



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



**Disseny i implementació d'un sistema per a la
representació d'imatges en una làmina de
material termocròmic**

**Treball de Fi de Grau realitzat a
Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de
Barcelona**

Universitat Politècnica de Catalunya

per

Aniol Oriol Tordera

**Grau en Enginyeria de Tecnologies i Serveis de
Telecomunicació, Menció en Sistemes Electrònics**

Tutor: Ramon Bragós Bardia

Barcelona, Octubre de 2021

Abstract

This project arises from the collaboration with a contemporary art production that is looking for a system capable of generating low-resolution images on a thermochromic sheet as if it was an image display. Therefore, a research of alternatives has been carried out in order to find the best way to generate heat in controlled points. Among all the alternatives, the usage of resistors arranged in matrix form has been selected. The obtained system can be modular, where each module measures 8x8 cm and comprises 128 resistors (16x8), which makes it very comfortable due to the easy image size and resolution adaptation. Regarding the final image result, the goals set by the artist and art production are met: the progressive appearance of a low-but-enough resolution image capable of being interpreted without distinguishing the pixels because of a felt that acts as an insulator between the resistors and the thermochromic sheet.

Resum

Aquest projecte és fruit de la col·laboració amb una productora d'art contemporani que busca un sistema capaç de generar imatges de baixa resolució en una làmina de material termocròmic com si es tractés d'un display al qual se li passa una imatge i aquest la mostra. Així, en aquest projecte s'ha fet un estudi d'alternatives per generar calor en punts controlats d'on s'ha acabat seleccionant l'ús de resistències disposades en forma de matriu. El sistema obtingut té la capacitat de ser modular, mesurant cada mòdul 8x8 cm i constant de 128 resistències (16x8), el que el fa molt còmode a l'hora de poder-se adaptar a la mida i resolució de la imatge que es busca. Pel que fa al resultat d'imatge final, es compleix amb els objectius marcats per l'artista i productora d'art, l'aparició progressiva d'una imatge de baixa resolució però la suficient com interpretar-la i sense que a aquesta se li puguin distingir els píxels gràcies a un feltre que fa d'aïllant entre les resistències i la làmina termocròmica.

Resumen

Este proyecto es fruto de la colaboración con una productora de arte contemporáneo que busca un sistema capaz de generar imágenes de baja resolución en una lámina de material termocrómico como si de un display se tratara, al que se le pasa una imagen y este la muestra. Así, en este proyecto se ha hecho un estudio de alternativas para generar puntos de calor controlados de donde se ha seleccionado el uso de resistencias puestas en forma matricial. El sistema obtenido tiene la capacidad de ser modular, midiendo 8x8 cm cada módulo y teniendo 128 resistencias (16x8), que lo hace muy cómodo a la hora de poderse adaptar a la medida y resolución de la imagen que se busca. En cuanto al resultado de la imagen final, se cumple con los objetivos marcados por la artista y la productora de arte, la aparición progresiva de una imagen de resolución baja, pero con la suficiente para poder interpretarla sin que en esta se le puedan distinguir los píxeles gracias a un fieltro que hace de aislante entre las resistencias y la lámina termocrómica.

Agraïments

En primer lloc vull agrair al meu tutor Ramon Bragós Bardia, qui m'ha guiat i s'ha implicat molt notablement en aquest projecte i qui ha tingut plena disposició per tal de poder aconseguir els objectius marcats.

També vull agrair a l'artista Belén Zahera i a la Sara Castillo i Louis-Charles Tiar de Dilalica per donar-me l'oportunitat i confiar en mi a l'hora de desenvolupar aquesta proposta que ha sigut una experiència molt enriquidora a nivell acadèmic i personal.

Per últim agrair a l'ETSETB per haver-me prestat tot el material i instruments necessaris per dur a terme aquest projecte.

Moltes gràcies a tots.

Historial de revisions

Revisió	Data	Propòsit
0	06/09/2021	Creació del document
1	06/10/2021	Revisió del document

LLISTA DE DISTRIBUCIÓ

Nom	e-mail
Aniol Oriol Tordera	aniol.oriol@estudiantat.upc.edu
Ramon Bragós Bardia	ramon.bragospc.edu

Escrit per:		Revisat i aprovat per:	
Data	05/10/2021	Data	06/10/2021
Nom	Aniol Oriol Tordera	Nom	Ramon Bragós Bardia
Posició	Autor del projecte	Posició	Supervisor del projecte

Taula de continguts

Abstract	1
Resum	2
Resumen	3
Agraïments	4
Historial de revisions.....	5
Taula de continguts	6
Llista de Figures	7
Llista de Taules:	9
1. Introducció i objectius	10
1.1. Introducció.....	10
1.2. Objectius	10
1.3. Requeriments i especificacions	10
1.4. Entorn de realització	11
1.5. Diagrama de Gantt	11
2. Estat de l'art de la tecnologia utilitzada:.....	12
2.1. El material termocròmic.....	12
2.2. Exemple referent	14
3. Metodologia / desenvolupament:	16
3.1. Anàlisi d'alternatives	16
3.2. Proves preliminars.....	18
3.2.1. Proves amb làser	18
3.2.2. Proves amb aire calent.....	20
3.2.3. Proves amb resistències.....	22
3.3. Proposta del prototip final	23
3.3.1. Disseny hardware sistema final	27
3.3.2. Software del sistema	32
4. Pressupost	37
5. Conclusions i propostes de futur:.....	39
Bibliografia:.....	40

Llista de Figures

Figura 1: Diagrama de Gantt	11
Figura 2: Làmina termocròmica	13
Figura 3: Termòmetre amb material termocròmic	13
Figura 4: Tassa termocròmica	13
Figura 5: Cullereta de plàstic termocròmic.....	14
Figura 6: Matriu de resistències.....	14
Figura 7: Resultat rellotge.....	15
Figura 8: Resistència Through-Hole vs. SMD	17
Figura 9: Imatge vectorial vs. imatge amb mapa de bits	17
Figura 10: Paquet obtingut de SFXC	18
Figura 11: Fotografia del làser utilitzat	19
Figura 12: Resultat traça realitzada amb làser.....	19
Figura 13: Imatge del tub de silicona i broqueta utilitzada.....	21
Figura 14: Resultat traça realitzada amb ràfega d'aire calent canalitzat.....	21
Figura 15: Circuit utilitzat per a les proves amb resistències Through-Hole	22
Figura 16: Circuit utilitzat per a les proves amb resistències SMD	22
Figura 17: Resultat resistències SMD amb feltre d'aïllant	23
Figura 18: Resultat resistències Through-Hole amb feltre d'aïllant	23
Figura 19: Primera distribució de resistències.....	25
Figura 20: Segona distribució de resistències.....	25
Figura 21: Resultat primera distribució (quatre resistències).....	25
Figura 22: Resultat segona distribució (cinc resistències).....	25
Figura 23: Diagrama de blocs del MCP23017 extret del datasheet del producte	27
Figura 24: Esquemàtic de una de les 8 parts iguals de la placa.....	28
Figura 25: Opció de distribució drivers a la placa.....	28
Figura 26: Layout de la placa utilitzada en el prototip final	29
Figura 27: Imatge anvers i revés placa de resistències prototip final	29
Figura 28: Prototip de un mòdul final	30
Figura 29: Representació dels sistema final	31
Figura 30: Esquemàtic de connexions I2C del sistema final	31
Figura 31: Imatge quadrada de color passada a blanc i negre pur.....	32
Figura 32: Imatge de (40,80) amb píxels quadrats vs. píxels rectangulars.....	33

Figura 33: Fragmentació de la imatge transposada33

Figura 34: Dígits representats en un sol mòdul.....35

Figura 35: Representació de com quedaria una imatge formada pels 25 mòduls36

Llista de Taules:

Taula 1: Alguns tipus de materials cromoactius	12
Taula 2: Rang i gama de colors segons la temperature que està submesa la làmina	23
Taula 3: Propietats resistències segons càpsula. Les tres primeres són SMD (essent la tercera la utilitzada en l'exemple del rellotge) i les dues últimes són Through-Hole.	24
Taula 4: Temperatures obtingudes segons capsules.	24
Taula 5: Diàmetre del punt generat per una sola resistència segons voltatge aplicat.	34
Taula 6: Cost del prototip.....	37
Taula 7: Cost de desenvolupament del projecte	37
Taula 8: Cost del material termocròmic.....	37
Taula 9: Cost dels 25 mòduls	38

1. Introducció i objectius

1.1. Introducció

La proposta d'aquest projecte sorgeix de l'artista Belén Zahera amb col·laboració amb la productora d'art Dilalica, als qui els hi va sorgir la idea de combinar el material termocròmic, que és aquell que canvia de color al aplicar-li calor, amb l'art, ja que aquest material disposa de propietats i efectes a la hora de canviar de color que li semblen molt interessants i aplicables a l'art.

Per tant el repte era aconseguir la manera de que una làmina termocròmica funcionés com un display, desenvolupant un sistema capaç de generar calor en punts controlats i concrets per recrear una imatge en la làmina. Aquesta imatge s'és conscient de que no serà de qualitat en quant a poder veure'n tots els detalls, però això no és el que vol l'artista, sinó que el que es vol és fer que aquesta imatge presenti una certa difusió aprofitant aquest efecte d'aigües que té el material termocròmic, així com la dinàmica d'aparició de la imatge, ja que aquesta anirà apareixent segons s'hi apliqui calor i amb el temps, un efecte que també està molt valorat per l'artista.

Una de les virtuts d'aquesta obra és la capacitat de poder generar diferents imatges amb un mateix sistema, ja que el que es vol és que s'hi pugui passar qualsevol imatge i que aquest sigui capaç de representar-la sobre la làmina.

En aquest projecte doncs s'ha estudiat diverses alternatives per generar calor de manera localitzada i controlada, dissenyat i caracteritzat un prototipus del sistema de l'alternativa seleccionada i també una API per passar la imatge al sistema adequadament.

1.2. Objectius

Els objectius que havia de complir el sistema, han sigut marcats per l'artista ja que és qui sap com vol que aquest es comporti i mostri les imatges sobre la làmina.

Aquests objectius són, aconseguir una imatge de baixa resolució, dins de que es pugui interpretar la imatge, que aquesta resolució subjectiva ha estat consultada amb l'artista proporcionant-li diferents resultats que s'han anat obtenint, i que aquesta imatge tingui una certa difusió en el sentit de que no es vegi la imatge pixelada, sinó que presenti una certa continuïtat i les vores suavitzades.

Addicionalment, el que també es demana és que no es pugui saber quin és el mètode emprat per generar l'escalfor, és a dir que la persona que estigui mirant la làmina, no pugui saber quin és el sistema que duu aquesta tasca a terme. El sistema ha de poder quedar amagat i ser una incògnita.

1.3. Requeriments i especificacions

Com a requeriments, en aquest projecte bàsicament són d'espai, i no tant especificacions tècniques.

Aquestes requeriments són:

- El sistema ha d'abarcara una làmina termocròmica de 40x40cm (mínim)

- Ha de poder-se amagar el sistema, podent aquest tenir una amplada que no superi els 15 cm.

1.4. Entorn de realització

Aquest projecte com s'ha comentat és una proposta de Dilalica, en concret amb el Louis-Charles Tiar i la Sara Castillo, en col·laboració amb l'artista Belén Zahera. Dilalica és una productora d'art contemporani amb les principals inquietuds per l'art digital i els reptes que les seves formes provoquen dins d'un espai físic. Dilalica té una galeria d'art a Barcelona on s'hi exposen algunes obres d'aquest tarannà, essent una galeria comercial. En el seu web hi ha una explicació més detallada sobre qui són:

“Desarrollamos una práctica curatorial colaborativa que se manifiesta en formatos expositivos, libros y web. Tenemos un espacio en Barcelona y colaboramos con otras instituciones. Aunque no es exclusivo de nuestra práctica, heredamos un especial interés por lo computacional, la imagen fotográfica, la colaboración y el cuestionamiento de la autoría individual. Nuestras investigaciones se expanden y a veces itineran en otros espacios.”

