



FACULTAT
DE CIÈNCIES
I TECNOLOGIA

UVIC | UVIC·UCC

Trabajo de Fin de Grado de DESARROLLO

PROPUESTA DE INCUBADORA
TERAPÉUTICA PARA NEONATOS
PREMATUROS: FOTOTERAPIA Y
MUSICOTERAPIA.

NICOLE BRITTANNY CABRERA VILLAVICENCIO

Grado en Ingeniería Biomédica

Tutora: Nathalie Marcela Cerón Hurtado (UAB)

Co-tutor: Moisès Serra Serra (UVIC)

Vic, Junio de 2021



FACULTAT
**DE CIÈNCIES
I TECNOLOGIA**

UVIC | UVIC·UCC

Final Degree Project of Development

**PROPOSAL OF A THERAPEUTIC
INCUBATOR FOR PREMATURE
NEWBORNS: PHOTOTHERAPY AND
MUSIC THERAPY**

NICOLE BRITTANNY CABRERA VILLAVICENCIO

Degree of Biomedical Engineering

Thesis advisor: Nathalie Marcela Cerón Hurtado (UAB)

Thesis co-advisor: Moisès Serra Serra (UVIC)

Vic, June of 2021

*A mis padres y hermanos,
Por estar siempre y prestar apoyo .
A mis sobrinos,
Por enseñarme la pureza del amor.*

UNIVERSIDAD DE VIC

Resumen

Tesis de Grado

Titulo Tesispor **Nicole CABRERA VILLAVICENCIO**

Se define como recién nacido prematuro aquel nacido ante de las 37 semanas de edad gestacional. Un parto prematuro puede estar causado por factores tanto biológicos como ambientales. Esta situación definitivamente es un verdadero problema de salud pública que incrementa la estancia hospitalaria, aumenta el margen de complicaciones para cada uno de los niños nacidos prematuros, lo cual, finalmente, redundará en los resultados finales para su desarrollo y su salud en general. Una de las patologías presente en hasta el 80% de los neonatos pretérmino, es la hiperbilirrubinemia. Se conoce como hiperbilirrubinemia el incremento excesivo de bilirrubina en sangre del recién nacido, llegando a sobrepasar los niveles permitidos para su edad en horas. En términos generales, la hiperbilirrubinemia es una condición benigna que se autoresuelve pero en un porcentaje de recién nacidos mínimo se requiere de intervenciones para lograr conseguir que los niveles de bilirrubina no asciendan a un valor que podría ser tóxico para el sistema nervioso. El tratamiento se basa en la aplicación de una terapia con ondas de luz entre los 460-490 nm de longitud de onda.

Como causa del nacimiento prematuro, el pretérmino no ha podido completar o seguir avanzando el desarrollo de algunos órganos, como el hígado, los pulmones o el cerebro. Por este motivo y por que la hiperbilirrubinemia puede afectar también el ámbito cognitivo del neonato, se propone acoplar al dispositivo de cuidado neonatal un módulo de reproducción de música para poder aplicar la musicoterapia; terapia no farmacológica que ayuda al desarrollo cognitivo del prematuro.

En esta tesis se realiza la propuesta y el desarrollo de un prototipo de incubadora con un sistema de fototerapia integrado en el que además de únicamente tratar una patología, se proporcione un nivel de bienestar al pequeño paciente por medio de la musicoterapia.

UNIVERSITY OF VIC

Abstract

College Degree Thesis

Titulo Tesis en Inglésby **Nicole CABRERA VILLAVICENCIO**

A premature newborn is defined as one born before 37 weeks of gestational age. Preterm labor can be caused by both biological and environmental factors. This situation is definitely a real public health problem that increases hospital stay, increases the margin of complications for each of the children born prematurely, which ultimately results in the final results for their development and their health in general.

One of the pathologies present in up to 80% of preterm infants is hyperbilirubinemia. Hyperbilirubinemia is known as the excessive increase of bilirubin in the newborn's blood, exceeding the levels allowed for their age in hours. In general terms, hyperbilirubinemia is a benign condition that resolves itself, but in a minimal percentage of newborns, interventions are required to ensure that the bilirubin levels do not rise to a value that could be toxic to the nervous system. The treatment is the application of a light wave therapy between 460-490 nm wavelength.

As a cause of premature birth, the preterm has not been able to complete or continue to advance the development of some of the organs, such as the liver, lungs or brain. For this reason and because hyperbilirubinemia can also affect the newborn's cognitive environment, it is proposed to attach a musical reproduction module to the neonatal care device in order to apply musical therapy; not pharmacological therapy that helps the cognitive development of premature infants.

In this thesis it achieves the proposal and the development of a prototype incubator, which has an integrated phototherapy system that only treats pathology, proportions a level of well being, solely for the small patient and with use of musical therapy.

Agradecimientos

Cuatro años después de mi primera clase universitaria, llega el día de escribir los agradecimientos de mi trabajo final de grado dando fin a una etapa. Este período de tiempo, corto y largo a la vez, han significado un crecimiento en mí tanto personal como académico y muchas son las personas que han contribuido en este proceso.

Agradecer, en primer lugar, a mis padres por haberme ayudado a convertirme en la persona en la que soy hoy en día. A ellos les debo muchos de mis logros y este en especial.

También me gustaría agradecer a mi tutora, Nathalie por el apoyo. Durante la tesis has sido mi guía, y aun que no ha sido fácil, ha parecido un tanto menos complicado. Y aun más importante, durante la carrera has conseguido siempre que la asignatura impartida tenga eso que te hace querer saber siempre más.

Por último, gracias a todas las personas que me han acompañado en este camino. Todas y cada de ellas han aportado algo importante en mí que me harán recordarlas siempre.

Palma de Mallorca, Junio de 2021

Tabla de Contenido

Resumen	vii
Abstract	viii
Agradecimientos	ix
Índice de Figuras	xii
Índice de Tablas	xiv
Lista de Abreviaturas	xv
1 Introducción	1
1.1 Conceptos generales	1
1.1.1 Periodo gestacional	3
1.1.1.1 Etapa prenatal: desarrollo cognitivo	4
1.1.2 Dispositivo médico de atención al prematuro: incubadora neonatal	8
1.1.2.1 Estado del arte	9
1.1.3 Métodos terapéuticos utilizados para el cuidado y la atención del prematuro	11
1.1.3.1 Fototerapia	13
1.1.3.2 Musicoterapia	15
2 Motivación y Objetivos	19
2.1 Motivación	19
2.2 Objetivos	20
3 Desarrollo del proyecto	21
3.1 Consideraciones y requerimientos de diseño de la incubadora neonatal	21
3.2 Identificación y análisis de soluciones posibles	22
3.3 Diseño de la propuesta	23
3.3.1 Parámetros de diseño	24
3.3.2 Diseño 3D	25
3.3.3 Instrumentación electrónica	28
4 Resultados y Discusión	37
4.1 Resultados	37

	xi
4.1.1	Diseño 37
4.1.2	Instrumentación 39
4.2	Discusión 43
4.2.1	Presupuesto para el desarrollo del prototipo 44
5	Conclusiones 45
	Bibliografía 47
A	Cuestionario sobre la hiperbilirrubinemia 53
A.1	Preguntas del cuestionario 53
A.2	Respuestas al cuestionario 54
B	Software e instrumentación electrónica 62
B.1	Software de diseño 62
B.1.1	PTC Creo Parametric 62
B.2	Software de programación 63
B.2.1	Arduino 63
B.3	Software de simulación 63
B.3.1	Matlab R2020b 63
B.4	Instrumentación electrónica 63
B.4.1	Arduino UNO 63
B.4.2	Sensor DHT22 64
B.4.3	Ventilador 12V 64
B.4.4	Pantalla LCD 65
B.4.5	LEDs 65
B.4.6	DFPlayer mini 66
B.4.7	Altavoz 66
C	Diseño y prototipo 67
D	Programación 71
D.1	Programación con Arduino 71
D.1.1	Control de la humedad 71
D.1.2	Control de la temperatura 72
D.1.3	Reproducción de música 72
D.1.4	Control de los LEDs 73
D.2	Programación con MATLAB 73
	Glosario 75

Índice de Figuras

1.1	Clasificación del prematuro respecto a su edad gestacional. *Esquema de la referencia (Mayoclinic, 2018)	4
1.2	Desarrollo del cerebro desde la gestación hasta los 2 años. *Esquema modificado de la referencia (<i>El desarrollo del cerebro del bebé durante el embarazo</i> Embarazo 2016)	5
1.3	Incubadora neonatal. *Esquema tomado de la referencia (Pro Rent, 2018)	10
1.4	Gráfico fototerapia en RN con EG > 35 semanas. *Esquema modificado de la referencia (Hospital Clínico San Borja Arrián, 2018)	13
3.1	Modelo de la incubadora tomada como referencia para realizar el diseño propio.	25
3.2	Incubadora Isolette® 8000 de Dräger Safety Hispania S.A. *Imagen tomada de (Dräger Safety Hispania S.A., 2021)	26
3.3	Diagrama CIE *Esquema tomado de la referencia (Laboratorio de tecnología del color de BenQ, 2019)	32
3.4	Irradiancia espectral *Esquema tomado de la referencia (AEMET, 2018)	33
4.1	Diseño 3D del prototipo de la incubadora neonatal.	38
4.2	Modelos de red.	40
4.3	Distribución iluminancia de los modelos de red.	41
4.4	Modelos de iluminación circulares.	41
4.5	Distribución iluminancia modelo de círculos concéntricos.	42
B.1	Placa Arduino UNO	63
B.2	Sensor DHT22	64
B.3	Ventilador empleado en el prototipo de la incubadora.	64
B.4	Pantalla LCD	65
B.5	LEDs azules utilizados para el sistema de fototerapia.	65
B.6	Módulo reproductor de música para la musicoterapia.	66
B.7	Altavoz 2W 8 Ohm.	66
C.1	Plano del capacete interior del prototipo de incubadora.	67
C.2	Plano del capacete exterior del prototipo de incubadora.	68
C.3	Plano del componente de apoyo de los capacetes y colchón del prematuro.	69
C.4	Plano del soporte inferior del prototipo.	69
C.5	Proceso de construcción del prototipo final de la incubadora neonatal.	70

D.1	Código implementado para establecer el control de la humedad.	71
D.2	Código implementado para establecer el control de la temperatura. . .	72
D.3	Código de control del reproductor de música del prototipo de la incubadora.	72
D.4	Código de control de los LEDs	73
D.5	Código implementado para el estudio de los modelos de fototerapia. .	74

Índice de Tablas

1.1	Desarrollo prenatal del cerebro	4
1.2	Resumen de las mejoras funcionales de las patentes del GIDEMS de la Pontificia Universidad Católica de Perú	11
1.3	Modelos de incubadoras comerciales y sus características funcionales. Información tomada de (MedicalExpo, 2021)	12
1.4	Fototerapia para RN con EG < 35 semanas. Tabla de (González-Valcárcel Espinosa, Mellado, and Caballero Martín, 2019)	14
3.1	Dimensiones de la Isolette® 8000	26
3.2	Dimensiones del prototipo a escala 1:4	26
3.3	Características técnicas del sensor DHT11	29
3.4	Características técnicas del sensor DHT22	30
3.5	Control de la humedad relativa en prematuros desde la semana 26 de edad gestacional hasta la 35	30
3.6	Equivalencias entre parámetros básicos de la fotometría y radiometría.	34
4.1	Equivalencia de valores entre la iluminancia e irradiancia de los modelos de fototerapia.	42
4.2	Presupuesto de los dispositivos electrónicos usados en el prototipo final.	44

Lista de Abreviaturas

INSTITUCIONES

GIDEMS	Grupo de Investigación De Equipos Médicos y Sistemas
NICE	National Institute for Health and Care Excellence

TÉRMINOS MÉDICOS

UCIN	Unidad de Cuidados Intensivos Neonatales
Bb	Bilirrubina
BC	Bilirrubina Conjugada
BNC	Bilirrubina No Conjugada
RN	Recién Nacido
RNT	Recién Nacido a Término
RNPT	Recién Nacido Pretérmino
FT	Fototerapia
MT	Musicoterapia
ISM	Industrial Scientific and Medical (ICM - Industrial, Científico y Médico)

Capítulo 1

Introducción

1.1 Conceptos generales

La prematurez se define como todo aquel nacimiento que ocurre antes de las 37 semanas de edad gestacional y/o 259 días de embarazo. La literatura universal refiere que esta condición se asocia a una tercera parte de mortalidad en los recién nacidos en EE.UU. Cuando los recién nacidos no llegan a las 25 semanas de edad gestacional, la mortalidad podría llegar al 50% y el margen de incapacidad o discapacidad funcional como secuelas podría, inclusive, llegar al 70%. Se ha tratado de estadificar de muchas formas el nacimiento pretérmino para clarificarlo y una de esas formas ha sido teniendo en cuenta el peso al nacer. Esto ha determinado clasificaciones asociadas al peso. Los recién nacido de bajo peso con peso < 2500 g son catalogados como de bajo peso, los de <1500 g catalogados como de muy bajo peso y los de <1000 g catalogados como extremadamente bajo peso al nacer (Rellan Rodríguez, García de Ribera, and Aragón García, 2008).

En términos generales, nacen de 12 a 18 millones de niños prematuros al año. De estos nacimientos prematuros al año, el 84% nacen entre la 32 y la 34 semana, el 10% entre la 28 y la 32 semana y el 5% por debajo de la 28 semana. La estadística y la epidemiología revelan también cifras que varían de acuerdo a diferentes factores como la etnia y sobre todo en países como EE.UU. donde se ha podido medir de una forma más completa la estadística del nacimiento pretérmino. El 14.1% de los partos prematuros se presenta en negros no hispanos, el 9.7% en hispanicos, y el 9.1% en no hispanicos blancos.

El parto prematuro es un grave problema en la salud pública por el alto índice de mortalidad y morbilidad que este hecho representa. Las causas de un parto prematuro pueden ser muy amplias, abarcando desde factores biológicos hasta factores sociales y/o ambientales (Mendoza Tascón et al., 2016). Entre los factores más determinantes de un nacimiento prematuro, están la edad materna, pues se ha destacado que las madres en los extremos de las edades tienen malos resultados neonatales, por debajo de los 15 años y mayores de 35 años para el primer hijo; el estilo de

vida, la educación, el estado nutricional, los hábitos diarios, el uso y abuso de sustancias prohibidas (tabaco, alcohol, sustancias psicoactivas) y de la misma forma, alteraciones cervicales, placentarias y, del feto propiamente dichas.

El desarrollo del prematuro fuera del ambiente uterino está directamente relacionado con la presencia de patologías a corto, mediano y largo plazo en el neonato. Las causas de estas patologías son la necesidad de un ambiente óptimo para el desarrollo del feto, que aunque una incubadora lo represente de la forma más ajustada posible, las características del ambiente siguen sin ser idénticas en su totalidad. La causa principal de que los prematuros tengan un riesgo muy alto de padecer algunas patologías es la inmadurez de la mayor parte de sus órganos y/o sistemas, por ejemplo, pueden sufrir de hiperbilirrubinemia por la inmadurez del hígado, infecciones por la debilidad de su sistema inmunitario o algún tipo de discapacidad intelectual por la falta de desarrollo cerebral.

La ictericia neonatal es la coloración amarilla de piel, escleras y mucosas en el recién nacido. Es la manifestación clínica de una patología denominada hiperbilirrubinemia. La hiperbilirrubinemia es el incremento en sangre del valor de los niveles de bilirrubina en miligramos sobre decilitro a un margen que excede la normalidad permitida y que, llevado a percentiles o porcentaje, significaría que el valor de la bilirrubina está por encima del percentil 95% para la edad permitida en horas. El recién nacido por su condición de prematuridad tiene una incapacidad para metabolizar, transportar y conjugar en el hígado la Bb, lo cual favorece que ésta incremente sus niveles en sangre. Esta patología tiene una incidencia superior, en un 20% (Olusanya, Kaplan, and Hansen, 2018), en niños prematuros en comparación con los niños nacidos en término. Es tratada con terapia de luz; terapia que ayuda a eliminar la Bb en sangre de diversas formas: orina o heces. Dicha terapia se le realiza al prematuro en la incubadora durante su estancia en las Unidades de Cuidados Intensivos Neonatales (UCINs). Si esta patología no se trata de forma correcta, puede ser la causante de daños cerebrales irreversibles que pueden ir desde una encefalopatía aguda o incluso la muerte del neonato. Es por esto que

En los últimos años, la hiperbilirrubinemia severa ha pasado a estar presente entre los líderes de investigación de políticas de salud. Esto se debe a la aparición de una mayor preocupación por un posible resurgimiento de encefalopatía por bilirrubina en algunas regiones del mundo, EE.UU. entre ellas (Borden et al., 2018).

Por otro lado, mientras el prematuro se encuentra en observación médica se le realiza un conjunto de pruebas cada determinado tiempo para conocer su evolución: pruebas causantes de estrés o irritabilidad en el prematuro. Para poder atenuar estos efectos, en muchas UCINs se utiliza la musicoterapia como una solución no farmacológica a estos problemas. Además, se conoce también que esta terapia contribuye de forma positiva en el desarrollo cognitivo del bebé.

Antes de entrar en la descripción detallada de la fototerapia y la musicoterapia, es esencial conocer cómo se desarrolla el feto en el vientre materno y porque es tan perjudicial que el niño nazca antes de tiempo.

1.1.1 Período gestacional

Se conoce como período gestacional el periodo de tiempo que transcurre desde que se produce la concepción hasta el nacimiento del bebé. Durante todo el tiempo medio que dura el embarazo, el feto crece y se desarrolla en el ambiente uterino materno. Un embarazo normal está entre las 38 y 42 semanas de gestación. Los bebés que, por diversas causas, han nacido antes de la semana 37 se los conoce como prematuros y, aquellos que han nacido después de la semana 42 se consideran posmaduros (Neil Kaneshiro, 2019).

El periodo de embarazo está dividido en tres trimestres, cada uno de 12 a 14 semanas (Neil Kaneshiro, 2019; Stickler, 2020). Cada uno de estos trimestres está caracterizado por acontecimientos importantes en el desarrollo del feto.

- **Primer trimestre.** Comprende las 12 primeras semanas de embarazo. Durante el primer trimestre, específicamente a final del 3 mes, se produce la formación total de los órganos del bebé. A lo largo de este trimestre, el crecimiento del feto varía en función de factores fetales y maternos. Una prueba de ultrasonido en este período nos ayudaría a determinar si el crecimiento del feto es normal o si existe algún problema (Bottomley and Bourne, 2009).
- **Segundo trimestre.** Comprende las semanas 13 a 27 de embarazo. En este trimestre, el bebé tiene la capacidad de poder escuchar y reconocer la voz de la madre aunque su sistema auditivo no está totalmente desarrollado. Durante este trimestre los órganos del bebé se continuaron formando y otros, como son el hígado, los riñones y el páncreas, empezaron a funcionar (Stickler, 2020). Además, el sistema nervioso comienza a funcionar en este momento del embarazo (Lerner, 2004).
- **Tercer trimestre.** Comprende el periodo desde la semana 28 hasta el momento del nacimiento. En este trimestre, el cerebro del bebé se desarrolla con mucha rapidez y además, también lo hace su sistema auditivo y visual. Si el bebé naciera antes de terminar el periodo gestacional, a partir de la semana 28 ya tendría capacidad para respirar por sí solo, aunque sus pulmones aún necesitarían acabar de madurar (Bottomley and Bourne, 2009).

Como se ha comentado anteriormente, el período de gestación en un embarazo normal oscila entre unas 38 y 42 semanas. Sin embargo, existen partos que suelen tener lugar, como mínimo, tres semanas antes de lo previsto. Este hecho se conoce como parto prematuro (Mayoclinic, 2018). En España, un 10% de los bebés nacen antes de la semana 37 de gestación; lo equivalente a unos 300.000 niños prematuros al año

(Moreira et al., 2020). En la Fig. 1.1 podemos ver la clasificación del neonato según su edad gestacional (EG) en el momento del parto prematuro.

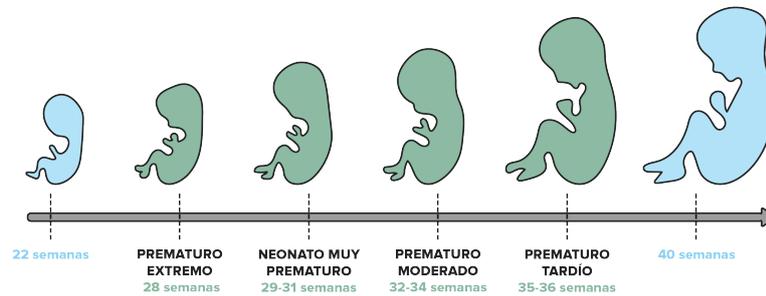


FIGURA 1.1: Clasificación del prematuro respecto a su edad gestacional. *Esquema de la referencia (Mayoclinic, 2018)

1.1.1.1 Etapa prenatal: desarrollo cognitivo

Cada uno de los trimestres que se han descrito en el apartado anterior, 1.1.1, están marcados por una serie de acontecimientos importantes en el desarrollo del feto. En especial, nos centraremos en cómo se produce el desarrollo del cerebro del bebé a lo largo de los 9 meses. En la Tabla 1.1 se presenta una breve descripción del desarrollo prenatal del cerebro en cada mes.

TABLA 1.1: Desarrollo prenatal del cerebro

Periodo	Desarrollo del cerebro
Primer mes	Formación del tubo neural.
Segundo mes	Diferenciación del tubo neural en células cerebrales y nerviosas. Las primeras células en diferenciarse formarán en la corteza cerebral.
Tercer mes	El embrión muestra reflejos y reacciona con el entorno. Se produce una liberación de hormonas implicadas en la diferenciación del feto.
Cuarto mes	El feto es capaz de experimentar sensaciones provenientes de estímulos sensoriales como son el olfato, el oído o el gusto.
Quinto mes	El feto aprende a controlar las reacciones producidas por estímulos sensoriales que empezó a experimentar en el cuarto mes.
Sexto mes	La corteza cerebral se divide en dos hemisferios.
Séptimo mes	Las ondas cerebrales pueden ser detectadas.
Octavo mes	Diferenciación de las principales áreas del cerebro: corteza visual y corteza auditiva.
Noveno mes	El cerebro del bebé tiene la misma cantidad de neuronas que un cerebro adulto, aun siendo 4 veces más pequeño.

En resumen:

- **Primer trimestre.** Se forma la estructura básica del cerebro (Aceves, 2014; Mas, 2016).

- **Segundo trimestre.** A pesar de que el cerebro no se ha desarrollado completamente en tamaño, la gran mayoría de neuronas del sistema nervioso central ya están presentes (Aceves, 2014; Mas, 2016).
- **Tercer trimestre.** El cerebro aumenta de tamaño y empieza a plegarse para llegar a adquirir la forma de un cerebro humano. El feto sigue desarrollando el control de sus movimientos (Aceves, 2014; Mas, 2016).

En la Fig. 1.2 se puede observar de forma gráfica el desarrollo cerebral del bebé explicando anteriormente en la Tabla 1.1.

A continuación, se realizará un breve estudio de las dos causas de posible daño cerebral en las que se centrarán los métodos terapéuticos que utilizados en el desarrollo de este trabajo.



