

Resum

La present memòria descriu el disseny, programació i elaboració d'un artefacte que simula un orgue de tubs d'aspecte fantasmagòric. Aquest, disposa d'un microcontrolador que fa sonar una peça musical i controla la il·luminació dels tubs de manera concordant.

A la primera part del projecte, es decideixen les funcions del prototip, les característiques que ha de tenir l'orgue fantasmagòric i l'elecció de perifèrics i components necessaris; com per exemple la família del microcontrolador, el nombre de tubs, el material de l'estructura i el component encarregat de reproduir el so.

A continuació, es descriu la solució adoptada on s'explica el funcionament, el circuit electrònic, el conjunt de components utilitzats i els diferents processos de mecanitzat utilitzats durant la conformació de l'artefacte.

Finalment, es detalla la programació del microcontrolador. S'exposa el mètode de transcripció de partitures que s'ha dut a terme i l'emmagatzematge de les dades obtingudes de la partitura i s'explica detalladament el codi de programa i la funció que realitza cada fragment de codi.

Sumari

RESUM.....	1
SUMARI.....	2
1. PREFACI.....	6
1.1. Origen del projecte.....	6
1.2. Motivació.....	6
1.3. Requeriments previs.....	6
2. INTRODUCCIÓ.....	8
2.1. Objectius del projecte.....	8
2.2. Antecedents.....	9
2.3. Abast del projecte.....	9
3. FONAMENTS TEÒRICS.....	10
3.1. Tocata i fuga en re menor de Bach.....	10
3.2. Théremin.....	11
4. REPRODUCCIÓ D'ÀUDIO.....	13
4.1. Melodies de la Tocata i fuga.....	13
4.1.1. Monofònic.....	13
4.1.2. Polifònic.....	14
4.1.3. Comparativa d'alternatives.....	15
4.2. Opcions d'àudio.....	16
4.2.1. Tocata i fuga.....	16
4.2.2. Tocata i fuga i una segona peça musical.....	16
4.2.3. Tocata i fuga i Théremin.....	16
4.2.4. Tocata i fuga, una segona peça musical i Théremin.....	17
4.2.5. Comparativa d'alternatives.....	17
5. CIRCUIT ELECTRÒNIC.....	19
5.1. Sistema de control dels LED.....	19
5.1.1. Microcontrolador amb tantes sortides digitals com LED a controlar.....	19
5.1.2. Registre de desplaçament 74HC595.....	19
5.1.3. Matriu de LED.....	20
5.1.4. Control mitjançant Charlieplexing.....	21
5.1.5. Comparativa d'alternatives.....	22

5.2. Família del microcontrolador.....	23
5.2.1. Microcontrolador PIC.....	23
5.2.2. Placa Arduino.....	23
5.2.3. Comparativa d'alternatives.....	24
5.3. Model de la placa del microcontrolador.....	24
5.3.1. Arduino Pro Mini.....	25
5.3.2. Arduino Micro.....	25
5.3.3. Arduino Nano.....	26
5.3.4. Comparativa d'alternatives.....	27
5.4. Generador de so.....	28
5.4.1. Brunzidor.....	28
5.4.2. Altaveu petit.....	28
5.4.3. Comparativa d'alternatives.....	29
6. ESTRUCTURA.....	30
6.1. Nombre de tubs.....	30
6.1.1. Trenta-dos tubs.....	30
6.1.2. Trenta-sis tubs.....	30
6.1.3. Quaranta tubs.....	31
6.1.4. Quaranta-vuit tubs.....	32
6.1.5. Comparativa d'alternatives.....	32
6.2. Model tubs d'assaig.....	33
6.2.1. Tub d'assaig amb tap de rosca.....	34
6.2.2. Tub d'assaig sense tap.....	34
6.2.3. Comparació d'alternatives.....	36
6.3. Mida dels tubs d'assaig.....	37
6.3.1. Tub d'assaig de 16×100 mm.....	37
6.3.2. Tub d'assaig de 16×120 mm.....	38
6.3.3. Tub d'assaig de 16×150 mm.....	39
6.3.4. Comparació d'alternatives.....	40
6.4. Material de l'esquelet de l'orgue fantasmagòric.....	41
6.4.1. Canonades de coure.....	41
6.4.2. Canonades de PVC.....	42
6.4.3. Comparativa d'alternatives.....	43
7. DISSENY DEL PROTOTIP.....	44
7.1. Descripció de la solució adoptada.....	44
7.2. Components i material.....	49
7.2.1. Reproducció de so.....	49
7.2.2. Reproducció visual.....	52

7.2.3. Estructura.....	54
7.2.4. Caixa de control.....	58
7.2.5. Altres.....	60
7.3. Mecanitzat.....	62
7.4. Cost del prototip.....	63
8. PROGRAMACIÓ.....	66
8.1. Transcripció de les partitures.....	66
8.2. Memòria flash	72
CONCLUSIONS.....	75
AGRAÏMENTS.....	76
BIBLIOGRAFIA.....	77

1. Prefaci

1.1. Origen del projecte

Aquest projecte consisteix en dissenyar, programar i construir un orgue d'aspecte fantasmagòric, controlat amb un microcontrolador, que faci sonar una melodia i controlar, al compàs de la música, una sèrie de LED ultraviolats per tal d'il·luminar uns tubs d'assaig que contenen una substància fluorescent.

La idea està basada en un projecte de John Park publicat al bloc d'Adafruit¹ on un microcontrolador controla de forma aleatòria una sèrie de LED ultraviolats que il·luminen uns tubs d'assaig amb una substància fluorescent. Aquests tubs estan col·locats de manera que simulen un orgue de tubs.

1.2. Motivació

La voluntat de formar-me en la programació de microcontroladors i el disseny de circuits electrònics, combinat amb l'interès personal per a la música, és la major motivació per a la realització d'aquest projecte.

Altrament, que el projecte consti d'una part teòrica i també d'una notable part pràctica, a diferència d'altres projectes que són íntegrament teòrics, és un altre incentiu. El fet de confeccionar l'orgue prèviament dissenyat i programat és un gran al·licient.

1.3. Requeriments previs

Per a realitzar aquest projecte són necessaris uns coneixements bàsics d'electrònica, imprescindibles per al disseny i l'elaboració del circuit electrònic de l'orgue.

També, tenir coneixement del llenguatge de programació en C++ és indispensable ja que el llenguatge de programació d'Arduino està basat en C++.

Per tal de dissenyar i simular l'estructura és necessari tenir dominar algun software de CAD (*computer-aided design*), en aquest cas de SolidWorks.

¹ <https://blog.adafruit.com/2016/10/17/new-guide-john-parks-mad-science-test-tube-rack-adafruit-johnedgarpark-halloween/>

Finalment, també és imprescindible tenir coneixença de la teoria musical per tal de poder transcriure les partitures a un llistat de notes i durades.

2. Introducció

El present projecte pretén dissenyar, programar i elaborar un orgue fantasmagòric. Es fa servir un microcontrolador per fer sonar una peça musical amb un o més dispositius perifèrics i controlar de forma concordant la il·luminació dels tubs de l'orgue. Per tal de donar-li un aspecte fantasmagòric i misteriós, els tubs contenen una substància fluorescent.

La funció de l'orgue fantasmagòric és ser exhibit a mode de demostració dels projectes que es realitzen al Departament d'Energia Elèctrica durant les visites que es realitzen a l'Escola, com per exemple les visites d'estudiants preuniversitaris.

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte és el disseny, la programació i la construcció d'un orgue fantasmagòric per ser mostrat a les visites d'estudiants preuniversitaris.

Per tal de satisfer l'objectiu principal, cal que es compleixin una sèrie de requisits:

- 1- Aspecte fantasmagòric. És fonamental que visualment l'orgue tingui un aspecte fantasmagòric per crear una "atmosfera de terror".
- 2- Il·luminació dels tubs amb una substància fluorescent. La fluorescència dels tubs contribueix de manera visual a crear un clima misteriós.
- 3- Reproducció d'àudio. La part auditiva és un requisit imprescindible per simular l'instrument musical. La reproducció d'una peça musical com la Toccata i Fuga contribueix a crear l'ambient fantasmagòric.
- 4- Manejabilitat. És important que l'orgue es pugui transportar i emmagatzemar amb facilitat. Això implica un pes i unes dimensions raonables.
- 5- Possibilitat d'ampliació. La possibilitat d'afegir noves melodies de manera pràctica i senzilla és un requisit que cal complir.
- 6- Atractiu. És imprescindible que l'orgue sigui atractiu visual i auditivament per tal d'atraure l'atenció de les visites i que s'emportin una bona impressió.
- 7- Robust. L'orgue ha de ser resistent a petits cops, a ser transportat i al pas del temps.
- 8- Fàcil de reparar. Amb el pas del temps i el transport l'orgue pot patir algun defecte. És important que sigui senzill de desmuntar i accedir a les connexions per tal de poder fer-hi

les reparacions pertinents amb una certa comoditat.

9- Segur. S'ha de poder manipular i interactuar sense córrer cap perill. Això implica que no ha de contenir substàncies tòxiques que suposin un risc per la integritat de l'usuari.

2.2. Antecedents

Aquest projecte és una ampliació del projecte de John Park publicat al bloc d'Adafruit, per tant, hi ha certes decisions preses en el projecte de partida que s'han assumit i incorporat directament perquè ja s'ha comprovat que són adequades i funcionals. Aquestes decisions són l'elecció del model de LED de llum ultraviolada, el tipus de pigment fluorescent i el material i la mecanització de la peça que sustenta els tubs d'assaig a l'estructura de l'orgue fantasmagòric.

El model de LED de llum ultraviolada utilitzat és el **UV/UVA 400nm Purple LED 5mm Clear Lens - 10 pack (PRODUCT ID: 1793)** de la botiga online d'Adafruit².

Els pigments fluorescents són els **GloMania 10 Color Set Mini Sampler Neon Pigment Powder, Black Light UV Reactive, Fluorescent** d'Amazon³.

La peça que sustenta els tubs d'assaig a l'estructura és de metacrilat i es mecanitza mitjançant el tall amb làser.

2.3. Abast del projecte

El projecte abasta el procés de disseny de la part electrònica i de l'estructura; l'adquisició dels components i materials necessaris; la programació del microcontrolador, i el muntatge del circuit electrònic i de l'estructura de l'orgue fantasmagòric.

² <https://www.adafruit.com/product/1793>

³ <https://www.amazon.com/gp/product/B00FPRFUMQ/>

3. Fonaments teòrics

3.1. Tocata i fuga en re menor de Bach

La Tocata i fuga en re menor, BWV 565, és una peça musical escrita per a orgue entre el 1703 i el 1707 per Johann Sebastian Bach (1).

Per transcriure la partitura a un seguit de notes i duracions ordenades s'ha partit d'una partitura simplificada per a piano extreta de **TaPartoche**^{X4} i ha estat adaptada a les dues veus que poden ser reproduïdes simultàniament.

El fragment que es reproduïx comprèn des del compàs u fins el vint-i-quatre (inclosos), el qual pot dividir-se en dues parts.

Primera part. *Adagio*

La primera part està conformada pels compassos u a nou (inclosos) de tempo *adagio*. És el tema principal de la peça que consta d'una melodia principal desdoblada per la segona veu dues octaves per sota. Al final del fragment hi ha un arpegi de l'acord de do sostingut sèptima disminuïda que li dona aquest aire fantasmagòric i misteriós a la peça. Finalment acaba amb un acord de re major.

Segona part. *Prestissimo i Lento*

La segona part comprèn del compàs deu al vint-i-quatre (inclosos). Aquesta part pot dividir-se en dos fragments en funció del tempo de reproducció:

Prestissimo

Fragment del compàs deu al vint-i-u (inclosos) de tempo *prestissimo*. És la part visual i auditiva més espectacular reproduïda amb l'orgue fantasmagòric: una successió d'arpegis primer ascendents i després descendents a ritme frenètic culminen en el *lento* final.

4 <http://es.tapartoche.com/Particiones/Titulos/bwv-565-tocata-y-fuga-en-re-menor-piano-v0.php>

Lento

Fragment del compàs vint-i-dos al vint-i-quatre (inclosos) de tempo *lento*. El frenesí dels arpegis dóna peu, de manera sobtada, al *lento* que indica que s'aproxima el final. Torna a aparèixer l'acord "fantasmagòric" de do sostingut sèptima disminuïda que harmonitza la melodia, la qual reproduceix una successió de notes descendents i ascendents per desembocar a la frase musical descendent final, amb el trino característic de la música barroca, cap a l'acord de re menor que conclou el fragment reproduït.

El conjunt del fragment reproduït té una durada de quaranta-cinc segons, suficient per mostrar les diferents possibilitats visuals i auditives que ofereix l'orgue. Primerament es reproduceix una de les melodies més famoses de la música barroca i finalment ofereix un espectacular efecte visual i auditiu.

3.2. Théremin

El théremin és un instrument musical electrònic, creat el 1920 per Lev Termen (León Theremin als Estats Units d'Amèrica), que pertany a la família dels instruments electròfons perquè el so es genera mitjançant circuits elèctrics. També forma part del subgrup d'instruments ràdio-elèctrics perquè genera i amplifica el so de forma totalment elèctrica sense la utilització de cap mecanisme.

L'instrument està format per una caixa amb dues antenes metàl·liques, horitzontal i vertical, que controlen respectivament el volum i el to. El to (freqüència) i el volum (amplitud) estan controlats per la capacitància que hi ha entre les antenes i el cos de l'intèrpret, que varia en funció de la distància que hi ha entre tots dos **(2)**.

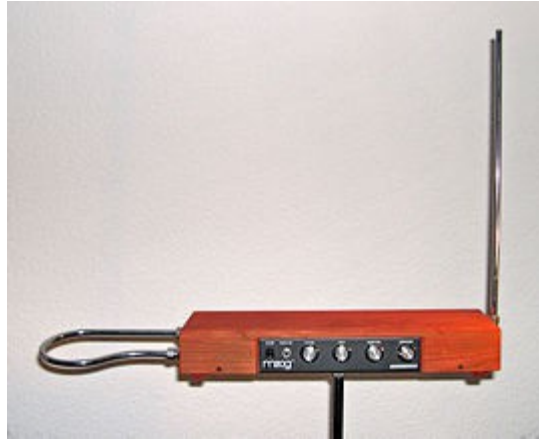


Figura 3.1: Thérémin⁵

En aquest projecte, l'orgue fantasmagòric disposa de l'opció d'interactuar-hi controlant el to de les dues veus que es reproduïxen amb la distància que hi ha entre les mans de l'usuari i els sensors d'ultrasons del prototip; aquesta opció s'anomena funcionalitat (o funció) de thérémin per la semblança que hi ha amb la manera de tocar l'instrument electrònic. Tot i aquesta similitud aparent, hi ha tres diferències bàsiques que es detallen a continuació.

La primera diferència és el fet que el thérémin és un instrument monofònic, només reproduïx un to simultàniament. En canvi, l'orgue fantasmagòric pot reproduir dos tons diferents simultàniament.

La segona és que el thérémin controla amb una antena el to i amb l'altra el volum. D'altra banda, cadascun dels dos sensors del prototip controlen el to d'una de les dues veus sense possibilitat de controlar-ne el volum.

I la tercera diferència és que el thérémin mesura la distància a la que es troba el cos de l'intèrpret mitjançant la capacítancia que hi ha entre l'antena i aquest. Altrament, l'orgue fantasmagòric ho fa emetent un so no audible i mesurant el temps que tarda en arribar l'eco que rebota en el cos de l'intèrpret.

⁵ Font: <https://ca.wikipedia.org/wiki/Theremin>

4. Reproducció d'àudio

4.1. Melodies de la Toccata i fuga

El fragment simplificat que es reproduïx de l'obra Toccata i fuga en re menor de Bach consta de dues veus. Seguidament s'exposen els avantatges i els inconvenients de reproduir només la melodia principal i en comparació a reproduir les dues.

El criteri a tenir en compte per decidir si es reproduïx una veu o dues és l'espectacularitat visual i auditiva que ofereix cada alternativa en funció de la complexitat del programa, del pes i mesures del prototip i del cost econòmic.

4.1.1. Monofònic

Reproduir només la melodia principal del fragment de la Toccata i fuga presenta una sèrie d'avantatges respecte l'opció de reproduir les dues veus.

Primer de tot, reproduir una sola veu suposa transcriure a llenguatge C++ només una melodia, fet que redueix a la meitat el temps dedicat a la transcripció de la partitura i la memòria destinada a emmagatzemar-la.

En segon lloc, la funció d'Arduino **tone()** permet generar una ona quadrada de la freqüència especificada en una sortida digital determinada per tal de produir sons mitjançant un brunzidor o un altaveu. Aquesta funció només permet generar un to simultàniament, per tant, pot utilitzar-se per reproduir una sola veu alhora. Poder utilitzar la funció **tone()** simplifica el codi del programa.

Finalment, reproduir solament la melodia principal implica utilitzar un sol dispositiu perifèric d'àudio i reproduir només disset notes diferents. En conseqüència, el nombre de tubs d'assaig, les sortides digitals del microcontrolador, el número de LED i d'altres components electrònics com cablejat i resistències és menor. Tot això implica que el preu, les dimensions i el pes també són menors.

