una solución universal para los distintos pacientes, donde se estudiaron el número de filas, de electrodos, la forma y los materiales.

En cuarto lugar, se estudió la posibilidad de diseñar un electropalatografo inalámbrico, por lo que se contemplaron los aspectos de compatibilidad electromagnética, la comunicación bluetooth y el consumo.

Por último, se desarrolló una propuesta de diseño final.

Las principales aportaciones de este trabajo son:

- El diseño de un nuevo paladar artificial universal adaptable para la mayoría de los pacientes.
- El nuevo enfoque de un sistema de electropalatografía inalámbrico que busca eliminar el cableado en los dispositivos existentes y mejorar la comodidad del paciente.
- La propuesta final de un electropalatógrafo que incluye un diseño básico de los componentes electrónicos en el propio paladar artificial.

Líneas futuras

Los resultados obtenidos en este trabajo de fin de grado suponen un punto de partida para un diseño final de un electropalatógrafo, constituyendo éste las primeras fases del diseño. Toda la información recabada puede ser utilizada para el desarrollo de las siguientes líneas futuras:

- Investigación para crear un diseño final del sistema de electropalatografía partiendo de la propuesta realizada en el presente trabajo de fin de grado.
- Diseño del software para la visualización de la información recogida por el sensor en un dispositivo final como un ordenador.

Bibliografía

Alonso Fustel, E., Garcia Vázquez, R., & Onaindia Olalde, C. (2011). Campos electromagnéticos y efectos en salud. *Subdireccion De Salud Publica De Biskaia*, 70.

Articulate Instruments Ltd. (2018). Articulate Instruments Ltd »WinEPG.

Camelion. (2018). Boton Litio CR927 3V (1 pcs) Camelion > Informatica > Baterias y Pilas > Pilas Boton. Retrieved June 25, 2018, from https://www.e-nuc.com/boton-litio-cr927-3v-pcs-camelion-p-6348.html

Cypress Semiconductors. (2018a). AN91445 Antenna Design and RF Layout Guidelines.

Cypress Semiconductors. (2018b). CYW20737S Bluetooth Low Energy System-in-Package (SiP) Module.

Cypress Semiconductors. (2018c). PSoC® 4: PSoC 4100_BLE Family Datasheet Programmable System-on-Chip (PSoC®). Retrieved June 22, 2018, from http://www.cypress.com/file/416481/download

Fernández Planas, A. M. (Ana M., Martínez Celdrán, E., & Universitat de Barcelona. Departament de Lingüística General. (2010). *Estudio electropalatográfico de la coarticulación vocálica en estructuras VCV en castellano*. Universitat de Barcelona.

Grupo SEMI-FLEX - Eurocircuitos. (2018).

Johanson Technology. (2018). 2.4GHz Mini Antenna, SMT.

Kelly, S., Main, A., Manley, G., & McLean, C. (2000). Electropalatography and the Linguagraph system. *Medical Engineering & Physics*, *22*(1), 47–58. https://doi.org/10.1016/S1350-4533(00)00007-2

Marunick, M. T., & Menaldi, C. J. (2000). Maxillary dental arch form related to voice classification: A pilot study. *Journal of Voice*, *14*(1), 82–91. https://doi.org/10.1016/S0892-1997(00)80097-1

Maxim Integrated. (2018). Ultra-Small, Low-RON, Beyond-the-Rails™ DPDT Analog Switches.

Park, H., Kiani, M., Lee, H. M., Kim, J., Block, J., Gosselin, B., & Ghovanloo, M. (2012). A wireless magnetoresistive sensing system for an intraoral tongue-computer interface. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2012.2227962

RECREUS INDUSTRIES S.L. (2018). Filaflex®Original 82A.

Rodríguez, S., Smith-Agreda, J. M., & García Atarés, N. (2003). *Anatomía de los órganos del lenguaje, visión y audición*. Editorial Médica Panamericana.

Rose Medical Solutions Ltd. (2018). Electropalatografía | Rose Medical Solutions Ltd.

Sardini, E., Serpelloni, M., & Fiorentini, R. (2013). Wireless intraoral sensor for the physiological monitoring of tongue pressure. In *2013 Transducers and Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, TRANSDUCERS and EUROSENSORS 2013*.

https://doi.org/10.1109/Transducers.2013.6627010

SmartPalate International. (2018). Sistema SmartPalate - CompleteSpeech.

Software de diseño CAD en 3D | SOLIDWORKS. (2018).

Soporte - Witbox. (2018).

Texas Instrument. (2018). LP5907 250-mA, Ultra-Low-Noise, Low-IQ LDO.

Tortora, G., & Derrickson, B. (2013). *Principios de Anatomía y Fisiología*. *Panamericana* (Vol. 13).

Wrench, A. A. (2007). Advances in EPG palate design. *Advances in Speech Language Pathology*, *9*(1), 3–12. https://doi.org/10.1080/14417040601123676