Extracte de www.dilalica.com/quienes-somos (web oficial)

1.5. Diagrama de Gantt

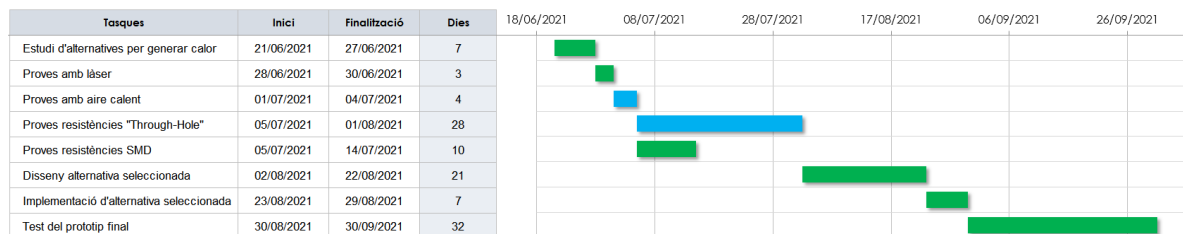


Figura 1: Diagrama de Gantt

Respecte a la planificació inicial, han canviat els temps en les proves amb aire calent i làser ja que es va veure ràpidament que eren camins que no eren viables pels objectius i interessos del projecte, això va fer que es pogués investigar durant més temps amb la via de les resistències i amb el disseny i implementació del prototip final.

2. Estat de l'art de la tecnologia utilitzada:

2.1. El material termocròmic

El material termocròmic forma part dels materials cromoactius, que són aquells capaços de canviar de colordavant d'un estímul extern. Segons quin n'és l'estímul reben diferents noms:

Fenòmen	Estímul
Electrocromisme	Corrent elèctrica
Magnetocromisme	Camp magnètic
Fotocromisme	Llum
Biocromisme	Interconnexió amb entitat biològica
Termocromisme	Calor

Taula 1: Alguns tipus de materials cromoactius¹

En aquest projecte com ja s'ha dit es centra en el termocromisme, aquest es defineix com un fenomen en el qual certs tints fets de cristall líquid canvien de color de manera reversible quan la temperatura canvia.

Existeixen dos tipus principals de mecanismes termocròmics, d'entre els quals el que s'utilitza en aquest projecte és el cristall líquid, aquests s'utilitzen en aplicacions on es requereix d'una certa precisió, ja que la seva resposta es pot dissenyar a temperatures concretes sent capaços de mostrar diferents colors a diferents temperatures. Aquest canvi depèn de la reflexió selectiva de certes longituds d'ona per l'estructura cristal·lina del material. Aquests cristalls líquids són complicats de treballar i requereixen d'equips d'impressió especialitzats. El material en sí sol ser més costós que altres alternatives. Les altes temperatures, alguns productes químics, dissolvents i la radiació ultraviolada afecten negativament en la vida útil d'aquest material. En concret el material que hem estat treballant es pot malbaratar a partir de temperatures superiors a 60°C, el que faria que no pogués continuar canviant de color.

Un altre tipus molt comú és el tint leuco, aquests tenen una resposta a la temperatura menys precisa que els cristalls líquids i només poden mostrar dos colors si aquests es mesclen amb algun pigment. La exposició a radiació ultraviolada, dissolvents i les altes temperatures també tenen un impacte negatiu en aquest material.

Aquests dos casos que s'han mencionat estan dins dels materials orgànics, però també trobem algun exemple de termocromisme en materials inorgànics, encara que aquests en la seva immensa majoria només presenten canvis molt subtils a la calor. Per exemple, el diòxid de titani i l'òxid de zinc són blancs a temperatura ambient, però quan s'escalfen canvien a color groc.

¹ Informació extreta de <https://www.hisour.com/es/thermochromism-24806/>

Aquests material termocròmics s'utilitzen cada vegada més freqüentment, com per exemple en senyalitzar control de temperatura, seguretat de tuberíes o elements perillosos, i algunes aplicacions en articles de la llar podrien ser, envasos per a microones, paelles, plaques calefactores, vasos, tasses, culleres, etc.

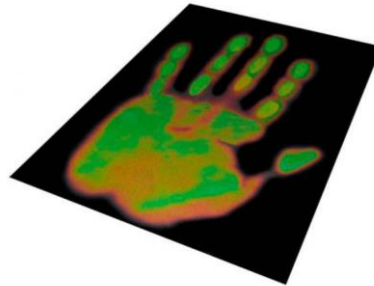


Figura 2: Làmina termocròmica²

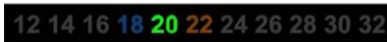


Figura 3: Termòmetre amb material termocròmic³



Figura 4: Tassa termocròmica⁴

² Font de la imatge: <https://www.opitec.es/kits-de-construccion/cartulina-papel/tiles/l-mina-termocr-mica.html?searchparam=termocr%C3%B3mico&redirected=1>

³ Font de la imatge: <https://www.sensores-temperatura.com/es/termometro-para-calendario/termometro-para-calendario-pack>

⁴ Font de la imatge: <http://solucionespackaging.com/tintas-cromaticas-packaging/>



Figura 5: Cullereta de plàstic termocròmic⁵

2.2. Exemple referent

Com exemple de display termocròmic, s'ha agafat de referència un projecte creat per Daniel Valuch, Enginyer al CERN en Ràdio-Freqüència, aquest projecte⁶ tracta de un rellotge d'agulles fet amb un display de 32x32 (1024) resistències, que per tant utilitza la calor dissipada per mostrar la informació. Es posa una làmina termocròmica al damunt de les resistències. Els píxels estan fets de resistències de encapsulat 2512 (SMD), cada un dissipant 250 mW (5V/50mA). Per tal de controlar les residències s'utilitzen 1024 circuits integrats 74LVC1G175's que són biestables D. Per controlar tots els component s'utilitza una Arduino Nano.

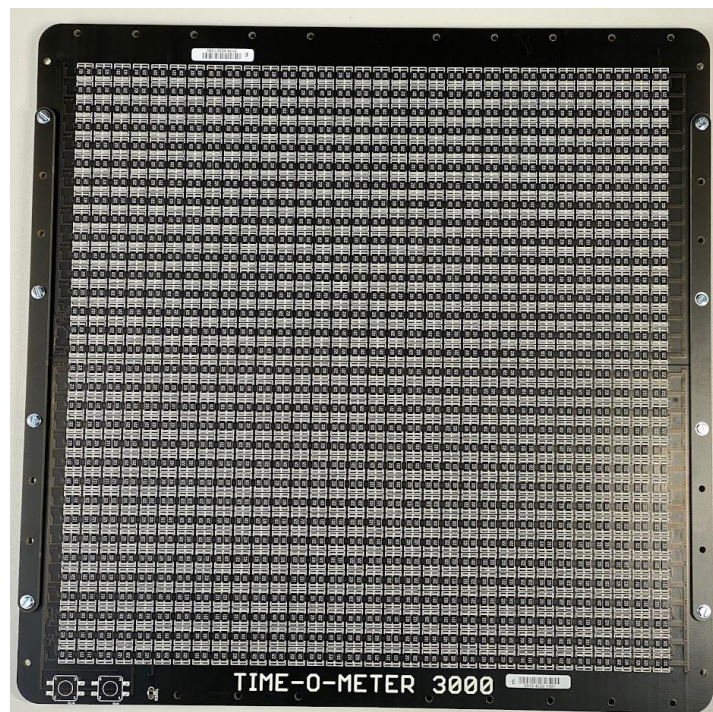


Figura 6: Matriu de resistències

⁵ Font de la imatge: <https://www.colourchange.com/thermochromic-plastic/>

⁶ Informació sobre el projecte a <https://hackaday.com/2020/05/24/matrix-of-resistors-forms-the-hot-hands-behind-this-thermochromic-analog-clock/>

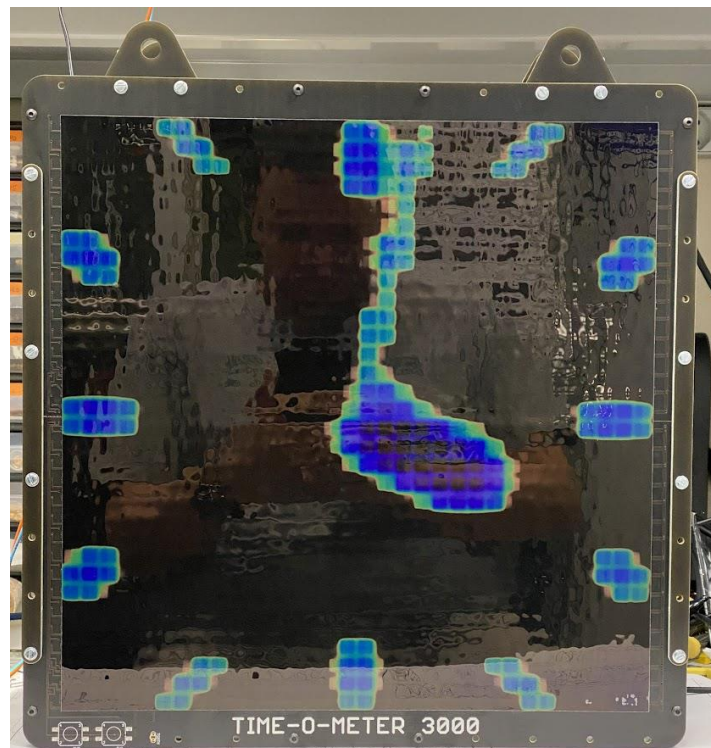


Figura 7: Resultat rellotge

D'aquí sorgeix també la idea de crear un display el qual pugui representar qualsevol imatge amb una làmina de material termocròmic.

L'autor en ressalta el delay de refredament de les resistències i per tant en el temps. Un altre factor a destacar i que és un dels objectius principals a solucionar és el pixelat, com es pot apreciar perfectament en la figura anterior, es poden distingir els píxels, cosa que es vol evitar per mostrar una imatge més continua/difusa, que és l'efecte que es busca per l'artista que ha ideat aquest projecte des d'un principi.

Aquest objectiu de reduir el pixelat ha portat a l'estudi i test de diferents mètodes per generar calor sobre una làmina termocròmica per tal de poder aconseguir el resultat desitjat.

3. Metodologia / desenvolupament:

3.1. Anàlisi d'alternatives

En primer lloc es va haver de fer un estudi de diferents alternatives que poguessin ser implementades i generessin punts de calor controlats a una temperatura inferior a 60°C ja que és la limitació del material sobre el qual hem estat treballant, en cas de que es sobrepassi aquest límit el material no recupera el color corresponent a la temperatura a la qual està sent excitat.

Així doncs amb aquesta limitació i tenint en compte els objectius de imatge que buscava l'artista, es van pensar dues alternatives addicionals, a la que ja s'havia vist del rellotge fet al CERN amb material termocròmic i resistències, com són la generació d'un punt de calor mitjançant un làser, o bé mitjançant una ràfega d'aire calent canalitzada.