El principal inconvenient d'aquesta alternativa és la poca espectacularitat visual i auditiva que presenta. Una sola veu reproduïx una melodia sense cap harmonia possible i visualment només hi ha encès un LED simultàniament.

4.1.2. Polifònic

El principal avantatge de reproduir les dues veus de la Tocata i fuga és l'efecte visual i auditiu que transmeten. Les dues veus paral·leles creen un efecte auditiu molt més potent que una sola veu i les harmonies del final de les dues parts evocuen a una sensació de plenitud auditiva i creen uns matisos que amb una veu sola no poden transmetre.

Una de les característiques de l'obra Tocata i Fuga és la simetria que hi ha entre la primera i la segona veu. Mitjançant l'encesa i l'apagada dels LED, aquesta simetria musical també es pot percebre visualment i crea una sinestèsia molt captivadora.

No obstant, hi ha una sèrie d'inconvenients que apareixen quan es reproduïxen les dues veus per tal d'aconseguir l'espectacularitat visual i auditiva desitjada.

El primer desavantatge té a veure amb el programa del microcontrolador. Transcriure les dues veus a llenguatge C++ implica el doble de feina que transcriure només una melodia i també suposa ocupar el doble d'espai de la memòria per emmagatzemar-les. A més a més, cal modificar la partitura perquè les notes coetànies de les dues melodies tinguin la mateixa durada; quan la nota de la primera veu i la nota coetània de la segona no tenen la mateixa durada, cal descompondre la figura de major duració en diverses notes del mateix to amb la durada de les figures de l'altra veu fins completar la durada de la figura original (s'explica detalladament a l'apartat **8.1**).

El segon inconvenient derivat de la reproducció de les dues melodies és no poder utilitzar la funció **tone()** d'Arduino per generar el so, ja que aquesta funció només pot generar un to simultàniament. Així doncs, cal buscar una alternativa que sigui capaç de generar com a mínim dos tons simultàniament.

L'últim inconvenient significatiu d'aquesta alternativa és que, a causa de les trenta-una notes diferents que es reproduïxen en el fragment de la Tocata i Fuga, el nombre de tubs d'assaig, les sortides del microcontrolador necessàries, el nombre de LED i d'altres components electrònics com cablejat i resistències és major que reproduint una sola veu. Cal tenir present també que són necessaris dos dispositius perifèrics d'àudio per tal de reproduir les melodies per separat. A més, com que el nombre de LED és bastant elevat, és possible que sigui necessari fer servir algun sistema de control com una matriu de LED o registres de desplaçament que compliquin el circuit electrònic. Tot això implica que el preu, les dimensions i el pes també són superiors.

4.1.3. Comparativa d'alternatives

Per decidir si l'orgue fantasmagòric és monofònic o polifònic, cal sospesar si els inconvenients de reproduir les dues veus són assumibles per obtenir l'efecte visual i auditiva que es desitja.

Primer de tot s'analitza la problemàtica del programa. Transcriure les dues melodies suposa pràcticament invertir el doble de temps i modificar la partitura perquè les notes coetànies tinguin la mateixa durada, tot i així, el temps total no és excessiu perquè es tracta d'un fragment relativament curt i es necessita menys d'una hora per tenir-ho tot transcrit.

Les variables resultants de la transcripció de la partitura esgoten pràcticament tota la memòria SRAM del microcontrolador, però el problema se soluciona si s'emmagatzemen a la memòria Flash. Això suposa una petita complicació del codi del programa perfectament assumible.

El fet de no poder usar la funció **tone()** d'Arduino per generar el so implica cercar alguna llibreria existent que permeti generar dos tons simultàniament. Existeixen llibreries que compleixen aquesta funció, com per exemple la llibreria **Tone**. Així doncs, el problema se soluciona utilitzant una llibreria que permeti reproduir dos tons diferents alhora en sortides digitals diferents. La complicació del programa utilitzant una d'aquestes llibreries és mínima.

El major nombre de notes diferents que es reproduïxen amb les dues melodies augmenta el preu, el pes i les dimensions del prototip. No obstant, tot i pràcticament duplicar-se l'amplada de l'orgue fantasmagòric, aquest no deixa de tenir unes dimensions raonables; l'amplada esdevé de 50 cm aproximadament i l'alçada no varia. El pes total varia en funció de la quantitat d'aigua continguda en els tubs d'assaig que ve determinada per la seva mida, si es vol reduir el pes poden utilitzar-se tubs més petits. Finalment, l'augment de preu a causa de reproduir les dues veus no és prou significatiu com per decantar-se per la monofonia. L'increment de preu no és del doble per dues raons: primer perquè els tubs d'assaig i la majoria de components electrònics tenen lot de compra i no necessàriament es necessita el doble de lots; i segon, hi ha costos fixos com el material de l'estructura, el microcontrolador i la mecanització de les peces que conformen l'estructura que no depenen en la seva totalitat del nombre de melodies reproduïdes.

En conclusió, l'espectacularitat auditiva i visual que es transmet amb la reproducció de les dues melodies preval per sobre dels inconvenients resultants. Cal tenir present que l'objectiu principal del projecte és dissenyar un orgue fantasmagòric per ser mostrat a mode d'exemple dels projectes que es duen a terme al Departament d'Enginyeria Elèctrica.

4.2. Opcions d'àudio

Després de decidir que la reproducció d'àudio de l'orgue fantasmagòric és polifònica, cal determinar el nombre de peces musicals que es reproduïen i si el prototip inclou la funció de poder ser tocat simulant un Thérémin.

El criteri que es segueix per prendre la decisió és la relació del grau de variació i interacció que ofereix cada alternativa en funció de la complicació que comporta.

4.2.1. Tocata i fuga

La primera alternativa és la més senzilla i consisteix en reproduir només el fragment de la Tocata i fuga sense afegir-hi res més.

La part positiva d'aquesta alternativa és la simplicitat del programa i del circuit electrònic.

No obstant, la nul·la varietat i la no interactivitat del prototip són dues característiques negatives que deriven de reproduir només una sola peça musical.

4.2.2. Tocata i fuga i una segona peça musical

Si a l'anterior alternativa s'hi afegeix una segona peça musical, s'obté l'opció de reproduir el fragment de la Tocata i fuga i una segona peça musical diferent a la primera.

L'avantatge que presenta aquesta alternativa és la major varietat que ofereix respecte la primera alternativa, sense complicar el circuit electrònic.

Els aspectes negatius són la interactivitat inexistent i el fet de necessitar el doble de memòria per emmagatzemar les partitures de les dues peces musicals; a més, cal tenir present el temps emprat en transcriure la nova peça musical com a inconvenient.

4.2.3. Tocata i fuga i Thérémin

Si en comptes d'afegir una segona peça musical a l'orgue fantasmagòric s'incorpora la funció de Thérémin, s'obté un prototip amb la facultat de reproduir una peça musical emmagatzemada i l'opció de que l'usuari hi interactuï tocant les dues veus.

Perquè el prototip actuï de forma similar a un Thérémin cal fer una ampliació del circuit electrònic i incloure-hi dos sensors d'ultrasons (un per cada veu) que transmeten al

microcontrolador informació de la distància a la qual es troba l'objecte que interactua amb l'orgue fantasmagòric. A més, també cal programar el microcontrolador perquè, a partir de la informació procedent dels sensors d'ultrasons, calculi quins són els LED corresponents i els activi i desactivi quan calgui, i perquè n'obtingui les freqüència associades als LED en qüestió i les transmeti als dispositius d'àudio corresponents.

Els avantatges que presenta l'opció d'una peça musical i el Thérémin és la interactivitat i la varietat que ofereix.

Els inconvenients d'aquesta alternativa són la necessitat d'ampliar el programa i el circuit electrònic per dur a terme la funció de Thérémin.

4.2.4. Tocata i fuga, una segona peça musical i Thérémin

Finalment, l'alternativa més completa és afegir una segona peça musical i la funció de Thérémin. D'aquesta manera es reproduïx la Tocata i fuga, una segona peça musical diferent i la possibilitat que l'usuari pugui tocar emprant les dues veus.

Aquesta alternativa ofereix com a avantatges disposar de més varietat que les opcions anteriors i més interactivitat mitjançant la funcionalitat de Thérémin de l'orgue fantasmagòric.

Els desavantatges d'aquesta alternativa són la major quantitat de memòria requerida per tal d'emmagatzemar les partitures de les dues peces musicals i l'ampliació del programa i del circuit electrònic imprescindibles per fer possible la funció de Thérémin; el temps requerit per transcriure la segona partitura també és un inconvenient a tenir present.

4.2.5. Comparativa d'alternatives

L'opció d'incloure la funcionalitat de Thérémin al prototip de l'orgue fantasmagòric li atorga la propietat de la interacció a canvi de fer una ampliació del programa i del circuit electrònic. L'ampliació del circuit electrònic és molt simple, ja que els sensors d'ultrasons es connecten directament al microcontrolador. L'ampliació del codi de programa no és tant immediata perquè cal transformar la informació enviada pels sensors als LED corresponents. Però un cop fets els factors de conversió i determinats els LED, el procediment és idèntic al que es segueix quan es reproduïx la Tocata i fuga. L'únic que canvia és l'origen de les dades: en comptes de llegir els números de LED a la partitura transcrita, es fan servir les dades

tractades que proporcionen els sensors d'ultrasons.

El fragment de la Tocata i fuga inclou dues parts completament diferents que es complementen a la perfecció: la primera part és el tema més conegut de la peça format per les dues veus en paral·lel amb un tempo pausat i la segona consta d'arpegis ascendents i descendents també en paral·lel amb un tempo molt ràpid. El fet de ser un fragment tant complet pel que fa a la varietat musical, no té sentit afegir una segona peça diferent si no aporta cap alternativa melòdica, ja que sí que implica dedicar temps a la transcripció de la segona partitura i més espai de memòria per emmagatzemar-la.

En conclusió, l'alternativa òptima és la que conté la funcionalitat de Thérémin i la reproducció del fragment de la Tocata i fuga perquè compleix els requisits de varietat i interactivitat, minimitzant tant la memòria dedicada a emmagatzemar les partitures com el temps dedicat a transcriure-les.

5. Circuit electrònic

5.1. Sistema de control dels LED

Davant la necessitat de controlar, com a mínim, trenta-dos LED amb un màxim de dos encesos a la vegada, s'ha d'estudiar de quines maneres pot realitzar-se aquest control.

5.1.1. Microcontrolador amb tantes sortides digitals com LED a controlar

La primera alternativa per controlar els LED és utilitzar un microcontrolador que tingui tantes sortides digitals com LED a controlar. Cal tenir present que també es necessiten potes d'entrades i sortides digitals per connectar els dos altaveus, els dos sensors d'ultrasons i el polsador.

Com més potes d'entrades i sortides digitals té un microcontrolador, més n'augmenta la mida i el preu. Dos microcontroladors Arduino que tenen suficients potes digitals són:

Arduino Due: té 54 entrades i sortides digitals, un cost de 34,00€ (sense impostos) a la botiga oficial i les seves mides són 102×53 mm.

Arduino Mega: té 54 entrades i sortides digitals, un cost de 35,00 € (sense impostos) a la botiga oficial i les seves mides també són 102×53 mm.

Utilitzar un microcontrolador amb tantes potes digitals com LED a controlar simplifica molt el codi perquè cada sortida té un LED assignat que s'activa i desactiva posant la sortida digital en *HIGH* i *LOW*, respectivament.

5.1.2. Registre de desplaçament 74HC595

La segona opció de control dels LED és utilitzar registres de desplaçament 74HC595 (**Figura 5.1**) en sèrie. Un registre de desplaçament és un circuit integrat que permet controlar vuit sortides reals a partir de tres potes del microcontrolador. Els registres de desplaçament es poden connectar en sèrie; per cada registre de desplaçament encadenat en sèrie es controlen vuit sortides digitals, totes elles controlades només amb tres potes del microcontrolador.

Un microcontrolador senzill de poques entrades i sortides digitals i dimensions reduïdes, juntament amb xips 74HC595 que costen menys d'un euro, pot controlar les mateixes

sortides digitals que un microcontrolador que tingui més potes i un preu superior.

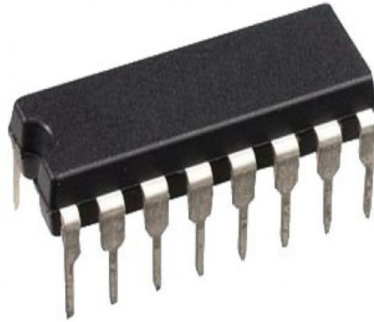


Figura 5.1: Registre de desplaçament 74HC595⁶

5.1.3. Matriu de LED

Una alternativa per no haver d'utilitzar un microcontrolador amb moltes entrades i sortides digitals ni afegir xips de registre de desplaçament és connectar els LED en forma de matriu (3). La matriu es constitueix de tal manera que tots els LED de la mateixa fila tenen els ànodes connectats conjuntament a una pota del microcontrolador i els de la mateixa columna tenen el càtodes connectats entre si a una altra pota diferent (Figura 5.2). Per tant, el nombre de potes de microcontrolador per controlar la matriu és la suma del nombre de files i nombre de columnes. En aquest cas es necessita una matriu de 6×6 o 7×7 LED, és a dir, dotze o catorze potes per controlar la matriu.

Per encendre un LED determinat cal posar en *HIGH* la pota digital a la qual estan connectats els ànodes de la fila on es troba el LED i en *LOW* la sortida digital on estan connectats els càtodes de la seva columna. Perquè la resta de LED de la matriu no s'encenguin, cal posar en *LOW* les sortides digitals connectades a les files amb els ànodes dels altres LED i en *HIGH* les potes digitals on estan connectades les columnes amb els càtodes de la resta de LED.

L'inconvenient que presenta aquesta alternativa és que aquest mètode només permet encendre un únic LED a la vegada. Per tal que doni la sensació que hi ha dos LED diferents encesos alhora, com és el cas d'aquest projecte, cal fer una encesa seqüencial. Això vol dir que es van encenent i apagant alternativament els dos LED tant ràpid que a simple vista es percep que els dos estan encesos al mateix temps. Haver de fer una encesa seqüencial fa disminuir una mica la intensitat dels LED.

⁶ Font: <https://www.ebay.es/i/361845995948?chn=ps>

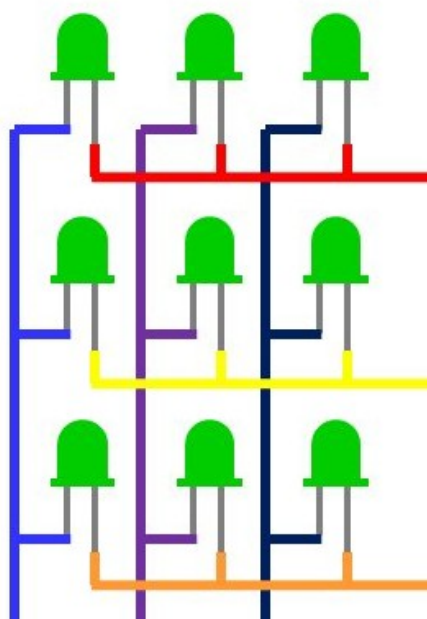


Figura. 5.2: Matriu de 3x3 LED⁷

5.1.4. Control mitjançant Charlieplexing

L'última alternativa per controlar els LED és utilitzar el **Charlieplexing**. El Charlieplexing és una tècnica que permet controlar un conjunt de LED utilitzant menys potes del microcontrolador que amb la matriu: amb sis potes del microcontrolador es poden controlar trenta LED, amb set es controlen fins a quaranta-dos i amb vuit, cinquanta-sis.

La connexió dels LED es fa de tal manera que entre cada dos potes s'hi connecta un parell de LED de sentit oposat. Per encendre un LED determinat cal definir totes les potes que no tenen connexió amb el LED en mode *INPUT* perquè actuïn com una alta impedància i així no hi circuli intensitat. Les dues potes restants, als quals estan connectats el LED i el seu complementari, es defineixen com a *OUTPUT*. Un cop fet això, la pota connectada a l'ànode del LED que es vol encendre se li dóna el valor *HIGH* i el connectat al càtode, el valor *LOW* (4).

El Charlieplexing permet controlar tots els LED sense la necessitat d'afegir xips de registre de desplaçament ni usar un microcontrolador amb molts entrades i sortides digitals. És l'opció més barata, ja que només necessita un microcontrolador amb set o vuit potes per controlar tots els LED (cal tenir en compte també les potes destinades a controlar altaveus,

⁷ Font: <https://recursos.citcea.upc.edu/vestible/sortida/malla.html>

sensors d'ultrasons i polsador).

El principal inconvenient és que connectar un nombre elevat de LED complica molt el circuit electrònic. A més a més, el codi del programa també es complica.

De la mateixa manera que amb la matriu de LED, tampoc es poden encendre dos LED diferents alhora, per tant també cal fer una encesa seqüencial que fa disminuir la lluminositat dels LED.

