



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
de Telecomunicació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE FINAL DE CARRERA

DISSENY I DESENVOLUPAMENT D'UNA
BALISA LLUMINOSA D'ALTA EFICIÈNCIA
ALIMENTADA PER ENERGIA SOLAR

(DESIGN AND DEVELOPMENT OF A HIGH
EFFICIENCY LIGHT BEACON, POWERED BY
SOLAR ENERGY)

Estudis: Enginyeria Electrònica

Autor: Marc Fàbregas Bachs

Director: Jaime Óscar Casas Piedrafita

Any: 2016

Índex

1.Col·laboracions i Agraïments.....	3
2.Resum del Projecte.....	4
3.Introducció.....	6
3.1 Context del projecte.....	6
3.2 Requeriments i especificacions de disseny i producció.....	9
3.3 Estructura de la memòria.....	10
4.Disseny.....	11
4.1 Consideracions d'eficiència energètica.....	11
4.2 Diagrama de blocs.....	11
4.3 Criteris de selecció de components.....	12
4.4 Unitat de control.....	17
4.5 Sistema de càrrega solar.....	19
4.6 Monitor de nivell de llum ambiental.....	23
4.7 Controladora LED.....	25
4.8 Placa de LED.....	25
4.9 Altres aspectes del disseny.....	26
4.10 Firmware.....	29
5.Desenvolupament.....	35
5.1 Hardware.....	35
5.2 Firmware.....	37
6.Resultats, conclusions i futures millores.....	41
7.Apèndix.....	46
7.1 Llista de components (BOM).....	46
7.2 Esquemàtics v2.....	48
7.3 Firmware base: mode nit.....	53
7.4 <i>Firmware base: mode jardí</i>	57
7.5 Gràfiques de consums.....	64
7.6 Disseny mecànic.....	66
8.Referències.....	68

1. Col·laboracions i Agraïments

Primer de tot voldria agrair a tots els que han fet possible el desenvolupament del projecte que queda descrit en aquest document, concretament a Àitor Mejías, que va col·laborar en la PCB realitzada i en algunes de les proves, a Lluís M. Martínez per propiciar que aquest projecte tingués lloc, i al Client que va confiar en mi per portar a cap aquest desenvolupament als inicis de la meva trajectòria com a emprenedor.

En segon lloc, el meu agraïment de nou a l'Òscar Casas per la oportunitat brindada per presentar aquest projecte sota la seva tutela -atípic perquè es presenta com a projecte UPC a pesar d'haver estat inicialment realitzat en el marc d'una empresa, concretament la meva pròpia empresa- i per les revisions i comentaris de la memòria a fi i efecte de millorar-lo, però també per l'esforç realitzat per la seva part perquè el projecte es pogués presentar a temps.

I per últim, com sol ser habitual, el meu agraïment a la meva família, en particular als meus pares per la seva insistència en què realitzés aquesta memòria i acabés del tot la carrera, tasca no trivial quan hom comença la seva pròpia carrera empresarial, i a la meua parella i els meus fills per estar de manera incondicional al meu costat i a l'hora saber renunciar a mi quan he hagut de dedicar més temps del compte a l'empresa, en general, i a aquest projecte i la seva documentació en particular.

2. Resum del Projecte

Català

Quan parlem de balises lluminoses, de les primeres coses que ens venen al cap és una imatge en mig de la foscor i en l'autopista o una carretera secundaria d'un aparell bastant gran, rodó, pesat i alimentat a bateries que ens senyalitza amb intermitència una zona restringida, en obres o perillosa. No obstant, tot i que la majoria d'aquest tipus de balises fan la seva funció, no totes ho fan de manera que la balisa funcioni per sempre sense cap tipus de manteniment.

El projecte presentat respon a una necessitat de mercat de disposar d'un sistema intel·ligent, auto-gestionable i autònom d'una balisa lluminosa que pugui funcionar en ambients a on l'alimentació de la xarxa elèctrica no pot arribar.

El repte que s'ha aconseguit ha estat implementar, sobre un sistema prototip inicial, millores en molts aspectes fins a fer-ho viable des d'un punt de vista tècnic, industrial i de mercat: la implementació d'un sistema de gestió d'energia més intel·ligent, la il·luminació de la balisa amb nous components LED que emeten més potència i un codi optimitzat ha fet que aquest projecte, anomenat internament SisLlum, passi d'una fase inicial de prototip a un producte final.

Així doncs, es presenta un disseny que, tot i que es va desenvolupar en un moment a on algunes tecnologies eren encara emergents en els camps LED i solar (tecnologies que avui en dia són emprades contínuament), encara avui el sistema continua sent innovador, segueix a la venda i és ben capaç de competir vers altres tecnologies més actuals.