FIGURA 1.2: Desarrollo del cerebro desde la gestación hasta los 2 años. *Esquema modificado de la referencia (*El desarrollo del cerebro del bebé durante el embarazo | Embarazo 2016*)

Lesiones cerebrales por prematuridad. El parto prematuro está asociado a múltiples complicaciones, con un aumento de la morbimortalidad perinatal (Escribano Cobalea et al., 2020). Cuánto menor es la edad gestacional del prematuro y su peso, mayor es la probabilidad de sufrir algún problema que cause lesión cerebral.

El cerebro fetal tiene un ritmo de crecimiento mucho mayor que el de un recién nacido, gracias al aporte de nutrientes a través del cordón umbilical y un metabolismo capaz de producir la cantidad necesaria de energía. El ambiente uterino proporciona unas condiciones óptimas para este ritmo de neurodesarrollo cerebral. Cuando un niño nace antes de tiempo, su cerebro aún está en proceso de desarrollo y las condiciones físicas y químicas a las que está expuesto fuera el ambiente uterino dificultan el aporte sanguíneo y energético, comprometiendo así el desarrollo anatómico y funcional del cerebro (Mas, 2014).

Cuánto más prematuro es un niño, menos neuronas que conforman el sistema nervioso tiene y por lo tanto, una vez fuera del útero de la madre, una mayor cantidad de neuronas deberá producir. Para poder completar esta producción de neuronas, necesita aporte energético. El sistema de aporte energético cerebral es el metabolismo de la glucosa; metabolismo inmaduro en el prematuro. Cuando aumentan las necesidades energéticas del cerebro (por ejemplo en una infección) y el prematuro es incapaz de adaptarse, disminuye la aportación energética de las neuronas y estas mueren. Por lo tanto, sería fatal que el prematuro sufriera alguna patología, porque esto significaría que el proceso de neurodesarrollo se para por un período de tiempo, pudiéndose incluso deteriorar (Mas, 2014).

Lesiones cerebrales por hiperbilirrubinemia. La hiperbilirrubinemia es una enfermedad que suele aparecer durante la primera semana de vida en neonatos y es la principal causa de hospitalización de niños recién nacidos (RN) (Olusanya, Kaplan, and Hansen, 2018). Los neonatos presentan esta patología, cuando los niveles de bilirrubina en sangre sobrepasan el límite permitido para su tiempo fuera del útero materno.

La bilirrubina es un pigmento biliar de color amarillo-anaranjado que se origina en la degradación de la hemoglobina de los glóbulos rojos viejos, dando paso a los nuevos, encargados de transportar el oxígeno necesario. Esta destrucción de bilirrubina tiene lugar en el sistema reticuloendotelial.

La bilirrubina en el cuerpo puede presentarse de dos formas distintas: bilirrubina conjugada y bilirrubina no conjugada. La característica principal que las diferencia es el carácter liposoluble de la bilirrubina no conjugada (Clínica Universidad de Navarra, 2020).

- **Bilirrubina no conjugada (BNC) o indirecta.** Bilirrubina unida a la albúmina. Liposoluble (Clínica Universidad de Navarra, 2020).
- **Bilirrubina conjugada (BC) o directa.** Bilirrubina unida con el ácido glucurónico. Gracias a su carácter hidrofílico el hígado se encarga de conjugarla, volviéndola excretable por los canículos donde haya agua, saliendo al exterior a través de la orina o de las heces (Clínica Universidad de Navarra, 2020).

Cuando esta bilirrubina, no conjugada, pasa a la circulación sistémica transportada por la albúmina donde los hepatocitos la capturarán, transformándola en BC para poder excretarla (Ossorio Martínez et al., 2011).

En los recién nacidos, el nivel normal de bilirrubina en sangre debe de ser menos de 5 mg/dl (Cifuentes Recondo, 2006). Superando este valor, es cuando la hiperbilirrubinemia se hace visible con un color amarillento en piel y ojos. En el período neonatal, diversas características alteran el metabolismo de la Bb. Los neonatos son muy propensos a tener niveles altos de bilirrubina indirecta en sangre porque el hígado no es capaz de conjugarla debido la inmadurez funcional de dicho órgano.

Además, por su corta vida no tienen la misma cantidad de albúmina en sangre que los niños mayores o adultos. Por lo tanto, la Bb no conjugada no podrá unirse a nada, provocando como consecuencia posibles daños cerebrales (Clínica Universidad de Navarra, 2020; Ríos M., 2002) y un mayor volumen de hematíes que tienen una vida media menor. Los neonatos, presentan también un menor número de bacterias en el intestino lo que provoca una menor conversión a urobilinoides (González-Valcárcel Espinosa, Mellado, and Caballero Martín, 2019).

Todo ello hace más difícil la excreción de Bb. La ictericia se puede considerar patológica cuando aparece dentro de las 24 primeras horas de vida; sobrepasa los 12 mg/dl en recién nacidos a término (RNT) y 15 mg/dl en recién nacidos pretérmino (RNPT); cuando aumenta la Bb más de 0.5 mg/dl/h y cuando la cantidad de BC es mayor de 2 mg/dl. Sin embargo, según ha comentado el médico Harold Urbano ¹ en las respuestas proporcionadas en un cuestionario realizado en este marco de trabajo sobre hiperbilirrubinemia neonatal ², es muy común que los recién nacidos tengan niveles más altos de los 5 mg/dl por la inmadurez del hígado apareciendo entre el 3 y 5 día de vida. Pero este hecho no debería persistir más de tres semanas y sobrepasar los 12 mg/dl (ictericia fisiológica) (Hospital Clínico San Borja Arrián, 2018).

Si el RN es prematuro, no ha completado su formación ni maduración cerebral neuronal, es más susceptible de tener daños neurológicos (encefalopatía) por la BNC y por eso es más frecuente observar en este tipo de pacientes secuelas neurológicas asociadas al daño por incremento severo por incrementos de Bb. Aunque no existe un nivel exacto de Bb para que produzca estos daños, cifras que rondan y superen los 20 mg/dl (momento en el que la Bb es capaz de atravesar la barrera hematoencefálica) hasta los 30 mg/dl son de mayor riesgo (Cifuentes Recondo, 2006; Ríos M., 2002).

Existen dos cuadros clínicos de elevada gravedad:

- **Encefalopatía bilirrubínica aguda.** En este cuadro clínico, el neonato presenta síntomas diferentes según el estado en el que se encuentre. En la fase precoz, los neonatos tienen mala succión, letargia y hipotonía. La fase intermedia está caracterizada por estupor, hipertonia e irritabilidad. En la fase avanzada, se presentan una serie de daños irreversibles: hiperextensión del cuello, fiebre, convulsiones, coma e incluso la muerte (González-Valcárcel Espinosa, Mellado, and Caballero Martín, 2019; Woodgate and Jardine, 2015).
- **Kernícterus.** No es necesaria que la forma crónica aparezca siempre después de la fase aguda. Esta fase está caracterizada por parálisis cerebral atetoide,

¹Médico especializado en pediatría desde el año 2000. Ejerciendo actualmente en el Hospital Francisco de Paula Santander, Colombia.

²Para más detalle consultar Anexo A

disfunción auditiva, parálisis de la mirada hacia arriba y displasia ónico-dental (González-Valcárcel Espinosa, Mellado, and Caballero Martín, 2019).

Cuando al neonato se le realizan todos los exámenes necesarios, y se los somete, en el caso de necesitarla, a fototerapia, pueden ser tratados tanto en cunas abiertas con calentador (RNT) o en incubadoras aptas para esta terapia (RNPT).

1.1.2 Dispositivo médico de atención al prematuro: incubadora neonatal

Una incubadora neonatal es un dispositivo médico capaz de representar un ambiente con una serie de condiciones (humedad, calor y oxígeno) para resguardar la salud del recién nacido (Restrepo Pérez et al., 2007; SRM Institute of Science and Technology, 2009).

Como se ha visto anteriormente, el útero materno proporciona las condiciones necesarias para que el bebé se pueda desarrollar de una forma correcta. Los niños que nacen antes de tiempo quedan expuestos a las condiciones físicas y químicas del exterior antes de completar su desarrollo, peligrando su vida. Fue por la necesidad de crear un ambiente parecido al del vientre materno para los niños pretérmino que surgió la incubadora (Restrepo Pérez et al., 2007; Hernández et al., 2017).

En un principio, las incubadoras eran sencillas y sólo suplían funciones de control de constantes básicas como la luminosidad, la temperatura y la humedad. De forma gradual, la Ingeniería Biomédica ha ido mejorando este dispositivo médico, controlando cada vez más variables con la finalidad de generar un ambiente lo más parecido posible al ambiente uterino (Restrepo Pérez et al., 2007).

Hoy en día, es muy fácil y común que un hospital disponga de incubadoras y estas, son cada vez más fáciles de controlar por el personal sanitario. A pesar de contar con diversos fabricantes de este dispositivo médico y varios modelos de incubadoras, hay características que deben cumplir y componentes que no pueden faltar. En la Fig. 1.3 podemos observar el aspecto de una incubadora neonatal estándar.

- **Medidas.** Las medidas estándares de las incubadoras son 90 cm de largo, 40 cm de ancho y 45cm de alto (Food and Drugs Administration, U.S Department of Health and Human Services, and Center for Devices and Radiological Health, 1998).
- **Chasis.** Esta parte de la incubadora contiene los sensores necesarios para alertar al sanitario en caso de falla y el portacolchón. Esta parte de la incubadora debe ser metálica (Restrepo Pérez et al., 2007).
- **Cúpula.** Fundamental para mantener el ambiente necesario para el neonato. Es la encargada de aislar al recién nacido del ambiente externo y el ambiente interno generado por la incubadora. Uno de los requisitos que debe cumplir esta cubierta, es que permita la visibilidad del neonato. Además, debe de estar hecha de un material que no reacciones con el oxígeno para evitar la corrosión

en caso de que a los niños se les deba aplicar la oxigenoterapia.

Es necesario que la cúpula tenga diferentes puntos de acceso para facilitar el cuidado del neonato, pero sin que se produzca una pérdida de calor (Restrepo Pérez et al., 2007).

- **Fuente de poder.** Fuente de alimentación para el funcionamiento de los componentes eléctricos del dispositivo (Restrepo Pérez et al., 2007).
- **Ventilador.** Encargado de impulsar el aire filtrado de la habitación e impulsarlo a través del calefactor y del humidificador. Gracias al ventilador la incubadora no se sobrecalienta (Weithöner, 2020).
- **Filtro.** Filtros bacterianos para proteger al bebé de los microorganismos externos que puedan causarle alguna complicación (Weithöner, 2020).
- **Calentador.** Encargado de calentar el aire interior de la incubadora, con una potencia nominal entre 100-300 W para no sobrecalentar el ambiente.
- **Controlador de temperatura.** Se activa cuando la temperatura se sale de un rango preestablecido: 36-38°C (Restrepo Pérez et al., 2007).
- **Controlador de humedad.** La humedad es un factor a tener en cuenta para cuidar la hidratación de bebé. Cuando los sensores de humedad detectan una bajada de esta, activan los humidificadores (Weithöner, 2020).
- **Controlador de peso.** La incubadora tiene incorporada una báscula, capaz de mantener un seguimiento del neonato para poder observar como evoluciona.
- **Suplemento de oxígeno.** Muchos neonatos presentan dificultades para respirar, ya sea por la inmadurez de sus pulmones, o por alguna afección respiratoria. La solución para poder cumplir esta función vital es la administración de oxígeno generando una atmósfera rica en este (Sola, Chow, and Rogido, 2005).
- **Soporte mecánico de la respiración.** Por alguna causa patológica, hay bebés que están en un estado de coma y no pueden respirar por si solos. El tubo de respiración es colocado en la tráquea del neonato para suplir esta necesidad (médica, 2019).

Existen incubadoras que, además que tener estos componentes básicos, contienen otros componentes complementarios que la capacitan más para poder proporcionarles a los neonatos las condiciones y cuidados necesarios para poder alcanzar un estado de salud óptimo.

1.1.2.1 Estado del arte

En el año 1981, el doctor Alexander Lyon creó la primera incubadora moderna (SRM Institute of Science and Technology, 2009), con la intención de que sea capaz de generar un ambiente similar al del útero materno para aumentar las probabilidades



FIGURA 1.3: Incubadora neonatal. *Esquema tomado de la referencia (Pro Rent, 2018)

de vida de los niños prematuros. Desde entonces, con el paso de los años, estos dispositivos médicos cada vez son más completos y complejos.

(Restrepo Pérez et al., 2007) presenta en el 2007 un prototipo de incubadora neonatal con un tecnología apropiada que fuese capaz de controlar el entorno del neonato y proporcionar las condiciones necesarias. Para ello se introdujeron en la incubadora 5 sensores diferentes: de temperatura, de humedad, de ruido, de luminosidad y una alarma de apertura de la puerta.

En 2018, el GIDEMS de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) desarrolló 3 patentes de incubadoras para poder proporcionar soluciones a algunos de los problemas que los médicos neonatólogos comentaban tener con ellas.

La primera patente: Burbuja Artificial Neonatal (BAN) está constituida por un circuito ventilatorio continuo. Esta patente ha demostrado ser más eficiente y alguna de sus características funcionales son: propagación uniforme del calor, mayor duración de los filtros bacterianos, menor percepción de ruido desde el habitáculo donde se encuentra el neonato o una menor pérdida del calor (Mugruza-Vassallo, Castellón-Lévano, and Román-Linares, 2018). A pesar de presentar estas características, esta patente no presenta un circuito de ventilación pulmonar, motivo por el que se crea la segunda patente.

La segunda patente tiene un sensor de flujo gaseoso bidireccional con el objetivo de poder manejar las presiones en tuberías flexibles (Mugruza-Vassallo, Castellón-Lévano, and Román-Linares, 2018).

La tercera y última patente, trabajó con una Burbuja Neonatal con Presurizador de Vías Aéreas. Esta patente comparte características con la BAN pero además, con esta se puede controlar la mezcla de gases que se les administra a los recién nacidos por las fosas nasales (Mugruza-Vassallo, Castellón-Lévano, and Román-Linares, 2018).

TABLA 1.2: Resumen de las mejoras funcionales de las patentes del GIDEMS de la Pontificia Universidad Católica de Perú

Patente	Mejoras funcionales
Primera patente: Burbuja Artificial Neonatal	<ul style="list-style-type: none"> - Circuito ventilatorio continuo. - Propagación uniforme de calor. - Duración mayor de los filtros bacterianos. - Menor percepción de ruido desde el habitáculo. - Menor pérdida de calor.
Segunda patente	<ul style="list-style-type: none"> - Flujo gaseoso bidireccional
Tercera patente	<ul style="list-style-type: none"> - Asepsia. - Temperatura uniforme. - Menor percepción del ruido desde el habitáculo. - Control de parámetros de mezcla gaseosa. - Sensor de flujo gaseoso bidireccional.

En el año 2019, el Hospital San Pedro de la Rioja adquirió 11 incubadoras híbridas para mejorar el cuidado de los prematuros en la Unidad de Cuidados Intensivos Neonatales. Estas incubadoras eran superiores, en comparación con las que ya tenía el hospital, a nivel tecnológico. Las incubadoras híbridas tienen un software interno para poder mantener en el ambiente interno la temperatura que sea más adecuada para el neonato según su edad gestacional y el peso del prematuro; un silenciamiento de alarmas; colchón con un ángulo de 360° de rotación, lo cual facilita el acceso al bebé; pantalla con mejores características para un mejor manejo por parte de los sanitarios (Hospital San Pedro, 2019).

Cuando los neonatos permanecen en la incubadora, pueden recibir una amplia variedad de terapias y técnicas con diversos fines. Por ejemplo, mucho reciben una terapia de luz llamada fototerapia para tratar la hiperbilirrubinemia; terapias con fisioterapeutas para mejorar su sistema musculoesquelético; técnicas por parte de los terapeutas ocupacionales para estimular los sentidos del neonato o terapia musical para aportar beneficios de comportamiento y desarrollo.

Es muy común por el funcionamiento del mercado, que un utensilio o dispositivo de interés pueda ser fabricado y vendido por más de un fabricante o proveedor. Lo mismo pasa con las incubadoras neonatales; puede ser que las UCINs tengan todas las incubadoras de su unidad del mismo modelo y fabricante, del mismo modelo y diferente fabricante, de modelo diferente y del mismo fabricante o incluso de modelo y fabricantes diferente. A continuación, se listarán en la Tabla 1.3 algunos modelos de incubadoras, el fabricante y las características funcionales de cada una.

1.1.3 Métodos terapéuticos utilizados para el cuidado y la atención del prematuro

Para tratar la hiperbilirrubinemia y prevenir que el bebé pueda llegar a sufrir daños cerebrales, se emplea la fototerapia como tratamiento para disminuir el cantidad de Bb en sangre. Además, es necesario llevar un control de la evolución de la misma por

TABLA 1.3: Modelos de incubadoras comerciales y sus características funcionales. Información tomada de (MedicalExpo, 2021)

Fabricante	Modelo	Características funcionales
Ningbo David Medical Device	YP-970	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de control de concentración de humedad. - Sistema de control de concentración de oxígeno. - >37°C función de ajuste de temperatura. - Alarma de fallo.
Suzhou Being Medical Device CO.,LTD	BIN-3000A	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura controlada por ordenador. - >37°C de temperatura. - Alarmas y autocomprobación. - Dispositivo de humedad extraíble para facilitar su limpieza. - Unidad de fototerapia (opción).
Dräger Safety Hispania S.A.	Isolette® 8000	<ul style="list-style-type: none"> - Mantiene un entorno estable para el bebé (algoritmo PID de Dräger). - Control continuo de la temperatura corporal central y periférica cutánea. - Sistema de congestión de la condensación para el control de infecciones. - Inhibición del ruido gracias a la cubierta de la incubadora. - Servorregulación de oxígeno.
Atom Medical Corporation	Dual Incu i	<ul style="list-style-type: none"> - Control de temperatura de forma manual o por servocontrol. - Reducción del estrés relacionado con el ruido. - Estructura sanitaria que ayuda a la protección de los niños de infecciones. - Incluye lámpara de fototerapia. - Incluye mesa de reanimación. - Se reduce el estrés de las caídas de temperatura.
Fanem Ltda	Vision Advanced 2286	<ul style="list-style-type: none"> - Microclima de gran estabilidad. - Control de humedad y oxígeno. - Modo cuna calentada para mantener el RN calentado por calor radiado. - Estabilidad térmica.
Neotech Medical Systems	3010H	<ul style="list-style-type: none"> - Sensor de temperatura basado en termistor para una medición precisa de la temperatura. - Sistema Memory Backup que restaura la temperatura de ajuste y modo control en caso de corte de corriente. - Soplador centrífugo que garantiza la entrada de aire fresco y reducción de CO2 en el interior de la campana. - Cámara de humedad incorporada. - Medidor de flujo de O2 integrado.

medio de analíticas de sangre, entre otras formas. Este proceso resultado doloroso y de mucho estrés en los neonatos.

En línea con la mejora de la calidad en la estancia de los neonatos en las UCINs, la musicoterapia es una terapia no medicamentosa que ha adquirido importancia en la última década. Esta terapia se utiliza con la finalidad ayudar en la disminución de estrés en los neonatos, dolor (Philbin, 2000; Maitre and Arnon, 2020; Verónica et al., 2015) y de posibles daños colaterales como podrían ser daños causados a nivel cognitivo por niveles muy elevados de Bb en sangre.

1.1.3.1 Fototerapia

La fototerapia es un tratamiento terapéutico con espectro de onda verde azul (430-490 nm) utilizado para tratar la hiperbilirrubinemia neonatal. Esta terapia produce la isomerización de la Bb, tanto la que se encuentra en los capilares superficiales de la piel como en el espacio intersticial celular, con la finalidad de poder excretarla de forma renal (Ossorio Martínez et al., 2011; Montealegre et al., 2020). La decisión tomada por el sanitario para que el neonato empiece la terapia de luz, está basada en cuatro factores: el peso, los factores de riesgo del individuo al que se le vaya a aplicar esta terapia, su edad cronológica y su edad gestacional.

Para aquellos RN que son más propensos a padecer esta patología, se les controla mediante una gráfica llamada nomograma que relaciona los niveles séricos de Bb y las horas de vida del neonato. Esta prueba junto con los factores de riesgo comúnmente asociados a la hiperbilirrubinemia sirven para tener un control y vigilancia sobre los pacientes de riesgo, previniendo así que se puedan llegar a presentar situaciones de mayor gravedad (Montealegre et al., 2020).

En la Fig. 1.4 podemos observar el gráfico necesario para estudiar los niveles de Bb del recién nacido según su edad gestacional, siempre y cuando esta sea mayor de 35 semanas. De la misma forma, si al RN al que se le debe aplicar este método terapéutico de luz tiene una EG menor de 35 semanas, se seguirán las indicaciones presentadas por el NICE - acrónimo en inglés de Institute for Health and Care Excellence - en el 2010 (Tabla. 1.4)

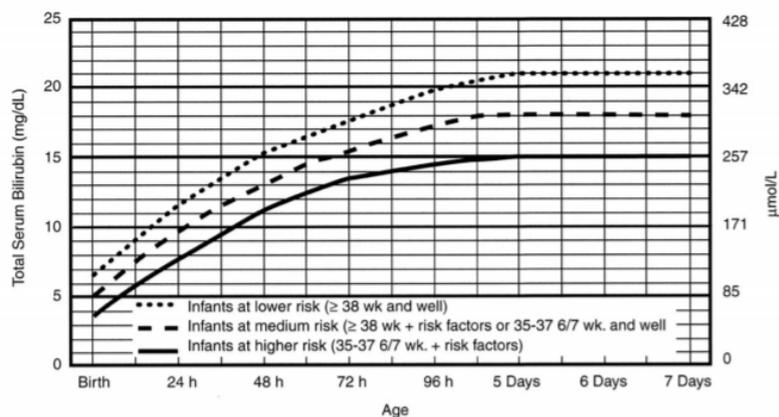


FIGURA 1.4: Gráfico fototerapia en RN con EG > 35 semanas. *Esquema modificado de la referencia (Hospital Clínico San Borja Arrián, 2018)

Cuando la bilirrubina no conjugada absorbe la luz de la fototerapia, se producen tres tipos de reacciones fotoquímicas diferentes que ayudan a la excreción de la Bb:

- **Isomerización estructural.** En esta reacción fotoquímica, la BNC se desglosa en dos tipos formas de Bb diferentes al absorber la luz: fotobilirrubina y luminirrubina. La fotobilirrubina es una variación de la bilirrubina puede ser excretada a través del hígado sin necesidad de conjugación. Sin embargo, su

TABLA 1.4: Fototerapia para RN con EG < 35 semanas. Tabla de (González-Valcárcel Espinosa, Mellado, and Caballero Martín, 2019)

Edad gestacional (semanas)	Bb sérica total (mg/dl)
<28 0/7	5-6
28 0/7-29 6/7	6-8
30 0/7-31 6/7	8-10
32 0/7-33 6/7	10-12
34 0/7-34 6/7	12-14

ritmo de eliminación es muy lenta y su conversión es reversible. Por otro lado, la luminirrubina es una conversión irreversible, que tiene lugar en el espacio extravascular de la piel, y puede ser eliminada rápidamente a través de la orina. Es la luminirrubina y su ritmo de eliminación la responsable de que disminuya el nivel Bb en sangre (Chattás, 2016; González-Valcárcel Espinosa, Mellado, and Caballero Martín, 2019; Ossorio Martínez et al., 2011; STOKOWSKI, 2006).