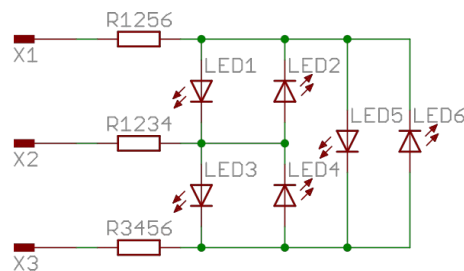


Figura 5.3: Control de sis LED mitjançant tres potes amb Charlieplexing⁸

5.1.5. Comparativa d'alternatives

El principal inconvenient del microcontrolador amb tantes sortides com LED a controlar és la grandària. Les dimensions d'aquest microcontrolador són massa grans perquè quedi dissimulat a l'estructura. Tanmateix, també és l'opció més cara. Així doncs, tot i que el codi i el circuit electrònic siguin els més simples, es descarta aquesta alternativa.

La intensitat amb la qual brillen els LED és molt important perquè s'ha d'apreciar amb claredat l'encesa i apagada dels tubs a simple vista. La matriu de LED no és una solució adequada perquè fa disminuir la lluminositat dels LED i complica el codi. De la mateixa manera, es descarta el sistema de control Charlieplexing perquè també fa minvar la intensitat dels LED i complica excessivament el circuit electrònic.

Així doncs, el registre de desplaçament és la solució indicada per controlar els LED: no en disminueix la intensitat i no complica en excés el codi. El circuit electrònic es complica poc si es compara amb el del microcontrolador amb tantes potes com LED i l'augment del cost respecte la matriu o el Charlieplexing és insignificant.

⁸ Font: <https://en.wikipedia.org/wiki/Charlieplexing>

5.2. Família del microcontrolador

En funció de les necessitats del projecte, cal escollir el tipus de microcontrolador que millor s'ajusta a aquestes característiques.

Les funcions que ha de realitzar el microcontrolador són relativament simples: controlar un conjunt de LED, reproduir melodies i rebre dades dels sensors d'ultrasons.

5.2.1. Microcontrolador PIC

PIC és un microcontrolador de l'empresa Microchip Technology. La principal característica és la llibertat total que ofereix a l'hora dissenyar i programar i el seu baix consum energètic; la part positiva és que es pot dissenyar i adaptar totalment a les necessitats del projecte amb l'inconvenient d'haver de crear tot el programa des de zero.

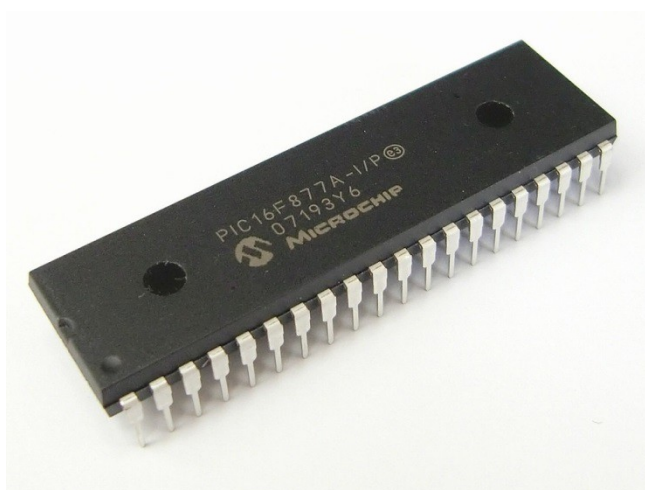


Figura 5.4: Microcontrolador PIC 16F877A⁹

5.2.2. Placa Arduino

Arduino és una placa de desenvolupament de codi obert basada en microcontroladors de l'empresa Atmel. La principal característica és que la placa ja conté els components per defecte i disposa de funcions i llibreries que poden ser utilitzades per tothom; el principal avantatge és la facilitat i rapidesa de programar-lo amb les llibreries i funcions però amb el desavantatge de no tenir la flexibilitat total que ofereix el PIC.

⁹ Font: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-452614597-pic16f877a-microcontrolador-pic-tipo-dip40-microchip-_JM



Figura 5.5: Placa Arduino UNO basada en el microcontrolador ATmega328P¹⁰

5.2.3. Comparativa d'alternatives

Aquest projecte no requereix d'una gran flexibilitat i, per tant, la placa Arduino satisfà perfectament les necessitats del projecte. En cas d'utilitzar un PIC, la flexibilitat que ens ofereix aquest tipus de microcontrolador no compensa l'increment de dificultat de la programació del microcontrolador.

Les llibreries d'Arduino (concretament les llibreries d'àudio) simplifiquen i faciliten molt la programació del microcontrolador. Això converteix la placa d'Arduino en la millor alternativa per controlar els LED, altaveus i sensors d'ultrasons de l'orgue fantasmagòric.

Així doncs, la millor alternativa és utilitzar una placa Arduino per les facilitats que ofereix a l'hora de programar.

5.3. Model de la placa del microcontrolador

El microcontrolador és l'encarregat de controlar la seqüència d'encesa i apagada dels LED, de controlar la reproducció d'àudio i de rebre la informació dels sensors d'ultrasons.

Els requisits que ha de complir la placa que conté el microcontrolador són els següents:

¹⁰ Font: https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-681128423-placa-arduino-uno-r3-cable-usb-_JM

disposar d'un mínim de deu sortides digitals (de les quals tres s'utilitzen amb el registre desplaçament dels LED, dues amb els altaveus, quatre amb els sensors d'ultrasons i una amb el polsador) i cal que tingui unes dimensions reduïdes perquè no destaquï a l'estructura.

Seguidament s'exposen tres models de placa d'Arduino que es caracteritzen per les seves dimensions reduïdes.

5.3.1. Arduino Pro Mini

La primera alternativa és la placa Arduino Pro Mini. Aquest model consta d'un microcontrolador ATmega328P amb catorze sortides digitals i un cristall oscil·lador de 16 MHz. Disposa de 32 kB de memòria flash, 2 kB dels quals es destinen al *bootloader* (programa que permet arrencar amb connexió a l'ordinador), 2 kB d'SRAM (*Static Random Access Memory*) i 1 kB d'EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*) (5). La memòria SRAM és l'encarregada d'emmagatzemar les variables del projecte.

És un model rectangular de 18×33 mm i el seu preu de compra és de 11,70 € sense I.V.A. (21,00 %).

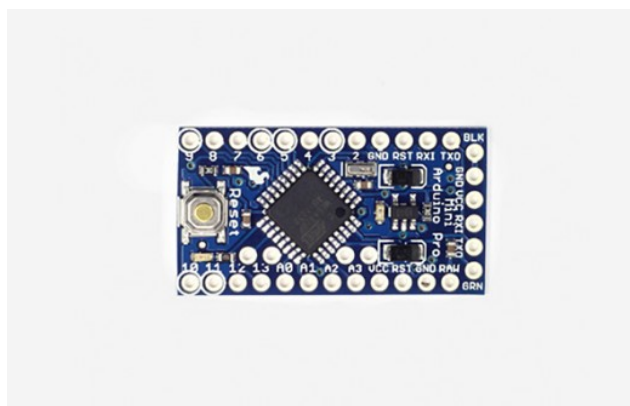


Figura 5.6: Arduino Pro Mini¹¹

¹¹ Font: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-pro-mini>

5.3.2. Arduino Micro

El segon model és l'Arduino Micro. Aquest model consta d'un microcontrolador ATmega32U4 amb vint sortides digitals i un cristall oscil·lador de 16 MHz. Disposa de 32 kB de memòria Flash (4 kB dels quals es destinen al *bootloader*), 2,5 kB d'SRAM i 1 kB d'EEPROM (6).

És un model rectangular de 18×48 mm i el seu preu de compra és de 19,50 € sense I.V.A. (21,00 %).

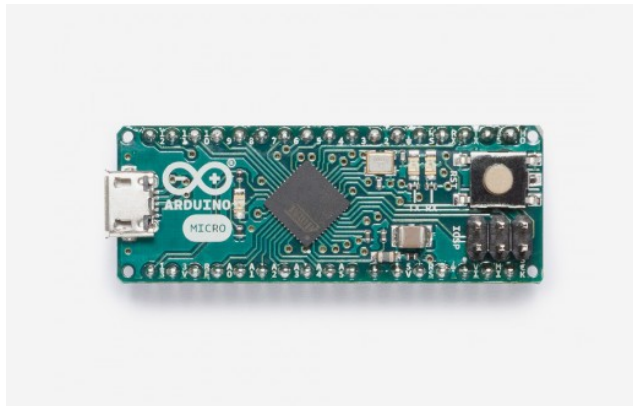


Figura 5.7: Arduino Micro¹²

5.3.3. Arduino Nano

La tercera alternativa és la placa Arduino Nano. Aquesta alternativa consta d'un microcontrolador ATmega328P amb vint-i-dues sortides digitals i un cristall oscil·lador de 16 MHz. Disposa de 32 kB de memòria Flash (2 kB dels quals es destinen al *bootloader*), 2 kB d'SRAM i 1 kB d'EEPROM (7).

És un model rectangular de 18×45 mm i el seu preu de compra és de 17,60 € sense I.V.A. (21,00 %).

¹² Font: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-micro>

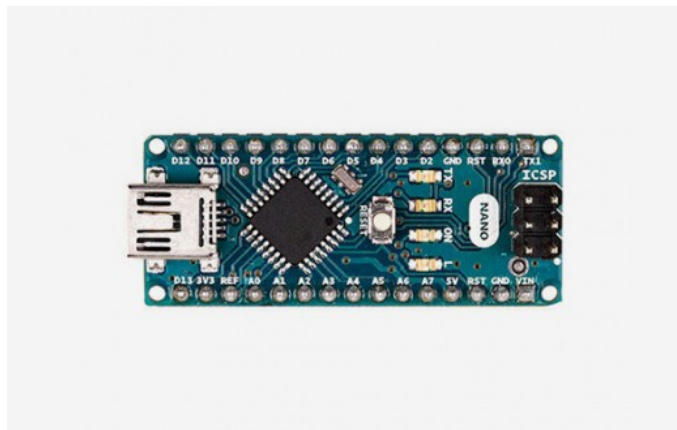


Figura 5.8: Arduino Nano¹³

5.3.4. Comparativa d'alternatives

Els tres microcontroladors compleixen el requisit necessari de disposar de com a mínim deu sortides digitals; tots tres són aptes per aquest projecte.

El segon criteri en importància és la mida del microcontrolador. De les tres alternatives, el que presenta les dimensions més reduïdes és l'Arduino Pro Mini. Els tres models tenen dos costats que mesuren 18 mm i difereixen en la mesura dels altres dos: l'Arduino Nano mesura 12 mm més que l'Arduino Pro Mini (un 25 %) i l'Arduino Micro mesura 15 mm més que l'Arduino Pro Mini (un 31 %).

Els tres models de microcontrolador tenen un cristall oscil·lador de 16 MHz i no presenten diferències significatives de memòria entre ells.

Pel que fa al preu, el model més econòmic és l'Arduino Pro Mini. La diferència de preu entre aquest model i l'Arduino Nano, que és el segon més barat, és del 34 %. La diferència respecte l'Arduino Micro, que és el més car, és del 40 %.

Així doncs, l'alternativa òptima pel projecte és utilitzar el microcontrolador Arduino Pro Mini.

¹³ Font: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>

	Arduino Pro Mini	Arduino Micro	Arduino Nano
Sortides digitals	14	20	22
Dimensions [mm]	18 × 33	18 × 48	18 × 45
Cristall oscil·lador [MHz]	16	16	16
Memòria Flash [kB]	32 – 2	32 – 4	32 – 2
Memòria SRAM [kB]	2,0	2,5	2,0
Memòria EEPROM [kB]	1	1	1
Preu sense I.V.A. (21,00 %) [€]	11,70	19,50	17,60

Taula 5.1: Resum de les especificacions de l'Arduino Pro Mini, l'Arduino Micro i l'Arduino Nano

5.4. Generador de so

Per tal de reproduir so, l'orgue fantasmagòric ha d'incorporar algun dispositiu apropiat. Aquest dispositiu ha de complir dos requisits: tenir dimensions reduïdes per tal de poder ser incorporat a l'estructura de l'orgue i no necessitar alimentació externa.

Seguidament s'analitzen els diferents dispositius que poden reproduir so tenint en compte les necessitats específiques de l'orgue.

5.4.1. Brunzidor

Es tracta d'un dispositiu simple i barat (poden adquirir-se per menys d'un euro). Produeix sons metàl·lics de poca qualitat. El circuit electrònic és molt simple i no necessita font d'alimentació externa.



Figura 5.9: Dos models de bronzidors¹⁴

5.4.2. Altaveu petit

És un dispositiu perifèric més complex i no tant barat (poden adquirir-se a partir de dos euros). Produeix sons més càlids i de més qualitat. El circuit electrònic és més complicat però no necessita d'alimentació externa.



Figura 5.10: Model d'altaveu petit¹⁵

5.4.3. Comparativa d'alternatives

La funció principal de l'orgue fantasmagòric és ser mostrat en públic. La part auditiva és tant important com la part visual, per tant, la millor qualitat del so del petit altaveu el converteix en la millor solució per reproduir el so de l'orgue.

Els punts febles del petit altaveu, com l'augment del cost o la complicació del circuit electrònic, només suposen un desavantatge perfectament assumible, ja que la millora de la qualitat del so és molt més significativa.

¹⁴ Font: <http://www.instructables.com/id/How-to-use-a-Buzzer-Arduino-Tutorial/>

¹⁵ Font: <http://tienda.bricogeek.com/varios/590-altavoz-5cm-8-ohm-05w.html>

6. Estructura

6.1. Nombre de tubs

El nombre de tubs, i en conseqüència el nombre de LED, defineix el número de notes diferents que poden ser reproduïdes lluminosament.

Per reproduir les dues veus de la Tocata i Fuga es necessiten trenta-una notes diferents. Per tant, són necessaris com a mínim trenta-dos tubs per tal que les dues columnes tinguin el mateix nombre de tubs.

Les taules, que es presenten per cada alternativa de nombre de tubs, representen la disposició de les notes on el fons blanc indica tub actiu i el gris significa inactiu en la reproducció de la Tocata i Fuga.

6.1.1. Trenta-dos tubs

Emprant només els tubs imprescindibles resulta un orgue de trenta-dos tubs disposats en dues files de setze tubs cadascuna.

En aquest cas només hi ha un tub inactiu dels trenta-dos totals. Trenta-un tubs són actius, és a dir, el 97 % dels tubs quan es reproduïx el fragment de la Tocata i Fuga.

Com s'observa a la **Taula 6.1** la disposició de les notes de les dues files no és simètrica.

Do3	Do#3	Re3	Mi3	Fa3	Sol3	La3	Sib3	Do4	Do#4	Re4	Mi4	Fa4	Sol4	La4	Sib4
	Do#1	Re1	Mi1	Fa1	Sol1	La1	Do#2	Re2	Mi2	Fa2	Fa#2	Sol2	La2	Sib2	Si2

Taula 6.1: Disposició de les notes amb trenta-dos tubs

6.1.2. Trenta-sis tubs

Per a que hi hagi simetria entre les dues files amb el mínim nombre de tubs s'hi han d'afegir quatre tubs més a l'alternativa anterior. En total es necessiten trenta-sis tubs, dels quals

quatre no es fan servir quan es reproduïx la Tocata i Fuga. La disposició és de dues files simètriques de divuit tubs.

Hi ha trenta-un tubs actius i cinc inactius a l'hora de reproduir la Tocata i Fuga. És a dir, s'utilitza el 86 % dels tubs.

Do3	Do#3	Re3	Mi3	Fa3	So3	La3	Sib3	Do4	Do#4	Re4	Mi4	Fa4	Fa#4	So4	La4	Sib4	Si4
Do1	Do#1	Re1	Mi1	Fa1	So1	La1	Sib1	Do2	Do#2	Re2	Mi2	Fa2	Fa#2	So2	La2	Sib2	Si2

Taula 6.2: Disposició de les notes amb trenta-sis tubs

6.1.3. Quaranta tubs

Aquesta alternativa basa el nombre de tubs en els condicionants del components electrònics. Aquestes dues condicions es desprenen d'utilitzar el registre de desplaçament i el lot de compra dels LED.

El registre de desplaçament utilitzat per controlar els LED controla vuit LED per cada xip 74HC595 utilitzat en sèrie i els LED UV que s'usen es venen en bosses de deu unitats.

L'opció de quaranta tubs s'ajusta a les condicions del registre de desplaçament i del lot de compra dels LED perquè quaranta és múltiple de vuit i de deu.

La disposició dels quaranta tubs és de dues files simètriques de vint tubs. Com s'observa a la **Taula 6.3**, els tubs afegits en aquesta alternativa (primera i última columna) no tenen notes assignades perquè no intervenen en la reproducció de la Tocata i Fuga.

En la reproducció de la Tocata i Fuga hi ha trenta-un tubs actius i nou inactius, el que representa un 78 % de tubs actius.

S14	S12
Sib4	Sib2
La4	La2
Sol4	Sol2
Fa#4	Fa#2
Fa4	Fa2
Mi4	Mi2
Re4	Re2
Do#4	Do#2
Do4	Do2
Sib3	Sib1
La3	La1
Sol3	Sol1
Fa3	Fa1
Mi3	Mi1
Re3	Re1
Do#3	Do#1
Do3	Do1

Taula 6.3: Disposició de les notes amb quaranta tubs

6.1.4. Quaranta-vuit tubs

L'última alternativa consisteix, respectant la simetria entre files, en un tub per cada nota possible entre la més aguda i la més greu del fragment reproduït de la Tocata i Fuga. Resulten quaranta-vuit tubs disposats en dues files de vint-i-quatre tubs cadascuna.