- **Làser:** La idea de generar una imatge amb un làser seria generar-la de manera vectorial, cosa que semblava una alternativa prou interessant per veure l'efecte que tenia en la làmina i si podria ser una via a estudiar i aplicar. Per tant el muntatge que es va plantejar era l'ús d'un galvanòmetre que ens permetés apuntar a una posició XY de la làmina per tal de poder-ne escalfar la superfície i que aquesta canviï de color. D'aquesta manera s'anirien dibuixant els vectors i repassant per sobre per tal de que la imatge perdurés.
- **Aire calent:** Amb aquest alternativa el que es vol és canalitzar ràfegues de aire prou calent amb un broquet i amb un posicionador XY generar o bé un escombrat com faria una impressora o bé com a l'alternativa del làser una imatge vectorial. Aquesta idea el que fa és que el punt generat sigui més difús que el generat per un làser i per tant també va semblar una via interessant a estudiar ja que podia complir amb els requisits del tipus de imatge que es buscava.
- **Resistències:** L'alternativa de les resistències és la més intuïtiva a la hora de pensar en generar una imatge ja que es comportarien com píxels en blanc o negre, és a dir una imatge generada per mapa de bits. Depenent de si es fa passar corrent o no per a cada una de les resistències. La idea per tant és crear una matriu feta per resistències, les quals puguem excitar o no depenent de si el punt de la imatge ha d'estar en blanc o negre. L'altre qüestió a tenir en compte però és estudiar quin tipus de resistència utilitzar, així que també es sotmetran a estudi l'ús de resistències SMD o Through Hole.
 - **SMD:** Aquest tipus de resistències són les que s'utilitzen en el projecte del rellotge del CERN. Per la seva forma geomètrica és la que recorda més a un píxel i es poden muntar de manera precisa tenint així un contacte directe amb la làmina termocròmica.

- **Through Hole:** Per altra banda també és interessant l'efecte que podria provocar aquest tipus de resistències ja que per la seva forma cilíndrica provocaria un efecte més difús del píxel, cosa que està deliberadament buscada per tal de complir amb els objectius de l'artista.



Figura 8: Resistència Through-Hole vs. SMD

Així doncs veiem que tenim dues maneres de generar les imatges amb les alternatives seleccionades, o bé per mitjà de mapa de bits (píxels en blanc i negre), o bé de manera vectorial. A continuació una imatge il·lustradora de les diferències entre aquestes dues tipologies.

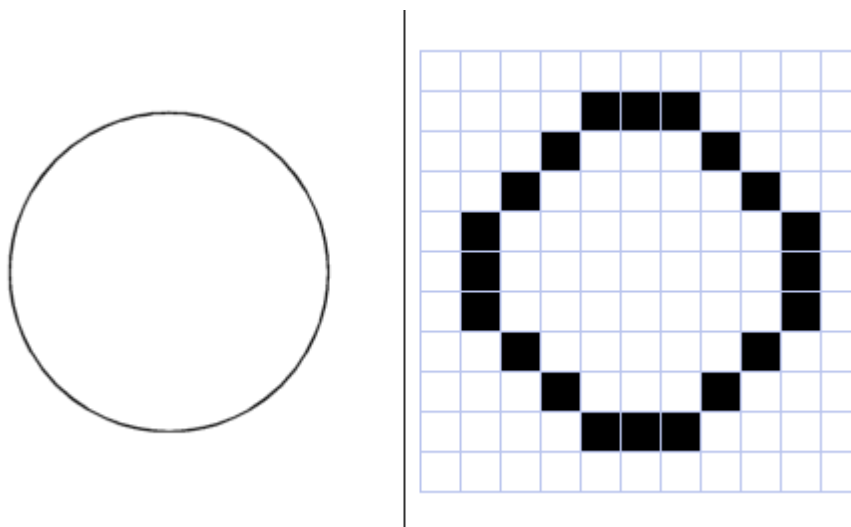


Figura 9: Imatge vectorial vs. imatge amb mapa de bits

Per tal de fer les proves pertinents s'ha fet una cerca de quina làmina utilitzar, aquesta s'ha escollit i obtingut a través de <https://www.opitec.es/>⁷ encara que aquesta làmina es troba a altres webs d'art i manualitats; aquesta làmina està fabricada per Astromedia.

Per altra banda també s'han obtingut làmines termocròmiques i d'altres materials provinents de l'empresa alemanya SFXC⁸, que es dedica a l'obtenció, fabricació i

⁷ Concretament la làmina és <https://www.opitec.es/kits-de-construccion/cartulina-papel/tiles/l-mina-termocr-mica.html?searchparam=termocr%C3%B3mico&redirected=1>

⁸ Pàgina web oficial de l'empresa: <https://www.sfxco.uk/es>

distribució de revestiments, pigments i plàstics de tecnologies com el cristall líquid termocròmic, fotocròmic, hidrocromic, entre d'altres tecnologies més aplicades a aquest material.



Figura 10: Paquet obtingut de SFXC⁹

3.2. Proves preliminars

Una vegada haver pensat les diferents alternatives per tal de fer el prototip final, es van fer una sèrie de proves per tal de poder seleccionar la millor opció tenint en compte els objectius marcats i la visió de l'artista sobre cada una de les proves realitzades per intentar apropar-nos al que buscava.

Per a la realització de les proves preliminars, així com de la resta del projecte, les làmines utilitzades han sigut la 448.WBK d'Astromedia i la GLOWG de SFXC.

3.2.1. Proves amb làser

Per la realització de les proves amb el làser es va utilitzar un làser de classe 1, ja que d'aquesta manera ja que l'aplicació final s'hauria de poder veure sense prendre precaucions de cap mena perquè estaria en una exposició, per tant s'ha de garantir la seguretat de la gent que estigués mirant la peça.

Un cop seleccionat el làser, que va ser el FTEC2785-M20PY0 de 31 mW i 783 nm de Bluesky Research, anteriorment també s'havia provat un díode làser de 10 mW i 650 nm de Thorlabs que es va descartar perquè va resultar massa poc potent, es van fer dos tipus de proves, una directament subjectant l'extrem de la fibra òptica del làser amb la mà i fent diferents formes i figures i una altra més fidel al que hauria de ser el prototip final que va

⁹ Obtingut de <https://www.sfxc.co.uk/es/collections/thermochromic-vinyls/products/smart-materials-demonstration-pack-large>

ser utilitzant un posicionador lineal XY per tal de desplaçar el làser per la làmina i així veure'n els resultats.

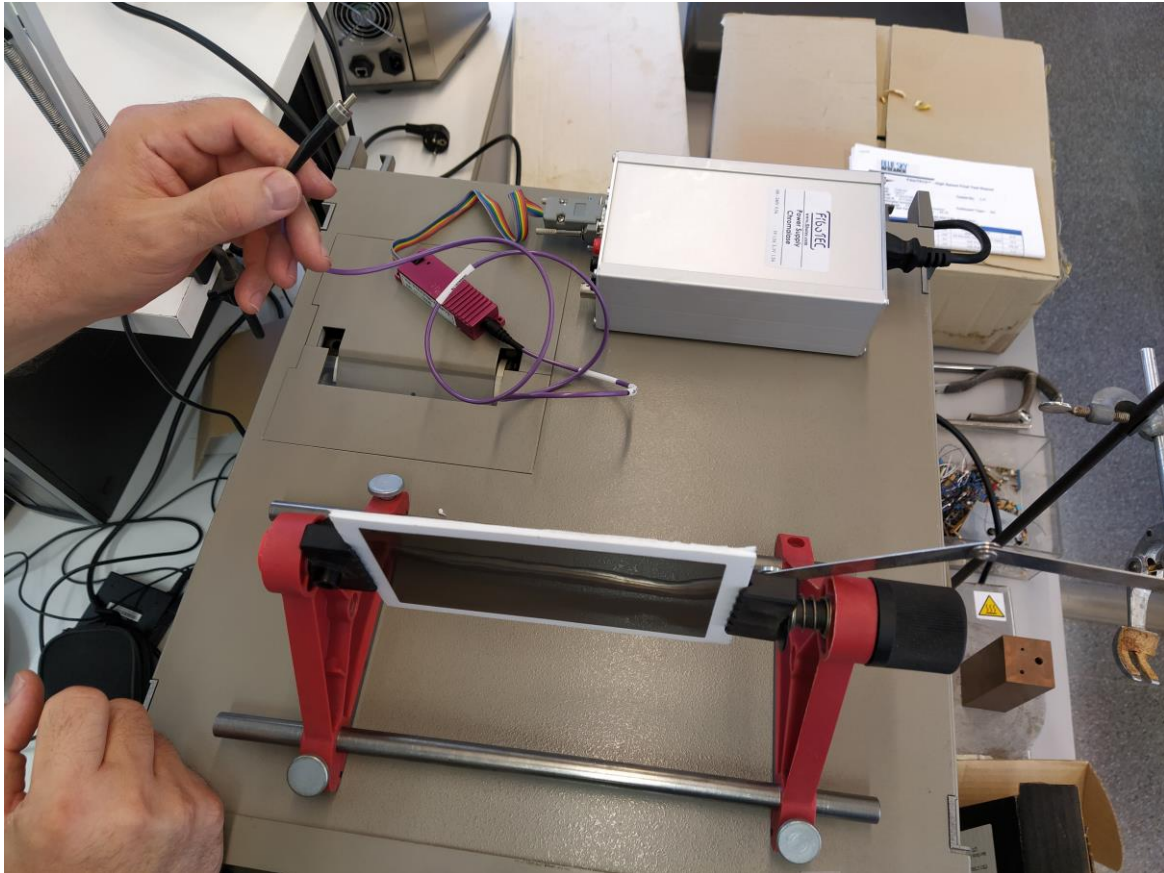


Figura 11: Fotografia del làser utilitzat

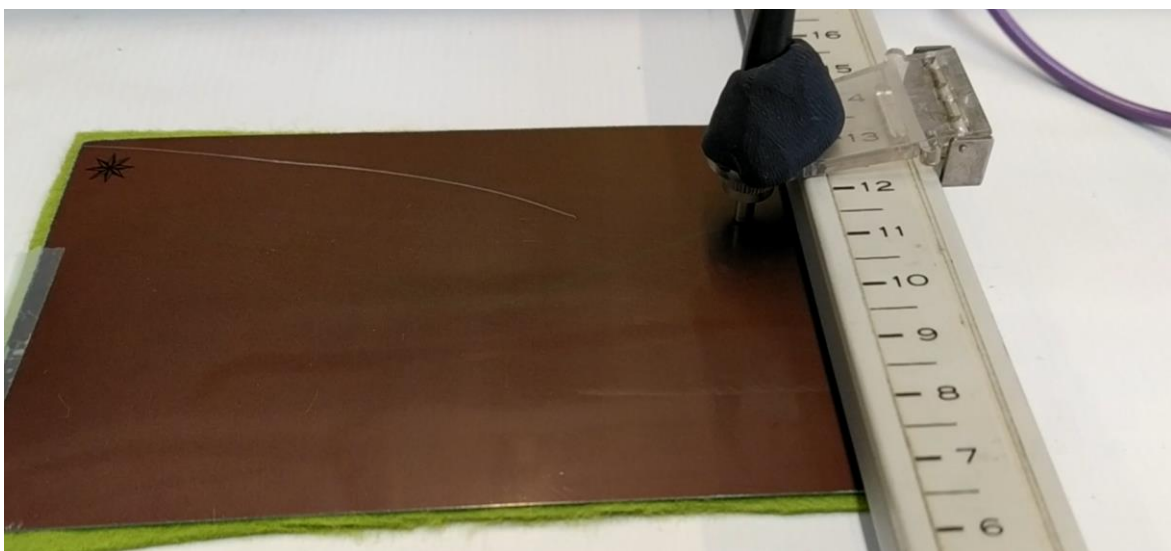


Figura 12: Resultat traça realitzada amb làser¹⁰

Com es pot apreciar en la figura anterior, la traça que es pot observar a la làmina és molt dèbil, per tal de que quedés marcat faria falta que el làser s'estigui 5 segons en un mateix

¹⁰ Video per a poder apreciar millor el resultat a <https://youtu.be/aNWwYPp3N4w>

punt, i quan es canvia de punt la persistència que té el punt és molt petita ja que la superfície del material es refreda ràpidament i per tant recupera el color de temperatura ambient. Tenint una persistència d'aproximadament 2 segons.