- **Fotoisomerización.** Al absorber la luz, la BNC se convierte en un isómero con un nivel de toxicidad menor y se difunde hasta la sangre para poder ser excretado por la bilis sin necesidad de conjugación previa (Ossorio Martínez et al., 2011).
- **Fotooxidación.** En esta reacción fotoquímica, la Bb se transforma en productos polares pequeños que serán excretados por la orina (Ossorio Martínez et al., 2011).

Para poder aplicar una terapia de luz lo más efectiva posible, es importante saber cuáles son los factores que ayudan a mejorar esta efectividad: el tipo de luz, la intensidad de la luz, la distancia a la que se sitúa el RN, el tiempo de exposición y el área corporal expuesta.

La dosis de la terapia de luz, o lo que es lo mismo, la irradiancia es el factor determinante de su efectividad. La irradiancia depende del tipo de luz que se utilice, la distancia que existe entre la fuente de luz y el paciente y también del área de piel expuesta. Este factor se mide en microwats (μW)/ cm^2 / nanómetros, expresando mediante estas unidades la energía incidente en la superficie corporal del área expuesta de una longitud de onda determinada. En la fototerapia simple, la intensidad del tratamiento está situada entre 6-12 $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ pero en las situaciones en las que necesitamos un descenso de Bb más rápido, se utilizará la fototerapia intensiva con valores que superarán los 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ para la luz azul; caracterizada por su mayor efectividad absorbiendo Bb y penetrando en la piel (Ossorio Martínez et al., 2011; Orfel, 2005; González-Valcárcel Espinosa, Mellado, and Caballero Martín, 2019; Bhutani et al., 2011; STOKOWSKI, 2006). Por regla general, para los bebés menores de 37 semanas de EG se les aplica una fototerapia de fibra óptica convencional o de "luz azul" (fototerapia simple). Si después de 6 horas de empezar el

tratamiento, los niveles Bb sérica no disminuyen o se siguen elevando de forma muy rápida se aplicará una fototerapia múltiple, es decir, con lámparas de alta radiación o con más de 1 lámpara convencional (Instituto Mexicano del Seguro Social, 2019).

Existen una amplia variedad de dispositivos aptos para aplicar esta terapia de luz. Es importante que estos dispositivos tengan una emisión de luz que cubran la máxima cantidad de superficie corporal posible en el plano horizontal, que no generen mucho calor para que el RN no sufra deshidratación, que sean duraderos y que proporcionen la longitud de onda e intensidad de luz necesaria. Los dispositivos más óptimos utilizados actualmente son diodos emisores de luz azul (luz LED con longitud de onda de 460-490nm) puesto que son de alta irradiancia y ayudan a una disminución más rápida de Bb en sangre sin generar calor (Chattás, 2016; Montealegre et al., 2020).

Una vez aplicada esta terapia, se deberán realizar mediciones cada determinado tiempo para saber cómo evolucionan estos niveles de Bb y conocer si la terapia aplicada está siendo efectiva. Después de iniciar la terapia de luz, la medición de los niveles de bilirrubina sérica se tienen que medir cada 4-6 horas. Cuando se observe en los resultados que los niveles de Bb en sangre disminuyen, la medición de Bb sérica pasará a hacerse cada 6-12 horas (Instituto Mexicano del Seguro Social, 2019). Esta terapia dejará de aplicarse sobre el prematuro cuando los niveles de Bb sérica estén entre el rango de valores correspondientes según su edad gestacional, como se muestra en la Tabla. 1.4.

1.1.3.2 Musicoterapia

A lo largo de este apartado, se entrará en detalle sobre la musicoterapia (MT). Se abarcará desde el término más simple, como es la definición atribuida de dicha terapia, pasando por su historia hasta llegar a la utilización de la musicoterapia en las Unidades de Cuidados Intensivos Neonatales.

¿Qué es la musicoterapia?

A mediados del siglo XX surgió la musicoterapia como profesión, y desde entonces ha adquirido un amplio número de definiciones.

Como definición general, podemos citar la definición de Bruscia: la musicoterapia es un proceso sistemático de intervención en donde el terapeuta ayuda al cliente a conseguir llegar a la salud, utilizando experiencias musicales (Bruscia, 2014).

Por otro lado, la Federación Mundial de la Musicoterapia (WFMT, 2011) proporciona la definición más completa y específica: "La musicoterapia es el uso profesional de la música y sus elementos como una intervención en entornos médicos, educativos y cotidianos con individuos, grupos, familias o comunidades que buscan optimizar su calidad de vida y mejorar su salud y bienestar físico, social, comunicativo, emocional, intelectual y espiritual. La investigación, la práctica, la educación y

el entrenamiento clínico en musicoterapia están basados en estándares profesionales acordes a contextos culturales, sociales y políticos."

De la misma forma que estas dos definiciones son válidas, lo son otras muchas que a lo largo de todos estos años han proporcionado diferentes autores. Para poder conseguir una definición que se ajuste lo más posible en el ámbito clínico podemos tomar como referencias definiciones anteriores y además tener en cuenta algunos factores como (Montiel López et al., 2015):

- Un terapeuta cualificado.
- Paciente.
- La música y sus componentes.
- La relación entre el paciente y el terapeuta.

Entonces, una definición más ajustada puede ser: La musicoterapia es el uso profesional de la música y sus componentes con fines terapéuticos; fines que pueden abarcar tanto aspectos físicos como psicológicos del paciente. Esencial que para poder conseguir todos esos objetivos, el terapeuta sea un profesional con una formación específica y además, que pueda llegar a establecer una buena relación profesional con el paciente.

Partiendo de esta definición más completa de la musicoterapia en el ámbito clínico, se estudiará cómo y porqué se utiliza con neonatos, especialmente con los prematuros.

Historia de la musicoterapia

En el año 1800 a.C, se encontró en los papiros de Lahun un escrito donde se recomendaba la utilización de la música en el momento del nacimiento del bebé, porque según decía, esta era beneficiosa tanto para la madre como para el bebé (Calle Albert, 2014; Calle Albert, 2017).

Damon de Atenas (músico y filósofo pitagórico ateniense del siglo V a.C.) fue uno de los primeros musicoterapeutas en defender, mediante un discurso, la capacidad que tiene la música de curar todo tipo de dolencias (Calle Albert, 2014; Brito, 2020).

Gracias a la Edad Media, la musicoterapia tuvo su época de mayor esplendor. Por ejemplo, en la cultura musulmana, la música estaba presente en el día a día y en cualquier tipo de ambiente; tanto en lugares privilegiados, utilizados por la alta sociedad, como en hospitales de personas dementes para tratamiento psicoterapéutico. De hecho, uno de los requisitos básicos para ser médico en un hospital era tener conocimientos tanto de la medicina como de la música.

Como se verá más adelante, cuando se realizan terapias musicales se reproducen piezas musicales de Mozart, Haydn o Beethoven, ya que además de ser importantes representantes de la música de la época, estos compositores fueron conscientes de

los beneficios que generaba la música sobre las personas. Por ejemplo, el compositor Joseph Haydn utilizó su música para tratar la melancolía del príncipe Esterhazy de Hungría (Rocha, 2011).

En España, en la segunda mitad del siglo XIX, Francisco Vidal y Careta realiza la primera tesis reflejando la relación con la música y la medicina (Neira, 2011).

A medida que ha ido avanzando el tiempo, la música como terapia ha ido adquiriendo cada vez más importancia. En EE.UU. por ejemplo, la musicoterapia está considerada una profesión con mucho futuro porque trata una área importante de la persona; las emociones (Neira, 2011). Además, actualmente la musicoterapia no se utiliza solo en el ámbito terapéutico sino también en el ámbito educativo (Carreras, 2014).

Hoy en día la musicoterapia tiene un abanico muy amplio de aplicaciones. Por ejemplo, se utiliza en personas con Alzheimer aportando beneficios a nivel físico, cognitivo y psicológico (Gómez Gallego and Gómez García, 2017). En personas con Parkinson para mejorar la calidad de vida de los pacientes (Menárguez, 2015). Está altamente recomendada durante el parto porque genera sensaciones de seguridad, tranquilidad, relajación y calma en la madre (Cortés Campos, 2015) y también en neonatos.

Tipos de musicoterapia

Existen dos formas diferentes de aplicar la musicoterapia (Velasco Conde, 2016), atendiendo a las necesidades del paciente:

- **Activa.** El paciente participa expresándose y creando a través del sonido, y la musicoterapia estudia la expresión del paciente .
- **Pasiva o receptiva.** A diferencia de la activa, en esta el paciente simplemente escucha la música reproducida. En este tipo de musicoterapia el terapeuta hace la elección de la música atendiendo las necesidades del paciente, con la finalidad de regular problemas como pueden ser el estrés y la ansiedad.

En esta tesis, se trabajará sólo la musicoterapia pasiva, con la finalidad de ayudar a regular problemas emocionales del paciente y a la vez aportar beneficios en el desarrollo cognitivo del RN.

Musicoterapia en las UCINs

Las Unidades de Cuidados Intensivos Neonatales (UCIN) nacieron por la necesidad de proporcionar un cuidado y atención especializado a los recién nacidos de alto riesgo (Zamora-Pasadas et al., 2009) menores de 29 días de vida. El objetivo principal de estas unidades es atender al RN con cualquier enfermedad o problema que suponga un peligro para su vida. En esta unidad, los RN están durante las 24 horas del día bajo vigilancia y cuidado humano y de la misma forma, de los dispositivos

tecnológicos que ayudan a la monitorización de factores importantes para mantener un estado absoluto de bienestar.

A pesar de que en estas unidades se toman todas las medidas necesarias para proporcionarle al recién nacido un ambiente similar al del útero limitando el estrés y cubriendo sus necesidades básicas para asegurar que el recién nacido crezca y se desarrolle de una forma correcta, no obstante existirá una diferencia entre ambos ambientes. En las UCINs a lo largo de los días existen diversos factores que alteran el descanso del RN produciendo estrés y alterando el crecimiento del niño; haciendo más difícil su recuperación. Es entonces, cuando en muchas unidades se decide aplicar la terapia musical para apoyar el crecimiento del niño ayudándole a alcanzar un estado de relajación.

Como comentan (Maitre and Arnon, 2020) en su estudio basado en un artículo llamado "Music therapy and retinopathy of prematurity screening: using recorded maternal singing and heartbeat for post exam recovery" , la musicoterapia como intervención terapéutica no farmacológica actúa como un apoyo para los bebés prematuros que se recuperan de momentos estresantes y dolorosos. En dicho artículo, el estudio se centra en la mitigación del dolor y la reducción del estrés a corto plazo en niños prematuros, sin embargo, existen otros estudios que muestran la influencia de la musicoterapia en las variaciones cardíacas del prematuro a corto plazo.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta a la hora de aplicar esta terapia es la intensidad máxima en decibelios (dB) del sonido a la que se puede reproducir la música. Como se explicó en la Tabla 1.1, en el 4 mes el feto es capaz de captar estímulos auditivos y en la semana 20 de gestación se forma el sistema auditivo y un sistema vestibular funcional entre las semanas 25 y 29 de gestación. Una de las principales preocupaciones al aplicar esta terapia es no producir ningún daño en el sistema vestibular del niño; daños causados típicamente por medicamentos ototóxicos y sonidos iguales o superiores a 60 dB (Allen, 2013).

Una vez explicada la parte teórica para conocer como se desarrolla el feto en el vientre materno, cuáles son las posibles consecuencias de que un bebé nazca antes de tiempo y las terapias utilizadas para ayudar al desarrollo y el bienestar del prematuro, se entrará en detalle en los cambios del dispositivo médico de atención al prematuro en los que se basa esta tesis. Esta propuesta se realiza con el objetivo de conseguir que el prematuro alcance un nivel de salud lo antes posible y además, contribuir a su desarrollo integral mientras se encuentra en la UCIN.

Capítulo 2

Motivación y Objetivos

2.1 Motivación

Uno de las finalidades del Grado de Ingeniería Biomédica es mejorar la calidad de vida de todas aquellas personas que lo necesiten, principalmente, a través de los dispositivos médicos. En esta tesis se propone un diseño de incubadora neonatal, capacitada para aplicar terapia de luz y musicoterapia al neonato. El principal objetivo de esta incubadora es ayudar a los neonatos, en especial a los prematuros, en el proceso de recuperación, atenuando algunas de las consecuencias de la prematuridad, como pueden ser niveles muy altos de bilirrubina o falta de desarrollo cerebral.

A nivel personal, una de las razones principales por las que decidí centrar el trabajo de final de carrera en el ámbito de cuidados neonatales fue por mi gran interés en este tema. El desarrollo humano comienza desde que se produce la fecundación y continua a lo largo de la vida, por lo que cuidados neonatales son importantes para que un niño crezca sano y con un desarrollo integral adecuado. Además, a diferencia de los niños de mayor edad o adultos, los bebés no tienen la capacidad de comunicarse de forma verbal, lo que dificulta conocer con exactitud lo que les sucede. Con este diseño, es posible cumplir objetivos de dos esferas diferentes: tratamiento de una patología que afecta a un porcentaje alto de recién nacidos y aportar beneficios para el desarrollo cognitivo del neonato. En primer lugar, a la vez que se trata la hiperbilirrubinemia neonatal, la cual puede llegar a tener consecuencias importantes, se intenta crear, a través de la música, un ambiente en el que los bebés se sientan cómodos y favorezca al mismo tiempo al desarrollo cognitivo neonatal. Como se ha podido ver en el estado del arte de las incubadoras, a día de hoy la musicoterapia solo se ha reproducido en vivo en las UCINs o en grabaciones generales para todos los niños. En esta tesis se trabaja sobre una propuesta que no requiere la presencia de algún músico para impartir esta terapia y que además, la música sea exclusiva para cada niño, haciendo esta terapia más personalizada. Así, a la vez que se realiza la terapia de luz, se puede aplicar la terapia musical y viceversa, realizando de forma simultánea terapias con objetivos diferentes pero a la vez relacionados.

En segundo lugar, este esquema permite tener la fuente de luz utilizada para la fototerapia integrada en la estructura de uno de los capacetes de la incubadora. La fuente

de luz de esta terapia se caracteriza por ser de bajo costo, bajo consumo, alta durabilidad y con un impacto social alto, al poder conseguir que las unidades de atención neonatal de países en vías de desarrollo tengan más facilidades para adquirir estos dispositivos.

2.2 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es proponer un nuevo diseño de incubadora que permita tratar la hiperbilirrubinemia en prematuros y a su vez, ayudar al bebé con problemas que pueda presentar a nivel físico, psicológico o cognitivo a través de la musicoterapia. Además, con el bajo coste que supone el diseño de este prototipo, es una oportunidad para que los países en vías de desarrollo puedan tratar a los recién nacidos que lo necesiten.

Para conseguir este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar y desarrollar un prototipo inicial de una incubadora neonatal que tenga un patrón diferente en la aplicación de la fototerapia y a su vez, se pueda reproducir música para beneficios del recién nacido.
- Obtener la óptima disposición de las luces de fototerapia sobre la cubierta en la que se incorporarán para conseguir exponer más superficie corporal, ayudando así a disminuir los niveles de bilirrubina a mayor ritmo.
- Proporcionar una modificación eficaz de una lámpara de fototerapia convencional que pueda ser utilizada en países en vías de desarrollo. De esta forma, se contribuye a la generación de propuestas que contribuyan con uno de los objetivos del desarrollo sostenible de las naciones unidas.
 - Garantizar que las personas pobres y vulnerables tengan acceso a derechos básicos, como lo son los servicios de atención de salud de calidad (United Nations, 2017). Así pues, el sistema sanitario de países en vías de desarrollo podrá adquirir el prototipo propuesto y los neonatos que sean diagnosticados con hiperbilirrubinemia y necesiten fototerapia, podrán recibir el tratamiento adecuado. Llegando a reducir de esta forma la mortalidad y morbilidad por dicha enfermedad y garantizando una vida sana y el bienestar del neonato, tanto a nivel físico como cognitivo gracias a la fototerapia y musicoterapia.
- Hallar del método más óptimo para reproducir música en la incubadora neonatal, durante un período de tiempo determinado y a una frecuencia permitida para que no dañe el sistema vestibular del recién nacido ni alterar su descanso y crecimiento.

Capítulo 3

Desarrollo del proyecto

3.1 Consideraciones y requerimientos de diseño de la incubadora neonatal

Partiendo de los componentes principales de las incubadoras, explicados en el Capítulo 1 sección 1.1.2, a la hora de realizar el diseño del prototipo, es necesario tener en cuenta algunas consideraciones y características esenciales para poder obtener un diseño final lo más ajustado a la realidad y a las necesidades del prematuro.

Requerimientos de diseño

- Es necesario que la cúpula de la incubadora sea diseñada con un material que no permita la fuga del calor del ambiente controlado en el interior pero que a su vez sea transparente para no perder el contacto visual con el neonato.
- La fuente de luz empleada en la fototerapia debe cumplir con algunos requisitos. Es importante que estas luces cumplan con el objetivo principal de causar la isomerización de la Bb para ayudar en su excreción y causando así, la disminución de los niveles de bilirrubina sérica total. Es necesario que este objetivo se alcance sin exponer al paciente prematuro a una pérdida de agua corporal por deshidratación o de calor por sudoración, por nombrar algunos de los riesgos asociados. Es necesario que el equipo de fototerapia cumpla con las siguientes especificaciones técnicas.
 - Longitud de onda: 450-500 nm
 - Irrandiciencia: $\geq 30 \mu W/cm^2/nm$
 - Área iluminada: $\sim 700 cm^2$

Así pues, será necesario ajustar la altura en punto en la cual la irrancia (I) esté por encima del valor límite de forma que la superficie corporal sea la mayor posible para conseguir los efectos deseados.

- Conociendo la falta de capacidad de termorregulación que poseen los prematuros, también se hace necesario establecer un control de variaciones de temperatura entre los 34 °C hasta los 39°C.
- En el caso de la musicoterapia, estando al tanto de la delicadeza del sistema vestibular de los RN, y en especial de los prematuros, es importante que el sistema escogido para la reproducción de una melodía no supere los 60 dB.

Normativa

En cuanto a las normativas para el desarrollo de un equipo biomédico, en conjunción con las buenas prácticas ingenieriles, se han de tener en cuenta las siguientes:

- ISO 9001. Para la implementación de un sistema de calidad y buenas prácticas de fabricación.
- ISO 13485. Norma basada en la ISO 9001 pero con aplicación exclusiva a dispositivos médicos.
- IEC 60601. Regulación de medidas de la seguridad eléctrica.
- UNE-EN 60601-2-19. Cumplimiento de requisitos particulares para la seguridad del bebé y del operador y el funcionamiento básico y esencial de las incubadoras neonatales.

3.2 Identificación y análisis de soluciones posibles

Los niveles altos de bilirrubina, causantes de la coloración amarillenta de piel y ojos, son muy comunes en recién nacidos. Tal como se explicó de forma más detallada en la sección 1.1.1.1, si esta patología no se trata en tiempo y de forma adecuada puede llegar a tener consecuencias irreparables a nivel cerebral, como la encefalopatía bilirrubínica aguda o el kernícterus; por otro lado también son conocidos los riesgos como la pérdida de oído y deformaciones físicas. Estas consecuencias por la falta de tratamiento, son más frecuentes en países que se encuentran en vías de desarrollo, como es el caso de la India. Este país es un claro representante de esta preocupante situación, no solo por la precariedad en la atención hospitalaria en extendidas partes del territorio sino por la significativa representación poblacional a nivel mundial. La atención médica y la tecnología en dichos países son factores muy limitantes puesto que no poseen medios económicos suficientes para la adquisición de equipo médico complejo (Thoppil, 2012); una historia que se repite en pequeñas poblaciones, zonas rurales o de difícil acceso en Latinoamérica, África y gran parte de Asia. Este proyecto supondría una oportunidad para proveer un dispositivo de bajo coste y mantenimiento, que sea capaz de proporcionarle al neonato un ambiente adecuado para poder recibir el tratamiento necesario y que sea adaptable a la necesidad.

Por otra parte, el tipo de luces utilizadas para el diseño del dispositivo de fototerapia, están caracterizadas por no generar calor sobre la superficie que ilumina, su extensa durabilidad y bajo consumo. Esta última característica contribuye al factor económico, puesto que cuánto más larga sea la vida útil de los componentes del dispositivo y estos sean más eficientes, menor será el consumo energético en operación, menor el mantenimiento y en consecuencia el impacto económico asociado disminuye.

Otro de los puntos que se han considerado para el diseño del prototipo es la inclusión de un módulo de musicoterapia. Como lo explica Kimberly A. Allen en "Music Therapy in the NICU: Is there Evidence to support Integration for Procedural Support?" (Allen, 2013) a lo largo del día y según los niveles de actividad en las salas de UCINs los niveles de ruido sufren muchas variaciones. En una sala de UCIN, se recomienda evitar que los niveles de ruido estén por encima de los 45 dB, límite que se supera cuando se realiza el procedimiento de succión endotraqueal, en movimientos tan sencillos como la apertura de una funda plástica o si un neonato necesita un sistema de ventilación de alta frecuencia, eventos que llegan a aumentar el nivel de intensidad sonora entre los 58 y 68 dB respectivamente. Todos estos aumentos bruscos del ruido ambiental de la sala son causantes de estrés o irritabilidad en el neonato. Para contribuir en la reducción de estos efectos, se incorpora un módulo de reproducción de melodías dentro del habitáculo de la incubadora, aplicándose así la musicoterapia pasiva; el paciente escuchará la melodía que el terapeuta elija según la cantidad de beneficios que se produzcan en el paciente.

3.3 Diseño de la propuesta

A lo largo de la redacción de esta tesis y, en específico, en el Capítulo 1 se han comentando los problemas principales de interés que se pueden encontrar en los recién nacidos y que son aún más delicados en prematuros. Con el objetivo de ayudar a los bebés que sufren dichas patologías a alcanzar un estado de salud óptimo, se propone un modelo de incubadora que tendrá, además de los componentes básicos de una convencional (control de temperatura, control de humedad, ventilación, entre otros), los instrumentos necesarios para que el paciente pueda recibir una terapia integrada de luz y sonido. De esta forma, al mismo tiempo que se ayuda a que los niveles de Bb del bebé disminuyan hasta llegar a un nivel estable, también se contribuye al desarrollo cognitivo y emocional del bebé pretérmino.

Para poder llevar a cabo esta propuesta, previamente ha sido necesario pensar, diseñar y realizar la parte de instrumentación electrónica para poder medir algunas variables, como temperatura y humedad relativa en el ambiente interno de la incubadora. Además de que el sistema sea capaz no solo de realizar el muestreo, sino de permitir la visualización de las variables y la activación de alarmas cuando alguno los valores de las variables salen del rango establecido.

Para el maquetado y elaboración del prototipo, se ha llevado a cabo previamente un proceso de diseño 3D para poder darle forma a la incubadora y poder acoplar al diseño impreso la instrumentación electrónica diseñada. Para acompañar toda esta búsqueda, de materiales, dispositivos electrónicos, herramientas de software, se ha realizado una extensiva consulta de información basada en los requerimientos de la aplicación final. Para conocer el proceso de desarrollo del prototipo, se hablarán de los parámetros de diseño que se han tenido en cuenta y de cada proceso de forma individual.