En aquest cas, hi ha trenta-un tubs actius i disset inactius. S'usen el 65 % dels tubs per reproduir la Tocata i Fuga.

S14	S12
La#4	La#2
La4	La2
Sol#4	Sol#2
Sol4	Sol2
Fa#4	Fa#2
Fa4	Fa2
Mi4	Mi2
Re#4	Re#2
Re4	Re2
Do#4	Do#2
Do4	Do2
Si3	Si1
La#3	La#1
La3	La1
Sol#3	Sol#1
Sol3	Sol1
Fa#3	Fa#1
Fa3	Fa1
Mi3	Mi1
Re#3	Re#1
Re3	Re1
Do#3	Do#1
Do3	Do1

Taula 6.4: Disposició de les notes amb quaranta-vuit tubs

6.1.5. Comparativa d'alternatives

Donada la simetria de les dues veus de la Tocata i Fuga és imprescindible que hi hagi simetria entre les dues files de tubs, això implica descartar l'alternativa de trenta-dos tubs.

L'alternativa de quaranta-vuit tubs esdevé massa gran en quant a dimensions i pes. Altrament, només s'utilitzen menys de dos terços dels tubs per reproduir la Tocata i Fuga, un percentatge massa baix. Aquestes dues raons són suficients per desestimar-la.

Finalment, entre l'opció de trenta-sis o quaranta tubs, es decideix utilitzar quaranta per dues raons:

Primera, la diferència de quatre tubs entre una i altra no afecta significativament el pes ni les dimensions. Això implica que amb un pes i dimensions similars l'opció de quaranta té quatre tubs més que la de trenta-sis.

Segona, totes dues alternatives necessiten cinc xips 74HC595 i quatre lots de deu LED. Amb quaranta tubs s'usen tots els LED i totes les sortides del sistema de desplaçament. En canvi, amb trenta-sis deixen d'utilitzar-se quatre LED i quatre sortides del registre de desplaçament no es fan servir.

6.2. Model tubs d'assaig

L'elecció del model de tub d'assaig és essencial perquè no només té un efecte estètic, sinó que també condiona el disseny de l'estructura de l'orgue fantasmagòric. Cal tenir present que els tubs d'assaig van confinats perpendicularment dins d'una làmina de metacrilat horitzontal, recolzats únicament per la part superior del tub.

La primera condició necessària és purament estètica. Els tubs d'assaig representen la canonada d'un orgue de tubs, que és el conjunt de tubs cilíndrics, llargs i prims encarregats de produir el so. Per tant, els tubs d'assaig emprats han de ser similars als tubs d'un orgue de tubs: cilíndrics, llargs i prims. Tanmateix, no poden ser tubs opacs perquè contenen la substància fluorescent que el LED il·lumina.

La segona condició necessària que ha de complir el model de tub d'assaig és la bona subjecció del tub amb l'estructura perquè l'orgue fantasmagòric sigui suficientment robust.

La tercera condició necessària és que el tap ha de poder ser foradat per introduir el LED que ha d'il·luminar la substància fluorescent continguda dins del tub d'assaig.

Finalment, entre tots els models que compleixin les tres condicions necessàries anteriors, s'aplica el criteri estètic i econòmic per decidir el model de tub d'assaig òptim.

Les alternatives presentades a continuació són models de tub d'assaig, que s'ajusten a les necessitats del projecte, comercialitzats pels proveïdors de material habituals del laboratori del Departament d'Enginyeria Química de l'ETSEIB, que són **DD Biolab S.L.** i **Pidiscat S.L.**. El lot de compra de tots els models de tubs d'assaig i de taps és molt superior al nombre de tubs i taps necessaris, per tant, no s'ha tingut en compte per comparar models ni preus.

6.2.1. Tub d'assaig amb tap de rosca

Tub de poliestirè vidre amb el fons rodó i tap de rosca del proveïdor **DD Biolab S.L.**

El diàmetre del tap és més ample que el diàmetre del tub, perfecte per subjectar el tub a l'estructura. El fet que el tap tingui rosca implica que la unió entre tap i tub sigui molt estable.

El proveïdor comercialitza tres mides d'aquest model: 100×16 mm, 120×16 mm i 150×16 mm.

L'aspecte negatiu d'aquest model és l'elevat preu del lot de compra, de 186,80 € a 227,00 € sense I.V.A. (21,00 %).



Figura 6.1: Tub d'assaig amb tap de rosca de 150×16 mm de DD Biolab S.L.¹⁶

6.2.2. Tub d'assaig sense tap

Tub d'assaig de poliestirè (transparent) o polietilè (translúcid) amb el fons rodó del proveïdor **Pidiscat S.L.**

Aquest tub és completament llis i no inclou tap. Tampoc presenta cap vora per poder ser subjectat.

El proveïdor comercialitza tres mides de cada material: 13×75 mm, 13×100 mm i 16×100 mm.

L'aspecte positiu d'aquest model és el baix cost del lot de compra, entre 6,50 € i 12,00 € sense I.V.A. (21,00 %). A aquest preu cal afegir-hi el preu del lot de taps.

¹⁶ Font: <https://www.ddbiolab.com/frontoffice/reference/012068>



Figura 6.2: Tub d'assaig de poliestirè de 100×13 mm de Pidiscat S.L.¹⁷

Hi ha dos models de tap que són compatibles amb aquest model de tub: tap universal i tap amb aletes.

a) Tap universal

El tap universal, comercialitzat pel proveïdor **DD Biolab S.L.**, s'uneix al tub a pressió. És adequat per tapar tubs de 12 mm, 13 mm i 16 mm.

El tap consta d'una llengüeta que serveix per subjectar suficientment el tub a l'estructura de l'orgue fantasmagòric.

D'altra banda, la poca subjecció entre tub i tap és la part més negativa d'aquesta opció.

El preu de compra del lot de taps universals és de 26,60 € sense I.V.A. (21,00 %).

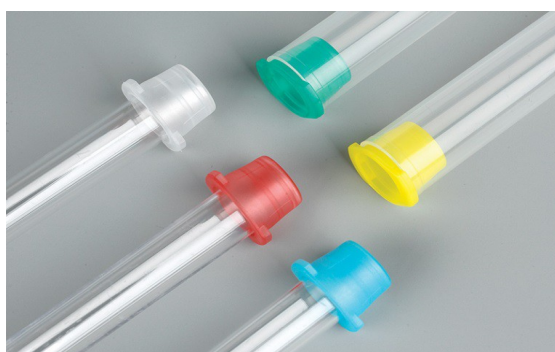


Figura 6.3: Taps universals de DD Biolab S.L.¹⁸

¹⁷ Font: <http://www.pidiscat.cat/ca/tubs-assaig-plastic-ps-pp-taps/7207-tubs-assaig-plastic-ps-13x100-mm-8-ml-capsa-500-units.html>

¹⁸ Font: <https://www.ddbiolab.com/frontoffice/product?produitId=0H-13-11>

b) Tap amb aletes

El tap amb aletes, comercialitzat pel proveïdor **Pidiscat S.L.**, s'uneix al tub per fregament. Es comercialitzen dues mesures: 13 mm i 16 mm de diàmetre.

Les aletes proporcionen una bona subjecció entre tap i tub d'assaig.

No obstant, tap i tub tenen el mateix diàmetre, això complica la subjecció del tub a l'estructura. A més d'això, la forma del tap dificulta la perforació per introduir el LED.

El preu del lot de compra del tap amb aletes és de 7,50 € o 10,50 €, sense I.V.A. (21,00 %), en funció del diàmetre.



Figura 6.4: Taps amb aletes de Pidiscat S.L.¹⁹

6.2.3. Comparació d'alternatives

El model de tub d'assaig amb tap de rosca, tot i tenir el preu de compra més car, és l'únic que garanteix la robustesa requerida; el tap presenta un major diàmetre que el tub, per la qual cosa la subjecció entre tub i estructura és molt estable i la unió amb rosca entre tub i tap és la més segura de les tres alternatives. Altrament, el tap pot ser foradat fàcilment per tal d'introduir-hi el LED.

El model de tub d'assaig amb tap amb aletes (per fricció) garanteix una subjecció suficient entre tub i tap, però no entre tub i estructura ja que el diàmetre del tub i el del tap són iguals. A més a més, per la seva forma, el tap és difícil de perforar per introduir-hi el LED.

El tub d'assaig amb tap universal (a pressió) tampoc ofereixen la robustesa requerida. Tot i que la forma del tap, amb un diàmetre major al del tub, garanteix una bona subjecció del tub amb l'estructura i que la forma del tap facilita la perforació per introduir el LED, la unió entre tap i tub hauria de ser reforçada amb algun producte adhesiu que amb el transcurs del temps podria disminuir la seva eficàcia.

¹⁹ Font: <http://www.pidiscat.cat/ca/tubs-assaig-plastic-ps-pp-taps/8844-taps-tub-assaig-plastic-pe-amb-aletes-13-mm-capsa-1000-unitats-.html>

Així doncs, l'elecció del tub d'assaig amb rosca és obligada ja que és l'única alternativa que compleix tots els requisits necessaris.

6.3. Mida dels tubs d'assaig

Un cop decidit el model de tub que s'ajusta millor a les característiques i a les necessitats de l'estructura, cal escollir la mida que aquests han de tenir. Les dimensions dels tubs d'assaig influeixen en les dimensions finals de l'orgue, en la massa i en l'aspecte.

L'empresa **DD Biolab S.L.**, proveïdor habitual de material de laboratori del Departament d'Enginyeria Química de l'ETSEIB, comercialitza el model escollit amb tres mides diferents. Totes elles tenen un diàmetre de 16 mm i varien en la seva longitud.

Per calcular la massa d'aigua (m) continguda en el total dels tubs d'assaig s'ha multiplicat la capacitat del tub (V) en cm^3 (obtinguda del catàleg del fabricant), per la densitat de l'aigua (ρ) en g/cm^3 i pel nombre total de tubs.

$$m = 40 \cdot V \cdot \rho \quad (\text{Eq. 6.1})$$

6.3.1. Tub d'assaig de 16×100 mm

El tub d'assaig més petit presenta un diàmetre de 16 mm i 100 mm de longitud. Cada tub conté un volum de 10 cm^3 .

L'aigua total que hi cap en 40 tubs de 16×100 mm té una massa aproximada de 400 g.

El preu del lot de compra de 704 unitats és de 301,00 €.

Utilitzant els tubs de 16×100 mm resulta un orgue de 500×350 mm aproximadament.

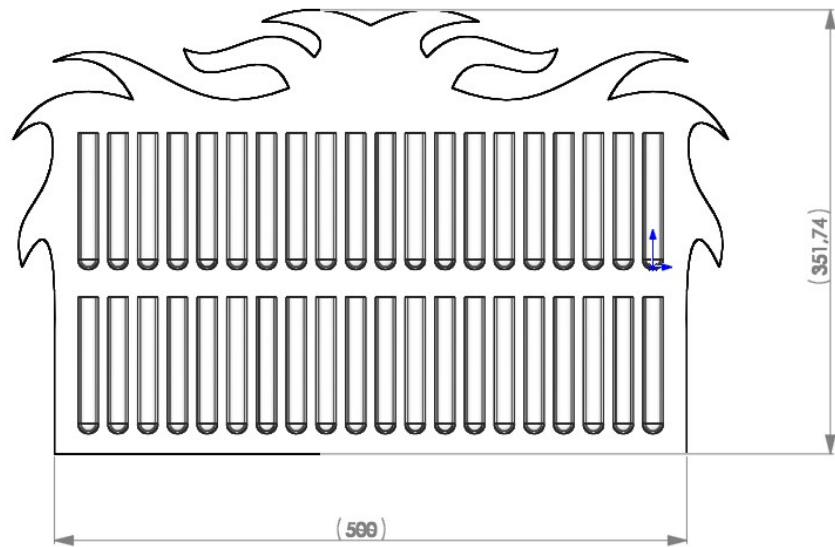


Figura 6.5: Simulació aproximada de les dimensions de l'orgue amb tubs de 16×100 mm

6.3.2. Tub d'assaig de 16×120 mm

El tub d'assaig mitjà té 16 mm de diàmetre i 120 mm de longitud. El volum contingut en aquesta mesura és de 16 cm³.

L'aigua total que hi cap en 40 tubs de 16×120 mm té un pes aproximat de 640 g.

El preu del lot de compra de 750 unitats és de 227,00 €.

Les mesures resultants de l'orgue, utilitzant els tubs de 16×120 mm, són 500×410 mm aproximadament.

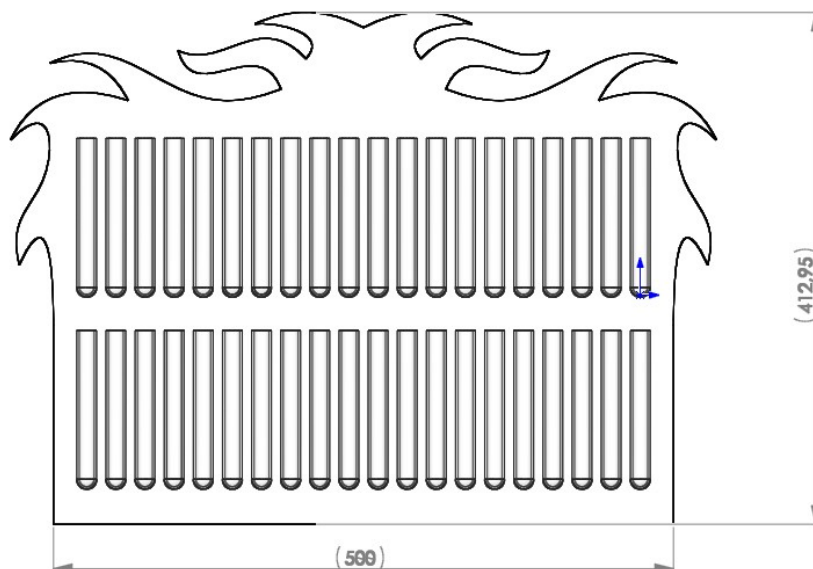


Figura 6.6: Simulació aproximada de les dimensions de l'orgue amb tubs de 16×120 mm

6.3.3. Tub d'assaig de 16×150 mm

La tercera mesura comercialitzada és un tub d'assaig de 16 mm de diàmetre i 150 mm de longitud. El volum contingut és de 19 cm³.

L'aigua total que hi cap en 40 tubs de 16×150 mm té una massa aproximada de 760 g.

El preu del lot de compra de 625 unitats és de 186,80 €.

Amb els tubs de 16×150 mm, l'orgue mesura 500×470 mm aproximadament.

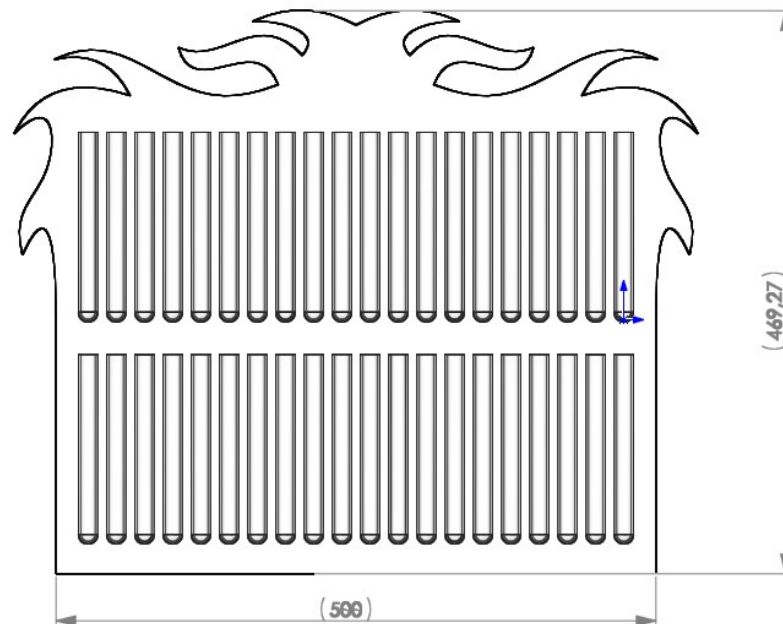


Figura 6.7: Simulació aproximada de les dimensions de l'orgue amb tubs de 16×150 mm

6.3.4. Comparació d'alternatives

La principal característica visual d'un orgue de tubs és la canonada, que és el conjunt de tubs llargs i prims encarregats de produir el so. Perquè l'aspecte de l'orgue fantasmagòric recordi el d'un orgue de tubs, cal que els tubs d'assaig evoquin la imatge de la canonada d'un orgue. Això s'aconsegueix utilitzant tubs d'assaig que tinguin una longitud suficient en relació amb el diàmetre. Els tubs de 100×16 mm es veuen massa curts i no evoquen la imatge de la canonada d'un orgue, per això es descarta aquesta mesura. Tant els tubs d'assaig de 120 mm de longitud com els de 150 mm compleixen aquesta condició necessària. Si bé aquest requisit fa pensar que la mesura més indicada és la de 150 mm perquè presenta major longitud amb el mateix diàmetre, cal tenir presents altres condicions no menys importants. També cal tenir present que un tub massa llarg pot comportar una deficiència d'il·luminació de la part inferior de la substància fluorescent.

