



TREBALL FINAL DE GRAU
ENGINYERIA BIOMÈDICA

MONITORITZACIÓ DE FACTORS DE RISC CUTANIS EN PACIENTS AMB COLLARTES ORTOPÈDICS PHILADELPHIA

AUTORA: EMILIA GÓMEZ COLOMER
TUTORA: BIANCA MARIELA INNOCENTI BADANO
COTUTORA: ANA CARRETERO PÉREZ

DEPARTAMENT:
Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica

CONVOCATÒRIA: Setembre 2025

TAULA DE CONTINGUT

1. INTRODUCCIÓ	2
2. METODOLOGIA.....	3
2.1. Revisió bibliogràfica.....	3
2.2. Desenvolupament del sistema de sensors	3
2.3. Integració dels sensors al collaret.....	4
2.4. Desenvolupament del sistema general	4
2.4.1. Hardware	4
2.4.2. Software	4
2.4.3. Interfície web	5
3. RESULTATS	5
4. CONCLUSIONS	6
4.1. Futurs passos.....	6

1. INTRODUCCIÓ

Les lesions cutànies associades a dispositius mèdics són una problemàtica clínica rellevant, especialment en pacients amb immobilització cervical prolongada. Els collarets ortopèdics Philadelphia, tot i ser efectius per estabilitzar la columna cervical en situacions post-traumàtiques o quirúrgiques, poden provocar lesions per pressió a causa del contacte mantingut amb zones anatòmiques com el mentó, la mandíbula o la regió occipital. Aquestes lesions poden aparèixer en menys de 72 hores i representar un risc clínic greu, incloent necrosi, infeccions o necessitat d'intervenció quirúrgica.

Actualment, no existeixen solucions comercials que permetin monitoritzar de forma integrada i contínua els factors de risc cutani associats a l'ús d'aquests collarets. Els estudis clínics han identificat com a principals factors causants d'aquestes lesions la pressió excessiva, l'augment de temperatura i la humitat acumulada sota el dispositiu. No obstant això, encara no es disposa d'una eina tecnològica que permeti detectar precoçment aquestes condicions de risc.

Aquest treball de fi de grau planteja com a objectiu principal el disseny i desenvolupament d'un sistema de monitorització intel·ligent integrat en un collaret Philadelphia, capaç de mesurar en temps real la pressió, la temperatura i la humitat en les zones crítiques de contacte amb la pell. A través de la integració de sensors biomèdics i una plataforma electrònica portable, el sistema recull i transmet dades que són interpretades mitjançant un model heurístic per alertar de possibles condicions lesives.

Partint d'aquesta premissa, la hipòtesi del treball és *“La incorporació d'un sistema de sensorització biomèdica dins del collaret permetrà identificar de forma anticipada les condicions fisiològiques que precedeixen l'aparició de lesions per pressió, afavorint així una actuació clínica més ràpida, personalitzada i preventiva”*.

La proposta pretén millorar la seguretat i qualitat de vida dels pacients mitjançant una solució tecnològica preventiva, aportant una eina objectiva i funcional tant per a l'ús clínic com per a la investigació biomèdica.

2. METODOLOGIA

Per assolir els objectius plantejats, el projecte s'ha estructurat en quatre fases metodològiques:

2.1. Revisió bibliogràfica

Diversos estudis recents evidencien una incidència elevada de lesions per pressió en aquestes situacions, amb una prevalença que pot arribar fins al 78% segons determinades condicions clíniques. Aquestes lesions solen aparèixer a zones amb prominències òssies com l'occipital, el mentó i la mandíbula, on el dispositiu exerceix una pressió sostinguda que interfereix amb la perfusió cutània.

Els principals factors fisiològics identificats com a desencadenants són: la pressió contínua, l'increment de la temperatura local i l'acumulació d'humitat per manca de ventilació. Aquest conjunt de condicions crea un microclima desfavorable que deteriora la funció de barrera de la pell i n'afavoreix la degradació.