3.3.1 Parámetros de diseño

Se conocen como parámetros de diseño, los elementos influyentes en la división del trabajo y la organización para conseguir un buen funcionamiento de la tarea, obteniendo por último los resultados deseados. Los parámetros de diseño de este proyecto han sido los siguientes:

- **Temperatura.** A la hora de realizar la programación con el sensor escogido, se debe tener en cuenta que la temperatura no debe estar por debajo de los 36°C ni por encima de los 38°C.
- **Humedad relativa.** De la misma forma que la temperatura tiene un rango establecido en el habitáculo donde se encuentra el recién nacido, la humedad relativa debe de estar entre 95-99% teniendo en cuenta la EG del neonato.
- **Tiempo medición.** El tiempo de medición establecido en la programación del sensor del prototipo es cada 5 minutos. Cada 5 minutos se conocerán los valores de las variables anteriores para conocer si se debe realizar alguna acción o no.
- **Longitud de onda.** Un parámetro de diseño importante es conocer la longitud de onda deseada de los LEDs que formarán parte del dispositivo de fototerapia, e investigar también cual es la disposición y el número de LEDs necesarios para hacer la terapia de luz efectiva.
- **Irradiancia.** Para que la fototerapia tenga el efecto de descenso de bilirrubina sérica total al ritmo deseado, la irradiancia del dispositivo de luz diseñado debe superar los 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$.
- **Medidas del diseño.** Para realizar la maqueta del prototipo a diseñar, se tendrán en cuenta las medidas de un dispositivo comercial. Será necesario calcular la escala de reducción para conocer las medidas exactas que debe tener el proyecto.
- **Nivel máximo de intensidad sonora.** Además de la fototerapia, se sumará una terapia musical para ayudar al neonato al alcanzar un estado de bienestar. Teniendo en cuenta el valor máximo de ruido soportado por el sistema vestibular del recién nacido, se deberá elegir un módulo de reproducción musical que no

sea cause ningún tipo de daño y pueda reproducir melodías desde archivos legibles por el software elegido para esta actividad, Arduino.

A continuación, se realizará una explicación detallada sobre cada uno de los procesos necesarios que se han tenido que completar para obtener el resultado final deseado teniendo en cuenta los parámetros de diseño comentados.

3.3.2 Diseño 3D

El software elegido para diseñar el prototipo de la incubadora es el programa PTC Creo Parametric (Anexo B); programa utilizado dentro de la asignatura de Diseño asistido por ordenador del programa de Ingeniería Biomédica de la Universidad de Vic.

Algo muy importante para poder empezar a trabajar en el diseño 3D es tener alguna incubadora de referencia. En este caso, se han tenido en cuenta dos incubadoras diferentes para poder obtener el diseño final. Por un lado, se ha tomado como referencia una imagen de un diseño de una incubadora, Fig. 3.1 ¹.



FIGURA 3.1: Modelo de la incubadora tomada como referencia para realizar el diseño propio.

Antes de realizar el diseño en el software ha sido necesario determinar una escala de reducción para poder diseñar el prototipo a escala, tomando como referencia las medidas reales del modelo de incubadora Isolette®8000 de Dräger Safety Hispania S.A., Fig 3.2. En la Tabla 1.3 del Capítulo 1 se pueden examinar las características funcionales de este modelo de dispositivo.

En su página web, el fabricante ofrece para la mayoría de los modelos de incubadoras, un documento que contiene información sobre especificaciones técnicas del dispositivo y sobre accesorios que se puedan compaginar con este modelo de incubadora ². En especial, para poder elaborar el diseño del prototipo se han tenido en

¹Esta imagen ha sido obtenido de una página de Internet, <https://es.123rf.com/>, cuyas imágenes son libres de derecho.

²<https://www.draeger.com/Products/Content/isolette-8000-plus-pi-9102545-es-es-1610-1.pdf>



FIGURA 3.2: Incubadora Isolette® 8000 de Dräger Safety Hispania S.A. *Imagen tomada de (Dräger Safety Hispania S.A., 2021)

cuenta las dimensiones de este modelo.

TABLA 3.1: Dimensiones de la Isolette® 8000

Atributos físicos	
Altura	132.6-152.7 cm
Anchura	104 cm
Profundidad	75 cm
Características de la cubierta	
Tamaño del colchón	34x74x3 cm

Como primera idea, se tomaron como referencia las medidas de la Tabla 3.1 para obtener una escala de reducción, teniendo en cuenta las dimensiones máximas de impresión de la impresora 3D que se utilizaría. La impresora 3D de la Universitat de Vic permite realizar impresiones con unas dimensiones máximas de 297x210 mm, dimensiones de tamaño folio. Para obtener un diseño con unas dimensiones menores a las máximas permitidas por la impresora, fue necesario utilizar una escala de reducción 1:4. La Tabla 3.2 contiene las medidas finales del prototipo.

TABLA 3.2: Dimensiones del prototipo a escala 1:4

Atributos físicos	
Altura	21.25 cm
Anchura	26 cm
Profundidad	18.75 cm
Características de la cubierta	
Tamaño capacete	18.75x12.5 cm
Tamaño soporte inferior	20x8x2 cm

Con el software de diseño escogido, se realizó el diseño 3D de las partes diferentes partes de la incubadora, capacete y soporte, para tener una visualización previa del aspecto que tendría el prototipo antes de realizar su impresión. El principal motivo es un atributo físico de la estructura. La estructura impresa será el soporte de la maqueta ya que no tiene ningún requerimiento específico de color. Sin embargo, el capacete de la incubadora y la estructura donde deben ir acopladas las luces LEDs deben de ser transparentes, para que permitan siempre la visibilidad con neonato

desde el exterior. En el Anexo D se puede apreciar el diseño de estas estructuras y sus planos.

Proceso de diseño

El diseño 3D del prototipo de la incubadora se realizó con la idea principal de poder ser impreso en un impresora 3D de modelo BCN3D, de la Universitat de Vic - Universitat Central de Catalunya.

Para poder realizar la impresión de los diseños, es importante que una vez acabado el diseño final, pase por una última etapa de revisión y aceptación que ratifique la viabilidad técnica para su fabricación. En esta etapa, la persona encargada de este proceso, comunicó que no sería posible la impresión del prototipo por sus características. A pesar de que se realizó una escala de reducción, con la que se obtuvieron medidas permitidas por la impresora 3D, el grosor de las piezas era muy grande para la impresora y suponía muchas horas de impresión y material utilizado lo que causaba el encarecimiento del dispositivo final. Para imprimir todas las piezas del prototipo de utilizarían como mínimo unas 60 horas. Por estas dos principales razones, se concluyó que la impresión 3D no era la técnica idónea para llevar a cabo el prototipaje por lo que sería necesario buscar alternativas para poder realizar la construcción del prototipo.

Tomando en cuentas las limitaciones antes mencionadas así como la viabilidad de uso de materiales más sostenibles, se decidió que la estructura de la incubadora se realizaría con madera. La madera es un material económico y fácil de manejar si se poseen las herramientas suficientes, como es el caso. Este material posee unas características mecánicas, ambientales y estéticas óptimas que la hicieron adecuada para este prototipo (Greemap, 2021):

- Resistencia mecánica debido a la estructura bidireccional de las fibras.
- Punto de inflamación entre 200-275°C y no es buen conductor de calor. Esta característica es importante por que como se ha comentado en el Capítulo 1 el medio interior de la incubadora debe estar entre 36-38°C con posibilidad de ser calentado cuando la temperatura fluctúe por debajo de este rango.
- Material que no requiere un tratamiento químico excesivo. Como los valores de humedad son muy altos dentro del habitáculo, es importante que se realice un tratamiento de impermeabilización tanto interno como externo para evitar el envejecimiento de la madera.
- Existencia de una amplia variedad de maderas de diferentes medidas. Esto permite que la búsqueda y compra del material se una tarea más fácil.

Además de estas ideales características que han hecho de la madera un material adecuado para la construcción del prototipo. El uso de un material natural, que

se puede obtener tanto de maderas nuevas como de maderas recicladas, hace del dispositivo final un dispositivo innovador, sostenible y de bajo consumo.

Indagando en las ventajas que supondría la construcción del dispositivo con el nuevo material, se pudo conocer que existe una experiencia previa del uso de la madera en dispositivos médicos. Por ejemplo, Alejandro Escario, un joven ingeniero, tomó la decisión de construir una incubadora "low cost" para países que no puedan permitirse adquirir un dispositivo tecnológico muy complejo por su elevado precio. Así pues, la idea de realizar el prototipo de madera se vio reforzada tras el conocimiento de este desarrollo.

3.3.3 Instrumentación electrónica

La instrumentación electrónica es un término que hace referencia a la parte de la electrónica que se encarga del diseño y el manejo tanto de instrumentos eléctricos como electrónicos para su uso en mediciones. La elección de los dispositivos usados y el desarrollo de la parte electrónica de esta tesis se realizó focalizándose bien en cuáles eran las variables que se tenían que medir y estudiando si era necesario o no establecer un control sobre estos parámetros. A continuación, se realizará una explicación detallada de cada uno de los dispositivos elegidos.

Sensores de humedad y temperatura

Revisando las opciones en el mercado de módulos compatibles con el dispositivo de control Arduino, se seleccionaron dos posibles módulos digitales para realizar el seguimiento de la humedad y temperatura, el DHT11 y el DHT22, estos se describen a continuación y se realiza una comparativo entre ellos.

DHT11 Como se ha comentado en el Capítulo 1, la temperatura interior de las incubadoras debe estar entre 36-38°C para conseguir que los neonatos se encuentren a una temperatura controlada para evitar que lleguen a estados de hipotermia o hipertermia. A su vez la humedad relativa del habitáculo también impone una variable de medición que ha de ser monitoreada y controlada para cuidar la hidratación del recién nacido.

El DHT11 es un sensor digital que mide la humedad relativa y la temperatura del aire circundante. Este dispositivo electrónico se caracteriza por ser un dispositivo de bajo costo y fácil uso y por tener integrado en su estructura un sensor capacitivo de humedad y un termistor. Una vez que son captados los valores de humedad, este sensor los convierte en una señal digital. Esto supone una ventaja porque obtener los datos de forma digital equivale a tener una mayor protección contra el ruido. La frecuencia con la que este sensor mide los valores de temperatura y humedad relativa es de 1 Hz, es decir, se obtienen los valores de las variable cada 2 segundos.

TABLA 3.3: Características técnicas del sensor DHT11

Características técnicas DHT11	
Voltaje de operación	3.5V a 5V
Consumo	2.5 mA
Señal de salida	Digital
Rango medición temperatura	0°C a 50°C
Precisión medición temperatura	$\pm 2^\circ\text{C}$
Resolución temperatura	1°C (8 bits)
Rango medición humedad	20% HR a 90% HR
Precisión medición humedad	$\pm 5\%$ HR
Resolución humedad	1% HR

Como se puede apreciar en la Tabla 3.3, el rango de medición de la temperatura de este sensor es de 0°C a 50°C. Es decir, este dispositivo abarca de forma completa los valores en los que se debe encontrar el entorno del neonato, pudiendo así realizar un programa que genere avisos cuando los valores de temperatura fluctúen por encima o debajo de dicho rango. Sin embargo, no es el más óptimo para realizar las mediciones del porcentaje de humedad relativa en el ambiente. En una incubadora neonatal, el nivel óptimo de humedad viene determinado una serie de variable como la edad gestacional, la capacidad del prematuro de mantener la temperatura corporal, la madurez de la piel del neonato y su condición en general. A medida que la piel del neonato madura, el control de la temperatura corporal aumenta, las pérdidas transepidérmicas de agua son menores por lo tanto, los niveles de humedad relativa se pueden ir reduciendo llegando incluso a su suspensión, cuando ya no sea necesaria (Clara Aurora Zamora-Jiménez et al., 2011).

Por ejemplo, en un prematuro entre las 26-28 semanas de gestación, los niveles de humedad relativa deben estar al 100%. En estos casos, el DHT11 no sería capaz de establecer un control sobre esta variable, ya que como se puede observar en la Tabla 3.3 su rango de medición de humedad se encuentra entre los 20-90% HR. Es por este motivo, que en el prototipo final el DHT11 será sustituido por el DHT22; el DHT11 será utilizado únicamente para la obtención de resultados de prueba.

DHT22 Para la obtención de los resultados finales, se utilizó una generación más del sensor de humedad y temperatura, el DHT22. A diferencia del DHT11, este sensor de temperatura y humedad tiene un rango de medición de estas dos variables mucho más amplio. De la misma forma, la precisión de medición de la temperatura es solo de un $\pm 0.5^\circ\text{C}$ a diferencia de los $\pm 2^\circ\text{C}$ del DHT11. Lo mismo pasa con la precisión al medir la temperatura, el DHT22 trabaja con una precisión de $\pm 2\%$ mientras que el DHT11 lo hace con una precisión de medición de la humedad de $\pm 5\%$. Además, este dispositivo de medición tiene una frecuencia de muestre de 2Hz, es decir, de dos muestras por segundo.

Como se ha comentado en la sección 3.3.3, el valor de la humedad relativa del habitáculo donde se encuentra el prematuro depende de diferentes variables. De estas

TABLA 3.4: Características técnicas del sensor DHT22

Características técnicas DHT22	
Voltaje de operación	3.5V a 6V
Consumo	2.5 mA
Señal de salida	Digital
Rango medición temperatura	-40°C a 80°C
Precisión medición temperatura	a 25° ± 0.5°C
Resolución temperatura	0.1°C (16 bits)
Rango medición humedad	0% HR a 100% HR
Precisión medición humedad	± 2%
Resolución humedad	0.1% HR

variables, la que más peso tiene para escoger el nivel de humedad relativa son las semanas de gestación del prematuro; a menor semanas de gestación, mayor porcentaje de humedad relativa y viceversa. En la Tabla 3.5 es posible observar como varía el valor de la HR en función de la edad gestacional. Teniendo en cuenta estos valores y el rango de medición de humedad del DHT22, se puede confirmar que es una buena elección de sensor para establecer un control sobre la variable de la humedad y, además, sobre la temperatura. Una vez montada la instrumentación y revisado el circuito para su correcto funcionamiento, se realiza el cambio del DHT11 al DHT22 para obtener un prototipo final que se ajuste lo más posible a los requerimientos que debe cumplir este dispositivo neonatal.

TABLA 3.5: Control de la humedad relativa en prematuros desde la semana 26 de edad gestacional hasta la 35

Edad gestacional (semanas)	Humedad relativa (%)
26-28	100
29-32	70-80
33-34	50-60
35	<50

Pantalla LCD: visualización de datos

Una pantalla de cristal líquido o LCD será el dispositivo que permitirá conocer de forma visual los valores de la temperatura y la humedad relativa. Este tipo de pantallas utilizan pequeñas cantidades de energía siendo así dispositivos de bajo consumo que pueden ser alimentados por una simple pila.

Además, como la humedad variará dependiendo de la edad gestacional del prematuro, se pedirá que se ingrese este valor para poder establecer un control sobre dicha variable; la pantalla LCD será la intermediaria entre el software y el sanitario.

Ventilador 12 V

Como se indica en el apartado 1.1.2 del Capítulo 1, un componente esencial de la incubadora es un ventilador que ayude, entre otras cosas, a evitar que el microambiente en el que se encuentra en neonato esté por encima de los 38°C. Para incorporar este dispositivo en la incubadora diseñada, se ha utilizado un ventilador de 12 V compatible con arduino.

Cuando el sensor DHT22 registra temperaturas por encima de los 38°C, se enciende una alarma visual que alerta de este problema. En este mismo momento, el ventilador se pone en marcha y no deja de funcionar hasta que la temperatura del ambiente se reestablece. Con esto se evita que el lactante sufra algún tipo de proceso hipertérmico, pudiendo causar esto efectos más graves como la deshidratación o, si no se atiende a tiempo, la muerte.

LEDs

Los LEDs forman parte de una tecnología lumínica que posee muchas ventajas. Proporciona un ahorro energético de entre el 80 y 90%, en comparación con la fuente de luz tradicional. La vida útil de las luces LED es bastante más prolongada que la de una bombilla tradicional; con un promedio de 95.000 horas más de funcionalidad. Además, esta fuente de iluminación no emite calor, característica de vital importancia para esta aplicación. Al no emitir ni necesitar calor, alcanza el punto de rendimiento máximo al momento. (Ortuño et al., 2016; Barcelona LED, 2018).

Cuando este componente eléctrico permite el paso de corriente, puede emitir un amplio número de longitudes, desde colores primarios (rojo, verde, azul) hasta luces compuestas por los distintos espectros cuando se suman luces de colores distintos. En la terapia de luz para disminuir los niveles de Bb sérica del lactante, se utilizan dispositivos de luz que emiten una luz con espectro de onda verde azul, entre 430-490nm. En la Figura 3.3 se muestra un diagrama del sistema CIE que realiza una caracterización de los colores mediante un parámetro de luminancia y dos coordenadas de color pudiendo observar donde se localizan los colores con las longitudes de onda comentadas.

En el estudio realizado por (Ebbesen et al., 2016) se estudia la existencia de diferencias significativas en la aplicación de la terapia de luz aplicada con luz azul (459 nm) o turquesa (497 nm). Este estudio fue llevado a cabo en una muestra poblacional de 91 neonatos que necesitan FT, separados en dos grupos de forma aleatoria. A 46 neonatos se les aplica una FT utilizando luz turquesa, y a los 45 restantes FT utilizando luz azul. Aunque se presenta que la luz turquesa es un 20% más eficiente que la luz azul, estas dos luces tuvieron el mismo efecto reductor de niveles de bilirrubina sérica total. Teniendo en cuenta este dato y que es más fácil encontrar en el mercado un led de luz azul que turquesa, para el prototipo de la incubadora

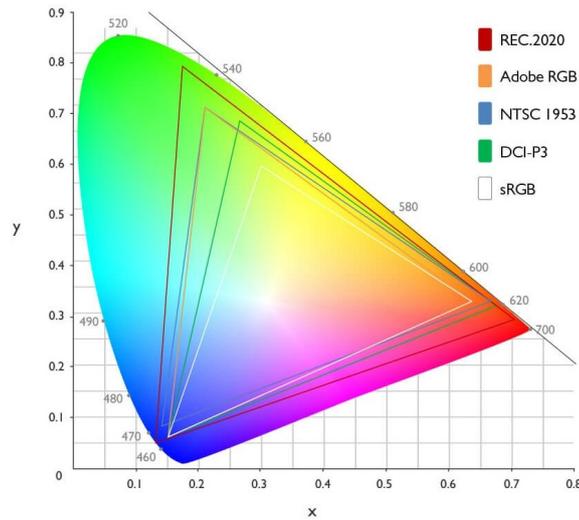


FIGURA 3.3: Diagrama CIE *Esquema tomado de la referencia (Laboratorio de tecnología del color de BenQ, 2019)

que se presentará, se han seleccionado LEDs de luz azul como tratamiento para la hiberbilirrubinemia.

Previo a la construcción del sistema de fototerapia del prototipo, es necesario haber realizado un estudio sobre algunos parámetros fotométricos y radiométricos que ayudarán a determinar el número de LEDs necesarios para la lámpara de fototerapia, la distancia entre dicha fuente de luz y el recién nacido para conseguir el nivel de irradiancia necesario, el espaciado entre los LEDs y el modelo óptimo para poder aplicar esta terapia de luz con éxito.

La radiometría es la ciencia que estudia la transferencia de potencia desde una fuente a un detector. Cuando esta transferencia de energía por unidad de tiempo se normaliza a la respuesta espectral del ojo humano, se conoce como fotometría. Estas dos magnitudes se diferencian en la utilización del subíndice "e" de energía para las magnitudes radiométricas y el subíndice "v" de visual para las fotométricas (Gómez González, 2006).

La **radiancia espectral** (L_e), ecuación 3.1, es la magnitud básica a partir de la cual se pueden obtener las demás magnitudes radiométricas. Esta magnitud básica se puede definir como la cantidad de flujo radiante por unidad de longitud de onda que abandona una unidad de área en una dirección determinada con un ángulo sólido en particular (Figura 3.4).

$$L_e = \frac{\delta^2 \Phi(\lambda)}{\delta A_s \delta \Omega} \left[\frac{W}{m^2 \mu m sr} \right] \quad (3.1)$$

Partiendo de esta definición básica, se definirán a continuación parámetros importantes en el estudio radiométrico (Gómez González, 2006).

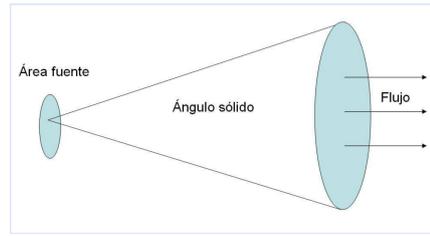


FIGURA 3.4: Irradiancia espectral *Esquema tomado de la referencia (AEMET, 2018)

Potencia radiante (Φ). Flujo de energía por unidad de tiempo.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} [W] \quad (3.2)$$

Irradiancia (E). Potencia incidente por unidad de superficie que emerge de un punto de dicha superficie.

$$E = \frac{dQ}{dS_o} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.3)$$

Intensidad radiante (I). Densidad de flujo radiante angular emitido por un punto en el espacio con una dirección específica de propagación. Esta variable es útil para calificar fuentes pequeñas en comparación con la distancia al detector o desde la fuente al observador.

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \left[\frac{W}{sr} \right] \quad (3.4)$$

De la misma forma que la radiancia espectral es la magnitud básica de la radiometría para la obtención de otras magnitudes de interés, la magnitud básica de la fotometría es el flujo luminoso emitido por una fuente. Se conoce como **flujo luminoso**, Φ_v la potencia medida en lumens la cual es emitida en forma de radiación luminosa y a la que el ojo humano es sensible.

$$\Phi_v = K_M \int_{0.38\mu m}^{0.75\mu m} V(\lambda) M_p(\lambda) d\lambda [lumens] \quad (3.5)$$

El flujo luminoso se determina mediante la ecuación 3.5 donde K_M es la eficacia luminosa para visión fotópica (683 lumen/W), $M_p(\lambda)$ es la potencia interpretada en $W/\mu m$ y $V(\lambda)$, definida como la respuesta fotópica del ojo humano, tiene un valor de 0.060 para una longitud de onda 460 nm (luz azul). A partir de este parámetro básico, se definirán algunos conceptos necesarios para el estudio fotométrico de la terapia de luz a aplicar (Gómez González, 2006; Konica Minolta Sensing, 2006).

Iluminancia (E_v). Parámetro que describe la medición de la cantidad de luz que cae y se expande en una determinada superficie (S). Este parámetro se relaciona en cómo las personas notan el brillo del área iluminada.

$$E_v = \frac{\Phi_v}{S} [lx] \quad (3.6)$$

Intensidad luminosa (I_v). La intensidad luminosa representa la cantidad de luz que es capaz de emitir una fuente de luz en todas las direcciones del espacio.

$$I_v = \frac{\Phi_v}{\omega} [cd] \quad (3.7)$$

Luminancia (L_v). La luminancia representa la medición de la cantidad de luz emitida reflejada desde un ángulo sólido de una superficie específica (superficie aparente). Es decir, representa el brillo de la luz reflejada fuera de la superficie.

$$L_v = \frac{I}{S_{aparente}} = \frac{I}{S \cos \alpha} [cd/m^2] \quad (3.8)$$

A continuación, en la Tabla 3.6 se puede observar las equivalencias entre los parámetros radiométricos y fotométricos descritos.

TABLA 3.6: Equivalencias entre parámetros básicos de la fotometría y radiometría.