S'ha de tenir en compte que aquesta prova s'ha hagut d'utilitzar un làser de baixa potència per tal de que no requereixi de protecció ocular a l'hora d'observar la peça, això també fa que per tant no es pugui optar per un làser més potent i que per tant escalfaria la zona més i més ràpid.

Per altra banda en quant a la poca persistència, ja és un tema més complex, faria falta un escombrat continu de la figura, i addicionalment que la imatge tingués unes limitacions de mida i detalls per tal de que quan s'arribés al final de la traça de la imatge que es vol dibuixar, no desaparegués la resta de la imatge. Una possible solució seria posar una làmina de material que retingués la calor interposat.

Per finalitzar, per tal d'abarcàr la làmina que compondria la peça final, seria necessari una certa distància entre el galvanòmetre i la làmina, així doncs seria més complicat d'amagar el sistema ja que no es vol que es vegui ni es sàpiga quin és el mètode que genera calor en la làmina i per tant la imatge. Fent-se desde la part de darrere de la làmina, augmenta la fondària del sistema en uns 40 cm.

Per tant després de realitzar les proves amb aquest làser i comentar-ne els resultats amb l'artista es va concloure de que era una alternativa inviable pel projecte que s'estava buscant i es va abandonar aquesta via.

3.2.2. Proves amb aire calent

Per fer les proves amb la ràfega d'aire calent es va disposar de una estació de aire calent, en concret la JBC AM6800, un tub de silicona per canalitzar l'aire i de una certa llargada per tal de que hi hagi una extensió flexible i així es pugui moure amb el posicionador XY, un broquet d'impresora 3D d'1 mm de diàmetre per fer més petita la ràfega d'aire i així guanyar precisió i el posicionador lineal XY que ja s'ha utilitzat en les proves amb làser.

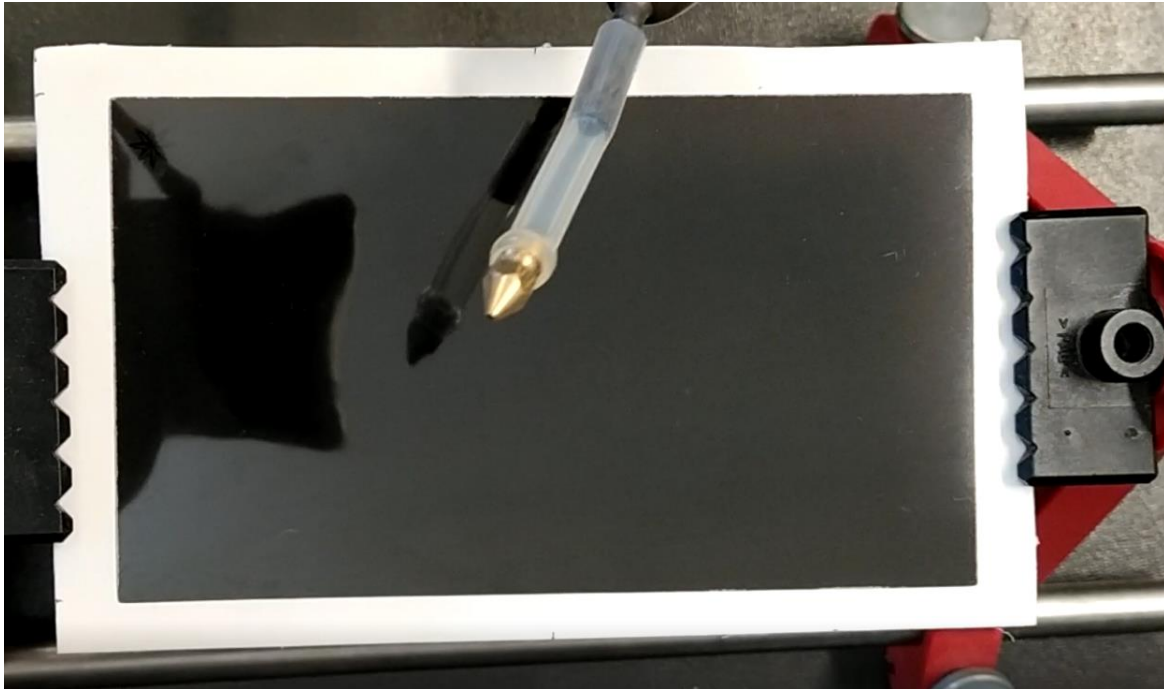


Figura 13: Imatge del tub de silicona i broqueta utilitzada

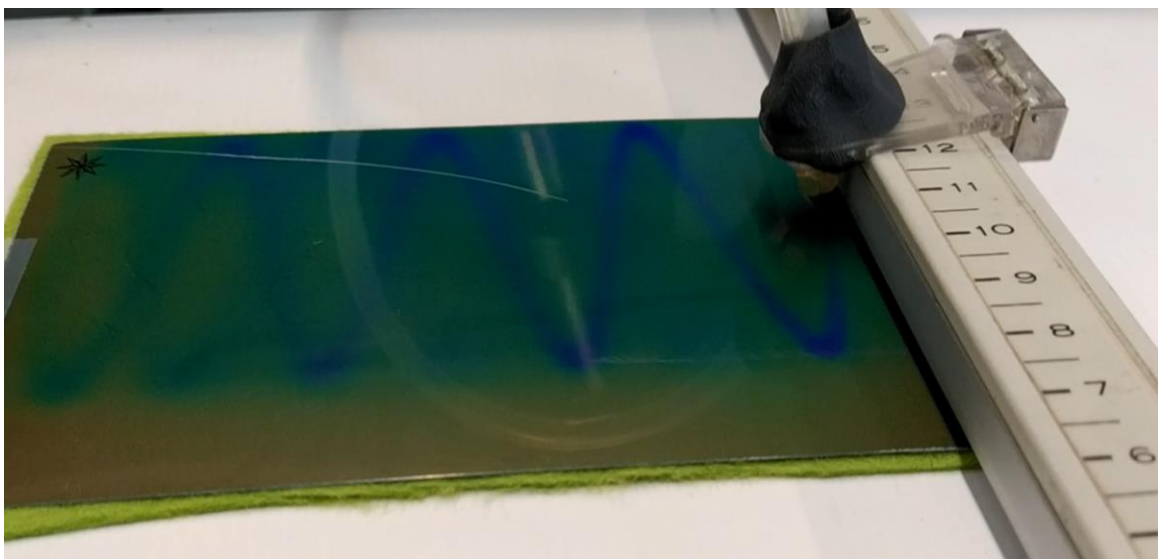


Figura 14: Resultat traça realitzada amb ràfega d'aire calent canalitzat¹¹

En quant a les proves amb la ràfega d'aire calent, els resultats en quant a imatge van ser més satisfactoris que amb el làser, la traça és molt més visible i té una persistència major a la del làser, entre uns 10 i 15 segons.

Tot i això es van observar una serie de limitacions a l'hora de implementar aquesta alternativa atenent al que es buscava des d'un principi. Primer de tot el soroll, aquest sistema al haver de realitzar-se amb un posicionador lineal XY i que aquest fos controlat per dos motors genera un cert soroll, junt amb l'estació d'aire calent que també genera soroll. Aquest soroll va ser un factor que no era d'interès per la peça final. Juntament amb el soroll es tornava a produir un temps d'extinció que per segons quina figura es volgués

¹¹ Video per apreciar millor el resultat a <https://youtu.be/0q0iBfAUVfo>

representar, no seria prou el temps que dura la traça i per tant no s'acabaria mai de veure la imatge al complet.

Aquesta alternativa per tant, va resultar interessant, però no complia amb els objectius marcats des d'un principi sobre com havia de ser la imatge i el sistema per tal de presentar-lo en una galeria.

3.2.3. Proves amb resistències

Aquesta alternativa era la més intuïtiva des de un principi, i més tenint en compte l'aplicació del rellotge termocròmic que havia servit com a referència. Tot i així quedava solucionar l'efecte píxel excessiu que aquest tenia i que no era el que buscava l'artista, es buscava una certa difusió, això va fer que es fessin proves amb la làmina directament sobre les resistències, i es van provar de posar diversos materials entre la làmina i les resistències: plàstic, suro, cartró-ploma, cartró de diferents gruixos... Finalment es va utilitzar 4 fulls de paper de 80g/m² i feltre de 1 mm de gruix. Per altra banda també s'estudia l'ús de resistències SMD o bé de resistències Through-Hole.

Així doncs per realitzar les proves amb resistències es va utilitzar un array de resistències ja existent al laboratori que és per a simular la resistència d'un material biològic, que utilitza resistències del tipus SMD; i per les resistències Through-Hole, es va fer un petit prototip de prova amb 10 resistències. Per ambdós casos es fan tests sense aïllament, amb capes de paper entremig, i amb un feltre entremig de les resistències i la làmina de material termocròmic.

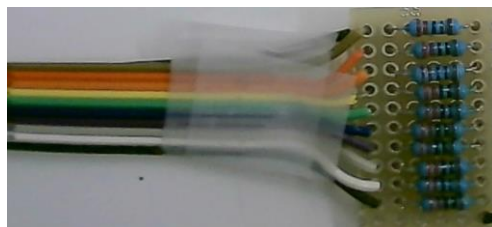


Figura 15: Circuit utilitzat per a les proves amb resistències Through-Hole

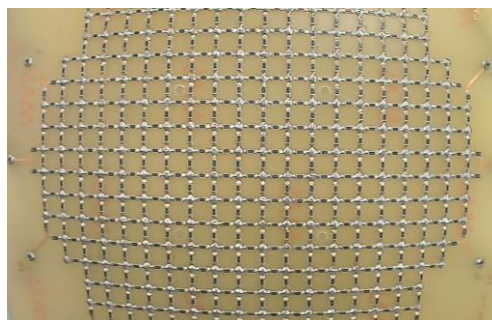


Figura 16: Circuit utilitzat per a les proves amb resistències SMD

Així doncs utilitzant aquests dos circuits els que es buscava era veure la diferència entre l'ús de aquests dos tipus de resistències per una banda, i per l'altra si aplicant un aïllant es podia reduir l'efecte píxel que no era de interès.



Figura 17: Resultat resistències SMD amb feltre d'aïllant

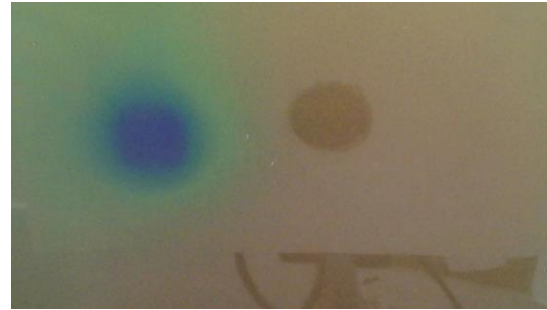


Figura 18: Resultat resistències Through-Hole amb feltre d'aïllant

En quant a la diferència entre les resistències SMD i les Through-Hole, es va observar que aquestes últimes produïen una imatge més arrodonida i que per tant donaven un efecte no tant pixelat.

Finalment, amb l'ús del material aïllant es va apreciar molt notòriament la reducció d'efecte píxel tant amb les capes de paper com amb el feltre. La resta de imatges amb les proves a diferents voltatges i amb diferents aïllaments es troben a l'Annex, es van fer proves a cinc voltatges diferents per a cada una de les disposicions de resistències, amb els dos tipus d'aïllants i sense. Per realitzar les proves es va utilitzar una web cam amb un suport per tal de mantenir una distància constant per a tots els resultats obtinguts.