Un cop descartada la mesura que no compleix la condició estètica, es compara la manejabilitat de l'orgue fantasmagòric amb les dues mides restants. L'orgue fantasmagòric ha de poder ser transportat i emmagatzemat amb relativa facilitat i això depèn directament de la massa i de les dimensions totals. Tant els tubs d'assaig de 120 mm de longitud com els de 150 mm transmeten la imatge de la canonada d'un orgue, però els de 120 mm ho fan

amb una massa i unes dimensions menors.

Finalment, quan es compara el preu de les dues mides, la diferència de 40,20 € entre els tubs de 120 mm (227 €) i els de 150 mm (186,80 €) pot assumir-se perfectament.

Per tant, l'alternativa òptima és utilitzar tubs de 16×120 mm. Aquesta mida representa la imatge d'un orgue de tubs, minimitzant la massa total i les dimensions, sense incrementar notablement el preu.

6.4. Material de l'esquelet de l'orgue fantasmagòric

L'esquelet és el conjunt de tubs que fixa i subjecta l'estructura de l'orgue fantasmagòric. Les propietats mecàniques que ha de complir el material dels tubs és disposar de la tenacitat i la rigidesa a la compressió suficients per no deformar-se ni trencar-se.

Altres característiques que es tenen en compte a l'hora de triar el material són el pes total resultant, l'aspecte, la facilitat de mecanització, el preu i l'impacte mediambiental.

Seguidament es presenten dues alternatives de canonades rígides que poden adquirir-se fàcilment a qualsevol comerç de materials de construcció. Els materials perjudicials per a les persones, per als animals o per al medi ambient han estat descartats automàticament.

6.4.1. Canonades de coure

La primera opció és utilitzar canonades de coure, un metall de transició dúctil i mal·leable. Es caracteritza per ser un metall amb poca duresa i una alta conductivitat elèctrica. Quan s'exposa a l'aire s'hi forma òxid, tot i que les canonades van recobertes amb una capa protectora per allargar-ne la vida útil. Es tracta d'un material que pot reciclar-se de forma indefinida. La seva densitat és de 8,9 g/cm³ aproximadament **(8)**.

Aquest tipus de canonada ofereix una molt bona subjecció permanent mitjançant la soldadura amb maneguets. Un cop feta la unió no pot desmuntar-se amb facilitat i, en cas de voler-se tornar a muntar, cal tornar a soldar.

Les canonades de coure poden ser tallades amb una serra per a metalls per obtenir-ne els diversos fragments de la llargada requerida.

Tant les canonades com els maneguets són de color vermellós i brillant (color coure). Amb l'aparició de l'òxid, el vermell es torna verdós i finalment s'acaba ennegrint.

El cost del material necessari per elaborar tot l'esquelet de l'orgue fantasmagòric amb canonades de coure és d'uns 7 € aproximadament (no es contemplen els costos del mecanitzat ni de la soldadura).



Figura 6.8: Canonada de coure de 22 mm de diàmetre i te femella de coure de 22 mm de diàmetre i 90°²⁰

6.4.2. Canonades de PVC

La segona alternativa és utilitzar canonades de PVC (clorur de polivinil) rígid, el derivat del plàstic més versàtil.

El PVC rígid és un material tenaç que presenta bona estabilitat dimensional i una alta resistència ambiental i a l'impacte. Ofereix també bona resistència elèctrica i a la flama i es tracta d'un material reciclable, estable i inert. La seva densitat és d'1,4 g/cm³ aproximadament (9).

Aquest tipus de canonada ofereix una bona subjecció a pressió mitjançant maneguets amb la possibilitat de desmuntar-se en qualsevol moment amb facilitat; pot muntar-se i desmuntar-se tantes vegades com es vulgui. Si la unió es vol fer de manera permanent pot aplicar-s'hi algun producte adhesiu.

Les canonades de PVC rígid poden ser tallades amb una serra de costella per obtenir-ne els diversos fragments de la llargada requerida.

Tant les canonades com els maneguets són de color gris fosc mat.

El cost del material necessari per elaborar tot l'esquelet de l'orgue fantasmagòric amb canonades de PVC rígid és d'uns 5 € aproximadament (no es contemplen els costos del

²⁰ Font: http://www.leroymerlin.es/productos/fontaneria_y_tratamiento_del_agua/alimentacion_de_agua/tuberias_de_cobre.html

mecanitzat ni de la possible aplicació d'un producte adhesiu).

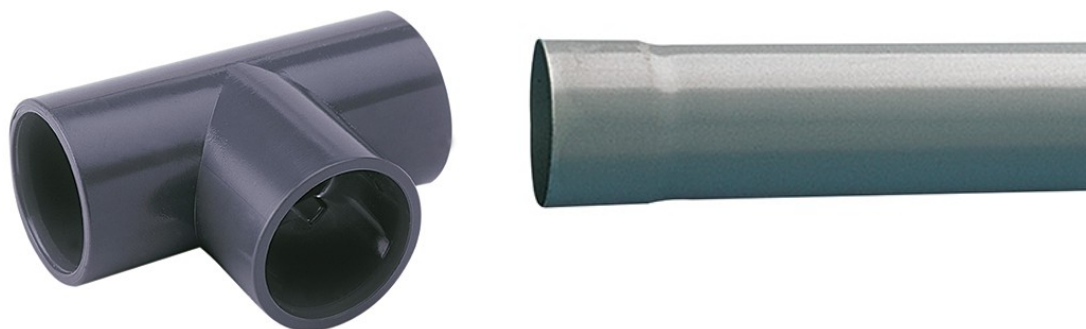


Figura 6.9: Te llisa femella de PVC de 32 mm de diàmetre i 90° i canonada de PVC de 32 mm de diàmetre²¹

6.4.3. Comparativa d'alternatives

Totes dues opcions són aptes per constituir l'esquelet de l'orgue fantasmagòric perquè compleixen els requisits de tenacitat i rigidesa i la condició de no ser perjudicial pel medi ambient ni la salut de persones ni animals.

No obstant, entre les dues alternatives, l'opció d'utilitzar canonades de PVC rígid presenta més avantatges que usar canonades de coure. El principal avantatge és que el PVC rígid ofereix la possibilitat de muntar i desmuntar l'esquelet tantes vegades com es vulgui sense necessitat de soldar. A més, té major resistència a la compressió i tenacitat, però sobretot millor resistència ambiental que el coure. Tot i que la diferència és molt poca, el preu d'utilitzar el PVC rígid és menor.

Amb tot això, es conclou que l'alternativa que millor s'ajusta a les necessitats del projecte és utilitzar canonades de PVC rígid per confeccionar l'esquelet de l'orgue fantasmagòric.

²¹ Font: http://www.leroymerlin.es/productos/fontaneria_y_tratamiento_del_agua/alimentacion_de_agua/tuberias_de_pvc_presion.html

7. Disseny del prototip

7.1. Descripció de la solució adoptada

L'orgue fantasmagòric és un artefacte que simula un orgue de tubs d'aspecte fantasmagòric. L'artefacte té tres estats de funcionament: mode **pausa**, mode **tocata** i mode **théremin**. El mode Tocata reproduïx visual i auditivament un fragment adaptat a dues veus de l'obra Tocata i Fuga en re menor de Johann Sebastian Bach. El segon mode simula l'instrument musical Théremin i, usant dos sensors d'ultrasons, permet a l'usuari interactuar fent sonar dos tons independents simultàniament a partir de la distància a la qual col·loca les seves mans.

L'usuari escull el mode de funcionament del prototip mitjançant una caixa de control amb dos polsadors (10). El polsador vermell activa i desactiva la reproducció i el polsador blau alterna entre Tocata i Théremin. La caixa que conté els polsadors també inclou els dos sensors d'ultrasons i tres LED que indiquen visualment el mode en el qual es troba l'orgue fantasmagòric.

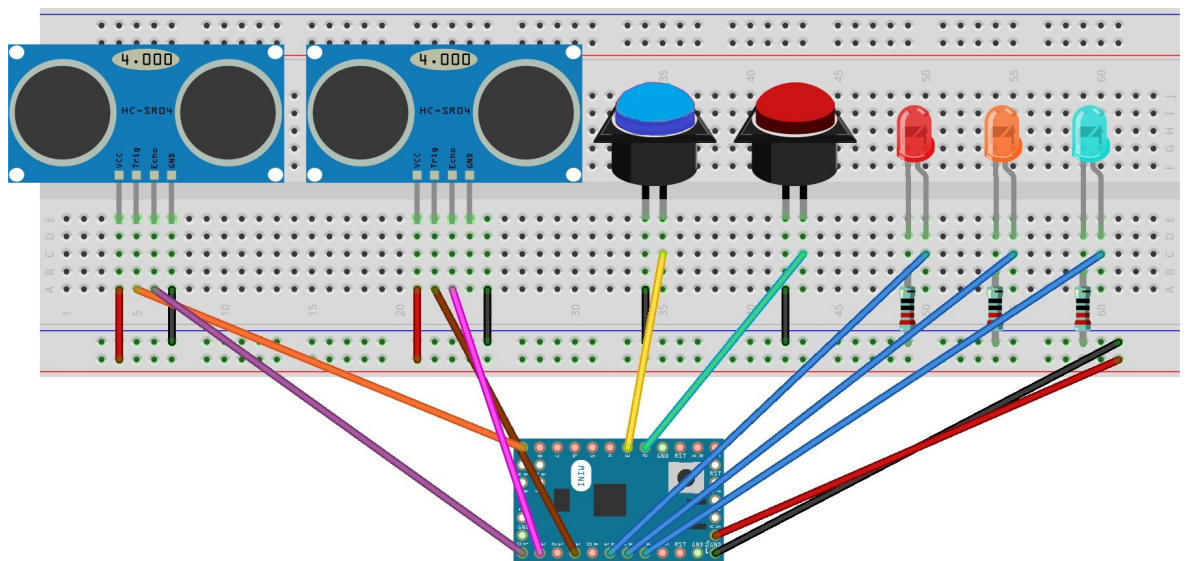


Figura 7.1: Circuit electrònic de la caixa de control

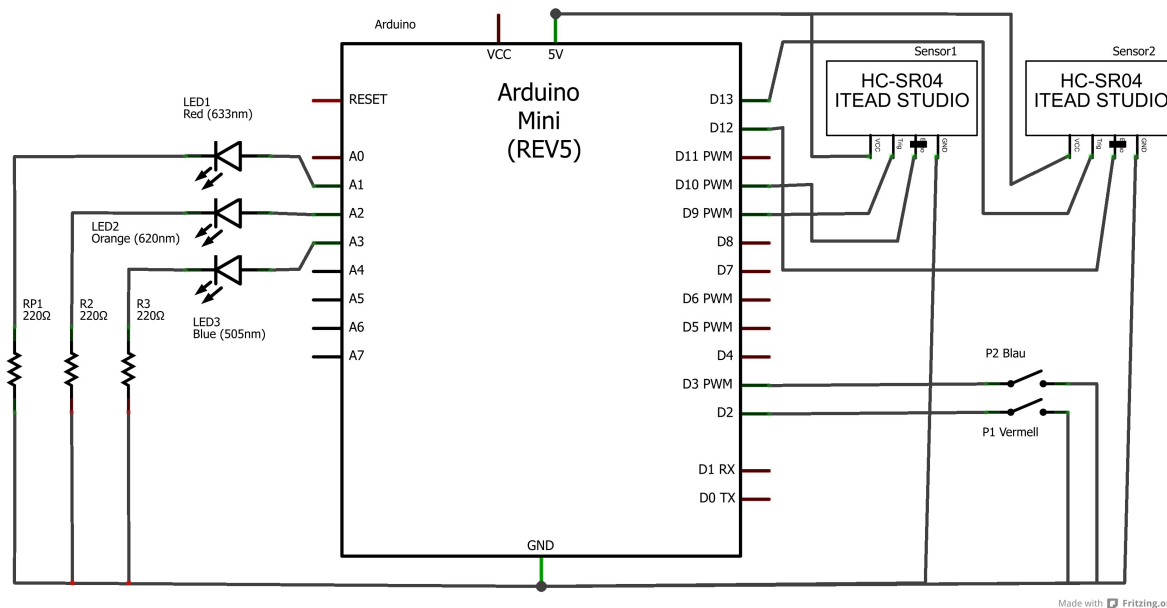
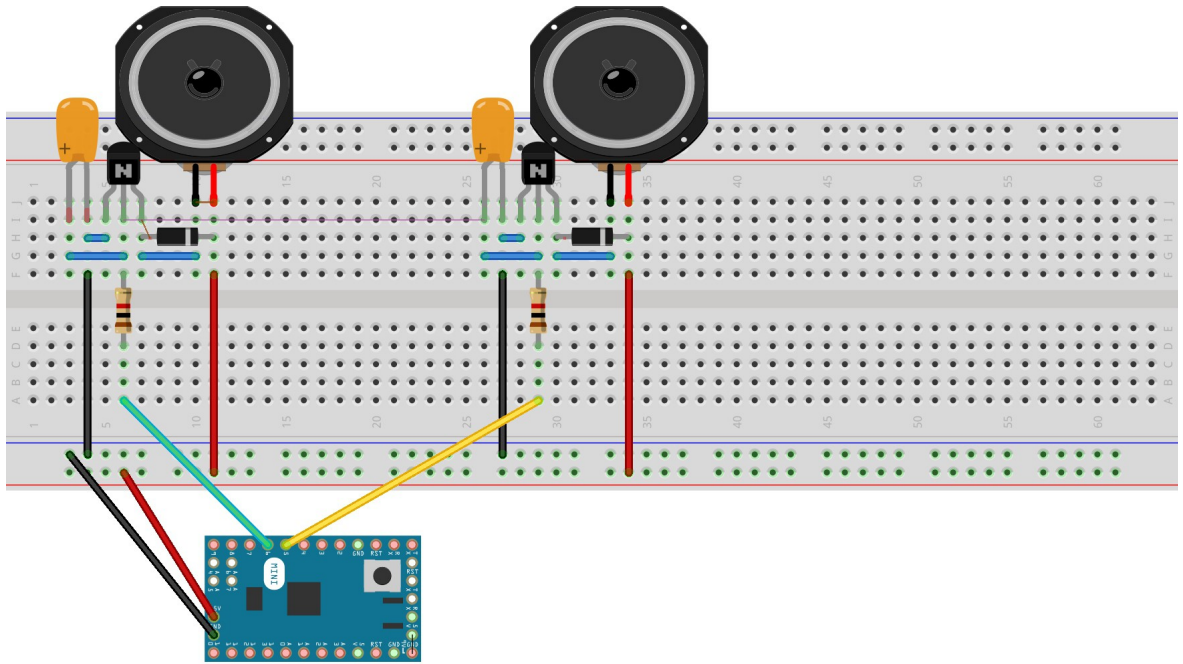


Figura 7.2: Esquema del circuit electrònic de la caixa de control

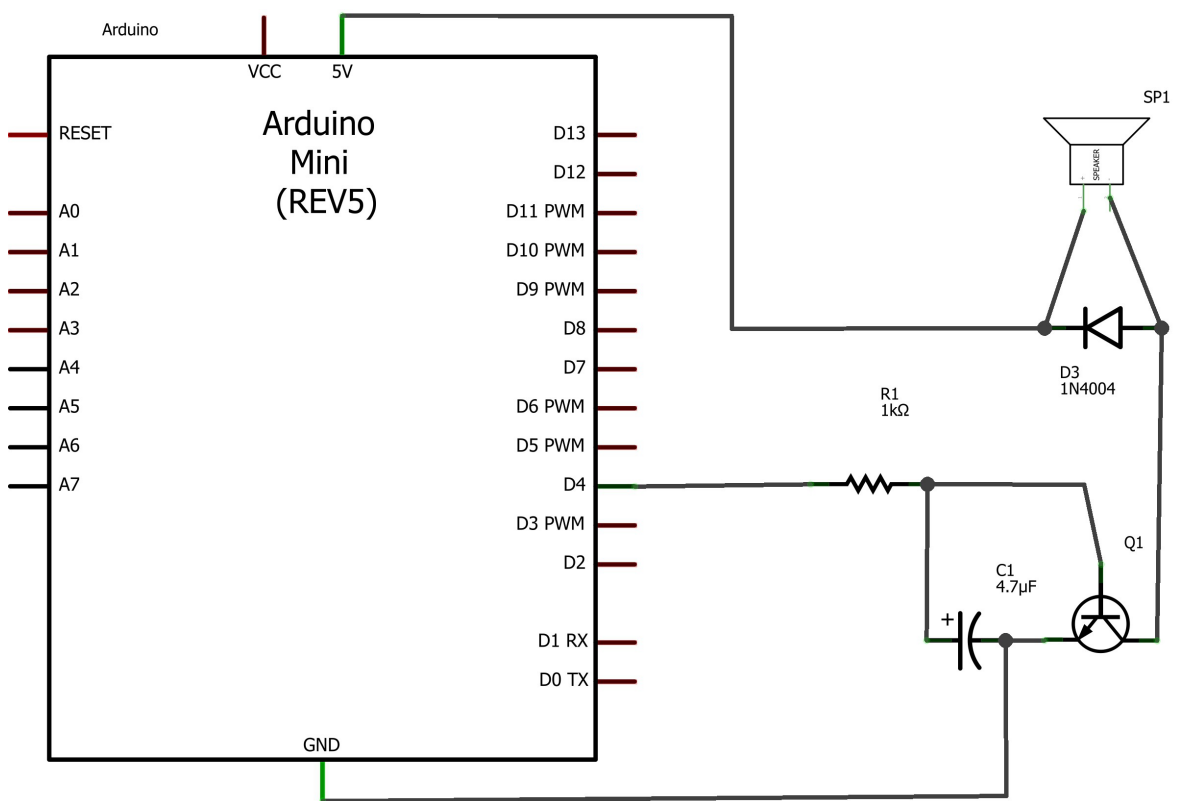
L'orgue disposa de quaranta tubs d'assaig col·locats verticalment en dues files simètriques. Cada tub té una nota musical assignada i conté un LED de llum ultraviolada per reproduir visualment la nota corresponent. Cada tub conté aigua que porta dissolt un pigment fluorescent que emetrà llum de color quan el LED estigui encès. L'artefacte disposa també de dos petits altaveus integrats que són els encarregats de reproduir auditivament els dos tons en el mode Tocata i en el mode Thérémin **(11)**.