Cantidad	Radiometría	Fotometría
Energía por unidad de tiempo	Flujo radiante (W)	Flujo luminoso (lm)
Potencia por unidad de área	Irradiancia (W/m^2)	Iluminancia (lx)
Potencia por unidad de ángulo sólido	Intensidad radiante (W/sr)	Intensidad luminosa (cd)
Potencia por área de ángulo sólido	Radiancia ($W/m^2/sr$)	Luminancia (cd/m^2)

En estudios realizados a las fuentes de luz LED, expertos concluyen que este tipo de fuente tiene patrones de distribución lambertiana, es decir, el reflejo de la radiación que incide en la superficie es uniforme en todas las direcciones del espacio. Esta distribución indica que la intensidad de la luz emitida tiene un coseno con respecto a la superficie normal y dependiente del ángulo de emisión (Nguyen et al., 2010; Cool et al., 2015). La intensidad luminosa del ángulo está descrita por la ecuación:

$$I(\theta) = I_0 \cos^m(\theta) \quad (3.9)$$

Donde I_0 es la intensidad luminosa central del grupo de LEDs, θ el ángulo de visión y m el orden de la emisión lambertiana que viene definido por el ángulo de visión donde la intensidad radiante es la mitad del valor que adquiere este ángulo en la dirección normal. Regularmente este es un valor que proporciona el fabricante pero que también es posible calcularlo de la siguiente forma:

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos\theta_{1/2})} \quad (3.10)$$

La iluminancia en un punto determinado debido a un LED determinado se puede calcular a través de la "Ley del coseno":

$$E_{i,j} = \frac{I(\theta_{i,j})\cos(\theta_{i,j})}{r_{i,j}^2} \quad (3.11)$$

Donde j representa el LED, i el punto iluminado y $r_{i,j}$ la distancia entre el LED y el punto de iluminación.

Recordar que para que la fototerapia sea efectiva y se consigan disminuir los niveles de bilirrubina en sangre, la irradiancia generada por los LEDs debe ser igual o superior a $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$. Para poder obtener los niveles de irradiancia de cada modelo se utilizará la ecuación 3.12 descrita a continuación

$$\text{UnidadFotometrica} = K_o \cdot V(\lambda) \cdot \text{UnidadRadiometrica} \quad (3.12)$$

donde K_o tiene un valor definido de $683 \text{ lm}/\text{W}$, $V(\lambda)$ es igual a 0.060 y la unidad fotométrica, en este caso la iluminancia, obtendrá un valor diferente, para cada modelo y conjunto de LEDs.

En el capítulo siguiente se propondrán dos modelos de disposición de los LEDs de los cuales se hará un estudio de la distribución de iluminancia de cada modelo con el fin de poder determinar cuál es el más indicado para la fototerapia. Para estudiar la distribución de la iluminancia en el prototipo se ha utilizado el programa MATLAB R2020b para poder simular dicha distribución.

Módulo reproductor de música

Como se ha ido explicando a lo largo de los capítulos anteriores, uno de los objetivos de este proyecto, es integrar un dispositivo reproductor de música para favorecer al desarrollo emocional y cognitivo del recién nacido.

Como se explica en la Tabla 1.1 del Capítulo 1, en el mes 4 de gestación el feto es capaz ya de experimentar sensaciones provenientes de estímulos sensoriales; en el mes 8 la corteza auditiva ya está definida y el oído es capaz de transmitir información al encéfalo. En el mes 9 de embarazo, el sistema auditivo ya está completamente definido y se encuentra operativo y unas semanas antes de nacer el sistema auditivo reacciona de forma notable a los estímulos externos (Capdevila, 2008).

Desde los años 60 se han realizado muchos estudios enfocados en la gestación y, algunos especialmente, en el desarrollo del sistema auditivo del feto. Gracias a estos estudios ha sido posible confirmar que los fetos tienen capacidades auditivas y

tienen la capacidad para mostrar reacciones auditivas ante estímulos de cualquier tipo pero más específicamente a estímulos musicales (Tafari, 2006). El neonato ante estos estímulos musicales, muestra diferentes gestos: deja de llorar, abre los ojos, parpadea y/o fija la mirada. Además, en estudios realizados se ha concluido que los bebés tienen una clara prioridad a las voces agudas femeninas; se cree que esto se debe a que durante todos los meses de gestación ha oído sobretodo la voz de su madre. Durante los primeros días de vida, puede ser que el oído del neonato se vea alterado por la presencia de líquido amniótico en el oído medio. Aunque a los recién nacidos no son capaces de captar sonidos de baja intensidad, se sobresaltan ante sonidos muy altos. Para que durante la utilización de la música como terapia esto no suceda y además no afecte al funcionamiento del sistema vestibular del prematuro, la melodía reproducida no debe superar en ningún caso los 60 dB.

Además del nivel de reproducción melódica máximo permitido, también es necesario tener en cuenta el tipo de melodía que se reproduce. Como se comentó previamente en la sección 1.1.3.2 del Capítulo 1, en las terapias musicales se suelen utilizar piezas musicales de autores como Mozart, Haydn o Beethoven.

En 2010, (Kanduri et al., 2015) realizaron un estudio con los espectadores de un concierto de música clásica; este era un concierto de W.A. Mozart Nr 3, G-major, K.216 con una duración de 20 minutos. Los resultados obtenidos fueron que la música clásica ayuda a la mejora de la actividad de los genes comprometidos en la secreción y transporte de dopamina, en el aprendizaje, la memoria y la función sináptica.

De la misma forma que la música clásica produce un conjunto de beneficios notables sobre personas adultas, también los tiene sobre la población de interés de esta tesis: los bebés prematuros. En el recién nacidos pretérmino, la música clásica, grabaciones de los sonidos del latido cardíaco de la madre, grabaciones de ruidos del útero o canciones de cuna mejoran la succión, el sueño del prematuro, reduce la frecuencia cardíaca, mejoran la frecuencia respiratoria y la saturación de oxígeno, estimulan el sistema inmune y la función neuronal. Además de todos estos beneficios, las canciones de cuna ayudan a mejorar el vínculo entre el prematuro y los padres (Ashley L Hodges and Lynda Law Wilson, 2010; Yildiz and Arıkan, 2012; Loewy et al., 2013; Wallis, 2013).

Teniendo en cuenta estos datos, la música que se reproducirá en las incubadoras de los neonatos será música clásica. Aunque este tipo de melodías tenga muchos beneficios, también es necesario considerar que es posible que la misma melodía tenga efectos contrarios en dos prematuros diferentes. Es por eso que, es necesario que la persona encargada de aplicar esta terapia atienda a los cambios que van surgiendo en cada prematuro, y en caso de ser necesario, varíe las melodías hasta encontrar la más adecuada para cada bebé. Gracias a esto, la terapia musical pasa a ser también una terapia personalizada para cada prematuro que se encuentre en la UCIN.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

Una vez completadas las etapas del diseño, fabricación del prototipo y prueba de la instrumentación utilizada, es importante analizar el correcto funcionamiento del ensamblaje de la parte electrónica junto con el diseño final del prototipo. Se obtendrá también el número de LEDs necesarios para que la lámpara de fototerapia alcance el nivel de irradiancia óptimo para su uso en el tratamiento de la hiperbiliruminemia en pacientes prematuros.

Los resultados obtenidos se detallarán desde los más generales, como el material utilizado para la construcción, hasta los más específicos, como el número de LEDs para la lámpara de fototerapia integrada, los pasos a seguir para la reproducción de las melodías en el módulo reproductor de música, y las alarmas que generan los instrumentos eléctricos utilizados, cuando las variables de estudio varían fuera del rango permitido.

4.1 Resultados

4.1.1 Diseño

Diseño 3D Con el software elegido para realizar el diseño, se representó de la forma más exacta posible el aspecto deseado de la incubadora neonatal. Como se puede observar en la Figura 4.1 el diseño realizado del prototipo es uno con una estructura básica y sencilla. Se decidió hacer un diseño sencillo que se pudiera imprimir en el menor tiempo posible, disminuyendo así el precio final del prototipo. El prototipo se construyó en su mayoría con materiales sostenibles respetando el diseño de la propuesta inicial y la instrumentación empleada sencilla, fiable, de bajo consumo y bajo coste.

Construcción del prototipo Se utilizó madera contrachapada ya que sus características técnicas lo hacen un buen material para el desarrollo del prototipo.

El contrachapado es un tablero obtenido por el trabajo y encolado de chapas de madera pegadas de forma transversal, formando ángulos rectos, con resinas sintéticas aplicando fuerza o presión. A diferencia de la madera maciza, este tipo de

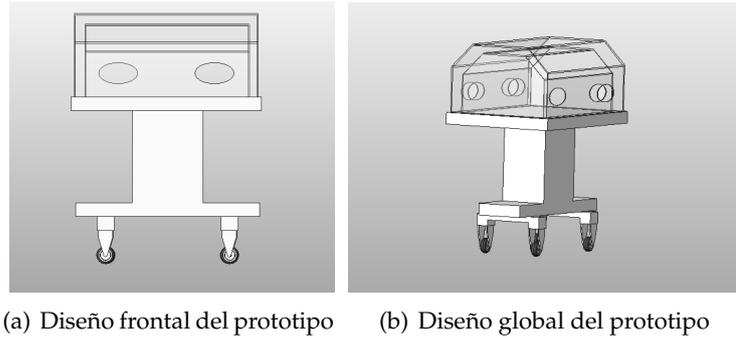


FIGURA 4.1: Diseño 3D del prototipo de la incubadora neonatal.

madera es de bajo peso; característica ventajosa para el prototipo. Asimismo, este material ofrece una gran resistencia y estabilidad gracias a la unión de las chapas una sobre las otras; resistencia al fuego y buen comportamiento ante la humedad y fácil de trabajar (Construir con Madera, 2020).

Para el desarrollo del prototipo se compraron 3 tableros de contrachapado de medidas y grosor diferentes; estos tableros fueron recortados obteniendo las diferentes piezas del prototipo con las medidas utilizadas en el diseño 3D. Antes de acoplar todas las piezas, ha sido necesario aplicarle a la madera un protector para evitar el posible ataque de plagas, hongos o insectos que puedan deteriorar la madera. A su vez, con el barniz se protege la madera frente a fenómenos meteorológicos. Una vez tratada la madera, se juntan las piezas unas con otras mediante clavos y puntas para poder obtener la base de la estructura del prototipo.

Para el capacete de la incubadora se utilizó una lámina de poliestireno transparente por su fácil manejo y transparencia; requisito que deben cumplir los capacetes de las incubadoras. En el prototipo, se tendrá un capacete interno que equivale al capacete general que tienen las incubadoras y otro un externo, que es la estructura donde se incorporaran los LEDs para la fototerapia. De esta forma, se consigue que el prototipo tenga el doble recubrimiento en su estructura superior para evitar fugas de aire y que el ambiente del neonato sufra caídas bruscas de temperatura.

4.1.2 Instrumentación

Control humedad y temperatura Tal y como se explicó en el Capítulo 3, se utilizaron dos sensores de humedad y temperatura en este trabajo. El DHT11 fue utilizado solamente para confirmar que el montaje y el funcionamiento de todos los dispositivos electrónicos era correcto y el DHT22 fue el sensor utilizado para el prototipo final.

Cuando el sensor de temperatura y humedad realiza la lectura de estas variables, es posible observar que valores toman éstas mediante la pantalla LCD. En el circuito de funcionamiento del prototipo de la incubadora neonatal, cuando la temperatura se encuentra fuera del rango establecido, 36-38°C, se generan dos alarmas. Estas alarmas se programaron para que fuesen visuales. Se enciende y se apagan dos luces de colores diferentes con la intención de avisar a la persona encargada del cuidado de los prematuros. La decisión de utilizar una alarma visual en lugar de una auditiva, radicó en evitar sonidos que puedan causar alteraciones en el prematuro.

Cuando la temperatura del habitáculo de la incubadora es inferior a 36°C, se enciende de forma parpadeante una luz azul. De la misma forma, cuando la temperatura del habitáculo está por encima de los 38°C de temperatura, se genera una alarma visual con el encendido de una luz amarilla. Aunque es necesario que la persona encargada del cuidado y vigilancia de los neonatos y del correcto funcionamiento de los dispositivos que se están utilizando, esta persona no debe realizar ningún tipo de acción para que la temperatura se estabilice. Este control está diseñado para que se lleve a cabo de una forma automática. Es decir, cuando se encienda la luz azul, indicando que la temperatura está por debajo de los 36°C, se activa el dispositivo calentador del circuito; este dispositivo funcionará hasta que la temperatura se vuelva a estabilizar. De la misma forma, cuando la temperatura aumente por encima de los 38°C se enciende el ventilador que hará circular el aire caliente para conseguir así que la temperatura ambiente disminuya por debajo de los 38°C. Tanto el calentador como el ventilador se apagan de forma inmediata cuando los valores obtenidos por el DHT22 se encuentra ya dentro del rango preestablecido.

Por otro lado, la humedad relativa es también un factor a controlar. Como se detalla en la Tabla 3.5 del Capítulo 3, el porcentaje de humedad relativa varía en función de la edad gestacional del prematuro, por lo tanto, a diferencia de la temperatura del ambiente no se puede establecer un rango fijo en el que pueda variar esta variable. Para poder establecer un control correcto sobre la humedad relativa que debe haber en el ambiente, será necesario conocer la edad gestacional del prematuro e introducirla en el programa de control. Es necesario tener en cuenta, que los valores de humedad relativa procesados por el sensor, deben tener una precisión de 10%. Este dato se utilizará para poder programar un aviso que sea capaz de alertar al personal sanitario para dar a conocer que los valores de humedad relativa en ese momento no son correctos (Bustamante Campoverde and Cevallos Larrea, 2013).

Sistema de fototerapia Teniendo en cuentas las variables necesarias ¹ para decidir un modelo óptimo, se analizarán los resultados obtenidos en MATLAB tanto para los modelos de referencia como para los modelos de diseño propio.

Modelo de red. La estructura de este modelo y la disposición de los LEDs es un poco más similar a las lámpara convencionales de fototerapia. El modelo diseñado está basado en el modelo de la Figura 4.2(a). Teniendo en cuenta que existen prematuros con diferentes grados de gravedad de hiperbilirrubinemia cuando la padecen, el modelo de red estaría pensando para poder encender y apagar determinadas filas de luces, según la necesidad del prematuro. El modelo modificado, dispone de 12 LEDs como se representa en la Figura 4.2(b); con una $d=104$ cm para el eje x y $d=75$ para el eje y. Los cálculos para poder determinar la distribución de la iluminancia en el modelo se realizan utilizando la Ley del coseno (ecuación 3.6).

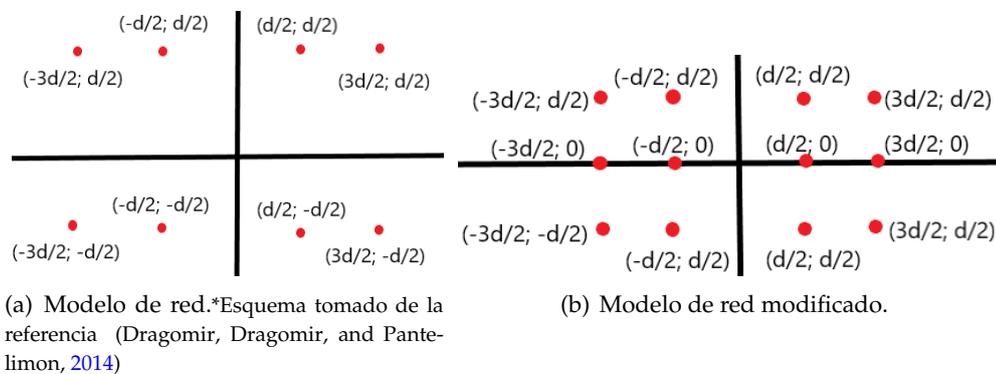


FIGURA 4.2: Modelos de red.

Para cada uno de los modelos se realiza el estudio sobre cómo se distribuye la iluminancia sobre la superficie y determinar así cuál es el mejor. En la Figura 4.3(a) se representa el resultado gráfico de la distribución de la iluminancia en el modelo de red tomado como referencia. Para un ángulo $\theta=30$, 8 LEDs y una distancia igual a 35 cm con respecto a la superficie a iluminar, el valor máximo de iluminancia obtenido es 1461.1 lx y el valor medio de 973.9351 lx. Para el mismo valor de θ y la misma distancia de la superficie a iluminar con un número total de 12 LEDs, el valor máximo de iluminancia obtenido es de 1.1067×10^3 lx y el valor medio del modelo de 1397.2 lx (Figura 4.3(b)).

Modelo de círculos concéntricos. El modelo de círculos concéntricos está pensando para poder adaptarse a la necesidad de cada prematuro. Este modelo consta de un número específico de círculos concéntricos que, al igual que el modelo de red, podrán encenderse en caso de que se necesite cubrir una mayor área para tratar al prematuro o apagarse en el caso de que los círculos más exteriores no aporten ninguna ayuda si la superficie de área corporal necesaria ya se encuentra iluminada. De la misma forma que se ha realizado el estudio de la distribución tanto para el modelo de red de referencia como para el modelo de red diseñado, para el modelo

¹Explicadas en el apartado 3.3.3 del Capítulo 3

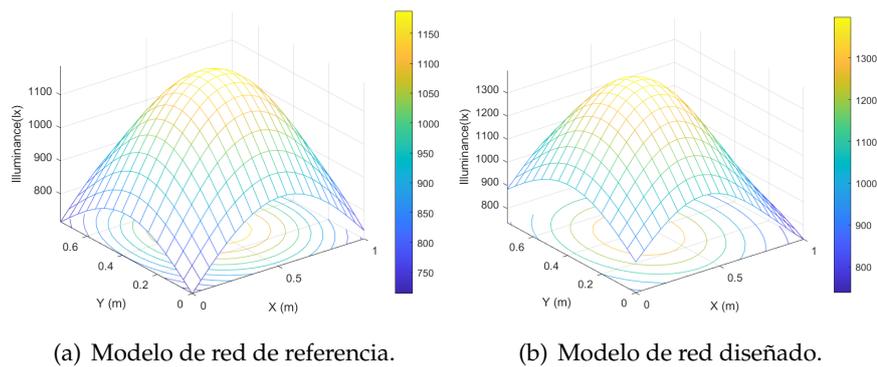
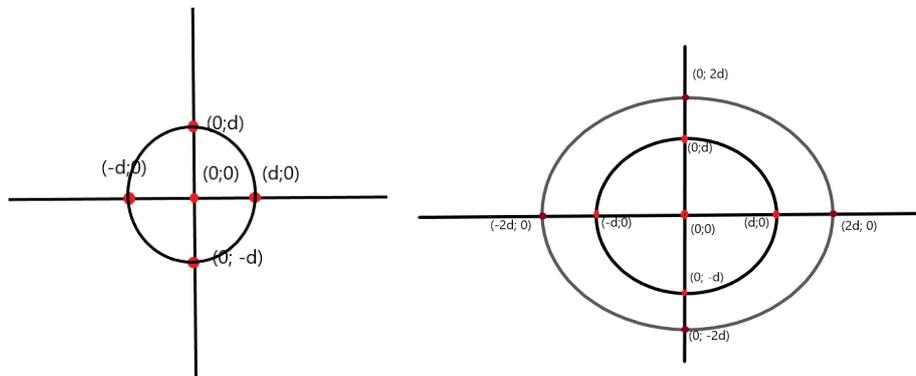


FIGURA 4.3: Distribución iluminancia de los modelos de red.

de círculos concéntricos se hará un estudio detallado sobre cada modelo de forma independiente. En las Figuras 4.4(a) y 4.4(b) es posible observar de forma gráfica el diseño de modelo planteado.



(a) Modelo circular de referencia.
*Esquema tomado de la referencia
(Dragomir, Dragomir, and Pantelimon,
2014)

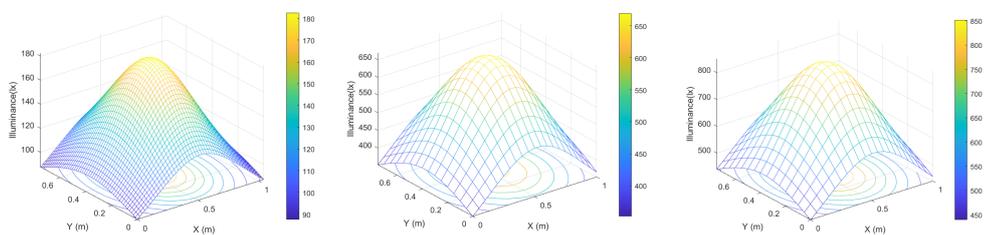
(b) Modelo circular modificado.

FIGURA 4.4: Modelos de iluminación circulares.

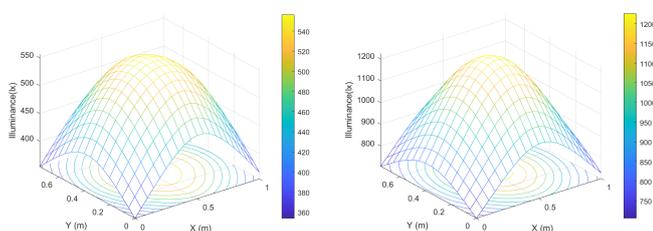
La distribución de la iluminancia se irá enseñando a continuación de forma progresiva. En primer lugar se mostrará como se distribuye en la iluminancia en el punto central y, después, cómo lo hace en cada uno de los círculos con los LEDs a una distancia determinada.

En la Figura 4.5(a) se puede observar que el LED central, a una distancia de 35 cm de la superficie a iluminar, con un ángulo $\theta=30$, el valor máximo de iluminancia en el centro es de 749.5490 lx. De la misma forma, en la Figura 4.5(b) se muestra solo la distribución de la iluminancia del primer círculo concéntrico; con un valor medio de 507.7590 lx. En conjunto, el LED central y el primer círculo alcanzan un valor medio de 637.4932 lx (distribución correspondiente al modelo circular tomado de referencia). La Figura 4.5(d) representa cómo se distribuye la iluminancia sólo con los LEDs del círculo exterior como fuente de luz, tomando un valor medio de 474.8101 lx. Por último, la Figura 4.5(e) representa la distribución de la iluminancia del LED central,

el círculo interior y exterior; alcanzando con esta estructura de iluminación un valor medio de 1.1123×10^3 lx.



(a) Distribución iluminancia LED central. (b) Distribución iluminancia del círculo interior. (c) Distribución iluminancia del LED central y círculo interior.



(d) Distribución iluminancia círculo exterior. (e) Distribución iluminancia del LED central, círculo interior y exterior.

FIGURA 4.5: Distribución iluminancia modelo de círculos concéntricos.

Utilizando todos los datos de la iluminancia obtenidos a lo largo de este proceso para cada modelo y aplicando la ecuación 3.12, se resumirá en la Tabla 4.1 la equivalencia en la unidad radiométrica de interés correspondiente, la irradiancia.

TABLA 4.1: Equivalencia de valores entre la iluminancia e irradiancia de los modelos de fototerapia.

	Iluminancia (lux)	Irradiancia ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)
Modelo de red	1.1067×10^3	2891
LED central	141.5240	369
Modelo círculos concéntricos	Círculo interior 507.7590	1326.43
Círculo exterior	474.8101	1240.36
LED central		
Círculo interior	1.1123×10^3	2905.69
Círculo exterior		

Musicoterapia Para poder conseguir la reproducción musical utilizando Arduino, se ha utilizado un DFP Player mini. Este dispositivo se encuentra entre los mejores en cuanto a calidad de reproducción de sonido. El DFP Player es capaz de reconocer archivos con extensiones .mp3 y .Waw, es controlable desde un microcontrolador y la conexión a un amplificador no implica la pérdida de calidad de audio. La memoria del dispositivo soporta 100 carpetas, con hasta 255 canciones en cada una. Para inicializar el funcionamiento de este dispositivo en el prototipo, se han guardado

en una carpeta un número total de 10 canciones clásicas de autores como Mozart, Haydn o Beethoven.