3.3. Proposta del prototip final

Un cop havent fet totes les proves prèvies per poder escollir la millor alternativa, s'escull l'alternativa de les resistències ja que la persistència de la imatge és tant llarga com s'estiguin excitant les resistències, els sistema que va a darrere la làmina no tindrà molta amplada cosa que farà que sigui més fàcil d'amagar, i no produeix soroll que era un efecte poc interessant.

En quant a l'efecte del píxel s'ha pogut veure que amb l'aplicació d'un aïllant entremig de les resistències i la làmina de material termocròmic i aplicant un voltatge menor, es pot reduir notòriament aquest efecte. L'aïllament escollit ha sigut el del feltre, ja que és el material que ha generat una imatge més interessant per a l'artista i per tant més proper als objectius que es volen complir.

En quant al valor de les resistències utilitzades i que s'utilitzaran s'han calculat a partir del rang de temperatura que té el material i partint de que s'excitarien a 5 volts, tot i que més endavant es pot reduir aquest valor.

27°	28°	29°	30°	31°	32°	33°	34°	35°
Negre	Vermell	Taronja	Groc	Verd	Blau	Violeta	Violeta	Negre

Taula 2: Rang i gama de colors segons la temperatura que està submesa la làmina

La temperatura la qual assoleixen les resistències i la làmina estan condicionades per la temperatura ambient, i per tant interessaria poder modular el voltatge que s'hi aplica per tal de poder corregir l'efecte en la imatge dins d'un marge de temperatura.

Tenint en compte que la temperatura final de la resistència és:

$$T = T_a + P_d \cdot R_{th}$$

$T_a \rightarrow$ Temperatura ambient

$P_d \rightarrow$ Potència dissipada

$R_{th} \rightarrow$ Resistència tèrmica

Considerem una temperatura ambient de 25° i per als diferents tipus de resistències en podem saber la seva resistència tèrmica.

Agafant un valor de resistència de 220Ω ja que és el que ens dona la potència desitjada per un voltatge de 5 V, estudiem diferents encapsulats:

Càpsula	L	W	h	Pn (mW)	Rth(°/W)
1206	3,2	1,6	0,55	250	53
2010	5	2,5	0,6	500	45
2512	6,3	3,15	0,65	1000	25
CMF60	6,1	2,3	2,3	250	100
MF1/4	6,3	2,3	2,3	250	140

Taula 3: Propietats resistències segons càpsula. Les tres primeres són SMD (essent la tercera la utilitzada en l'exemple del rellotge) i les dues últimes són Through-Hole.

Per aquest valor de resistències i amb un voltatge de 5 volts la potència dissipada és de 0,114 W. Per tant amb la fórmula i tenint en compte els diferents encapsulats obtenim:

Càpsula	T	dT(T-Ta)
1206	31,0	6,0
2010	30,1	5,1
2512	27,8	2,8
CMF60	36,4	11,4
MF1/4	40,9	15,9

Taula 4: Temperatures obtingudes segons capsules.

Amb aquests resultat s'opta per l'encapsulat MF1/4 ja que és el que compleix amb el rang de temperatura i té una mida que ja és la buscada per tal de satisfer els objectius que es busquen al projecte. Aquesta resistència és del tipus Through-Hole que profunditzant més són prou interessants ja que tenen una dissipació de la calor cilíndrica en totes direccions igual mentre que les SMD dissipen més calor cap a la placa i les pistes d'aquesta que no pas cap a la superfície, de la resistència i necessiten de més voltatge/corrent per poder

arribar a les temperatures desitjades. En conclusió, s'utilitzen resistències de 220 Ω, del tipus Through-Hole de ¼ de Watt.

En quant a la distribució de files i columnes de les resistències se'n van plantejar i provar dues, que són les que podem veure en la següent imatge:



Figura 19: Primera distribució de resistències

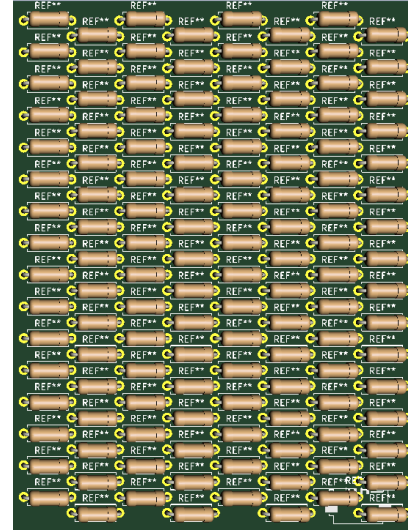


Figura 20: Segona distribució de resistències

La idea era veure si amb la segona distribució es veia una línia més continua ja que es reduïa l'espai entre resistències, encara que això pogués arribar a empitjorar la qualitat de la imatge, encara que com marcaven els objectius tampoc s'hagués empitjorat fins a un punt molt important. Per comprovar això es va fer una petita placa amb resistències posades amb les dues distribucions i amb un filtre aplicant 5 volts a cada resistència se'n va observar els resultats per a un conjunt de quatre i cinc resistències consecutives activades respectivament..

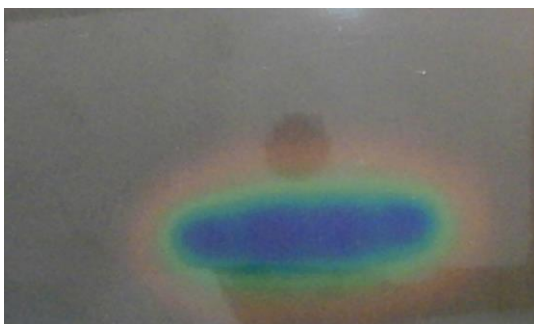


Figura 21: Resultat primera distribució (quatre resistències)

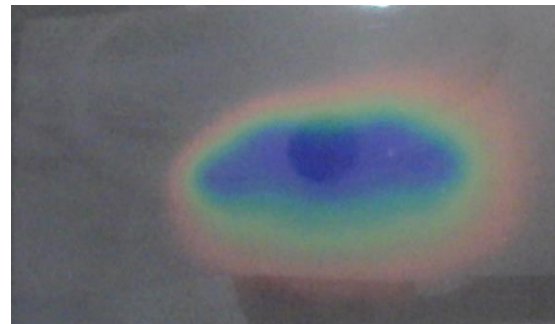


Figura 22: Resultat segona distribució (cinc resistències)

Un cop vistos els resultats de les dues distribucions, es va escollir la primera distribució ja que no generava tants espais com s'esperava i d'aquesta manera no empitjoravem la qualitat de la imatge final que ja per sí seria prou baixa.

Després d'haver pres la decisió de quina distribució seguir, s'han estudiat diversos drivers per poder excitar les resistències d'una amb una amb la idea que el driver que les pogués controlar tingués un latch perquè aquestes només s'haguessin d'excitar una vegada per

software i fins que no se'ls hi digui res no canviïn d'estat. Com ja s'ha comentat amb anterioritat però la idea de un latch per resistència com en el cas del rellotge del CERN no acabava de convencer ja que semblava una opció sobredimensionada sobretot en cost tant per driver com de muntatge més endavant ja que obliga a externalitzar el muntatge del prototipus, per això es van cercar altres drivers que poguessin complir amb les necessitats del projecte.

Com a primera opció es va investigar sobre drivers que s'utilitzen pel control de LED's, que a més donava l'avantatge de poder regular la intensitat per a cada resistència, tot i no ser un factor crucial. Tot i això es van haver de descartar ja que aquests disposaven d'una protecció ja que se suposa que són LED's el que hi ha a cada pin i no resistències, i genera una condició d'error perquè no és un LED el que s'hi connecta i el voltage que hi cau és diferent a l'esperat. Per aquest motiu es va optar per expansors E/S (I/O Expanders en anglès) que ens donaven la opció d'activar o desactivar els diferents pins per mitjà de comunicació I2C el que simplifica molt el muntatge hardware. Al haver de controlar moltes resistències és necessari agafar el driver més gran al mercat i a un preu raonable que són els de 16 ports.

Els dos drivers que s'han provat han sigut el PCF8575 i el MCP23017, el primer en la seva versió de 8 ports. Els dos tenen adreça configurable i comunicació I2C així com 16 sortides, així que es va acabar utilitzant el MCP23017 ja que les prestacions que són necessàries pel projecte són molt semblats i té un cost inferior al PCF8575.

Functional Block Diagram

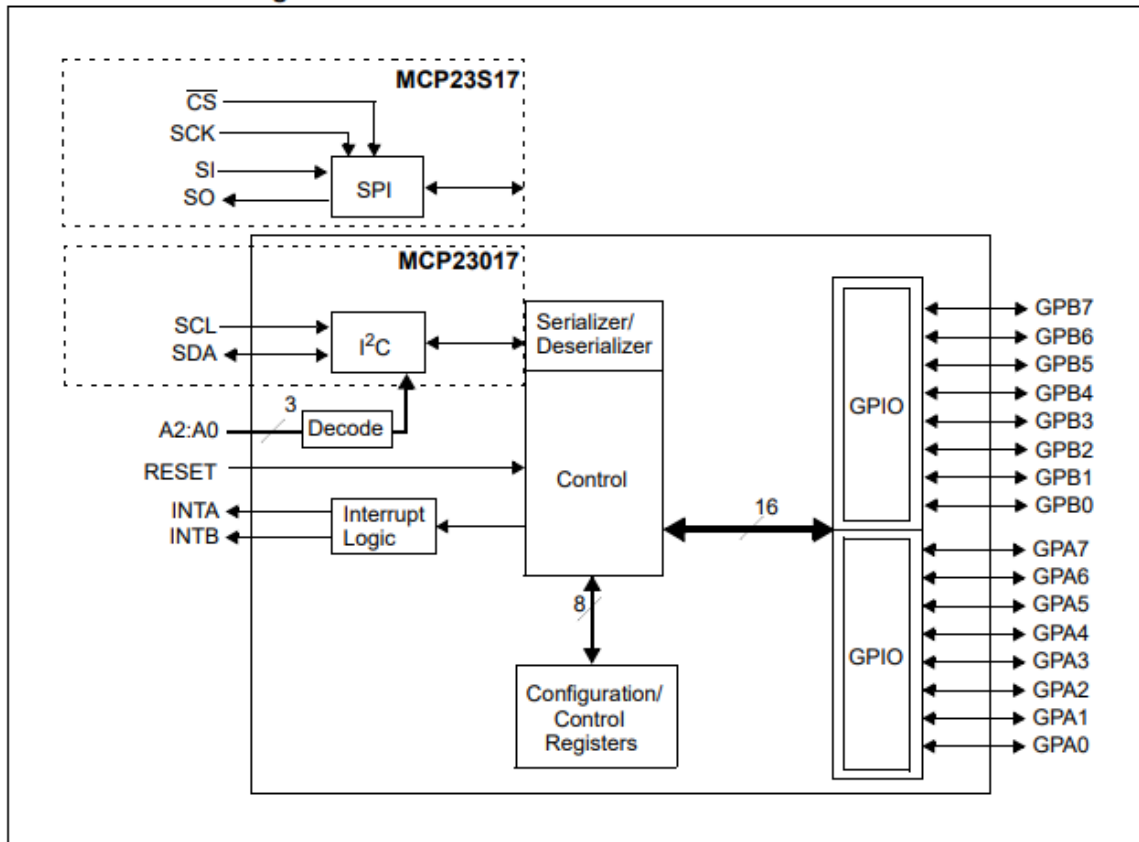


Figura 23: Diagrama de blocs del MCP23017 extret del datasheet del producte¹²

3.3.1. Disseny hardware sistema final

Tenint en compte la distribució que s'ha escollit, que cada driver pot controlar a 16 resistències i que cadascun d'aquests drivers MCP23017 I2C tenen 3 bits d'adreça es subdivideix el sistema final que ha de ser de 40x40 cm en diferents mòduls. Cada mòdul serà una placa que tindrà per tant 128 (8 adreces x 16 resistències) resistències cada un. La mida d'aquest mòdul per tal de tenir una distancia la qual la imatge pugui quedar d'una manera continua serà de 8 x 8 cm. Aquesta mida surt de que és la placa al màxim comprimida per tal de respectar les distàncies entre resistències d'una mateixa fila i els forats necessaris per poder-les soldar seguidament.