S'usa una placa Arduino Pro Mini per controlar la seqüència d'encesa i apagada dels LED, la reproducció d'àudio i el processament de la informació que prové dels sensors d'ultrasons. Les llibreries existents d'Arduino faciliten molt la programació del microcontrolador per satisfer les necessitats del projecte. Aquest model de placa presenta unes dimensions reduïdes i un número de potes suficients per controlar el prototip.



Made with Fritzing.org

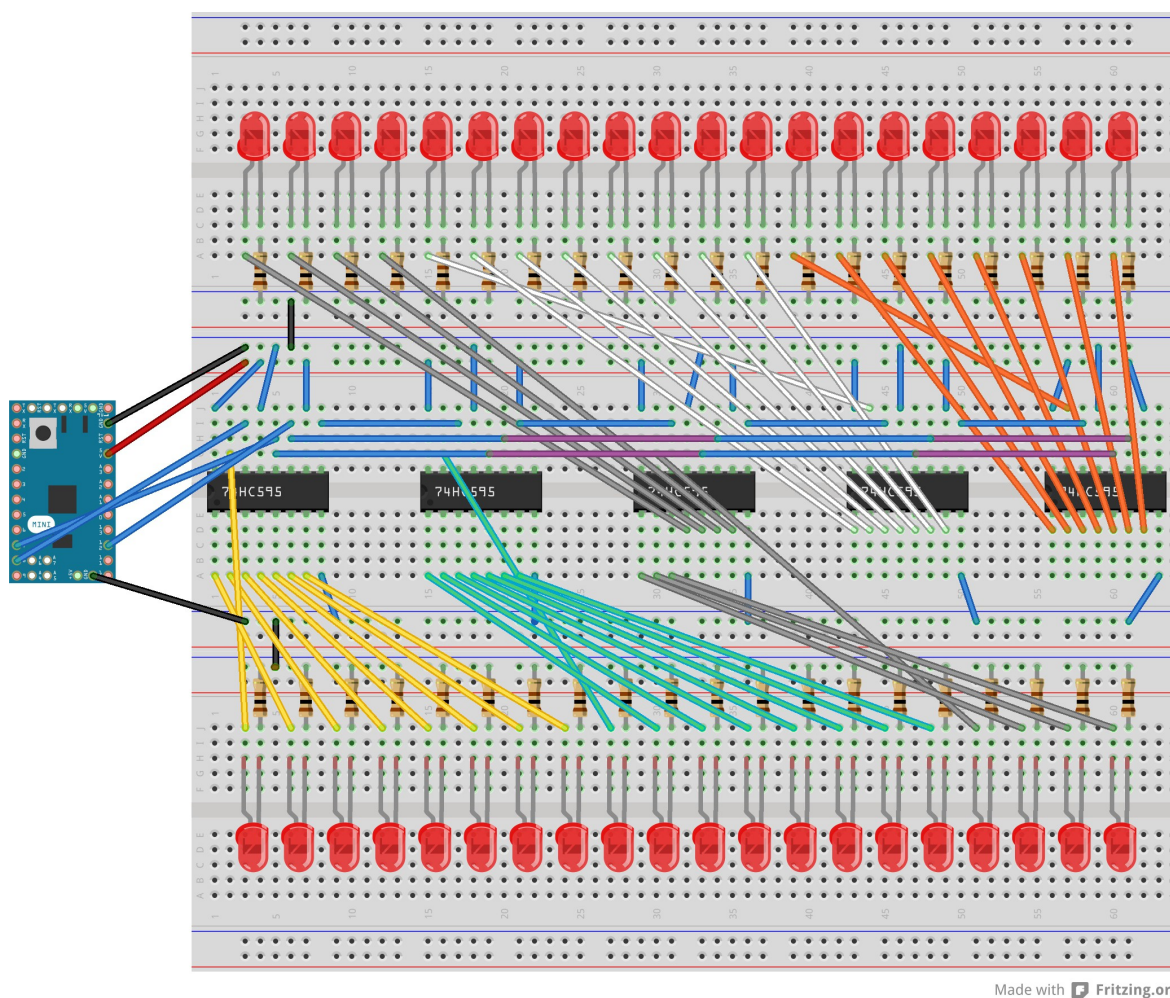
Figura 7.3: Circuit electrònic dels dos altaveus



Made with Fritzing.org

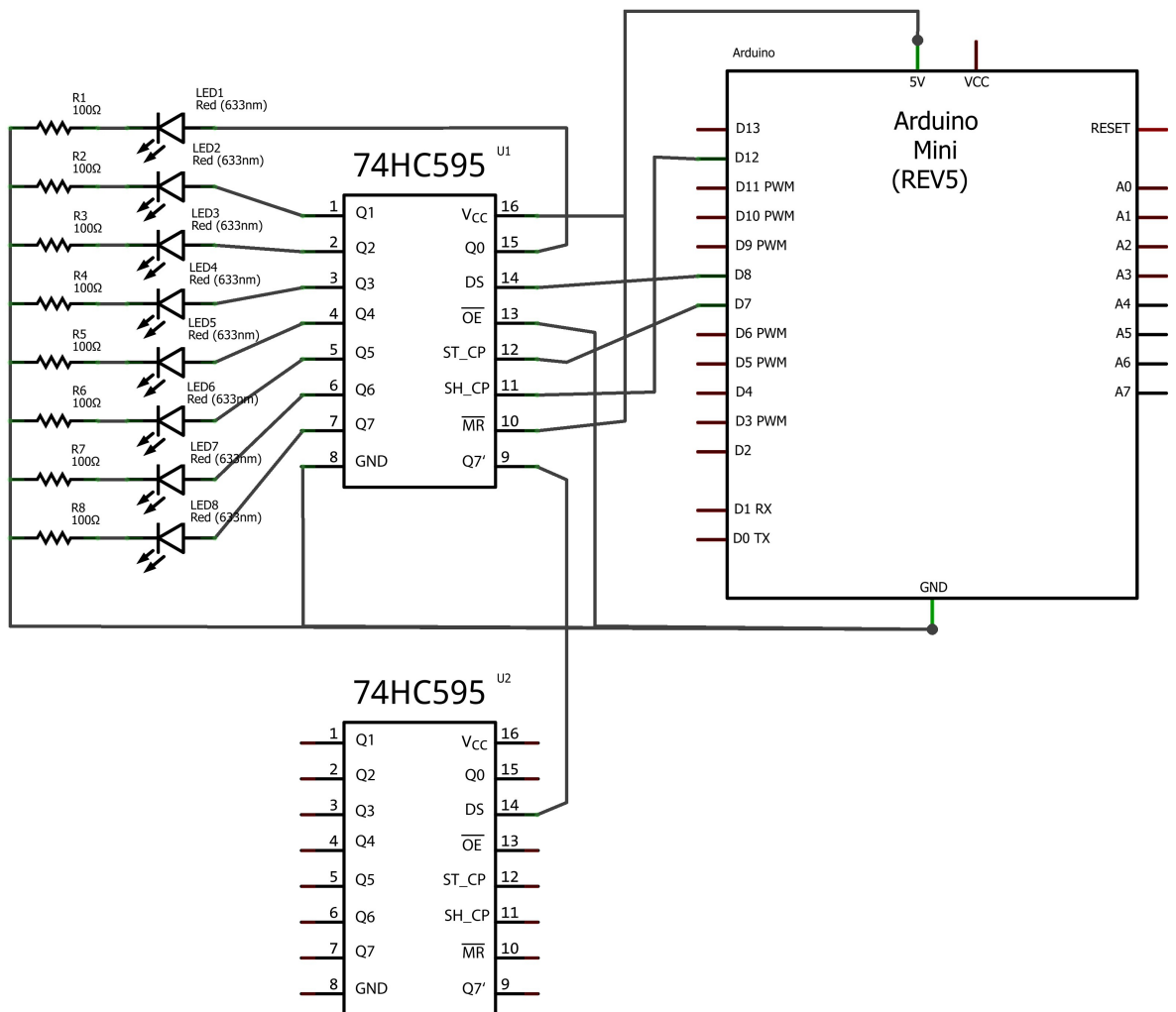
Figura 7.4: Esquema del circuit electrònic d'un dels dos altaveus

Els quaranta LED dels tubs d'assaigs es controlen mitjançant un registre de desplaçament (12). S'utilitzen cinc xips 74HC595 en sèrie per controlar els quaranta LED amb només tres potes del microcontrolador.



Made with Fritzing.org

Figura 7.5: Circuit electrònic del control dels LED dels tubs d'assaig



Made with Fritzing.org

Figura 7.6: Esquema del circuit electrònic del control dels LED dels tubs d'assaig

La placa Arduino Pro Mini s'alimenta mitjançant una font endollable que li proporciona 9 V i 2000 mAh. Tot el circuit electrònic s'abasta de la placa Arduino.

L'estructura del prototip consta dels tubs d'assaig, dues peces de metacrilat que actuen de suport dels tubs d'assaig, una peça de metacrilat amb una funció estètica, les canonades de PVC que conformen l'esquelet i el suport de fusta que dona estabilitat al prototip.

Els tubs d'assaig són de poliestirè vidre, tenen forma cilíndrica, disposen de tap amb rosca i tenen una mesura de 16 × 120 mm. S'ha foradat el tap de cada tub per passar-hi el cablejat

del LED corresponent. El tap, de color vermell, ha estat pintat amb esprai de color negre.

Les dues peces de metacrilat negre que actuen de suport dels tubs d'assaig han estat dissenyades amb SolidWorks i tallades amb làser. Els tubs d'assaig van encaixats perpendicularment i se sostenen recolzats amb la part inferior del tap de rosca.

La peça de metacrilat negre, disposada de forma vertical, té la funció d'amagar la placa Arduino i el cablejat que va per la part posterior del prototip. També té la funció de ressaltar, per contrast, la fluorescència dels tubs d'assaig. La peça ha estat dissenyada amb SolidWorks i posteriorment tallada amb làser.

Les canonades de PVC, tallades amb serra de costella i posteriorment pintades amb esprai de color negre, s'uneixen a pressió mitjançant maneguets i colzes per conformar l'esquelet que sustenta tot el prototip.

La base, de fusta de pi i mecanitzada amb fresadora, garanteix l'estabilitat del prototip. Posteriorment s'ha pintat amb esprai negre.

7.2. Components i material

En aquest apartat es presenten tots els components utilitzats per la conformació del prototip. Tots els preus tenen aplicat l'IVA (21 %).

7.2.1. Reproducció de so

A continuació es detallen tots els components del prototip destinats a la reproducció de so.

Altaveu (x2)

Altaveu de 5 cm i 8 ohm – 0,5 W. Presenta unes dimensions reduïdes perquè quedi integrat dins de l'estructura. Disposa de potència suficient per reproduir de manera clara l'àudio en condicions normals. No necessita alimentació externa i té un preu reduït.

Preu unitari: 1,50 €.

Preu conjunt: 3,00 €.



Figura 7.7: Altaveu 5 cm 8 ohm – 0,5 W²²

Condensador del circuit de l'altaveu (x2)

Condensador de 4,7 μ F i 100 V.

Preu unitari: 1,29 €.

Preu conjunt: 2,58 €.



Figura 7.8: Condensador de 4,7 μ F 100 V²³

²² Font: <http://tienda.bricogeek.com/varios/590-altavoz-5cm-8-ohm-05w.html>

²³ Font: <https://www.ebay.com/itm/2pcs-WIMA-MKS4-4-7uF-4-7-F-4-7uF-100V-5-pich-22-5mm-Capacitor-/151156405665>

Resistència del circuit de l'altaveu (x2)

Resistència d'1 k Ω .

Preu unitari: 0,05 €.

Preu total: 0,10 €.



Figura 7.9: Resistència d'1 k Ω ²⁴

Transistor del circuit de l'altaveu (x2)

Transistor **2N3904**.

Preu lot de compra: 0,07 € (lot de 5 unitats).

Preu total: 0,03 €.



Figura 7.10: Transistor NPN 2N3904²⁵

24 Font: <https://www.nextiafenix.com/producto/resistencia-1k-1w4/>

25 Font: <https://www.sparkfun.com/products/521>

Díode del circuit de l'altaveu (x2)

Díode **1N4004**.

Preu lot de compra: 0,10 € (lot de 5 unitats).

Preu total: 0,04 €.



Figura 7.11: Díode 1N4004²⁶

7.2.2. Reproducció visual

Seguidament es presenten els components encarregats de la reproducció visual.

LED ultraviolat (x40)

LED **UV/UVA 400 nm Purple LED 5mm Clear Lens - 10 pack**.

Preu lot de compra: 4,95 € (lot de 10 unitats).

Preu total: 19,80 €.



Figura 7.12: LED UV²⁷

²⁶ Font: <https://www.ondaradio.es/producto/wd4004-rohs-1n4004-diodo-rectificador-1n-4004-1a-400v-do-41-35572.aspx>

²⁷ Font: <https://www.adafruit.com/product/1793>

Pigments fluorescents (x10)

Pigments fluorescents **GloMania 10 Color Set Mini Sampler Neon Pigment Powder, Black Light UV Reactive, Fluorescent.**

Preu lot de compra: 14,99 € (lot de 10 pigments de colors diferents).

Preu total: 14,99 €.



Figura 7.13: Pigments fluorescents

Circuit integrat 74HC595 (x5)

Circuit integrat **74HC595.**

Preu lot de compra: 0,69 € (lot de 5 unitats).

Preu total: 0,69 €.



Figura 7.14: Circuit integrat 74HC595²⁸

²⁸ Font: <https://www.ondaradio.es/producto/74hc595-rohs-8-bit-shift-registers-with-3-state-output-registdip-16-22453.aspx>

Resistència del LED (x40)

Resistència de 100 Ω .

Preu lot de compra: 0,75 € (lot de 20 unitats)

Preu total: 1,50 €.



Figura 7.16: Resistència de 100 Ω ²⁹

7.2.3. Estructura

Els components que conformen l'estructura del prototip es presenten a continuació.

Tub d'assaig (x40)

Tub d'assaig amb tap de rosca de 16×120 mm.

Preu lot de compra: 227,00 € (lot de 750 unitats).

Preu total: 12,11 €.

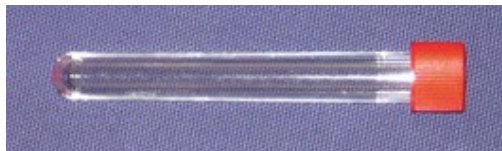


Figura 7.17: Tub d'assaig amb tap de rosca de 16 × 120 mm³⁰

²⁹ Font: <https://www.component7.com/100-ohm-1-4-watt-resistor>

³⁰ Font: <https://www.ddbiolab.com/frontoffice/reference/012068>

Tub de 32 mm de PVC

Tub de PVC a pressió de 32 mm i 2,5 m.

Preu unitari: 1,85 €.

Preu total: 1,85 €.



Figura 7.18: Tub de PVC pressió de 32 mm i 2,5 m³¹

Te de 90° de PVC (x2)

Te llista de 32 mm i 90° femella de PVC a pressió.

Preu unitari: 1,17 €.

Preu total: 2,34 €.

³¹ Font: <http://www.leroymerlin.es/fp/12400843/tubo-de-pvc-presion-de-32-mm-y-25-m-?idCatPadre=10611&pathFamiliaFicha=500611>



Figura 7.19: Te llista de 32 mm i 90° femella³²

Maneguet de PVC (x4)

Maneguet llis de 32 mm femella – femella de PVC a pressió

Preu unitari: 0,72 €.

Preu total: 2,88 €.



Figura 7.20: Maneguet llis de 32 mm femella – femella³³

32 Font: <http://www.leroymerlin.es/fp/12165006/te-lisa-de-32-mm-y-90%C2%BA-hembra?idCatPadre=10611&pathFamiliaFicha=500611>

33 Font: <http://www.leroymerlin.es/fp/12165664/manguito-liso-de-32-mm-hembra-hembra?idCatPadre=10611&pathFamiliaFicha=500611>

Colze de 90° de PVC (x2)

Colze llis de 32 mm i 90° femella-femella de PVC a pressió.