Castellà

Cuando hablamos de balizas luminosas, la primera imagen que nos vienen a la cabeza es un equipo pesado, redondo y grande, con una gran batería, colocado en medio de la oscuridad de una autopista o una carretera secundaria, señalizando con una intermitencia de un peligro, unas obras o una zona restringida. Sin embargo, aunque la mayoría de estas balizas realizan su funcionalidad correctamente, pocas de ellas lo hacen de modo que funcionen toda su vida sin ningún tipo de mantenimiento.

El proyecto presentado responde a una necesidad del mercado de este tipos de sistemas inteligentes, auto-gestionables y autónomos de baliza luminosa, para funcionar en lugares donde no hay red eléctrica ni si quiera se encuentra cerca.

El reto que se ha conseguido ha sido implementar, sobre la base de un prototipo inicial, mejoras en muchos aspectos hasta hacerlo viable des de un punto de vista técnico e industrial pero también de mercado: la implementación de un sistema de gestión de la energía más inteligente, la iluminación de la baliza con nuevos componentes LED que emiten más potencia lumínica y un código fuente optimizado, han hecho que esta solución, llamada SisLlum, pase de un a fase inicial de prototipo, a un producto final.

Así pues, se presenta un diseño que, aunque se desarrolló en un momento en el que algunas tecnologías trabajadas eran todavía emergentes en los campos del LED y la energía solar (tecnología muy utilizadas en la actualidad), todavía hoy se mantiene vigente e innovador, y el producto sigue a la venta, compitiendo todavía con productos de tecnología más actual.

Anglès

When we talk about light beacons, the first image that come into our minds are these heavy, rounded and bulky devices, using plumb-based big batteries, placed in the middle of the dark of a highway or road; they point out constructions works, danger or restricted areas using a blinking light. However, although most of them execute their functionality, only few of them do it with an infinite battery life and without requiring maintenance.

The project presented here meets a demand of the market of this kind of smart, self-managed and autonomous light beacons, to be placed where there is no access to the mains electricity.

The challenge that has been achieved consist on the implementation, starting from an initial prototype, improvements in many aspects; the result is now a product feasible from the technical point of view but also from the industrialization and sales. A smarter energy management system, a light part with updated brand new LED components, with more lighting power, and an optimized source code, have been implemented. With this, the final solution, called SisLlum, has passed from an initial prototype phase, to a final product.

Therefore, a new design is presented here; although it was developed in a moment that some of the technologies used in this project were just emergent at that time (now widely used), in the LED and solar energy sectors, at that time, the design is still innovative and applicable, and the final product is still under sales today, still competing with the newest similar products.

3. Introducció

3.1 Context del projecte

El projecte que aquí es documenta comença a desenvolupar-se cap a l'any 2002 fruit d'una idea de producte del Client (del que no revelarem el nom per innecessari e irrellevant i per motius de confidencialitat), en una època en que l'energia solar comença a ser popular però que encara no s'utilitza en gaires aplicacions. La innovació que conté el producte porta al Client a protegir-lo sota la modalitat de disseny industrial.

El Client vol desenvolupar un sistema de abalisament lluminós per a pistes d'esquí però extensible també a d'altres entorns en els quals la disponibilitat d'energia procedent de la xarxa elèctrica és impossible o inviable i que, a més, l'excés és massa complicat com per pensar en un sistema de bateries intercanviables o substituïbles, un cop aquestes estan esgotades.

Per tant, un dels requeriments principals del producte és que ha d'estar alimentat amb una font d'energia autònoma.

Existeixen, però, altres dos requeriments importants pel sistema, sobretot en l'aplicació de les pistes d'esquí:

- el sistema ha de ser de fàcil instal·lació i desmuntatge (pensem que les senyalitzacions de les pistes d'esquí, per motius ecològics, s'han de desmuntar completament (salvant els telecadires i telesquíis), un cop acabada la temporada de neu)
- ha de poder suportar les dures condicions de la neu, no tant per la temperatura com per la habilitat d'aquesta de posar-se suaument i adherir-se a qualsevol superfície que no sigui vertical (i en alguns casos, depenent del material, fins i tot en aquestes) fins a cobrir-la per complet (obstruint, aleshores, el pas de la llum).

Tot això va portar als enginyers industrials del Client a dissenyar el següent sistema basat en una cèl·lula solar:



Il·lustració 1: Disseny industrial

En la part superior del sistema, un caputxó protegeix el sistema d'il·luminació. La forma cilíndrica permet una senzilla instal·lació que no té dependència amb la ubicació. La base disposa d'un suport (de color rosa fluorescent en la il·lustració 1) que permet unir la balisa als pals de suport amb gran facilitat, a pressió; el dispositiu també s'allibera a pressió però, en aquest cas, requerint d'una força considerablement més gran que la necessària per instal·lar-lo.