Per tant, per tal de obtenir el sistema al complet seran necessaris 25 mòduls que es podran seleccionar mitjançant multiplexors I2C. Tot anirà controlat mitjançant una Arduino UNO, que alimentarà a la vegada la lògica dels drivers. I les resistències estaran alimentades amb una font d'alimentació a la qual es pugui regular el voltatge posant la massa d'aquesta font amb comú de l'Arduino i els MCP23017, que amb aquesta configuració esmentada pot donar un màxim de 25 mA, suficient ja que amb el voltatge a 5V per cada resistència hi passen aproximadament 23 mA.

Per tal de veure-ho amb més detall, a continuació es descriu el disseny d'una sola placa (un sol mòdul) de 128 resistències.

¹² Datasheet: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/20001952c.pdf>

Així la placa es pot dividir en 8 regions, una regió per cada MCP23017, i cada MCP23017 té 2 ports A i B amb 8 sortides cada un, així doncs cada regió encara es pot subdividir en dues més. Així per a cada placa enviarem la paraula que faci falta al port A o B al MCP23017 que correspongui segons adreça. Cada placa conté 128 resistències, i cada MCP23017 en té associades 16.

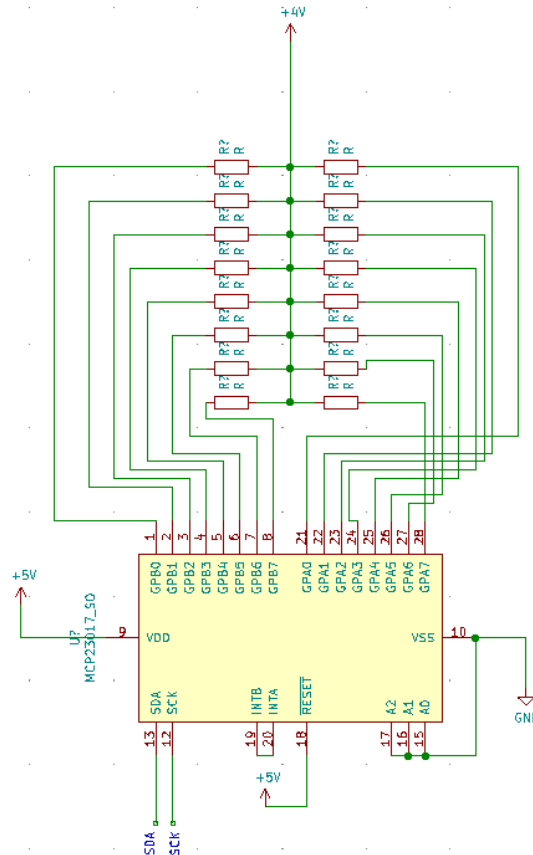


Figura 24: Esquemàtic de una de les 8 parts iguals de la placa

En primera instància els divers es volien col·locar com es pot observar en la següent figura:

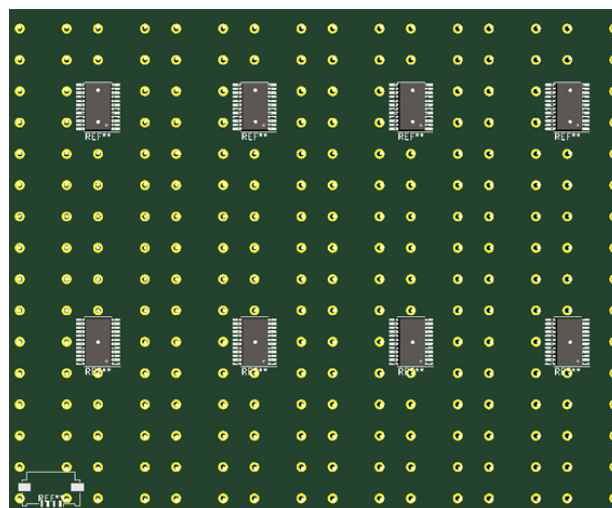


Figura 25: Opció de distribució drivers a la placa

Aquesta distribució però es va acabar descartant ja que aquests drivers s'escalfen i per tant dissipaven calor cap a la placa i les vies tal com s'ha comentat anteriorment amb les resistències SMD i podrien acabar veient-se zones en la làmina termocròmica i escalfant resistències no actives que per tant acabarien empitjorant el resultat final.

Així l'alternativa escollida és la de posar connectors enlloc del driver directament i connectant els drivers mitjançant plaques més petites en perpendicular a la placa de resistències i interconnectant-los tots en una altra placa per tal de connectar tots els pins de I2C i alimentació dels drivers (Vcc i GND).

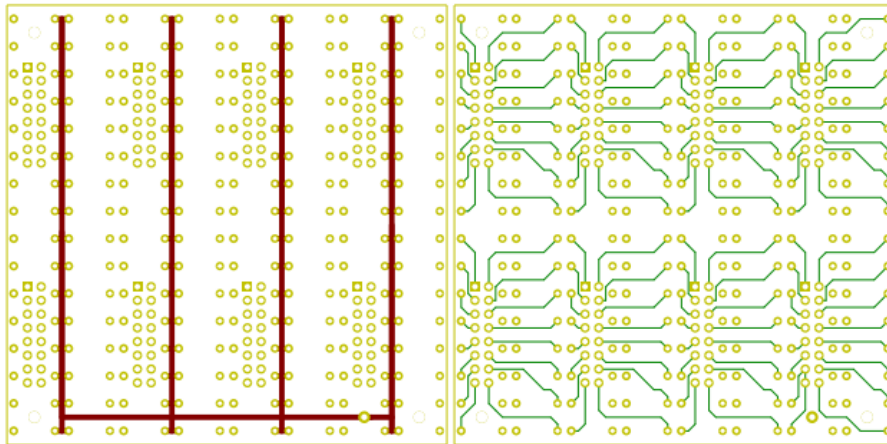


Figura 26: Layout de la placa utilitzada en el prototip final

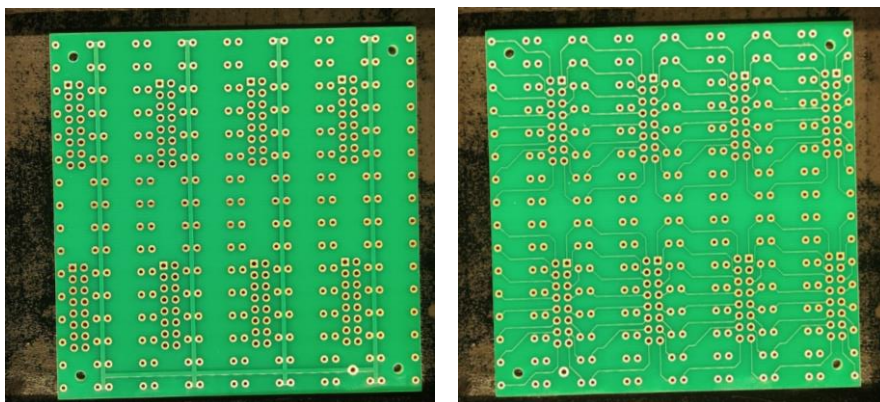


Figura 27: Imatge anvers i revés placa de resistències prototip final

Com podem veure la distribució final de les resistències i els connectors dels drivers, totes les resistències de un terminal van a un pin comú amb un terminal tipus regleta per la part de darrere que serà pel qual se'ls hi podrà aplicar el voltatge que es vulgui amb una font d'alimentació independent ja que l'Arduino no és capaç de donar suficient intensitat, ja que suposant que totes les resistències estiguessin en ON i alimentades a 5 V, el corrent total per les resistències seria de 3 A.

En quant a la distància a la que estan els extrems de les resistències de les vores de la placa està dissenyada per què quan es posin plaques de costat, les resistències de plaques veïnes quedin a la mateixa distància a la que estan dins de la placa. En aquesta placa també s'hi ha fet 4 forats de muntatge de 2.5 mm.

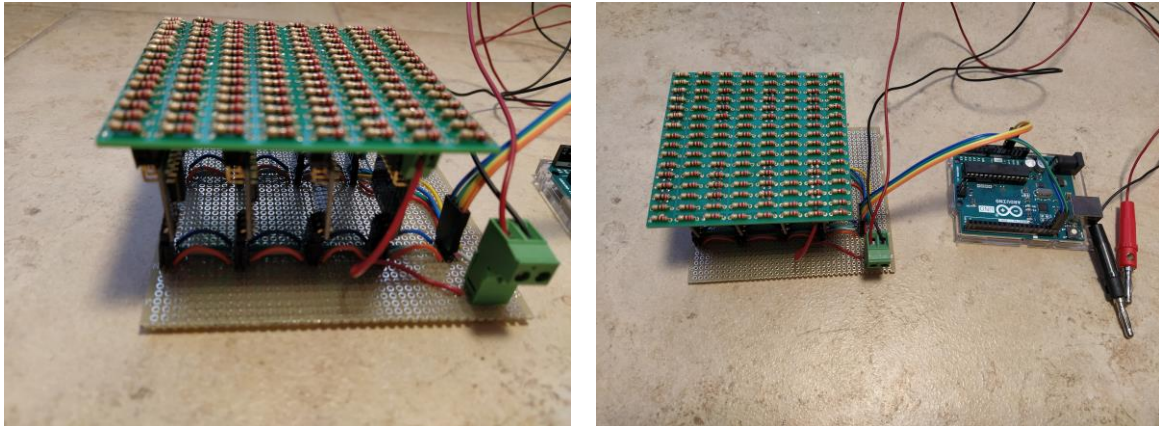


Figura 28: Prototip de un mòdul final

En les imatges anteriors els colors del cable corresponen als següents pins:

Blau: SDA (Pin Arduino UNO)

Verd: SCL (Pin Arduino UNO)

Groc: GND (Pin Arduino UNO)

Taronja: 5V (Pin Arduino UNO)

Vermell: Positiu font d'alimentació

Negre: Massa font alimentació, aquest està en comú amb el GND de l'Arduino UNO.

Per tal d'acabar el projecte al complet, seria necessari el muntatge de 24 mòduls iguals i utilitzar per exemple 4 multiplexors I2C de 8 canals, el multiplexor planejat és el TCA9548, que també permet 3 bits d'adreces, és a dir que se'n podrien utilitzar 8 com aquests el que podria controlar 64 plaques. En cas de voler-ho expandir s'hauria de optar per un altre multiplexor I2C que permetés més canals i/o més adreces.

Com podem observar en les imatges no superem l'amplada màxima que s'havia requerit, ja que no es podien superar els 15 cm i el mòdul en fa 4.8 cm, 5.2 cm contant feltre i làmina termocròmica.



Figura 29: Representació dels sistema final

En la figura anterior es veu el que aniria darrere de la làmina termocròmica, 25 plaques, el que fa un total de 3200 resistències. I s'aconsegueix complir amb l'altre requisit podent-lo fins i tot superar si es volgués, ja que s'aconsegueix tenir una sistema que en total fa 40x40cm tal i com es demanava.