Este dispositivo tiene un nivel de intensidad sonora máximo de 90 dB, por lo tanto, al superar los 60 dB permitidos por el sistema vestibular del neonato, ha sido necesario establecer un control a través del microcontrolador. Este control permite que la música se pueda reproducir por debajo de esta intensidad sonora pero nunca por encima. Además, el dispositivo permite ajustar los niveles de sonido hasta en 30 niveles diferentes, hecho que supone una ventaja muy grande para poder regular de la forma más adecuada posible la melodía reproducida.

Como cada incubadora tendrá un dispositivo DFPlayer independiente, esto permitirá que cada prematuro sea tratado con una terapia musical personalizada e individualizada, hecho óptimo para conseguir reducir la estancia del neonato en la UCIN, mejorar la succión de leche, mitigación del dolor o recuperación de procesos dolorosos o estresantes, como puede ser la extracción sanguínea para el control de la hiperbilirrubinemia u otra patología. En el momento de la aplicación de la terapia musical, será importante que la persona encargada del cuidado de los neonatos, observe como reacciona cada prematuro ante la melodía reproducida para poder determinar cuál o cuáles son las más óptimas y cuáles causan comportamientos negativos en el neonato.

4.2 **Discusión**

La idea principal de cada modelo, es permitir que cada uno se adapte a la necesidad de cada prematuro, individualizando así la terapia. Como se ha explicado en el Capítulo 1, a cada niño se le realizan los análisis necesarios para poder conocer que tan altos son los niveles de bilirrubina en sangre. Según el resultado obtenido, el médico será el responsable de decidir si será necesario la aplicación de tratamiento o no y, en caso positivo, decidirá también cuál será el tiempo de aplicación y en qué intensidad.

Como se puede observar en la Tabla 4.1 donde se recogen los valores de irradiancia de cada modelo, tan solo utilizando el LED central supera ya los $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ que exige la terapia de luz para tener eficacia y poder obtener algún resultado en el prematuro. A partir de este resultado, las demás configuraciones de LEDs han sido validadas y por tanto los modelos aquí propuestos cumplirían con el objetivo de la aplicación final.

Para la construcción del prototipo se elegirá el modelo de fototerapia en red, que proporciona una irradiancia de $2891 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. La elección se ha realizado teniendo en cuenta el control que se podría realizar sobre los LEDs según la necesidad de cada neonato. En este caso, el hecho de tener 4 columnas de LEDs permitiría que se

puedan encender, por ejemplo, 2 filas de LEDs para neonatos con hiperbilirrubinemia leve, asegurando el recubrimiento total de la superficie corporal del neonato. Y de la misma forma, para los neonatos con hiperbilirrubinemia severa, se encenderían todos los LEDs del modelo para acelerar así el proceso de recuperación.

4.2.1 Presupuesto para el desarrollo del prototipo

Para poder desarrollar el prototipo ideado y diseñado, ha sido necesaria la compra tanto materiales como la madera, para conseguir la estructura de la incubadora, como de la instrumentación electrónica para poder medir y controlar las variables de interés.

TABLA 4.2: Presupuesto de los dispositivos electrónicos usados en el prototipo final.

	Precio de mercado (€)
Dispositivo electrónico	
Arduino UNO	18.73
Sensor DHT22	8.29
Ventilador 12V	12
LCD	6.49
Calentador	
LEDs	7.95
DFPlayer Mini	7.49
Altavoz	
Tarjeta Micro SD	8
Material para la construcción	
Madera	6.49
Tratamiento impermeabilizante	5.99
Poliestireno	4.99
PRESUPUESTO FINAL	86.42

Muchos de los productos adquiridos es posible encontrarlos en diferentes puntos de venta, online o en tiendas físicas, y con un precio de venta diferente. En la Tabla 4.2 se detalla el precio de adquisición tanto para el material utilizado para la construcción de la estructura del prototipo, como para la instrumentación característica de este tipo de dispositivos médicos.

Las características de cada uno de los dispositivos electrónicos utilizados se pueden consultar en el Anexo B. Para cada uno de estos dispositivos electrónicos ha sido necesario implementar unas líneas de código que permita establecer un control sobre ellos y/o obtener algún dato necesario. Así pues, en el Anexo D se puede consultar la implementación del código con Arduino.

Capítulo 5

Conclusiones

En conclusión, analicemos la forma en la que se han cumplido los objetivos planteados en el Capítulo 2, apartado 2.2, para poder obtener el prototipo de incubadora deseado.

- He desarrollado un diseño de un prototipo inicial de incubadora con un patrón diferente en la aplicación de la fototerapia. Las luces LEDs utilizadas se encuentran situadas en el caparazón exterior de la incubadora que actúa a su vez como base para hacer posible la colocación de las luces en la disposición deseada y simula el doble recubrimiento necesario para evitar cambios bruscos de temperatura en el habitáculo interior de la incubadora.
- Se realizó un conjunto de simulaciones para el modelo de red con 8 y 12 LEDs y para el modelo de círculos con 5 y 9 LEDs. Para estos dos modelos se calculó cuál era la distribución de la iluminancia. En ambos modelos se obtuvo un nivel de irradiancia superior al mínimo necesario para que la fototerapia sea eficaz, así que, cualquiera de los dos hubiese sido óptimo para ser utilizado en el prototipo. Finalmente se escogió el modelo de red por tener un número mayor de LEDs. El factor de número de LEDs activos en la terapia es fundamental para ayudar al neonato a recuperarse de forma más temprana de la patología presente, la hiperbilirrubinemia. Es decir, si el neonato tiene niveles muy altos de Bb en sangre y necesita una FT intensiva, será necesario tener en funcionamiento todos los LEDs. Pero, si por el contrario presenta una ictericia neonatal severa, se pueden utilizar la mitad de las luces.
- El punto anterior comentado presenta una característica muy ventajosa del dispositivo. Además de ser los LEDs caracterizados por su bajo consumo y alta durabilidad, este sistema permitirá reducir aun más el consumo energético. Esto hace posible que la utilización de este dispositivo sea más económica, y por lo tanto, será un factor decisivo para la adquisición de la incubadora neonatal por parte de países en vías de desarrollo. De esta forma, los neonatos que los necesiten podrán ser tratados de forma adecuada, sin perder efectividad y llegando a reducir así, la tasa de mortalidad y morbilidad por dicha enfermedad.

- En lo que a la musicoterapia se refiere, ha sido posible hallar un sistema que permite la reproducción de melodías a través del microcontrolador con el cual se controlan todos los sistemas propios de la incubadora y la parte de fototerapia. Al ser un módulo de dimensiones reducidas y con un nivel de intensidad máxima de reproducción que es posible limitar, proporciona la oportunidad de que cada incubadora tenga un sistema de reproducción de melodías independiente. Esto hace que la terapia musical se puede aplicar para cada neonato de forma individualizada y con una melodía diferente, ayudando así al prematuro en el proceso de recuperación y desarrollo cognitivo.

Como conclusión general, se han conseguido los objetivos principales de diseñar un dispositivo neonatal con una sistema de fototerapia diferente al convencional y a su vez, con los instrumentos necesarios para que sea posible utilizar con el neonato la musicoterapia.

Perspectivas futuras

Para la construcción de esta propuesta a escala real para con la finalidad de ser aplicada en el ámbito de la neonatología y cumplir los objetivos planteados, se ha de considerar lo siguiente:

- Realizar un estudio y simulación de un modelo de fototerapia en forma de media luna y estudiar las diferencias con el modelo de red utilizado.
- De la misma forma que se han encontrado experiencias previas del uso de madera para la construcción de este dispositivo neonatal, investigar sobre otros materiales sustentables que puedan utilizarse en este tipo de desarrollos y que a su vez sean competitivos en precio.
- Añadir teclado de membrana en el prototipo para que el usuario pueda introducir directamente la edad gestacional del neonato y que, al igual que ahora, a partir del dato introducido, la programación realizada establezca unos límites mínimos y máximos de humedad relativa del habitáculo.
- Estudiar el comportamiento de cada neonato ante la reproducción de las melodías seleccionadas, para poder conocer de forma más profunda cuáles son las canciones que ayudan en el tratamiento del prematuro. Además, de estudiar también, cuál es la intensidad sonora más adecuada para la reproducción melódica.
- Diseñar un nuevo modelo 3D para tener en cuenta el aspecto estético de la incubadora.

Estas propuestas, junto con las características del prototipo actual, harían del dispositivo final, uno de mayor calidad, más eficiente y óptimo.

Bibliografía

- Aceves, Itzel (2014). *Desarrollo prenatal del cerebro*.
- AEMET (2018). *Glosario: Radiancia - Definición*.
- Allen, Kimberly A (2013). "Music Therapy in the NICU : Is there Evidence to support". In: *Advances in neonatal care : official journal of the National Association of Neonatal Nurses* 13.5, pp. 1–7. DOI: 10.1097/ANC.0b013e3182a0278b.Music.
- Ashley L Hodges and Lynda Law Wilson (2010). *Effects of music therapy on preterm infants in the neonatal intensive care unit - PubMed*.
- Barcelona LED (2018). *Características y Ventajas de los Diodos LED*.
- Bhutani, Vinod K. et al. (2011). *The Need to Implement Effective Phototherapy in Resource-Constrained Settings*. DOI: 10.1053/j.semperi.2011.02.015.
- Borden, Amy R. et al. (2018). "Variation in the Phototherapy Practices and Irradiance of Devices in a Major Metropolitan Area". In: *Neonatology* 113.3, pp. 269–274. ISSN: 16617819. DOI: 10.1159/000485369.
- Bottomley, Cecilia and Tom Bourne (2009). "Dating and growth in the first trimester". In: *Best Practice and Research: Clinical Obstetrics and Gynaecology* 23.4, pp. 439–452. ISSN: 15216934. DOI: 10.1016/j.bpobgyn.2009.01.011.
- Brito, Carla Alonso (2020). "Musicoterapia en cuidado paliativos: manejo enfermero en la sintomatología y bienestar psicológico." PhD thesis. UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA/SEDE TENERIFE.
- Bruscia, Kenneth E. (2014). *Defining Music Therapy*. Ed. by 2014 Barcelona Publishers. 3, ilustra, p. 387. ISBN: 1937440575, 9781937440572.
- Bustamante Campoverde, Jaime Antonio and Andrés Josué Cevallos Larrea (2013). "Diseño e implementación de un prototipo de incubadora en cumplimiento con la norma UNE-EN 60601-2-19". PhD thesis. Cuenca: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA.
- Calle Albert, Ignacio (2014). *La figura de la mujer en la historia de la musicoterapia*, p. 228. ISBN: 978-84-15698-80-7.
- (2017). *Historia de la musicoterapia. Desde la antigüedad hasta el prerromanticismo. Terapia musical*.
- Capdevila, Reina (2008). "Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona: Conductes musicals dels infants 0-3. Anàlisi i validació d'una pauta d'observació." PhD thesis. Barcelona: Universitat de Barcelona. ISBN: 9788469223116.
- Carreras, Noelia Oneca (2014). "Musicoterapia: fundamentos, aspectos prácticos y aplicación a niños hospitalizados". PhD thesis. Universidad de Navarra.

- Chattás, Lic Guillermina (2016). "Cuidados al recién nacido en luminoterapia". In: *Revista de Enfermería*.
- Cifuentes Recondo, Javier (2006). "Ictericia en el recién nacido". In: *Medwave* 6.5. ISSN: 0717-6384. DOI: 10.5867/medwave.2006.05.1984.
- Clara Aurora Zamora-Jiménez et al. (2011). "Control térmico en el recién nacido pretérmino". In: *Perinatología y Reproducción Humana*.
- Clínica Universidad de Navarra (2020). *Bilirrubina e Ictericia. Prueba diagnóstica*.
- Construir con Madera (2020). *Tablero contrachapado. Características, tipos y usos*.
- Cool, Simon et al. (2015). "Development of a high irradiance LED configuration for small field of view motion estimation of fertilizer particles". In: *Sensors (Switzerland)* 15.11, pp. 28627–28645. ISSN: 14248220. DOI: 10.3390/s151128627.
- Cortés Campos, Marta (2015). "Efectos de la musicoterapia durante el embarazo y el parto TT - Efectos of music therapy during pregnancy and labor". In: *Metas enferm* 18.8, pp. 56–61. ISSN: 11387262.
- Dräger Safety Hispania S.A. (2021). *Isolette® 8000*.
- Dragomir, Radu Bogdan, Radu Dragomir, and Brândușa Pantelimon (2014). "Irradiance model and simulation of a lighting led system." In: *U.P.B. Sci. Bull., Series C* 76. ISSN: 2286-3540.
- Ebbesen, Finn et al. (2016). "Effect of phototherapy with turquoise vs. blue LED light of equal irradiance in jaundiced neonates". In: *Pediatric Research* 79.2, pp. 308–312. ISSN: 15300447. DOI: 10.1038/pr.2015.209.
- El desarrollo del cerebro del bebé durante el embarazo | Embarazo* (2016).
- Escribano Cobalea, M. et al. (2020). "Morbidity and mortality associated with preterm birth and its relationship with the use of corticosteroids and magnesium sulphate". In: *Clinica e Investigacion en Ginecologia y Obstetricia*. ISSN: 15789349. DOI: 10.1016/j.gine.2020.08.003.
- Food and Drugs Administration, U.S Department of Health and Human Services, and Center for Devices and Radiological Health (1998). "Neonatal and Neonatal Transport Incubators - Premarket Notifications - Guidance for Industry and FDA Reviewers/Staff". In.
- Gómez Gallego, M. and J. Gómez García (2017). "Musicoterapia en la enfermedad de Alzheimer: efectos cognitivos, psicológicos y conductuales". In: *Neurologia* 32.5, pp. 300–308. ISSN: 15781968. DOI: 10.1016/j.nr1.2015.12.003.
- Gómez González, Emilio (2006). *Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría*. Tech. rep. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- González-Valcárcel Espinosa, M, R C Raynero Mellado, and S M Caballero Martín (2019). "Ictericia neonatal". In: *Pediatr Integral* XXIII.3, pp. 147–153.
- Greemap (2021). *Propiedades de la madera*.
- Hernández, Guillermo Alexander Acevedo et al. (2017). "Sistema e-Salud para el monitoreo de un prototipo de incubadora neonatal". In: *Ciencia e Ingeniería* 38.2, pp. 107–112. ISSN: 2244-8780.

- Hospital Clínico San Borja Arrián (2018). *Guías de Práctica - Clínica en Pediatría*. Ed. by Francisco Barrera Quezada. VII. Santiago de Chile, pp. 139–143.
- Hospital San Pedro (2019). *El Hospital San Pedro renueva la dotación completa de incubadoras de la Unidad de Neonatal con equipos que benefician el desarrollo del bebé*.
- Instituto Mexicano del Seguro Social (2019). *Diagnóstico y Tratamiento de la Ictericia Neonatal*. Tech. rep. México.
- Kanduri, Chakravarthi et al. (2015). “The effect of listening to music on human transcriptome”. In: *PeerJ* 3, e830. ISSN: 21678359. DOI: [10.7717/peerj.830](https://doi.org/10.7717/peerj.830).
- Konica Minolta Sensing (2006). *Luminancia vs. Iluminancia*. (Visited on 05/10/2021).
- Laboratorio de tecnología del color de BenQ (2019). *¿Qué es la gama de colores? | BenQ España*.
- Lerner, Jodi P. (2004). *Fetal growth and well-being*. DOI: [10.1016/S0889-8545\(03\)00121-9](https://doi.org/10.1016/S0889-8545(03)00121-9).
- Loewy, Joanne et al. (2013). “The effects of music therapy on vital signs, feeding, and sleep in premature infants”. In: *Pediatrics* 131.5, pp. 902–918. ISSN: 00314005. DOI: [10.1542/peds.2012-1367](https://doi.org/10.1542/peds.2012-1367).
- Maitre, Nathalie L. and Shmuel Arnon (2020). “Music therapy for neonatal stress and pain—music to our ears”. In: *Journal of Perinatology*. ISSN: 14765543. DOI: [10.1038/s41372-020-00838-1](https://doi.org/10.1038/s41372-020-00838-1).
- Mas, María José (2014). *Lesiones cerebrales en el prematuro*.
- (2016). *Neurodesarrollo: del embarazo a los 3 años*.
- Mayoclinic (2018). *Nacimiento prematuro - Síntomas y causas - Mayo Clinic*.
- médica, MedlinePlus enciclopedia (2019). *Ventilador mecánico en bebés*.
- MedicalExpo (2021). *Incubadora neonatal con ruedas*.
- Menárguez, María Luisa Sánchez (2015). “Musicoterapia en la enfermedad de Parkinson”. PhD thesis. Universidad Católica de Murcia, pp. 22–29.
- Mendoza Tascón, Luis Alfonso et al. (2016). “Epidemiology of prematurity, its determinants and prevention of preterm birth”. In: *Revista Chilena de Obstetricia y Ginecología* 81.4, pp. 330–342. ISSN: 07177526. DOI: [10.4067/S0717-75262016000400012](https://doi.org/10.4067/S0717-75262016000400012).
- Montealegre, Adriana et al. (2020). “Effectiveness and safety of two phototherapy devices for the humanised management of neonatal jaundice”. In: *Anales de Pediatría* 92.2, pp. 79–87. ISSN: 16959531. DOI: [10.1016/j.anpedi.2019.02.008](https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2019.02.008).
- Montiel López, Mónica et al. (2015). “La musicoterapia en neonatos como herramienta terapéutica”. In.
- Moreira, Isabel et al. (2020). “Efectos a corto plazo de las intrusiones de polvo sahariano en las variables adversas al nacimiento en España”. In: *Revista de Salud Ambiental* 20.2, pp. 109–118. ISSN: 1577-9572.
- Mugruza-Vassallo, C. A., C. B. Castellón-Lévano, and H. Román-Linares (2018). “Mechanical ventilation embedded in neonatal incubator”. In: *Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica* 39.2, pp. 165–181. ISSN: 01889532. DOI: [10.17488/RMIB.39.2.3](https://doi.org/10.17488/RMIB.39.2.3).
- Neil Kaneshiro (2019). *Edad gestacional: MedlinePlus enciclopedia médica*.

- Neira, Cristóbal (2011). *Musicoterapia: La música como terapia desde la 2da mitad del s.XIX*.
- Nguyen, H Q et al. (2010). *A MATLAB-based simulation program for indoor visible light communication system*. Tech. rep.
- Olusanya, Bolajoko O, Michael Kaplan, and Thor W R Hansen (2018). "Epidemiología de la ictericia neonatal y manejo de la hiperbilirrubinemia severa". In: *In-tramed*.
- Orfel, José Luis (2005). "Ictericia en el recién nacido III: tratamiento y discusión". In: *Medwave* 5.7. ISSN: 0717-6384. DOI: 10.5867/medwave.2005.07.2391.
- Ortuño, Manuel et al. (2016). "Iluminando con LEDs". In: *Revista Española de Física*. ISSN: 0213-862X.
- Ossorio Martínez, Rosa María et al. (2011). *Protocolo de fototerapia en el neonato*. Tech. rep.
- Philbin, M. Kathleen (2000). "The Influence of Auditory Experience on the Behavior of Preterm Newborns". In: *Journal of Perinatology* 20, S77–S87. ISSN: 14765543. DOI: 10.1038/sj.jp.7200453.
- Pro Rent (2018). *Incubadora neonatal*.
- Rellán Rodríguez, S., C. García de Ribera, and M. Paz Aragón García (2008). "El recién nacido prematuro." In: *Prensa médica argentina* 40.38, pp. 2532–2537. ISSN: 0032745X.
- Restrepo Pérez, Laura et al. (2007). "Prototipo de incubadora neonatal". In: *Revista Ingeniería Biomédica* 1.1, pp. 55–59. ISSN: 1909-9762. DOI: 10.24050/19099762.n1.2007.20.
- Ríos M., Gloria (2002). "Síndrome icterico del primer trimestre". In: *Revista chilena de pediatría* 73.4, pp. 399–401. ISSN: 0370-4106. DOI: 10.4067/s0370-41062002000400013.
- Rocha, Hernán Vásquez (2011). "La música como asunto de Estado: la relación Esterházy-Haydn". In: *Punto Cero* 16.22, pp. 9–17. ISSN: 1815-0276.
- Sola, A., L. Chow, and M. Rogido (2005). "Retinopathy of prematurity and oxygen therapy: A changing relationship". In: *Anales de Pediatría* 62.1, pp. 48–63. ISSN: 16954033. DOI: 10.1157/13070182.
- SRM Institute of Science and Technology (2009). "Infant Incubator". In: *Biomedical Safety & Standards* 39.15, p. 118. ISSN: 1080-9775. DOI: 10.1097/01.bmsas.0000359429.56164.94.
- Stickler, Tracy (2020). *What Happens During the Trimesters of Pregnancy?*
- STOKOWSKI, LAURA A. (2006). "FUNDAMENTALS OF PHOTOTHERAPY FOR NEONATAL JAUNDICE". In: *Advances in Neonatal Care* 6.6, pp. 303–312. ISSN: 1536-0903. DOI: 10.1016/j.adnc.2006.08.004.
- Tafari, Johannella (2006). *¿Se nace musical? Cómo promover las aptitudes musicales de los niños*. Ed. by Graó. Barcelona. ISBN: 84-7827-463-4.
- Thoppil, Dhanya Ann (2012). "LED Bulbs Help India Treat Infant Jaundice". In: *The Wall Street Journal*.
- United Nations (2017). *SDG Indicators*.

- Velasco Conde, Susana (2016). "Musicoterapia Con Neonatos Prematuros En La Unidad De Cuidados Intensivos Neonatales". In: pp. 18–21.
- Verónica, R. Martínez et al. (2015). "Musicoterapia en una Unidad de Cuidados Intensivos Neonatales: experiencia benéfica para el binomio". In: *Perinatología y Reproducción Humana* 29.3, pp. 95–98. ISSN: 01875337. DOI: 10.1016/j.rprh.2015.12.002.
- Wallis, Laura (2013). *The power of the lullaby*. DOI: 10.1097/01.naj.0000431902.81613.ff.
- Weithöner, Frank (2020). *Frank's Infant Incubators*.
- WFMT (2011). *¿Qué es la musicoterapia?*
- Woodgate, Paul and Luke Anthony Jardine (2015). *Neonatal jaundice: phototherapy*.
- Yildiz, Aynur and Duygu Arikan (2012). "The effects of giving pacifiers to premature infants and making them listen to lullabies on their transition period for total oral feeding and sucking success". In: *Journal of Clinical Nursing* 21.5-6, pp. 644–656. ISSN: 09621067. DOI: 10.1111/j.1365-2702.2010.03634.x.
- Zamora-Pasadas, Marta et al. (2009). "Percepciones de los padres y las madres de recién nacidos ingresados en una unidad de cuidados intensivos neonatales y su opinión sobre la hospitalización compartida". In: *Paraninfo Digital* 3.7, pp. 1–12. ISSN: 1988-3439. arXiv: NIHMS150003.