Preu unitari: 0,71 €.

Preu total: 1,42 €.



Figura 7.21: Colze llis de 32 mm i 90° femella-femella³⁴

Planxa de metacrilat de 60×50 cm i 5 mm de gruix

Planxa de metacrilat negre opac de 60×50 cm i 5 mm de gruix.

Preu unitari: 32,20 €.

Preu total: 32,20 €.



Figura 7.22: Planxa de metacrilat negre opac³⁵

³⁴ Font: <http://www.leroymerlin.es/fp/12164950/codo-liso-de-32-mm-y-90%C2%BA-hembra-hembra?idCatPadre=10611&pathFamiliaFicha=500611>

³⁵ Font: <https://www.amazon.es/metacrilato-negro/s?ie=UTF8&page=1&rh=i%3Aaps%2Ck%3Ametacrilato%20negro>

Planxa de metacrilat de 60×50 cm i 3 mm de gruix

Planxa de metacrilat negre de 60×50 cm i 3 mm de gruix.

Preu unitari: 21,15 €.

Preu total: 21,15 €.

Fusta suport

Llistó de fusta de pi de 545×120×30 mm.

Preu unitari: 4,30 €.

Preu total: 4,30 €.



Figura 7.23: Llistó de fusta de pi

7.2.4. Caixa de control

Els components que formen part de la caixa de control es descriuen a continuació.

Polsador (x2)

Polsador OFF-ON.

Preu unitari: 1,72 €.

Preu total: 3,44 €.

Figura 7.24: Polsador OFF-ON³⁶

Caixa de plàstic

Caixa **HAMMOND CAJA DE PLASTICO - HAND HELD ENCLOSURES - FLAME RETARDANT ABS 170x85x34 mm.**

Preu unitari: 8,48 €.

Preu total: 8,48 €.

Figura 7.25: Caixa 170x85x34 mm³⁷

Sensor d'ultrasons (x2)

El sensor d'ultrasons **HC-SR04** és senzill i barat. Per realitzar correctament la funció de Théremin no es necessita més precisió i l'interval de distància que mesura és l'adequat.

Preu unitari: 1,68 €.

Preu total: 3,36 €.

³⁶ Font: <https://www.ondaradio.es/producto/pb101ar-rohs-pulsador-redondo-off-on-rojo-18189.aspx>

³⁷ Font: <https://www.ondaradio.es/producto/1599ebk-rohs-hammond-caja-plastico-negra-170x85x34-mm-17802.aspx>



Figura 7.26: Mòdul sensor d'ultrasons HC-SR04³⁸

7.2.5. Altres

Finalment es detallen la resta de components que formen part del prototip i no estan inclosos en cap de les categories anteriors.

Cablejat

10 m de cable de 0,50 mm² de secció.

Preu unitari: 2,93 €.

Preu total: 2,93 €.



Figura 7.27: Bobina de 10 m de cable de 0,50 mm²³⁹

38 Font: <https://www.ondaradio.es/producto/hcsr04-modulo-sensor-ultrasonico-hc-sr04-para-arduino-44072.aspx>

39 Font: <https://www.ondaradio.es/producto/cc2502r-rohs-bls10-hilo-conex-050-rojo-10284.aspx>

Font d'alimentació

Font d'alimentació endollable de 9 V i 2000 mAh.

Preu unitari: 4,20 €

Preu total: 4,20 €



Figura 7.28: Font d'alimentació endollable de 9 V i 2000 mAh⁴⁰

⁴⁰ Font: <https://www.ebay.com/itm/AC-100-240V-Converter-Adapter-DC-5-5-x-2-5MM-4-5V-1A-1000mA-Charger-EU-Plug-BEST-/182800824513?oid=121899250726>

7.3. Mecanitzat

El mecanitzat del prototip s'ha realitzat de forma manual exceptuant el tall amb làser de les peces de metacrilat de l'estructura i el mecanitzat de la base de fusta, que han estat mecanitzats per tercers.

El tap dels tubs d'assaig s'ha foradat amb una barrina per poder passar-hi el cablejat del LED.

Amb un serra de costella s'ha tallat la canonada de PVC per tal de dividir-la en els fragments de la mesura adequada. La unió dels fragments de canonada és a pressió amb maneguets i colzes de PVC.

El circuit electrònic s'ha soldat amb estany al taller del Departament d'Energia Elèctrica.

El fons decoratiu i el suport dels tubs d'assaig, peces de metacrilat, s'han dissenyat amb SolidWorks i han estat tallades amb làser degut a la gran quantitat de línies corbes que presenten.

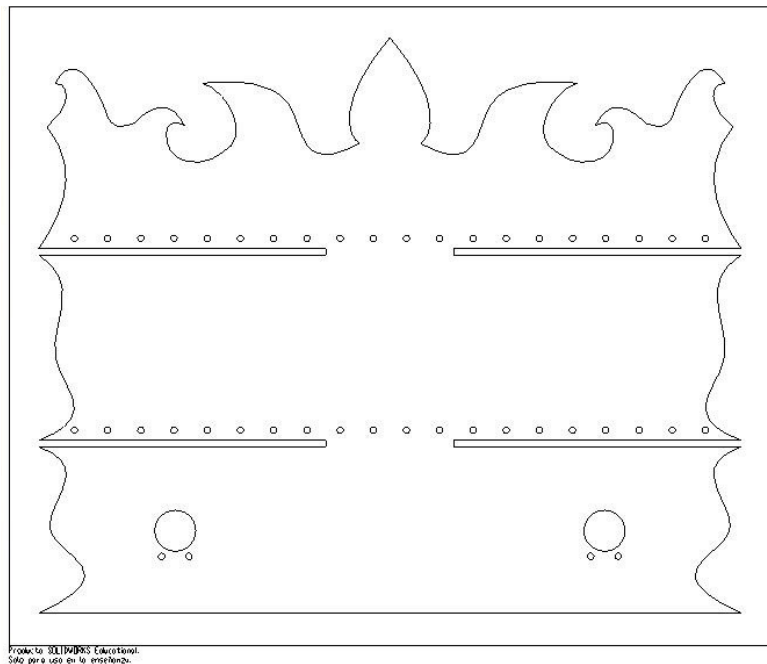


Figura 7.29: Plànol del fons decoratiu en una planxa de 60×50 cm per ser tallada amb làser

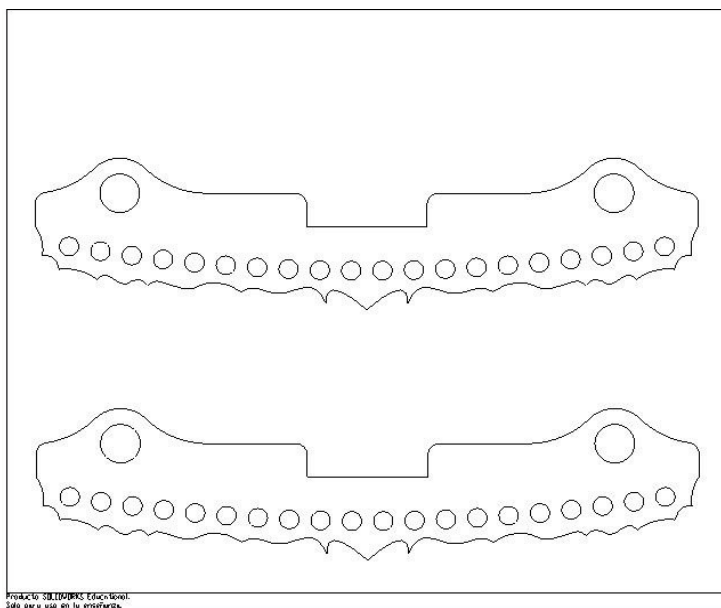


Figura 7.30: Plànol del suport dels tubs en una planxa de 60×50 cm per ser tallada amb làser

El suport, de fusta, ha estat mecanitzat amb una fresadora d'alt rendiment.

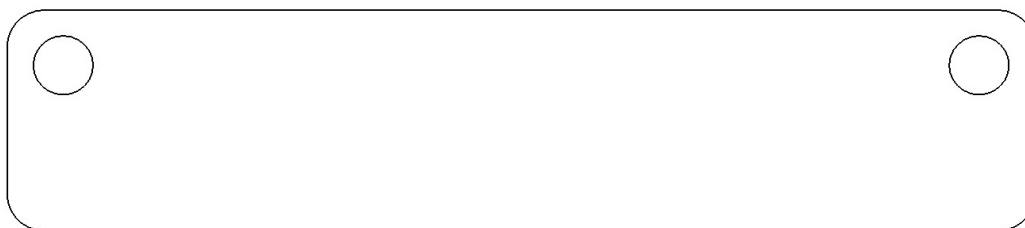


Figura 7.31: Plànol de la base per ser mecanitzada amb fresadora d'alt rendiment

7.4. Cost del prototip

A continuació es desglossen els costos dels components, del material i del mecanitzat necessaris per conformar el prototip.

Components	Preu unitari [€/un]	Unitats [un]	Preu total [€]
Altaveu	1,50	2,00	3,00
Condensador 4,7 μ F i 100 V	1,29	2,00	2,58
Resistència 1 k Ω	0,05	2,00	0,10
2N3904	0,01	2,00	0,03
1N4004	0,02	2,00	0,04
LED UV 5 mm	0,50	40,00	19,80
Pigment fluorescent	1,50	10,00	14,99
74HC595	0,14	5,00	0,69
Resistència 100 Ω	0,04	40,00	1,50
Tub d'assaig 16x120 mm	0,30	40,00	12,11
Tub PVC de 2,5 m	1,85	1,00	1,85
Te 90° PVC	1,17	2,00	2,34
Maneguet PVC	0,72	4,00	2,88
Colze 90° PVC	0,71	2,00	1,42
Planxa de metacrilat 60x50x5 mm	32,20	1,00	32,10
Planxa de metacrilat 60x50x3 mm	21,15	1,00	21,15
Llistó fusta de pi	4,30	1,00	4,30
Polsador OFF-ON	1,72	2,00	3,44
Caixa 170x85x34 mm	8,48	1,00	8,48
Sensor US	1,68	2,00	3,36
10 m de cable de 0,50 mm ²	2,93	1,00	2,93
Font alimentació	4,20	1,00	4,20
TOTAL			96,36

Taula 7.1: Cost dels components i del material

Mecanitzat	Preu [€]
Tall làser	23,26
Tall fresadora	5,72
TOTAL	28,98

Taula 7.2: Cost del mecanitzat

Concepte	Cost [€]
Components i material	96,36
Mecanitzat	28,98
TOTAL	125,34

Taula 7.3: Cost total

8. Programació

El llenguatge de programació estàndard d'Arduino està basat en el llenguatge C++ amb una adaptació provinent del software lliure **avr-libc**, el qual proporciona una llibreria de C d'alta qualitat per ser utilitzada en els microcontroladors AVR d'Atmel.

8.1. Transcripció de les partitures

Per a què la partitura pugui ser reproduïda pel microcontrolador cal transcriure-la a una sèrie de notes i duracions ordenades cronològicament. Les tasques que es realitzen quan es transcriu una partitura són les següents: determinar el nom de les notes, assignar cada nota a la seva freqüència, decidir el valor de duració de cada figura, assignar cada LED a la seva nota corresponent, definir el nombre de parts diferents amb el tempo corresponent i, finalment, crear vectors amb la seqüència ordenada de les notes i les duracions. Seguidament es detalla com es duen a terme cadascuna de les tasques comentades.

Determinació del nom de les notes

S'utilitza el sistema de notació musical llatí per anomenar les notes musicals perquè és el sistema que s'ensenya i s'utilitza habitualment a Catalunya. Cada nota musical és una constant denominada amb el nom complet de la nota escrit en majúscules. Si la constant fa referència a una nota musical sostinguda, s'hi afegeix una **s** minúscula al final: **DO**, **DOs**, **RE**, **REs**, **MI**, **FA**, **FAs**, **SOL**, **SOLs**, **LA**, **LAs** i **SI**. Al silenci se l'anomena **NO**.

No es transcriuen les notes amb bemoll perquè les notes naturals i les notes sostingudes ja representen totes les freqüències possibles de l'escala cromàtica⁴¹. L'alteració sostingut suma un semitò cromàtic i l'alteració bemoll resta un semitò cromàtic; és a dir, un fa sostingut i un sol bemoll de la mateixa octava són notes enharmòniques perquè tenen la mateixa freqüència.

El fragment que es reproduïx de la Tocata i Fuga té un àmbit de quatre octaves. Darrere del nom de la nota s'hi afegeix un número que, seguint el criteri de l'índex acústic franco-belga⁴², indica l'octava a la qual pertany.

Per exemple, la notació **FAs3** fa referència a la nota fa sostingut de l'octava número 3.

⁴¹ L'escala cromàtica està composta per dotze sons separats per una distància d'un semitò.

⁴² El sistema franco-belga assigna la nota la₃ a la freqüència de 440 Hz.

Assignació de les freqüències a les notes

Per assignar cada nota a la seva freqüència (**13**), es crea l'arxiu **Freq.h** on, mitjançant el component de C **#define**, s'assigna la freqüència⁴³, en hertz, al nom de cada nota. D'aquesta manera, aquestes constants no ocupen cap espai de memòria al xip. Per exemple:

```
#define FA3      349
#define FAs3    370
#define SOL3    392
#define SOLs3   415
#define LA3     440
#define LAs3    466
```

Seguint l'exemple anterior, la nota **FAs3** té una freqüència assignada de 370 Hz.

Al silenci (anomenat **NO**) se li assigna una freqüència de 0 Hz perquè el vector **notes[]** és un conjunt d'enters, però tal com s'explica a l'apartat **10.2.3**, no es reproduïx una freqüència de 0 Hz per tocar el silenci, simplement no es reproduïx cap so.

Elecció dels valors de duració de les figures musicals

La duració d'una nota és el temps que aquesta està sonant fins que es reproduïx la següent nota o un silenci; aquesta duració ve determinada gràficament per la figura musical.

En el fragment reproduït la figura amb la duració més curta és la fusa, per tant, se li assigna el valor de duració 1 a aquesta figura. La següent figura amb menys duració és la semicorxera, que equival a dues fuses, per tant, se li assigna el valor de duració 2. La corxera equival a quatre fuses i el seu valor serà 4. Una negra dura el mateix que vuit fuses, així doncs, se li assigna el valor 8. La blanca, que té la mateixa duració que setze fuses, té un valor de duració de 16. Finalment, la figura amb més duració és la rodona, que equival a trenta-dues semicorxeres, i el seu valor serà 32. Tenint definides les principals figures musicals ja es pot assignar qualsevol duració combinant aquestes figures.

⁴³ Comentari: Les freqüències estan arrodonides a la unitat perquè tinguin valor enter. L'efecte d'aquest arrodoniment és imperceptible auditivament.

Figura	Valor de duració
Rodona	32
Blanca	16
Negra	8
Corxera	4
Semicorxera	2
Fusa	1

Taula 8.1: Valors de duració de les principals figures musicals

La figura característica de la segona part és el treset, una divisió ternària d'una figura binària. A la segona part de la Tocata i fuga apareixen tresets de corxeres, el que significa que es reproduïxen tres corxeres en el temps d'una negra. Així doncs, el valor de les corxeres del treset és d'una tercera part del valor d'una negra (2,6).

A la tercera part hi apareix un trino⁴⁴, característic de la música barroca. La duració de les notes del trino es representen amb la figura de la fusa.

Un cop determinat el nom de les notes, haver assignat la freqüència a cada nota i definit els valors de duració de les figures es crea un document anomenat **MelodiesTocataPROGMEM.h** on s'escriu tot el que es detalla a continuació, necessari per transcriure la partitura. Aquest document actua com una llibreria que emmagatzema la informació de la partitura.

Determinació del número de parts i del tempo

El fragment de la Tocata i fuga que es reproduïx presenta tres passatges amb tempo de reproducció diferent. Per aquest motiu, es divideix la partitura en tres parts i amb el component **#define** es defineix la constant **parts** amb el valor 3.

Després es crea un vector anomenat **tempo[]** amb els valors de tempo, ordenats cronològicament, de cadascuna de les part.

```
int tempo[]={62,48,95};
```

El valor de tempo és una constant que multiplica el valor de duració de cada nota per obtenir el temps de reproducció, en mil·lisegons, de cada nota. Per tant, com major és el

⁴⁴ Un trino és un adornament musical que consisteix en l'alternació ràpida de dues notes adjacents, habitualment a una distància de mig o d'un to.

valor de tempo d'una part, més pausat és el tempo de reproducció perquè les notes tenen una durada superior. Per exemple, si el valor de tempo de la primera part és 100, una semicorxera (valor de duració 2) sona durant 200 ms i una negra (valor de duració 8) dura 800 ms.