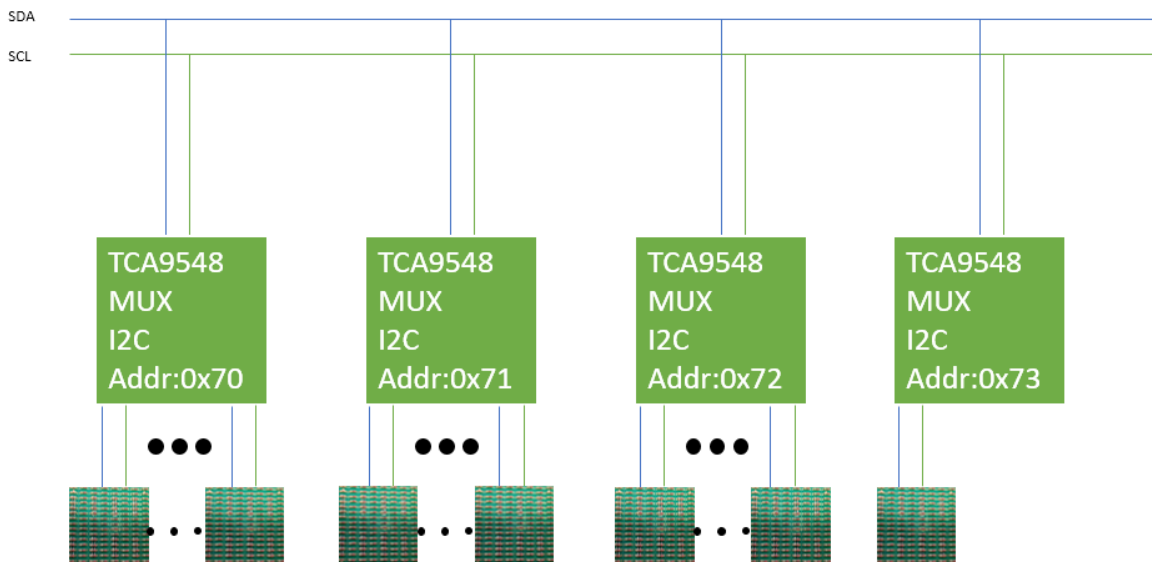


Figura 30: Esquemàtic de connexions I2C del sistema final

En l'esquemàtic s'aprecia les connexions I2C del sistema final. Tots els drivers funcionen amb els 5 V de l'Arduino UNO i les resistències estan connectades a una font d'alimentació prou potent per a poder excitar a totes les resistències necessàries, com s'ha calculat abans 3 A de corrent. Per a poder fer totes aquestes proves s'ha utilitzat una font d'alimentació del laboratori per poder variar entre 3 i 5 V però en el sistema final, per reduir costos, s'utilitzaria una font fixa de 5 V i un pont en H controlat pel senyal PWM de l'Arduino per generar els voltatges inferiors a 5 V.

3.3.2. Software del sistema

El software d'aquest projecte s'ha utilitzat els llenguatges de programació d'Arduino que és pràcticament igual al llenguatge C. Mitjançant l'Arduino IDE s'ha fet el codi per tal de que la placa Arduino controli els drivers I2C i així seleccionar les resistències a activar per cada imatge. Per altra banda s'ha utilitzat el llenguatge de programació Python per poder processar la imatge i transformar-la per tal de poder passar-la a la placa de 40x40 cm dels projecte final.

El primer pas és partir de una imatge quadrada, si no és quadrada seleccionar-ne una secció quadrada o bé canviar-li la mida afectant això a la seva forma original, un cop seleccionada la imatge se la converteix en blanc i negre pur, on la decisió de cada píxel si és blanc o negre es pot programar mitjançant un valor llindar que va de 0 a 255 depenent de el color dins de l'escala de grisos, aquest llindar està posat a 127 per defecte.



Figura 31: Imatge quadrada de color passada a blanc i negre pur

Una vegada es té la imatge en blanc i negre, aquesta es transforma a una imatge de mida (40,80) píxels ja que la imatge final tindria 40 resistències per fila i 80 per columna. Tot i això la placa és quadrada per la geometria de les resistències, això fa que la imatge final, encara que a priori sembli que es deformaria, no es deforma, sinó que es podria dir que en l'eix vertical hi ha més píxels i per tant més resolució en l'eix vertical que en l'horitzontal.

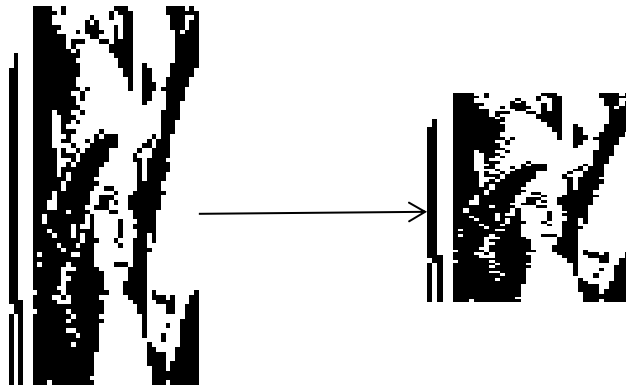


Figura 32: Imatge de (40,80) amb píxels quadrats vs. píxels rectangulars

En la figura anterior es veu com és la imatge re configurada si tots els píxels fossin quadrats a l'esquerra i a la dreta tenint en compte que els píxels en vertical són rectangulars i no quadrats.

Quan es té aquesta imatge es transposa per poder-ne llegir el que seran les paraules per cada port de cada I/O Expander i seguidament es divideix en 25 parts de 16x8 píxels, per tal de després poder direccionar a quina placa va cada valor de píxel.

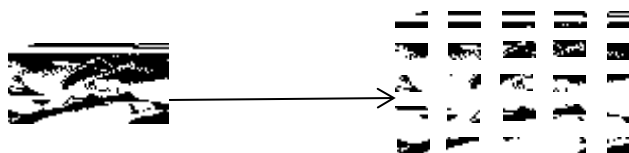


Figura 33: Fragmentació de la imatge transposada




Amb el valor de cada píxel essent 0 pels negres i 255 pels blanc, per tal de generar les paraules es passen els valors de 255 a 1 ja que per la placa posar el port a '0' és excitar la resistència mentre que posar-lo a '1' és no excitar-la.

Seguidament s'agrupen els bits per paraules de 8 bits i es passen per bus sèrie (Port USB) el qual està connectat l'Arduino de manera ordenada.

Des del codi de l'Arduino finalment es llegeixen aquestes paraules (bytes) i per mitjà de comunicació I2C s'envien les paraules als ports de cada MCP23017 passant abans pels multiplexors TCA9548.

Resultats de validació

Per tal de poder comprovar que el sistema funciona com s'espera es fan una sèrie de mesures i imatges per després poder-los discutir i si és necessari canviar quelcom del sistema.

Voltatge aplicat	Diàmetre del punt	Resultat
3 V	0.4 cm	
4 V	0.6 cm	
5 V	1 cm	

Taula 5: Diàmetre del punt generat per una sola resistència segons voltatge aplicat.

En la taula anterior es pot observar la diferència entre aplicar un voltatge sobre una resistència i l'efecte que aquesta produeix amb la calor que dissipa. Aquestes proves són per tants sols una resistència excitada. És precís comentar que hi ha més mesures amb altres aïllaments, i amb més varietat de voltatges a l'Annex que ens han portat a descartar altres voltatges i opcions que havien sorgit en un principi.

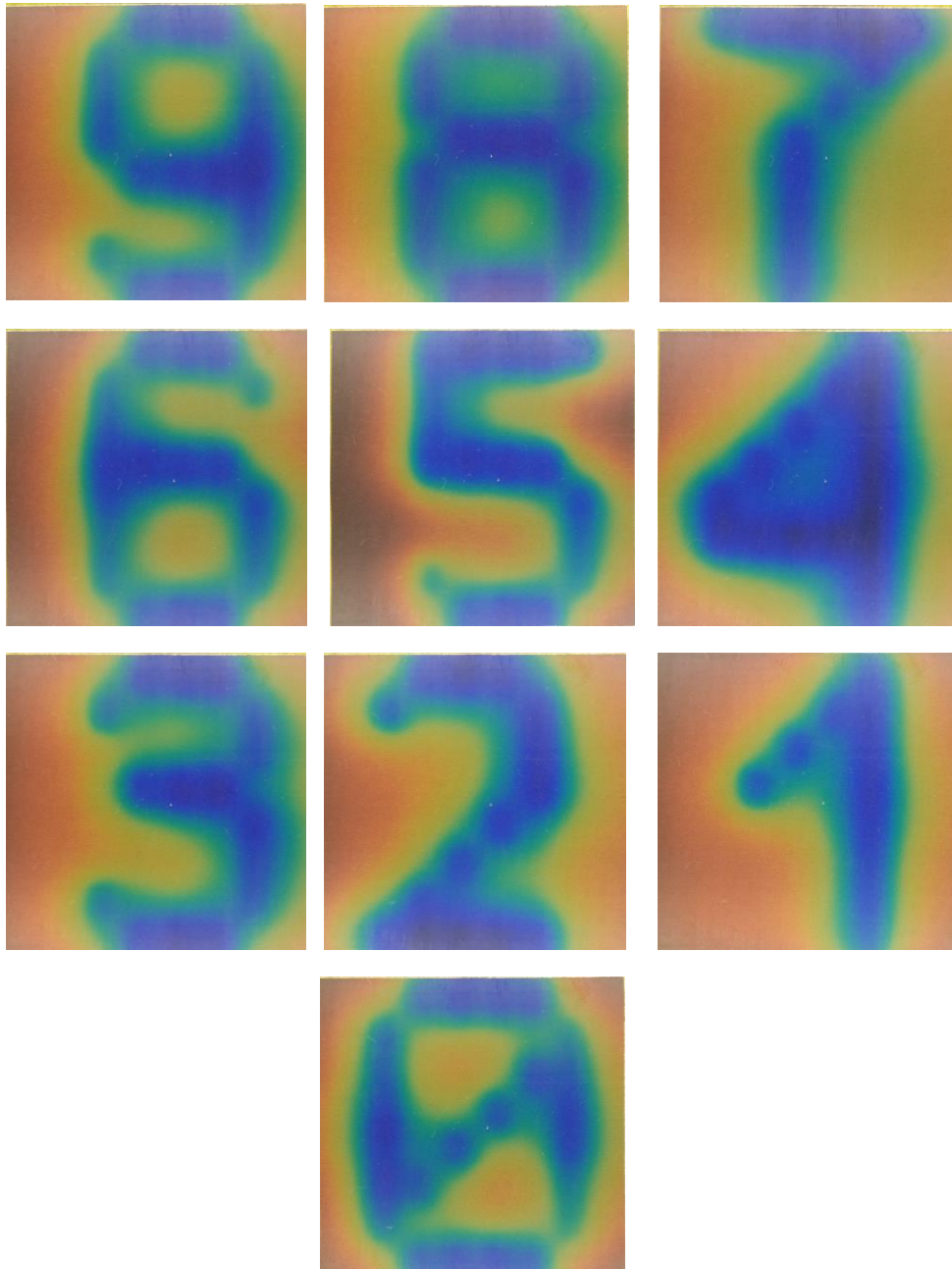


Figura 34: Dígits representats en un sol mòdul

Per veure la resolució amb un sol mòdul i poder utilitzar el sistema per alguna aplicació amb menys mòduls i que requereixi de menys resolució s'han representat els nombres del 0 al 9 amb un sol mòdul. Com es pot veure els nombres es poden distingir perfectament i per tant podem veure que els resultats són bons, i per exemple, amb 4 mòduls es podria fer un rellotge digital seguint amb l'exemple de referència de tot aquest projecte i amb la idea de fer un display amb material termocròmic. Cal recalcar que aquestes imatges estan preses excitant les resistències amb 4 volts cadascuna.