ANEXOS

Anexo A

Cuestionario sobre la hiperbilirrubinemia

Al inicio de la redacción de esta tesis, se elaboró un cuestionario sobre la hiperbilirrubinemia destinado a profesionales de la salud. Cuando se redactó el cuestionario, la idea principal fue establecer un pequeño contacto con sanitarios que trabajasen en su día a día con neonatos y hayan tratado esta patología. La información que proporcionaron los sanitarios, que pudieron responder este cuestionario, fue de vital importancia para poder esclarecer conceptos y tener una orientación sobre la información necesaria para llevar a cabo la tesis.

Cuando se compartía el cuestionario sobre la hiperbilirrubinemia, a su vez se compartía también un documento Documento de Presentación de la Intención y de la Protección de datos. En este documento se presentaba la finalidad para la que serían utilizadas las respuestas que fueran proporcionada y el compromiso de tratar los datos de los participante de acuerdo a la Ley de Protección de Datos de Carácter Personal.

En este Anexo, se muestran las preguntas que conformaban el cuestionario y las respuestas de los sanitarios.

A.1 Preguntas del cuestionario

1. A los niños a los que se les diagnóstica hiperbilirrubinemia, ¿sufren alguna alteración en su comportamiento?
2. En algún momento, por alguna causa en especial, ¿se ha utilizado algún tipo de luz diferente a la que se usa de forma habitual? Si la respuesta es afirmativa, ¿por qué?
3. En los niños que se ha utilizado la fototerapia, ¿se han observado efectos secundarios causados por este tratamiento?
4. La exposición a la luz solar una vez los niños se encuentran en casa, ¿sería un método preventivo para evitar el aumento de los niveles de bilirrubina y evitar aplicarles esta terapia?

5. ¿Existe algún tipo de variación de la patología según el sexo del neonato? Es decir, ¿puede que el sexo del bebé esté más relacionado con la patología?

A.2 Respuestas al cuestionario

Médico Harold Urbano

Cargo desempeñado: Médico Pediatra

Institución: Hospital Francisco de Paula Santander, Colombia

1. Ictericia neonatal es la manifestación clínica de la enfermedad. En la nomenclatura de las enfermedades, nos referimos a la hiperbilirrubinemia. Esta enfermedad se da cuando el valor de la bilirrubina en sangre del paciente está por encima de un percentil permitido para la edad en horas.

Para que la hiperbilirrubinemia comprometa el comportamiento del recién nacido, ocasione manifestaciones neurológicas visibles, detectables con exámenes paraclínicos y médicos, debería estar en un valor alto que atraviese la barrera hematoencefálica cerebral y lesiones estructuras cerebrales. Ese valor alto generalmente ronda por encima de los 20 mg/dl y es absolutamente confirmado el daño cerebral si el valor ronda por encima de los 30 mg/dl. Las alteraciones neurológicas ocasionadas por hiperbilirrubinemia extrema o severa en el caso de 30 mg/dl, van desde alteraciones en el comportamiento, irritabilidad, llanto incontrolable y si las cosas se deterioran el paciente puede presentar compromiso del sensorio, estupor, obnubilación, convulsiones, bradicardia, paro y muerte.

2. El hecho de haber legado actualmente a utilizar la luz utilizada para tratar la fototerapia ha sido el producto de investigaciones y resultados en la disminución del valor de la bilirrubina con la aplicación de la luz. La terapia actualmente utilizada para tratar la hiperbilirrubinemia basada en emisión de luz se llama fototerapia. Básicamente, desde que se empezó y desde que Kraber descubrió el efecto de la luz, se empezaron a intensificar los estudios hasta llegar al nivel óptimo actual que tenemos donde se descubrió que el espectro de luz adecuado para incidir sobre la molécula de bilirrubina es el espectro que se encuentra en el rango del verde azul, con longitudes de onda de 430-460 nm de longitud.

Anteriormente se utilizaban lámparas de luz blanca que tenían un espectro de onda muy amplio y podía ser que tenían algún efecto en la disminución de la bilirrubina, pero ese efecto no era tan notorio y visible como lo logramos con las lámparas actuales, que son lámparas más especializadas que le brindan al paciente un espectro de luz adecuado y sin la posibilidad de tantos efectos adversos. La bilirrubina en el cuerpo se presenta en varias formas: no conjugada o indirecta y conjugada o directa

3. Todas las intervenciones en medicina y sobre todo en pediatría y más aun en medicina neonatal no son inocuas. Las intervenciones tienen mucho que ver con sus efectos adversos y la idea es que uno coloque un tratamiento y que el tratamiento en el recién nacido sea lo más seguro posible y que cause los menos efectos adversos. El problema grande y tenaz de la medicina neonatal es que no tiene estudios realizados estrictamente aleatorizados y ensayados clínicamente en recién nacidos por razones éticas. No se puede probar en un recién nacido generalmente un tratamiento para ver si mejor o no y todos los estudios y los estudios terapéuticos de recién nacidos y niños pequeños son extrapolados de estudios de adultos.

En el caso de la fototerapia como bien se sabe no se utiliza fototerapia en adultos para nada y se usa en el recién nacidos para disminuir el valor de la bilirrubina sérica total. El objetivo final de ponerle fototerapia a un recién nacido es evitar que el recién nacido suba los niveles de bilirrubina sérica a un valor severo (20mg/dl) o a un valor extremo (30 mg/dl).

Exponer al niño a un rayo de luz constantemente podría traer efectos adversos y los efectos adversos, así como se ha mejorado el rayo de luz para ser más efectivos con resolución del cuadro también se ha mejorado el rayo de luz y los dispositivos de suministro de luz para ocasionar menos efectos adversos. Anteriormente cuando se colocaba a un recién nacido bajo lámpara de fototerapia, estas tenían la posibilidad de calentar mucho al recién nacido; lo exponían a una gran fuente de calor y los niños tenían efectos secundarios ocasionados por la exposición a la fuente de calor.

Cuando yo coloco un objeto, ese objeto puede perder calor y el calor hace perder agua insensible por 4 mecanismos. Los mecanismos por los cuales un cuerpo puede perder calor son: conducción, convección, radiación y sudoración. Todos esos mecanismos juntos van en contra y ayudan a que el niño pierda agua de su cuerpo en una forma que se llama insensible. Los cuerpiitos pierden agua de dos formas:

- Insensible. Agua que se pierde que no podemos contabilizar. El agua que se pierde por transpiración a nivel de la piel o que se pierde por la respiración del recién nacido.
- Sensible. Es la forma que nosotros podemos visualizar o podemos cuantificar (vómito, orina, la pérdida de saliva, pérdida de líquido por una fistula, la diarrea).

Entonces cuando los recién nacidos eran expuestos a lámparas de fototerapia que no tenían las técnicas actuales, esos recién nacidos eran expuestos también a calor y el calor generaba una pérdida de agua insensible por el espectro electromagnético. Entonces es como que el niño se deshidrata por la exposición a los rayos de luz y el resultado que producían era que se calentaba el cuerpo y se evaporaba el agua del cuerpo.

Hoy día con la tecnificación del procedimiento, con el empleo de lámparas LED que ya no se calientan, con el empleo de acrílicos protectores sobre las lámparas LED pues ya no hay un calentamiento por debajo de la lámpara y el niño prácticamente no tiene incremento de pérdida de agua insensible. Anteriormente para compensar este efecto de las lámparas de fototerapia lo que hacíamos era colocar a los niños líquidos endovenosos para mantenerlos hidratados; hoy en día no es una indicación que un recién nacido que este expuesto al rayo de fototerapia tenga que tener líquidos por que la perdida por calor de agua insensible no va a ser mucha.

El segundo efecto puede ser la aparición de brotes, ras, erupciones en la piel como una respuesta de la piel del niño a la exposición del rayo luminoso, pero esto es inherente a cada cuerpito y cada cuerpito de cada paciente lo da como lo quiera dar.

El otro efecto es la irritabilidad refleja, ósea, un recién nacido que está bajo una lampara de fototerapia metido en esa lampara, la indicación del médico es colocar la paciente bajo esa lámpara y solamente sacar la paciente para alimentarlo. Entonces, finalmente, ese recién nacido queda expuesto a esa luz todas las 24 horas y esta recibiendo estimulación visual continua, constante y es como si para el todo el día fuera día; es por eso que colocamos unas gafas protectoras de tonalidad oscura para que el rayo no pase y no perturbe al recién nacido. No hay ningún estudio hasta ahora de oftalmología que demuestre que el rayo de luz lesiona los conos y bastones de la retina pero como no hay ningún estudio que lo demuestre tampoco se puede asumir que no lo ocasione; es por tal motivo que cuando exponemos el recién nacido a los rayos de luz de fototerapia debemos brindarles obligatoriamente protección ocular porque la protección ocular nos garantiza que al menos no va a haber irritabilidad por el estímulo visual constante o lo que no se sabe, si o no hay lesiones de conos y bastones pero hay ningún estudio que demuestre ceguera por exposición a rayos de fototerapia.

Y, otro efecto adverso más indeseable es el que se llama el Síndrome del Niño Bronceado. Este síndrome consiste en una coloración plomiza, cobriza, gris, fea, espantosa que toma el recién nacido que está sometido a lámparas de fototerapia, pero esto se presenta cuando la bilirrubina predominante en el niño es la bilirrubina directa o conjugada. Nosotros colocamos fototerapia para bajar el nivel de la bilirrubina no conjugada o indirecta porque es la que nos puede lesionar el cerebro. Cuando un recién nacido está icterico a extensas de esa bilirrubina conjugada el tratamiento es otro diferente a la fototerapia. Cuando erróneamente se coloca fototerapia a un paciente que tiene incremento de la bilirrubina conjugada ese resultado podría ser nefasto porque podría tener como efecto adverso el Síndrome del Niño Bronceado, que no es para nada un bronceado parecido o idéntico al de la playa; es un bronceado patológico.

Y, otro efecto adverso podría ser la aparición de diarrea. El recién nacido expuesto a fototerapia podría tener incremento en la motilidad intestinal y como resultado de eso aumentar la frecuencia de deposiciones diarreicas lo cual podría llevar a deshidratación y eso tendría que tenernos a nosotros en alerta por la posibilidad de que el paciente tenga más complicaciones hidroelectrolíticas.

Los recién nacidos son propensos a tener niveles elevados de bilirrubina no conjugada o indirecta porque están en una etapa transicional donde todavía no pueden cumplir la función de conjugación de la bilirrubina por el hígado por que las enzimas hepáticas no están adecuadamente maduras y a medida que van pasando los días esa encima va madurando y va convirtiendo la bilirrubina no conjugada en bilirrubina conjugada.

La diferencia entre la bilirrubina no conjugada y la bilirrubina conjugada estrictamente es su carácter lipofílico. La bilirrubina no conjugada se une a la grasa y la bilirrubina conjugada se une al agua. El hígado se encarga de conjuguar la bilirrubina, la vuelve excretable por todos los canalículos donde haya agua y es así como la bilirrubina puede salir excretada del cuerpo a través de las heces, la orina y de todos los sitios donde haya agua. El recién nacido por estar en una etapa transicional se demora mucho en madurar estos mecanismos y es casi mandatorio que esté amarillo, pero esto no debe pasar por más de tres semanas o subir a un nivel mayor de 12mg/dl.

La función de la luz de fototerapia es incidir la molécula en la superficie de la piel aprovechando que la bilirrubina sale a la circulación dérmica y la onda de luz incide la molécula y le ocasiona cambios químicos y configuracionales. Los cambios químicos básicamente son la fotoisomerización, la fotoconfiguración y la fotooxidación. Gracias a estas reacciones que se presentan en la molécula ella puede hacer un "conjugación" dérmica y pasarse el paso hepático porque el recién nacido tiene muy congestionado el paso hepático (está lleno de bilirrubina y se atrasa en la conjugación).

Entonces la fototerapia lo que le hace es saltar el paso hepático y realizar la conjugación de la bilirrubina en la piel. Allí es donde es importante tener una adecuada exposición de la luz; adecuada exposición de una superficie adecuada del cuerpo. Es por esto que los recién nacidos deben estar en cunas completamente desvestidos con el pañal y con unas gafas fotoprotectoras de los rayos de luz para los ojitos. Esa superficie grande de exposición a la luz hace que se conjugue bastante la bilirrubina y pueda ser excretada.

Por el contrario, si no es excretada esta bilirrubina se quedaría en la forma no conjugada, se pegaría en las grasas y sería muy fácil que penetre en el cerebro y lesione las estructuras cerebrales. Otra desventaja que tiene el recién nacido es que en la sangre no tiene los mismos niveles de albumina sérica que tenemos

los adultos y los niños mayores. La albumina es la que se encarga de transportar en la sangre la bilirrubina; esta bilirrubina al no tener donde unirse a la albúmina no le queda otra alternativa que meterse en el cerebro y provocar daños cerebrales.

A medida que ha ido evolucionando la investigación, se ha llegado a optimizar mucho la fototerapia como un mecanismo de protección cerebral para el bebé. Se introduce a un niño a fototerapia con el único y exclusivo motivo de evitar que el niño tenga daño cerebral por hiperbilirrubinemia; a ese daño cerebral se le llama encefalopatía aguda. Y lo que se consigue con la fototerapia es bajar gradualmente los valores de bilirrubina en sangre porque la encefalopatía depende de la cantidad de mg de bilirrubina que haya en sangre y sobre todo de la forma como esta bilirrubina se incrementa progresivamente en el tiempo. Ósea que un niño que está icterico a la 10 de la mañana con 5 mg de bilirrubina y a las 12 de la noche con 20 mg de bilirrubina tiene una seria posibilidad de sufrir daño hepático.

Lo que se ha tratado con la investigación es conseguir un rayo de luz óptimo y se ha descubierto que el rayo de luz óptimo es el verde azul, pero antes se utilizaban rayos blancos que eran lámparas de luz blanca, después a lámparas de luz halogenadas y ahora en la era moderna, tenemos lámparas de fototerapia con bombillo del que no calientan al paciente mucho y no le hacen perder agua de forma insensible y aparte también hay acrílicos protectores que hacen que el recién nacido este confortable debajo de la lampara de la fototerapia, no reciba tanto calor y no se abochorne y pierda agua insensible por la exposición al calor. Esto ha ido cambiando y se ha llegado a la optimización de la exposición haciendo que el niño tenga mas superficie expuesta o logrando más cantidad de mV/cm^2 de piel expuesta colocándole una segunda lámpara o también se esta utilizando actualmente la implementación de brazaletes de fibra óptica que dan el espectro de luz que se quiere para aumentar la exposición a la luz y además se están ideando la presencia colchonetas donde el paciente queda acostado y desde la base se emana luz verde azul para que todo esto en conjugación logre bajar mucho más el nivel de bilirrubina (polifototerapia).

Inicialmente se utilizó la luz solar por que se pensaba que los rayos de la luz solar tendían a disminuir el valor de la bilirrubina, pero hoy en día nos damos cuenta de que fue anecdótico porque ya esta plenamente documentado que el espectro de la longitud de onda del rayo solar es muy grande y no logra ocasionar un efecto valedero, efectivo y determinante en la disminución de los valores de bilirrubina. Por esto, no es bueno recomendarles a las madres que para evitar la ictericia progresiva en la piel y mucosas asoleen a los niños. Sino que, si les ven ictericos, y acudan rápidamente al médico para que este valore un examen de sangre y mire los niveles de bilirrubina para saber si hay que aplicar o no fototerapia.

4. No. No hay ningún estudio que demuestre que clínicamente que la exposición de los rayos de la luz solar disminuya de forma notoria y efectiva los niveles de bilirrubina sérica de tal forma que llegue a prevenirle la presencia de encefalopatía aguda por hiperbilirrubinemia. Las indicaciones de helioterapia son sobre todo anecdóticas y no son fundamentadas en estudios valederos clínicos aleatorizados. El rayo de luz solar es un rayo físicamente inadecuado porque la longitud de onda no es apropiada para incidir sobre la molécula de bilirrubina y se podría perder mucho tiempo precioso indicándole a la madre que asolee al niño cuando lo vea amarillo, porque la madre tendría la falsa percepción de que está haciendo algo bueno indicado por el médico. La exposición a luz de fototerapia tiene unas indicaciones precisas, unas indicaciones claras y su objetivo final es evitar que el paciente haga niveles tóxicos de bilirrubina (severa) que lo lleven a incrementar el riesgo de lesión cerebral. Cuando un recién nacido está icterico debe ser evaluado por un médico y ese médico debe determinar si esa ictericia es patológica o fisiológica. Si la ictericia es patológica y requiere tratamiento el médico lo debe evaluar en unas tablas publicadas en los estudios de ictericia neonatal por Bhutani donde determinados con el valor de bilirrubina de cada paciente la necesidad de fototerapia o no.

La indicación de asolear a un niño en casa más tiene que ver con todo el rito de atención, cuidados, manejo, baño y cuidados del recién nacido peor sobre todo a los recién nacidos se los debe exponer al sol en una frecuencia diaria de 1 o 2 veces al día con luz no tan calurosa (con sol no tan caluroso) para que niño no se quemee o no se caliente mucho con el único y explicito objetivo de que rayo de luz solar ayuda a metabolizar Vitamina D. Y esa sería una razón por la cual los recién nacidos sean expuestos a los rayos de luz solar para tener niveles adecuados de Vitamina D, tales así que los recién nacidos que viven en áreas del globo terráqueo donde no hay por tiempos prolongados exposición a los rayos de luz, como en los polos, deben recibir suplementación de Vitamina D a razón de 400 unidades internacionales diarias.

5. No hay ninguna asociación científicamente comprobada entre la presencia de hiperbilirrubinemia severa complicada por sexo, pero parece ser que estadísticamente es mas importante la presencia de hiperbilirrubinemia en el sexo masculino que en el sexo femenino con tendencia a complicarse un poquito más en el sexo femenino. Desde el punto de vista étnico, las complicaciones se deberían complicar más en pacientes denominados de raza amarilla, todos los pacientes que viven en la región asiática por distribución geográfica podrían tener una alteración genética que ocasiona el enlentecimiento de la enzima conjugadora de bilirrubina y ellos por herencia genética demográfica y geográfica debería tener mas posibilidad de hacer ictericia que un niño caucásico o afroamericano. Aquí las diferencias entre las razas sería la posibilidad de poder discernir si están amarillos o no. Es muy difícil en un paciente de raza

negra discriminar si está icterico o no por que la valoración se volvería subjetiva a la visión de cada observador. De tal forma que hay elementos como icterómetros, bilirrubinómetros y en su defecto la bilirrubina en la sangre para determinar si están amarillos o no. Los bilirrubinómetros son dispositivos de uso transdérmico que sensan la presencia de bilirrubina a través de la piel, pero no son tan efectivos en pacientes de raza negra porque los pacientes de raza negra tendrían cierta dificultad para poder sensarse el valor de la bilirrubina.

Enfermera Marina López

Cargo desempeñado: Enfermera pediatra

Institución: Hospital Calella, Barcelona

1. Sí, no en su totalidad pero hay casos en los que sí que se da. Estos cambios están relacionados con un aumento de la somnolencia, están más apáticos, más aletargados, les cuesta más hacer el reflejo de succión, algunos son hipotónicos. Son muchos de los rasgos que he observado pero estos son algunos de ellos.
2. Sí, la luz ultravioleta cuando los niveles son muy altos. Cuando la alteración es muy poca, se les pone en contacto con la luz solar.
3. En mi caso, no.
4. De hecho, cuando se van a casa porque han adquirido unos niveles normales de bilirrubina es lo que les recomendamos a los padres.
5. No me he fijado, pero creo que la afectación es la misma.

Anexo B

Software e instrumentación electrónica

Para poder completar tareas esenciales para conseguir el diseño final, ha sido necesario la utilización de software tanto de diseño, como programación o simulación. Programas de diseño para poder realizar el diseño 3D y recrear de una forma real cómo debía de ser el aspecto del prototipo. Software de programación para establecer un control de las variables de humedad, temperatura, ventilación o música, entre otras variables, a través de un microcontrolador. Programa de simulación para poder determinar qué modelo es el más óptimo para una terapia de luz eficaz.

Además de los programas comentados, también ha sido necesaria la utilización de instrumentos electrónicos para la obtención del diseño final. Por ejemplo, un sensor de temperatura y humedad que mida las variables de interés y un microcontrolador que actúe sobre ellas en cierto momento; un ventilador que ayude a tener el habitáculo del neonato lo más limpio posible o un módulo reproductor de música para poder aplicar la terapia musical. A continuación, se hará una explicación detallada la instrumentación electrónica y de los programas empleados.

B.1 Software de diseño

B.1.1 PTC Creo Parametric



Creo 6.0 Parametric es una herramienta CAD (Computer Aided Design) que proporciona las prestaciones necesarias para poder realizar diseños 3D y 2D de los productos de interés, de una forma eficiente y rentable. Además, una vez teniendo el diseño, permite realizar simulaciones y análisis del funcionamiento de este, para poder observar y entender como sería su funcionamiento en la realidad. La versión utilizada para realizar el diseño del prototipo fue la versión 6.0.

B.2 Software de programación

B.2.1 Arduino

Arduino es un software IDE (siglas en inglés de Integrated Development Environment) de código abierto que facilita la escritura y la carga de su código en cualquier placa Arduino, aunque también en placas de desarrollo de otros proveedores. Esta herramienta informática es una aplicación multiplataforma (posible trabajar con ella independientemente del sistema operativo con el que se ejecute el ordenador) y escrita en lenguaje de programación Java.



Al ser una herramienta informática de programación de código abierto, existe una gran facilidad para encontrar en blogs códigos que nos ayuden a entender cómo funciona este software. De la misma forma, existen un amplio número de librerías con las que se puede trabajar para poder desarrollar el código.

B.3 Software de simulación

B.3.1 Matlab R2020b

MATLAB[®] es un software utilizado para la resolución de problemas científicos e ingenieriles, principalmente. Este programa es utilizado para funciones de finanzas computacionales, robótica, procesamiento de señales o visión artificial entre algunas funciones principales.



La versión utilizada ha sido MATLAB[®]R2020b, la cual ha permitido el procesamiento de los datos de la distribución de la iluminancia en un entorno y su estudio a través de la obtención de gráficas integradas.

B.4 Instrumentación electrónica

B.4.1 Arduino UNO



FIGURA B.1: Placa Arduino UNO

Arduino UNO (Figura B.1) es una pequeña placa electrónica con un microcontrolador programable (Atmel ATmega328) desarrollada por Arduino[®]. Además del microcontrolador, esta placa contiene un conjunto de pines como entradas y salidas de las cuales se puede definir la acción deseada con el chip. Esta ha sido la placa

con la que se ha desarrollado el programa necesario para el prototipo de la incubadora.

Actualmente en el mercado existe una amplia variedad de placas electrónicas para poder realizar trabajos de programación. En concreto, el precio de mercado de esta placa fue de 18.73 €.

B.4.2 Sensor DHT22

El sensor DHT22 (Figura B.2) es un dispositivo digital que mide la humedad relativa y la temperatura del aire circundante (3.3.3). Si en el mercado actual, hay una amplia variedad de sensores que son capaces de medir estas variables, ¿por qué se ha escogido el DHT22?

En primer lugar, el modelo de sensor DHT22 tiene un resistencia pull-up, lo que proporciona una estabilidad en la señal de salida. Además, como se comenta en la Tabla 3.4 este sensor abarca perfectamente los valores entre los cuales pueden moverse las variables de temperatura y humedad relativa, en este caso.