2.2. Desenvolupament del sistema de sensors

Selecció del sensors

Per a la monitorització dels factors de risc cutanis, es van escollir dos tipus de sensors biomèdics amb criteris de fiabilitat, mida reduïda, baix consum i facilitat d'integració:

- **Sensor de pressió FlexiForce A401:** sensor resistiu ultrafí, flexible i amb una àrea activa de 25,4 mm. Ofereix una lectura (V) proporcional a la força aplicada (N), fet que el fa ideal per identificar zones amb pressió sostinguda al coll.
- **Sensor de temperatura i humitat SHT31 de Sensirion:** sensor digital d'alta precisió amb interfície I²C, capaç de mesurar de manera fiable canvis tèrmics i d'humitat al microclima de la pell. Presenta una resposta ràpida, baixa deriva i una mida compacta, adequada per a la integració en dispositius portables.

Calibratge

El calibratge dels sensors FlexiForce es va dur a terme mitjançant l'aplicació de pesos coneguts per determinar la relació entre el pes (kg) i la tensió de sortida (V). Tot i així, aquests sensors no presenten un comportament lineal: la seva resposta és més precisa a pressions mitjanes-altes i pot variar lleugerament entre unitats, amb certa inestabilitat a pressions molt baixes. Per aquest motiu, a més de generar una corba polinòmica de calibratge, es va implementar una classificació per nivells de risc clínic basada en trams de voltatge de sortida (V): sense pressió, baixa, moderada, possible lesió, lesió, lesió crítica.

Disseny PCB sensors SHT31

En quan als sensors de temperatura i humitat, es van adquirir dos mòduls del SHT31 de DFRobot i un multiplexor I²C per provar la funcionalitat d'aquest tipus de sensor. Un cop validat el prototip inicial, es va portar a terme l'elaboració de 8 plaques de circuit imprès (PCB) personalitzades amb les mides exactes per poder integrar-los en els orificis del collaret.

2.3. Integració dels sensors al collaret

Els 16 sensors (8 de pressió i 8 de temperatura i humitat) es van integrar directament al collaret ortopèdic aprofitant la seva estructura rígida però modificable. Es van crear orificis i cavitats adaptades per encaixar els sensors de forma estable i segura, i també es van aprofitar alguns orificis de la part posterior, garantint un contacte continu amb la pell. El disseny va prioritzar que la integració no interferís amb l'ergonomia ni la funcionalitat terapèutica del collaret. Els cables es van conduir de manera ordenada per dins de la superfície, minimitzant molèsties i interferències.

2.4. Desenvolupament del sistema general

2.4.1. Hardware

Es va dissenyar una PCB central personalitzada per integrar tots els components del sistema de monitorització en un format compacte i modular, permetent un funcionament autònom i fiable durant sessions de monitorització prolongades. Aquesta placa incorpora:

- El **microcontrolador** ESP32-WROOM-32, que centralitza les lectures dels sensors i gestiona la transmissió de dades via Bluetooth Low Energy (BLE), facilitant una connexió inalàmbrica amb el dispositiu receptor.
- Un **multiplexor** I²C (TCA9548A) que permet gestionar múltiples sensors SHT31 amb la mateixa adreça, activant canals de lectura independents per a cada un.
- **Circuits de condicionament analògic** dissenyats específicament per convertir la variació resistiva dels sensors de pressió FlexiForce A401 en una tensió (V) proporcional, llegible pels convertidors ADC del microcontrolador.
- Un **sistema complet d'alimentació i càrrega**, amb una bateria LiPo de 3.7 V – 1800 mAh, reguladors de tensió (LDO i inversors per -1.25 V), i un carregador integrat per recàrrega segura via port USB.

2.4.2. Software

Per la recollida i lectura de dades, es va desenvolupar un *firmware* específic per l'ESP32, programat en Arduino (C++), que realitza les següents funcions dividides en 3 fases:

- **Fase 1: Aquisició de dades.** Lectura periòdica de tots els sensors, amb aplicació de mitjana i filtratge exponencial suau per reduir el soroll i estabilitzar el senyal.
- **Fase 2: Processament.** Estructuració de les dades en un document JSON, diferenciant pressió, temperatura i humitat.
- **Fase 3: Transmissió i classificació.** Enviament de les dades per BLE a la interfície web en temps real, actualitzant-se cada 2 segons.