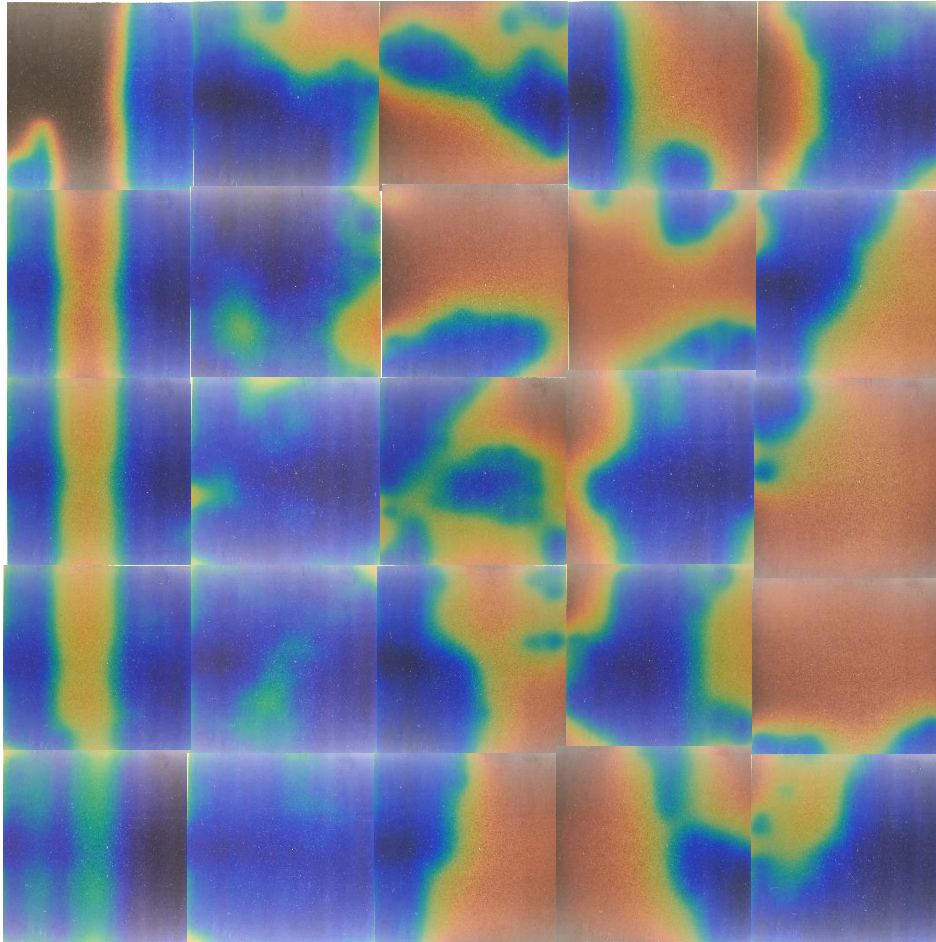


Figura 35: Representació de com quedaria una imatge formada pels 25 mòduls

Com es pot veure en la imatge final i comparant-la amb la imatge en mapa de bits en blanc i negre que havíem vist en les figures del punt 3.3.2 es compleix amb l'objectiu marcat sobre la qualitat de imatge. Les línies entre mòduls es veuen ja que és una imatge virtual realitzada a base de fer 25 fotografies, una per cada part de la imatge que aniria a cadascun dels mòduls, però obtingudes totes amb l'únic mòdul que s'ha construït. És a dir que errors d'encaix de les imatges i/o enquadraments a la hora de fer les fotografies no s'han tingut en compte ja que en el projecte final la làmina seria de 40x40 cm disposada a sobre dels 25 mòduls i on totes les resistències estarien a la mateixa distància i no tindrien la dissipació diferent als extrems del mòdul com presenta ara, així que aquestes imperfeccions no hi serien.

Així podríem posar qualsevol imatge en el sistema final i sortiria una versió de l'estil d'aquesta, que és l'objectiu marcat per l'artista. Cal recalcar que la imatge, gràcies al feltre que hi ha entremig de les resistències i la làmina termocròmica, s'aconsegueix que tingui una certa continuïtat i difusió dels píxels o geometria de les resistències, el que era l'objectiu més important a solucionar des d'un inici.

4. Pressupost

A continuació es mostra la taula per la fabricació del prototip:

PRODUCTE/SERVEI	UNITATS	PREU/UNITAT (€)	COST (€)
RESISTÈNCIES 220Ω	128	0,16	20,48
MÒDUL MCP23017	8	3,25	26
PCB RESISTÈNCIES	3	50	150
TIRES PIN FEMELLA 2X20	3	0,65	1,95
TIRES PIN FEMELLA 1X40	5	0,23	1,15
BLOCS TERMINAL CABLE A PLACA	2	0,34	0,68
CABLE	2	2,7	5,4
CONNECTORS BANANA	2	1,48	2,96
ARDUINO UNO	1	23,09	23,09
CABLE USB	1	8,88	8,88
PACK CABLES DUPONT	1	7,99	7,99
MUNTATGE	3	9	27
		Total:	275,58

Taula 6: Cost del prototip

En la següent taula es mostra una taula amb les hores de desenvolupament del projecte dedicades:

TASCA	HORES	COST/HORA (€)	COST (€)
DISSENY	202,5	8	1620
PROVES I MESURES	135	8	1080
MUNTATGE	35	8	280
REDACCIÓ	52,5	8	420
		Total:	3400

Taula 7: Cost de desenvolupament del projecte

Seguidament es mostra el preu del material termocròmic el qual s'ha treballat:

MATERIAL	UNITATS	PREU/UNITAT (€)	COST (€)
LÀMINA TERMOCRÒMICA 105X148 MM	3	9,99	29,97
LÀMINA TERMOCRÒMICA 150X150 MM	1	12,95	12,95
VINIL DE CRISTALL LÍQUID TERMOCRÒMIC 450X350MM	1	42,36	42,36
KIT DE DEMOSTRACIÓ DE MATERIALS INTEL·LIGENTS	1	151,17	151,17
		Total:	236,45

Taula 8: Cost del material termocròmic

En la següent taula tenim el cost per a la fabricació dels 25 mòduls del projecte:

PRODUCTE/SERVEI	UNITATS	PREU/UNITAT (€)	COST (€)
RESISTÈNCIES 220Ω*****	5000	0,005	25
MÒDUL MCP23017	200	3,25	650
MÒDUL TCA9548	4	1,9	7,6
PCB RESISTÈNCIES****	25	1,56	39
PCB CONNEXIONS****	25	1,56	39
TIRES PIN FEMELLA 2X20	75	0,65	48,75
TIRES PIN FEMELLA 1X40	125	0,23	28,75
BLOCS TERMINAL CABLE A PLACA	50	0,34	17
CABLE***	5	2,7	13,5
CONNECTORS BANANA	2	1,48	2,96
ARDUINO UNO	1	23,09	23,09
CABLE USB	1	8,88	8,88
PACK CABLES DUPONT	1	7,99	7,99
MUNTATGE**	75	9	675
		Total:	1586,52

Taula 9: Cost dels 25 mòduls

*El preu/unitat dels productes pot canviar segons la quantitat demanada i el plaç d'entrega

**En el muntatge a la columna unitats s'hi representen les hores i en la de Preu/unitat (€) el cost/hora del muntatge

***En els cables les unitats són en metres i el preu/unitat és preu/metre

**** Hi ha un mínim de fabricació de 5

*****Es subministren en múltiples de 5000

5. Conclusions i propostes de futur:

Del sistema final i dels resultats obtinguts en podem extreure que s'han complert amb tots els objectius i requisits fixats al principi tenint en compte que no s'ha muntat el sistema final de 40x40 cm sinó un prototipus de prova de concepte, un sol mòdul.

S'ha aconseguit un sistema modular el qual té una amplada idònia per tal de que l'artista el pugui "amagar" fàcilment, i que permet generar mides molt diverses per a diferents mides de làmina termocròmica, el que també provoca que això pugui fer augmentar o disminuir la resolució de la imatge final, el què s'hauria d'actualitzar el software per cada disposició de plaques.

En quant a la imatge obtinguda, es compleix amb l'eliminació de l'efecte píxel, mitjançant un aïllament, que és el feltre, i resistències del tipus Through Hole, les quals dissipen la calor de manera cilíndrica el que ajuda que el punt que aquestes generen no sigui rectangular/quadrat, a més a més amb el sistema de 40x40 cm la resolució obtinguda és la buscada per l'artista, i per tant compleix amb l'objectiu de baixa resolució però la suficient com per poder intuir i interpretar la imatge que s'hi està representant.

Com a conseqüència d'haver optat pel sistema amb resistències, el que obtenim és un sistema silenciós i fàcil de dissimular ja que no genera sorolls, com generava la opció de l'aire calent tant pel posicionador com la mateixa estació d'aire, ni requereix de una amplada gran com en l'alternativa del làser dirigit per un galvanòmetre. També s'aconsegueix una imatge persistent i que pot tenir les dimensions i detall que siguin, ja que no es requereix de un escombrat ni de resseguir les línies traçades ja que les resistències s'engeguen pràcticament totes a la vegada generant un efecte d'aparició de la imatge que també ha estat molt ben valorat per l'artista. To això fa que es pugui complir amb aquesta intriga de l'observador per tal de descobrir quin és el mètode o sistema que s'utilitza per generar la imatge que té al davant.

Com a propostes de futur hi hauria la de poder tenir un millor control de la temperatura de les resistències i per tant del voltatge a aplicar-les-hi per tal de poder tenir un millor control en la imatge. També que podria ser totalment complementari, un sensor de temperatura ambient que també jugaria un paper important a l'hora de decidir el voltatge a aplicar.

Com a millora més laboriosa i idíl·lica la generació d'un software de reconeixement d'imatge mitjançant una càmera, el qual controlés quan la superfície que està canviant de color ja s'ha expandit massa i per tant es perd massa resolució d'imatge, com a conseqüència que es decidís abaixar el voltatge aplicat fins a obtenir una imatge bona. Aquesta idea sorgeix de que quan fa molta estona que s'hi està aplicant un voltatge, depèn molt de la temperatura ambient que la imatge es torni de massa poca qualitat, pel que s'hauria de fer un estudi concret sobre quin voltatge aplicar depenent de la temperatura ambient i fins i tot depenent d'aquesta temperatura ambient, tenir a la disposició làmines que reaccionin a un altre rang de temperatures.

Finalment, i a tall més personal, valoro molt positivament l'haver tingut aquesta oportunitat de treballar en un àmbit totalment diferent i nou per a mi que considero que m'ha fet créixer enriquir tant acadèmica, professional com personalment.

Bibliografia:

[1] Web oficial de Dilalica: <https://www.dilalica.com/es>

[2] Article del rellotge fet amb resistències: <https://hackaday.com/2020/05/24/matrix-of-resistors-forms-the-hot-hands-behind-this-thermochromic-analog-clock/>

[3] Informació sobre material termocròmic: <https://www.hisour.com/es/thermochromism-24806/>

[4] Imatges d'exemple:

<https://www.opitec.es/kits-de-construccion/cartulina-papel/tiles/l-mina-termocr-mica.html?searchparam=termocr%C3%B3mico&redirected=1>

<https://www.sensores-temperatura.com/es/termometro-para-calendario/termometro-para-calendario-pack>

<http://solucionespackaging.com/tintas-cromaticas-packaging/>

<https://www.colourchange.com/thermochromic-plastic/>

[5] Làmines termocròmiques i materials adquirits:

<https://www.opitec.es/kits-de-construccion/cartulina-papel/tiles/l-mina-termocr-mica.html?searchparam=termocr%C3%B3mico&redirected=1>

<https://www.sfxco.co.uk/es/collections/thermochromic-vinyls/products/smart-materials-demonstration-pack-large>

<https://www.sfxco.co.uk/es/collections/thermochromic-vinyls/products/lc-liquid-crystal-thermochromic-sheets?variant=6780064897>

<https://www.sfxco.co.uk/es/collections/thermochromic-vinyls/products/liquid-crystal-vinyl-sheet-colour-changing-matt-film>

[6] Datasheet MCP23017:

<https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/20001952c.pdf>