FIGURA B.2: Sensor DHT22

Para algunas aplicaciones, es posible que el tiempo de muestreo cada 2 segundos sea un inconveniente, sin embargo, para esta aplicación la variable de tiempo no tiene ningún efecto negativo. En los parámetros de diseño del prototipo, se decidió medir los valores de humedad y temperatura cada 5 minutos, principalmente por que, en un ambiente cerrado, los cambios de temperatura y humedad no son tan bruscos para cambiar en períodos de tiempo tan cortos.

Además, este sensor ofrece valores que son muy precisos y tiene un funcionamiento muy compatible con el microcontrolador con el que se trabaja. El precio de compra de este sensor fue 8.29 €. De acuerdo con sus características y eficacia y teniendo en cuenta la gran variedad de sensores y precios existentes en el mercado, esta opción está considerada una de las asequibles.

B.4.3 Ventilador 12V

A pesar de las variaciones entre los diferentes modelos de incubadoras neonatales presentes en el mercado, como se comenta en el apartado 1.1.2 del Capítulo 1, existen una serie de componentes básicos en este tipo de dispositivo médico. Uno de estos componentes básicos es el ventilador, implementado con la finalidad de



FIGURA B.3: Ventilador empleado en el prototipo de la incubadora.

evitar que la incubadora se sobrecaliente y de impulsar el aire filtrado a través del ambiente interno de la incubadora.

En el prototipo de la incubadora, se ha utilizado un ventilador de un tamaño pequeño, de acuerdo con las dimensiones del diseño final. El ventilador es un modelo EE60251S1-1000U-999 con un voltaje DC de 12V (Figura B.3).

Como el ventilador es un dispositivo que se encarga principalmente de el impulso de aire filtrado a través del habitáculo del neonato, es constante. Por lo tanto, ha sido programado para que únicamente se apague cuando el dispositivo de cuidado neonatal deje de funcionar, por lo demás, funcionará sin excepción alguna.

Al igual que la mayoría de los dispositivos electrónicos que se han utilizado en este diseño, en el mercado existe una amplia variedad de ventiladores, múltiples tamaños y diferentes distribuidores. Una característica de este tipo de instrumentos, es que cuánto más pequeño es, más caro. Las dimensiones de este dispositivo son 60x25 mm y su precio de mercado 12 €.

B.4.4 Pantalla LCD



FIGURA B.4: Pantalla LCD

El precio de mercado de este dispositivo electrónico es de 6.49 €.

Una pantalla LCD, de su acrónimo en inglés Liquid Cristal Display, es una pantalla delgada y plana, que utiliza una cantidad muy pequeña de energía, encargada de mostrar, en este caso, los valores de las variables de humedad y temperatura. La pantalla LCD utilizada (Figura B.4), tiene la capacidad de enseñar 16 caracteres alfanuméricos en las dos filas disponibles (16x2). El precio de mercado de este dispositivo electrónico es de 6.49 €.

B.4.5 LEDs



FIGURA B.5: LEDs azules utilizados para el sistema de fototerapia.

Para la simulación del sistema de fototerapia en el prototipo, se ha utilizado una tira de LEDs azules de 5V (Figura B.5). La tira de LEDs utilizada permite colocar los cada uno de los LEDs de forma independiente, únicamente realizando una fuente de conexión a fuente de alimentación; esta característica ha permitido representar el modelo de fototerapia de la forma más exacta posible. La selección de este color ha sido por que, como se comentó en el Capítulo la Sección 3.3.3 del Capítulo 3, las luces con esta longitud de onda son absorbidas

Para la simulación del sistema de fototerapia en el prototipo, se ha utilizado una tira de LEDs azules de 5V (Figura B.5). La tira de LEDs utilizada permite colocar los cada uno de los LEDs de forma independiente, únicamente realizando una fuente de conexión a fuente de alimentación; esta característica ha permitido representar el modelo de fototerapia de la forma más exacta posible. La selección de este color ha sido por que, como se comentó en el Capítulo la Sección 3.3.3 del Capítulo 3, las luces con esta longitud de onda son absorbidas

mejor por la piel consiguiendo así romper las moléculas de BNC para que pueda ser eliminada por el cuerpo del prematuro.

B.4.6 DFPlayer mini

El DFPlayer Mini (Figura B.6) es un reproductor de audio de pequeño y de bajo coste. Este módulo puede ser conectado a Arduino para reproducir audios en formato de ficheros MP3, WMA y WAV. Arduino no es capaz de reproducir ficheros MP3, por lo tanto se necesita un instrumento como el DFPlayer Mini para poder realizar esta acción.

Este componente dispone de un lector de tarjetas micro SD con una capacidad de memoria máxima de 32 GB, llegando a almacenar así 100 carpetas, con 255 canciones cada una. Para poder realizar una reproducción segura de las melodías guardadas en este módulo, será imprescindible establecer un valor límite de intensidad sonora para no dañar el sistema vestibular del neonato.

El DFPlayer Mini proporciona diferentes velocidades de muestreo (8, 11.025, 12, 16, 24, 32, 44.1 y 48 kHz), una salida DAC de 24 bits, 30 niveles de volumen y un ecualizador de 6 niveles. Su precio de mercado es de 7.99 €; precio que incluye dos altavoces compatibles con arduino.

B.4.7 Altavoz

Un altavoz es una caja con un electroimán que se encarga de convertir los impulsos eléctricos, que recibe, en sonidos. El dispositivo DFPlayer Mini es el encargado de la lecturas de los archivos y de su reproducción, pero para poder escuchar las melodías reproducidas es necesario utilizar un altavoz.

En este caso se ha utilizado un altavoz de 2W y 8 Ohm (Figura B.7) por que es lo máximo que permite utilizar el módulo de reproducción de música seleccionado y además, con este existe una mayor probabilidad de asegurar la intensidad máxima a la que se hará la reproducción melódica.



FIGURA B.6: Módulo reproductor de música para la musicoterapia.



FIGURA B.7: Altavoz 2W 8 Ohm.

Anexo C

Diseño y prototipo

Para poder realizar el diseño del prototipo, se tuvieron en cuenta las medidas del modelo de incubadora Isolette ® 8000. Se hicieron los cálculos necesarios para conocer las dimensiones que tendría el prototipo para poder proseguir con el diseño y la posterior construcción.

A continuación, será posible observar los planos de cada una de las piezas del prototipo y conocer que dimensiones toman estas en el prototipo.

El prototipo se ha diseñado con dos capacetes como componentes principales. El primero cumplirá la función de protección del neonato y mantenimiento de la estabilidad del habitáculo de la incubadora, y el más exterior, además, llevará incorporado el modelo de fototerapia seleccionado en el Capítulo 4. En las Figuras C.1 y C.2 se muestra el plano del diseño y las dimensiones que toma cada pieza.

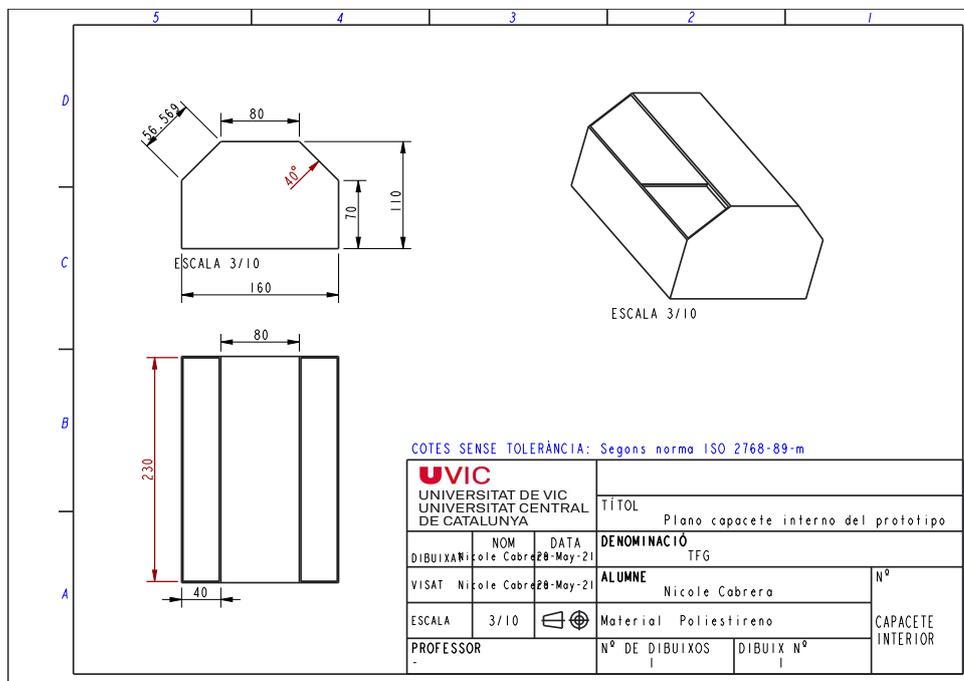


FIGURA C.1: Plano del capacet interno del prototipo de incubadora.

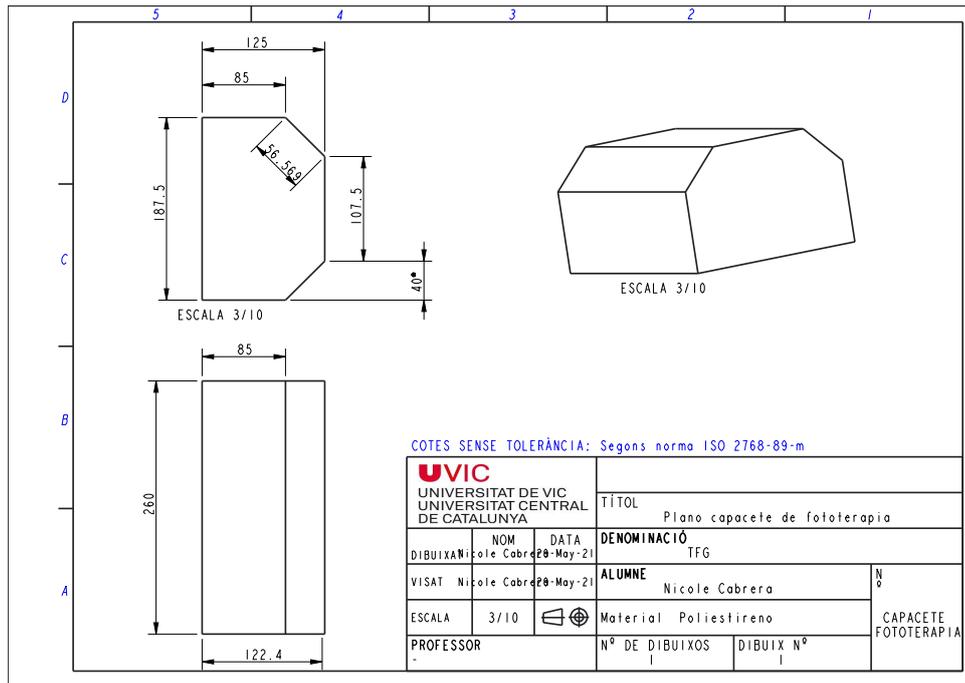


FIGURA C.2: Plano del capacet exterior del prototipo de incubadora.

Se tomaron como referencia las dimensiones de la incubadora Isolette ®8000, y se escalaron para poder realizar el proceso de construcción del prototipo. Una escala de reducción se utiliza cuando las medidas del objeto real son mayores que el tamaño de la hoja de papel. Se ha utilizado una escala 1:4, lo que quiere decir, que cada centímetro de cualquier pieza del prototipo son 4 centímetros del mismo componente a escala real.

Por otro lado, en la Figura C.3 es posible observar la parte de la incubadora donde se encajan los capacetes antes mostrados, y además, donde se sitúa el colchón del neonato. Por último, la Figura C.4 contiene el plano de la pieza de soporte de la incubadora, el cuerpo principal de la estructura de este dispositivo médico de cuidado neonatal. Junto a esta pieza, se colocan 4 ruedas para poder darle movilidad al dispositivo, proporcionando así mayor facilidad de movimiento o traslado.

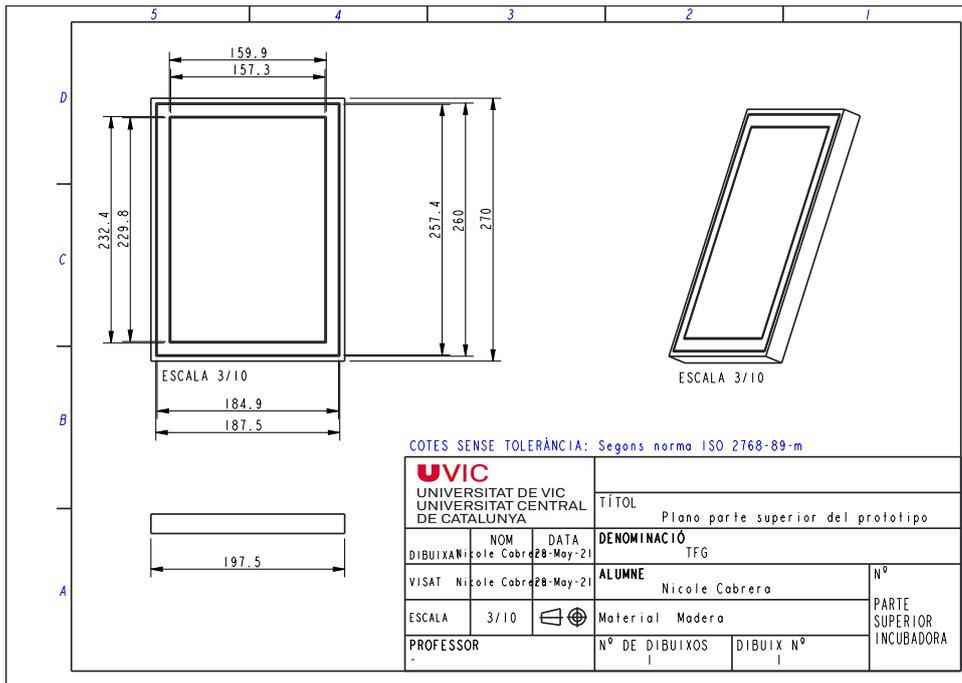


FIGURA C.3: Plano del componente de apoyo de los capacetes y colchón del prematuro.

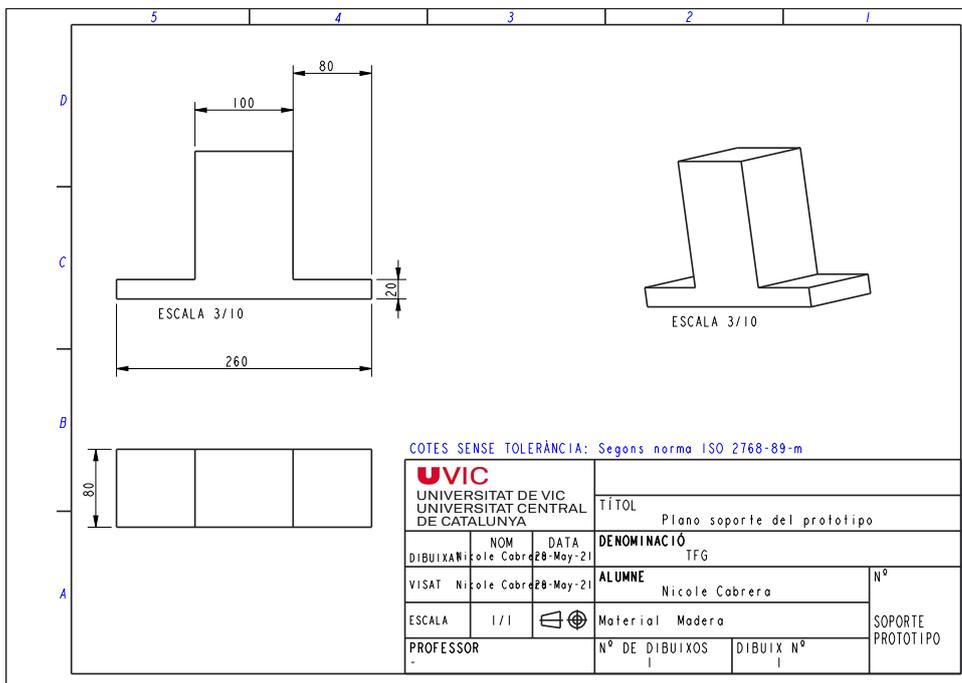


FIGURA C.4: Plano del soporte inferior del prototipo.

En último lugar, la Figura C.5 está formada por diferentes imágenes donde es posible apreciar el proceso de construcción del diseño final; desde el trabajo de piezas independientes hasta la obtención del diseño final.



(a) Construcción soporte superior del soporte y los ca- Prototipo
prototipo. pacates. acabado del dis-
positivo médico de
cuidado neonatal.

FIGURA C.5: Proceso de construcción del prototipo final de la incubadora neonatal.

Anexo D

Programación

D.1 Programación con Arduino

Para poder asegurar un correcta aplicación de las terapias, ha sido necesaria la implementación de un código con Arduino para poder establecer el control de las variables de interés.

D.1.1 Control de la humedad

La humedad relativa es una variable, dependiendo de la edad gestacional del recién nacido, puede tomar valores diferentes (Tabla 3.5). Es por eso que es necesario que antes de ejecutar el programa, se introduzca la edad gestacional del prematuro para que el código pueda establecer un adecuado control.

```

if (29>EG<32)
{
  if (h<70 or h>80)
  {
    digitalWrite(5, HIGH); //Pone en alto "uno" el pin digital 8 del arduino y activa el LED
  }
}

if (33>EG<34)
{
  if (h<50 or h>60)
  {
    digitalWrite(5, HIGH); //Pone en alto "uno" el pin digital 8 del arduino y activa el LED
  }
}

if (EG>35)
{
  if (h>50)
  {
    digitalWrite(5, HIGH); //Pone en alto "uno" el pin digital 8 del arduino y activa el LED
  }
}

```

FIGURA D.1: Código implementado para establecer el control de la humedad.

Por ejemplo, un neonato con un EG=30 semanas, necesita que la humedad relativa del habitáculo tenga un valores entre 70-80%. Cuando esta variable esté fuera del rango predeterminado, se generará una alarma visual de color blanco para poder notificar el problema.

D.1.2 Control de la temperatura

A diferencia de la humedad relativa del habitáculo, la temperatura debe situarse, sin excepción, entre los 36-38°C. Como se puede observar en la Figura D.2 se activa un LED cuando esta variable está por debajo de los 36°C y se activa otro LED de color diferente, para alertar de qué la temperatura supera los 38°C.

```

if (t<36)
{
  digitalWrite(8, HIGH); //Pone en alto "uno" el pin digital 8 del arduino y activa el LED
}
else
{
  digitalWrite(8, LOW); //Pone en bajo "cero" el pin digital 8 del arduino y desactiva LED
}

if (t>38)
{
  digitalWrite(4, HIGH); //Pone en alto "uno" el pin digital 4 del arduino y activa el LED
}
else
{
  digitalWrite(4, LOW); //Pone en bajo "cero" el pin digital 4 del arduino y desactiva LED
}

```

FIGURA D.2: Código implementado para establecer el control de la temperatura.

Se decidió utilizar dos alarmas visuales diferentes, para cuando se den algunas de estas situaciones, el sanitario pueda reconocer de forma fácil el motivo.

D.1.3 Reproducción de música

Para la reproducción de las música que contiene la tarjeta micro SD se ha elegido hacerlo de forma aleatoria. De esta forma, se hace posible que se reproduzcan todas las canciones sin un orden preestablecido, para que el neonato escuche melodías diferentes a lo largo de la terapia. Se establece también, un tiempo de 100 milisegundos de espera entre la canción acabada de reproducir y la siguiente.

```

boolean busy = digitalRead (12);
if (busy ==false)
{
  myDFPPlayer.randomAll(); //Random play all the mp3.
}
delay(100);

```

(a) Código implementado para la reproducción aleatoria de melodías musicales.

```
myDFPPlayer.volume(20);
```

(b) Establecimiento del nivel de intensidad de sonido del DFP Player Mini.

FIGURA D.3: Código de control del reproductor de música del prototipo de la incubadora.

Como se muestra en la Figura D.3, se ha predeterminado que el nivel de intensidad máxima a la que se reproduzcan las melodías sea el nivel 20. Para poder establecer el nivel máximo de intensidad sonora se ha utilizado un sonómetro. El nivel 20 es un nivel es el que se escucha la melodía que suena y el valor de dB a este nivel es igual a 50 (valor óptimo que no sobrepasa el nivel de intensidad máximo permitido del sistema vestibular del neonato.)

D.1.4 Control de los LEDs

En el modelo de red de fototerapia seleccionado, es posible encender los LEDs en su totalidad o solo alguno de ellos, en función de las necesidades del prematuro. En a Figura D.4(b) se puede observar el encendido de todos los LEDs, si fuera necesario para mejorar la salud del paciente. Si por el contrario, el diagnóstico determina que no se necesita una terapia de luz tan intensa, se tendría que activar el código de la Figura D.4(b).

```

// FOTOTERAPIA POR PARTES
if (digitalRead (B_PIN) == LOW) {
    digitalWrite (5, HIGH);
}

else
{
    digitalWrite(5, LOW);
}

digitalWrite(9, LOW);
digitalWrite(5, LOW);

```

(a) Código del control de el conjunto de LEDs completos.

(b) Código del control de la mitad de los LEDs.

FIGURA D.4: Código de control de los LEDs

D.2 Programación con MATLAB

Para poder seleccionar el modelo más adecuado que alcance el nivel de irradiancia necesario para poder aplicar una fototerapia efectiva.

El estudio de cada modelo se ha hecho con la aplicación de las fórmulas Lambertianas, descritas en el Capítulo 4. Específicamente, como se puede ver en la imagen D.5, se han aplicado la fórmula de la intensidad luminosa según un ángulo de luminosidad, $\theta=30$, y con un cálculo previo de la variable m . A continuación, se ha aplicado la Ley del Coseno, para determinar la iluminancia producida por el conjunto de LEDs de cada modelo.

```
% semi-angle at half power
theta=30;
% Lambertian order of emission
m=-log(2)/log(cosd(theta/2));
% Center luminous intensity y total según número de LEDs
I0=0.73;
I0_total=I0*(cosd(theta)^m);

% Vectores de distancia
D1=sqrt((XRec-XTrans1).^2+(YRec-YTrans1).^2+h^2);
D2=sqrt((XRec-XTrans2).^2+(YRec-YTrans2).^2+h^2);

%E_lux total
E_lux1=(I0*(cosd(theta)^m))./((D1)*acos(0.8));
E_lux2=(I0*(cosd(theta)^m))./((D2)*acos(0.8));

E_lux=E_lux1+E_lux2;
```

FIGURA D.5: Código implementado para el estudio de los modelos de fototerapia.

Teniendo ya el valor de iluminancia que caracteriza cada modelo, se calculará la equivalencia en la unidad fotométrica deseada, irradiancia (Ecuación 3.12).

Glosario

- Bilirrubina** : Pigmento lipofílico de color amarillo generado en el metabolismo de la hemoglobina. En un proceso correcto, ésta pasa por el hígado y se expulsa del cuerpo a través de la orina o las heces.
- Tubo neural** : Estructura antecesora del sistema nerviosa y formada durante el período gestacional. Esta estructura terminará dando lugar al cerebro y la médula espinal.
- LED** : Acrónimo en inglés de Light Emitting Diode. Componente eléctrico que únicamente permite el paso de corriente en un solo sentido, emitiendo así luz.