2.4.3. Interfície web

Per facilitar la interpretació clínica, es va crear una interfície web interactiva mitjançant *Streamlit*, que representa les dades rebudes de forma visual i intuïtiva:

- **Un mapa de calor** mostra les zones amb temperatura i humitat elevades.
- **Un mapa de pressió** destaca les àrees amb pressió sostinguda.
- **Una taula informativa** recull els valors concrets per a cada zona (°C, %RH, kg, nivell de risc), amb codificació per colors (verd, taronja, vermell) que indica el nivell de risc clínic segons uns llindars predefinits.

Aquest entorn permet una valoració ràpida i precisa per part del personal mèdic, afavorint una intervenció preventiva abans que apareguin lesions visibles.

3. RESULTATS

Després d'integrar tots els components i validar el sistema electrònic, es va dur a terme una prova funcional completa del dispositiu. L'usuari va portar el collaret durant 3 hores de manera contínua, mentre el sistema enregistrava dades cada 2 segons.

Els resultats es van visualitzar mitjançant la interfície web desenvolupada, que va permetre identificar zones anatòmiques amb condicions de risc clínic:

- **Zona occipital mitjana:** pressió extrema i sostinguda (sortida gairebé saturada a 3.3 V), identificada com a zona crítica, especialment quan el pacient està en repòs o decúbit.
- **Barbeta dreta i zona mandibular dreta:** combinació de pressió moderada (>0.13 kg), temperatura superior als 35 °C i humitat al 100 %, indicant un risc elevat de maceració cutània.
- **Zona occipital inferior esquerra i superior dreta:** pressió moderada sostinguda (0.12–0.16 kg) amb temperatura entre 30–33 °C, considerades zones de risc mitjà, però rellevants si l'exposició és prolongada.

- **Zones passives (com la barbeta esquerra):** valors de pressió molt baixos i temperatures inferiors als llindars, confirmant la seva menor exposició al risc.

La taula generada per la interfície, juntament amb els mapes de calor i de pressió, van oferir una visualització clara i intuïtiva de les àrees de més vulnerabilitat, permetent una actuació preventiva immediata si s'apliqués en un entorn clínic real.

4. CONCLUSIONS

Aquest treball ha demostrat la viabilitat tècnica i funcional del desenvolupament d'un sistema de monitorització biomèdica integrat en un collaret ortopèdic Philadelphia, orientat a la prevenció de lesions cutànies per pressió en pacients amb immobilització cervical.

La integració de sensors de pressió, temperatura i humitat en punts anatòmics crítics ha permès detectar condicions fisiològiques que poden comprometre la integritat de la pell. L'anàlisi de dades en temps real, combinada amb una interfície visual de fàcil interpretació, constitueix una eina preventiva que pot ser de gran utilitat en l'àmbit clínic.

Els resultats obtinguts han validat la hipòtesi inicial: el sistema és capaç de detectar situacions de risc abans que es produeixin lesions visibles, permetent una actuació mèdica més ràpida i personalitzada. A més, l'ús de tecnologia portable, modular i de baix consum fa que aquest sistema sigui escalable i adaptable a altres aplicacions mèdiques.

Tot i els bons resultats, cal considerar que les proves s'han realitzat sobre un únic usuari (el propi desenvolupador), fet que limita l'extrapolació clínic; no totes les zones monitoritzades han comptat amb els tres tipus de sensors simultàniament; l'entorn de prova no simula condicions reals com el moviment, la sudoració o la variabilitat entre pacients.

4.1. Futurs passos

De cara a futures fases, es proposa: ampliar les proves a una mostra clínic més diversa; integrar actuadors passius o actius (com microventilació) per actuar sobre zones de risc; millorar la robustesa del sistema i explorar la seva certificació per a ús clínic real.

Aquest projecte representa un primer pas cap a solucions intel·ligents per a la prevenció de lesions cutànies, aportant valor en la frontera entre tecnologia mèdica, enginyeria biomèdica i atenció al pacient.