Assignació de cada LED a una nota

És necessari assignar cada LED a una nota concreta. A partir de la **Taula 8.2** es crea un vector amb les notes ordenades de tal manera que el nombre del LED correspon a la posició dins del vector de la nota corresponent.

```
const uint16_t notes[] PROGMEM=
    {NO,NO,DO1,DOs1,RE1,MI1,FA1,SOL1,LA1,LAs1,
     DO2,DOs2,RE2,MI2,FA2,FAs2,SOL2,LA2,LAs2,SI2,NO,
     NO,DO3,DOs3,RE3,MI3,FA3,SOL3,LA3,LAs3,
     DO4,DOs4,RE4,MI4,FA4,FAs4,SOL4,LA4,LAs4,SI4,NO};
```

D'aquesta manera, la nota assignada al LED número 24 correspon a la nota que ocupa la posició 24 del vector **notes[]**, la nota **LAs3**.

$$notes[24]=LAs3 \quad \text{Eq. 8.1}$$

La posició zero del vector s'utilitza com a silenci i no està assignat a cap tub. Les posicions amb la paraula "**NO**" representen els tubs que no tenen cap nota assignada (primera i última columna) perquè no s'utilitzen a la reproducció del fragment de la Tocata i fuga.

21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	33	34	35	36	37	38	39	40
	Do3	Do#3	Re3	Mi3	Fa3	Sol3	La3	Sib3	Do4	Do#4	Re4	Mi4	Fa4	Fa#4	Sol4	La4	Sib4	Si4	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Do1	Do#1	Re1	Mi1	Fa1	Sol1	La1	Sib1	Do2	Do#2	Re2	Mi2	Fa2	Fa#2	Sol2	La2	Sib2	Si2	

Taula 8.2: Relació entre número de LED i nota

Transcripció de notes i duracions

Per cada part del fragment es creen tres vectors: primera melodia, segona melodia i duració; en total sis vectors de notes i dos de duracions. Però abans de transcriure les notes i les duracions, cal que els vectors de la primera melodia, la segona melodia i la duració de la mateixa part tinguin dimensions idèntiques. Perquè es compleixi aquesta condició necessària, es modifica la partitura seguint el següent criteri: quan les notes coetànies de la primera i segona melodia no tenen la mateixa figura, la figura de major duració es divideix en diverses notes del mateix to i prenen el valor de les figures de menys duració de l'altra melodia fins completar la durada original de la figura dividida.

A mode d'exemple, la **Figura 8.1** mostra un fragment de la partitura original i la **Figura 8.2** ensenya el mateix fragment de la partitura modificada on les figures de les dues melodies són iguals.



Figura 8.1: Partitura original del compàs 7 al 9



Figura 8.2: Partitura modificada del compàs 7 al 9

Perquè això sigui viable, cal que no hi hagi silenci entre notes. D'aquesta manera, dues corxeres de la mateixa freqüència seguides se senten com una sola negra. L'inconvenient que presenta és que dues notes consecutives de la mateixa freqüència es perceben com una sola nota i per distingir que són dues notes diferents cal afegir una petita pausa entremig; en el fragment que es reproduïx de la Tocata i fuga no hi ha dues notes consecutives amb la mateixa freqüència, per tant, no cal prestar atenció a aquest inconvenient.

Un cop adaptada la partitura, es crea el vector que conté la seqüència cronològica dels números de LED de la primera veu que actuen a la primera part. El procediment és el següent: es llegeix la primera nota de la primera veu (pentagrama superior) de la partitura modificada, després s'obté el número de LED que correspon a la nota llegida usant la **Taula 8.2** i finalment s'escriu aquest número al vector. Es repeteix el mètode amb la nota següent afegint el nou número de LED a la dreta del nombre anterior fins arribar al final de la primera part. Els silencis es transcriuen com el LED número 0. S'obté un vector com el següent:

```
const uint16_t melodia11[] PROGMEM = {37,36,37,36,34,33,32,31,32,0,
37,36,37,0,33,34,31,32,0,
28,27,28,27,26,25,24,23,24,0,
28,28,28,28,0,23,25,24,24,24,0};
```

El procediment per crear els vectors de les altres parts i de la segona veu és idèntic.

El nom del vector indica la veu i la part a la qual pertany. La forma que presenta és **melodiaXY[]** on la X indica la part i la Y la veu. Per exemple, melodia32[] és la seqüència cronològica de nombres de LED que s'activen amb la segona veu de la tercera part.

Després de crear tots els vectors de les melodies, es creen vectors amb la seqüència cronològica dels valors de les figures de cada part. El procediment per transcriure els valors de les figures de la primera part es descriu a continuació: es llegeix la figura de la primera nota de la primera part (de la primera o segona veu, ja que les dues tenen les mateixes figures), utilitzant la **Taula 8.1** s'obté el valor de duració de la figura i aquest s'escriu al vector de valors de duracions. Es segueix el mateix mètode amb la següent figura i s'afegeix el seu valor de duració a la dreta de l'anterior. S'obté un vector com el següent:

```
const uint16_t duracio1[] PROGMEM =    {1,1,10,1,1,1,1,2,6,8,
                                        1,1,6,2,2,2,2,8,8,
                                        1,1,10,1,1,1,1,2,6,8,
                                        2,2,2,2,2,2,12,4,4,8,6};
```

El mètode per crear els vectors amb la seqüència de valors de duració de les altres dues parts és el mateix.

El nom del vector mostra la part a la qual fa referència. El nom genèric és **duracioX[]** on la X indica la part. Per exemple, **duracio2[]** és la seqüència cronològica de valors de duració de les figures de la segona part.

Finalment, es comprova que les longituds dels tres vectors de cada part (dos de melodia i un de duració) tenen la mateixa llargada.

8.2. Memòria flash

La memòria SRAM és l'encarregada d'emmagatzemar les variables i les dades del programa; aquest tipus de memòria de les plaques Arduino és escassa si es compara amb la memòria flash. Un projecte que necessiti emmagatzemar un nombre elevat de variables i dades és probable que esgoti tota la memòria SRAM i no funcioni correctament. En aquests casos, una bona solució és guardar les dades constants a la memòria flash, molt més abundant que la SRAM.

La transcripció de la partitura requereix una gran quantitat de memòria SRAM per emmagatzemar totes les dades resultants. La placa Arduino Pro Mini, utilitzada en aquest projecte, disposa de 2 kB de memòria SRAM, insuficient per emmagatzemar les variables del programa i les dades de la transcripció de la partitura.

En canvi, aquesta placa disposa de 32 kB de memòria flash; aquest tipus de memòria es destina a emmagatzemar el codi del programa. La quantitat de memòria flash que disposa és superior a la requerida per contenir el programa, això implica que la memòria flash restant pot guardar les dades constants de la transcripció de la partitura i deixar la SRAM exclusivament per les variables del programa.

Per emmagatzemar dades constants a la memòria flash cal incloure la llibreria **pgmspace.h** al programa (si aquesta no està inclosa ja per defecte). La paraula clau **PROGMEM**, que forma part d'aquesta llibreria, és un modificador de variables que ordena al compilador posar certa informació a la memòria flash, en comptes de posar-la a la SRAM. Cal tenir present que només funciona amb els tipus de dades definides a la llibreria **pgmspace.h**. La sintaxi per utilitzar la paraula clau **PROGMEM** és la següent:

```
const TipusDada NomVector[] PROGMEM = { };
```

D'aquesta manera, un vector de dades de la transcripció de la partitura resulta:

```
const uint16_t duracio3[] PROGMEM =  
{16,26,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,6,2,1,1,1,1,1,1,2,4,32,32};
```

On el tipus de dada és **uint16_t** (setze bits sense signe) i **duracio3** és el nom del vector.

Un a vegada s'han guardat els vectors de dades a la memòria flash, s'utilitza la funció **PROGMEM_getAnything()** de la llibreria **PROGMEM_readAnything.h** per accedir a qualsevol tipus de dada emmagatzemada a la memòria flash. En aquest projecte hi ha dos procediments diferents que se segueixen en funció de com es vol accedir al vector de dades.

Accedir mitjançant el nom del vector

```
int num_nota1 = PROGMEM_getAnything(p_melodia1[i]+j);
```

En el primer cas, s'accedeix a la informació de la memòria flash mitjançant el nom del vector i la posició que ocupa la dada dins d'aquest vector.

Accedir mitjançant la direcció de memòria del vector

```
int nota1 = PROGMEM_getAnything(&notes[num_nota1]);
```

En el segon cas, s'accedeix a la informació de la memòria flash a partir de l'adreça concreta de memòria que ocupa la dada.

Emmagatzemant les dades constants de la transcripció de la partitura, el microcontrolador disposa de suficient memòria SRAM per guardar les variables del programa i de suficient memòria flash per emmagatzemar el codi del programa i les dades obtingudes a partir de la transcripció.

Conclusions

L'objectiu principal d'aquest projecte ha estat dissenyar, programar i conformar un artefacte que simulés un orgue de tubs d'aspecte fantasmagòric. A efectes pràctics, l'objectiu principal ha estat assolit de forma satisfactòria ja que el prototip presenta un aspecte fantasmagòric i misteriós visual (amb l'estructura negra de disseny tètric i la fluorescència dels tubs d'assaig) i auditivament (amb la reproducció de l'obra Tocata i fuga de Bach). El prototip resultant presenta unes dimensions i un pes adequats per tal de ser emmagatzemat i transportat amb relativa facilitat i també ofereix la possibilitat de ser millorat en un futur amb afegits que li atorguin noves funcionalitats, requisits imprescindibles per satisfer l'objectiu principal.

A nivell personal, la realització del projecte ha suposat aprendre des de zero el funcionament i la programació d'una placa Arduino, així com buscar i utilitzar llibreries existents per dur a terme determinades tasques de manera òptima. També ha suposat adquirir experiència en el disseny de peces mecanitzades amb tall làser o amb broca. A més de tots els conceptes i coneixements teòrics, la realització d'un projecte amb diferents etapes i terminis d'entrega de components completament diferents ha suposat dedicar molta atenció a la planificació i l'organització del temps disponible. Un altre aspecte treballat en aquest projecte ha estat la selecció de components de diferents proveïdors comparant-ne el preu, el termini d'entrega i les característiques.

A partir d'aquest projecte s'obre un ventall de possibles ampliacions i projectes relacionats. Un projecte interessant seria dissenyar un mètode per transcriure de manera automàtica una partitura electrònica (de programes com Finale, Sibelius o MuseScore) a un llistat de notes i duracions per poder ser reproduïdes amb un microcontrolador. Una ampliació podria ser afegir-hi una entrada d'àudio per reproduir una peça musical amb els altaveus i acompanyar-la visualment amb l'encesa i apagada dels LED en funció del ritme, volum i freqüències.

En conclusió, l'esforç i el temps invertit en la realització d'aquest projecte ha suposat un resultat final molt satisfactori i un coneixement adquirit que serà aplicat en futurs projectes lúdics amb microcontroladors.

Agraïments

En primer lloc, vull agrair a la meva família i a la meva parella el suport i l'interès mostrat durant la realització d'aquest projecte. Sobretot pel fet d'aguantar que la taula de la meva habitació estigués plena de cables durant sis mesos.

A més, vull agrair a l'Oriol Boix, director d'aquest projecte, la predisposició i interès mostrat durant la realització del projecte, així com els consells i suggeriments que m'ha anat donant a l'hora d'enfocar i resoldre tots els dubtes i problemes sorgits.

Finalment, també vull agrair al Joaquim de Feo l'ajuda rebuda durant el muntatge i el procés de soldatge del circuit elèctric del prototip.

Bibliografia

1. **WIKIPEDIA.** *Wikipedia - Toccata i fuga en re menor, BWV 565.* Barcelona, 2018. [En línia] [Data: 23 / 11 / 2017] [https://ca.wikipedia.org/wiki/Toccata_i_fuga_en_re_menor,_BWV_565]

Web consultada per obtenir informació sobre l'obra musical Tocata i fuga en re menor de Johann Sebastian Bach.

2. **WIKIPEDIA.** *Wikipedia – Theremin.* Barcelona, 2018. [En línia] [Data: 30 / 03 / 2018] [<https://ca.wikipedia.org/wiki/Theremin>]

Web consultada per obtenir informació sobre l'instrument musical Théremin.

3. **BOIX, ORIOL.** *Tecnologia vestible - Malla LED.* Barcelona, 2001. [En línia] [Data: 30 / 11 / 2017] [<http://recursos.citcea.upc.edu/vestible/sortida/malla.html>]

Web consultada per obtenir informació sobre la connexió en malla per tal de controlar un conjunt de LED.

4. **WIKIPEDIA.** *Wikipedia – Charlieplexing.* Macau, 2018. [En línia] [Data: 30 / 11 / 2017] [<https://en.wikipedia.org/wiki/Charlieplexing>]

Web consultada per obtenir informació sobre la connexió en Charlieplexing per tal de controlar un conjunt de LED.

5. **ARDUINO.** *Arduino – Arduino Pro Mini.* Ashburn, 2005. [En línia] [Data: 24 / 01 / 2018] [<https://store.arduino.cc/arduino-pro-mini>]

Web consultada per obtenir informació sobre les especificacions i connexions de la placa Arduino Pro Mini.

6. ARDUINO. *Arduino – Arduino Micro.* Ashburn, 2005. [En línia] [Data: 24 / 01 / 2018] [<https://store.arduino.cc/arduino-micro>]

Web consultada per obtenir informació sobre les especificacions i connexions de la placa Arduino Micro.

7. ARDUINO. *Arduino – Arduino Nano.* Ashburn, 2005. [En línia] [Data: 24 / 01 / 2018] [<https://store.arduino.cc/arduino-nano>]

Web consultada per obtenir informació sobre les especificacions i connexions de la placa Arduino Nano.

8. WIKIPEDIA. *Wikipedia – Cobre.* Madrid, 2018. [En línia] [Data: 28 / 05 / 2018] [<https://es.wikipedia.org/wiki/Cobre>]

Web consultada per obtenir les propietats físiques i mecàniques del coure.

9. WIKIPEDIA. *Wikipedia - Policloruro de vinilo.* Ciutat de Mèxic, 2018. [En línia] [Data: 28 / 05 / 2018] [https://es.wikipedia.org/wiki/Policloruro_de_vinilo]

Web consultada per obtenir les propietats físiques i mecàniques del PVC.

10. BOIX, ORIOL. *Polsadors i interruptors.* Barcelona, 2001. [En línia] [Data: 30 / 03 / 2018] [<https://recursos.citcea.upc.edu/vestible/entrada/polsador.html>]

Web consultada per obtenir informació de la connexió dels polsadors.

11. BOIX, ORIOL. *Tecnologia vestible – Altaveu.* Barcelona, 2001. [En línia] [Data: 30 / 11 / 2017] [<http://recursos.citcea.upc.edu/vestible/sortida/altaveu.html>]

Web consultada per obtenir informació sobre el circuit electrònic d'un altaveu petit.

12. BOIX, ORIOL. *Programació en ASM del PIC 16F690 amb PICKit 2 – Registre de desplaçament.* Barcelona, 2001. [En línia] [Data: 30 / 11 / 2017] [<https://recursos.citcea.upc.edu/pic16a/perif/registre.html>]

Web consultada per obtenir informació sobre el funcionament i connexió dels registres de desplaçament.

13. WIKIPEDIA. *Wikipedia – Freqüències del piano.* Barcelona, 2018. [En línia] [Data: 11 / 01 / 2018] [https://ca.wikipedia.org/wiki/Freq%C3%BC%C3%A8ncies_del_piano]

Web consultada per obtenir la informació de la freqüència, en hertz, de cada nota musical.

14. ARDUINO. *Arduino - PROGMEM.* Ashburn, 2005. [En línia] [Data: 13 / 03 / 2018] [<https://www.arduino.cc/reference/en/language/variables/utilities/progmem/>]

Web consultada per obtenir informació sobre l'emmagatzematge de dades a la memòria Flash d'un microcontrolador.

15. PROMETEC. *Prometec – Los punteros.* Dallas, 2015. [En línia] [Data: 13 / 03 / 2018] [<https://www.prometec.net/punteros/>]

Web consultada per obtenir informació sobre els punters de C++.

16. FRITZING. *Fritzing - HC-SR04 Project.* Berlín, 2007. [Arxiu HC-S.fzpz] [Data: 23 / 08 / 2018] [<http://fritzing.org/projects/hc-sr04-project>]

L'arxiu HC-S.fzpz s'ha descarregat per poder utilitzar la simulació del sensor d'ultrasons HC-SR04 al programa Fritzing.

17. SPARKFUN. *Sparkfun - Ultrasonic Sensor – HC-SR04.* Denver, 2015. [Arxiu DGCH-RED_datasheet.pdf] [Data: 30 / 03 / 2018] [<https://www.sparkfun.com/products/13959>]

L'arxiu DGCH-RED_datasheet.pdf s'ha descarregat per obtenir informació dels sensors d'ultrasons HC-SR04.

18. VIESLY. *Tapartoche - BWV 565 Toccata y Fuga en Re menor (Piano)*. Roubaix, 2015.
[Arxiu [bwv-565-toccata-y-fuga-en-re-menor-piano-v0.pdf](#)] [Data: 23 / 11 / 2017]
[<http://es.tapartoche.com/Particiones/Titulos/bwv-565-toccata-y-fuga-en-re-menor-piano-v0.php>]

La partitura descarregada és el punt de partida per crear la partitura adaptada que es reprodueix.