Il·lustració 2: Exemple d'aplicació del sistema

Les plaques solars fotovoltaïques monocristal·lines o policristal·lines estan realitzades amb cristalls de silici (de majors o menors dimensions, respectivament) i tenen, per tant, la particularitat d'ésser rígides. Al mateix torn, el cos cilíndric del sistema ha d'albergar també el circuit electrònic que controla el funcionament del sistema i les bateries que acumulen l'energia captada per les cèl·lules solars. Tot plegat va fer descartar, com a mínim inicialment, l'ús d'algunes plaques rígides a l'interior del cilindre, formant un hexàgon.

Aleshores el Client subcontracta els serveis d'una consultora especialitzada en processos industrials perquè busqui alternatives, doncs, a la cèl·lula solar monocristal·lina i policristal·lina per a la generació d'energia solar.

I així es va donar pas a la placa fotovoltaica amorfa, que, en no utilitzar el silici cristal·litzat, disposa de la flexibilitat necessària per crear la forma cilíndrica que optimitza la superfície exposada al sol, tal i com es veu en la figura 1.

Però les cèl·lules amorfes també es caracteritzen per la seva baixa eficiència en la conversió d'energia, entesa com a potència màxima generada (P_m) dividida entre la irradiació rebuda (E , en W/m²) en la superfície de la placa (A_c):

$$\eta = \frac{P_m}{E \times A_c}$$

Demostrar que aquesta tecnologia poc eficient ho era prou per l'aplicació a la que va destinada i la utilitat que se'n vol treure va representar un dels primers reptes del projecte, previ al treball que en aquest document s'exposa comentarem que l'esmentada consultora va arribar a resultats positius en quan a que aquestes plaques generen suficient energia per carregar un acumulador com una bateria, imprescindible perquè el sistema pugui funcionar en els moments en què no hi ha il·luminació solar.

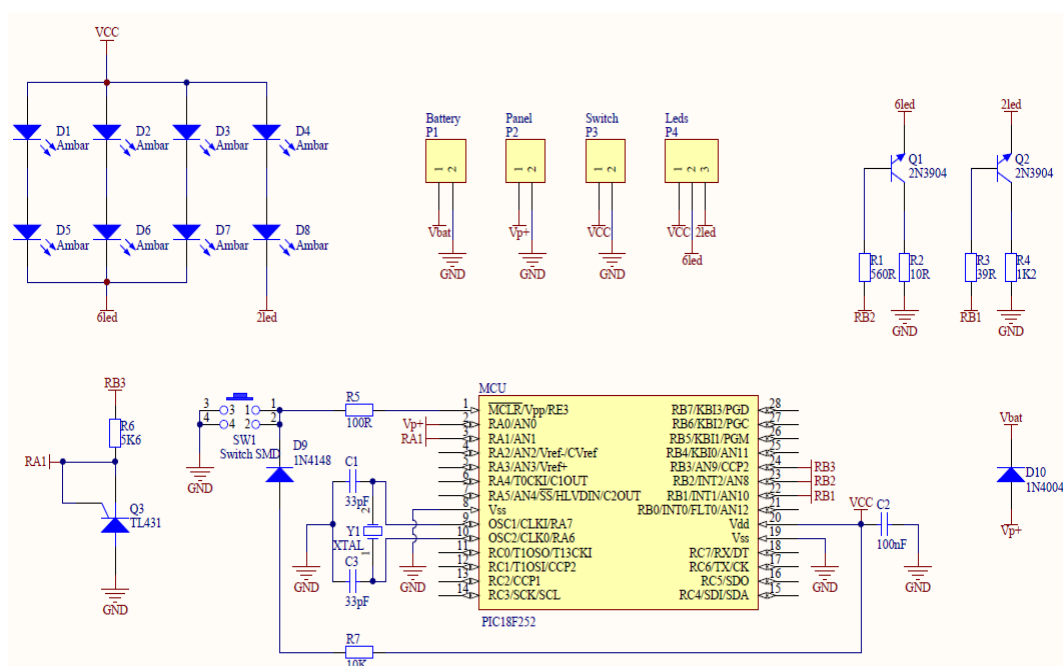
No obstant, apareix el primer compromís pel projecte: malgrat disposar d'un acumulador (que no té més propòsit que mantenir en funcionament el sistema en moments en el que no hi ha llum solar o en aquells dies que el sistema no es pot carregar perquè la nuvolositat impedeix un correcte funcionament de la càrrega), perquè el sistema sigui sostenible, el

consum energètic mig d'aquest ha de ser igual a la generació energètica mitja i, aquesta, amb cèl·lules amorfes, és realment pobre.

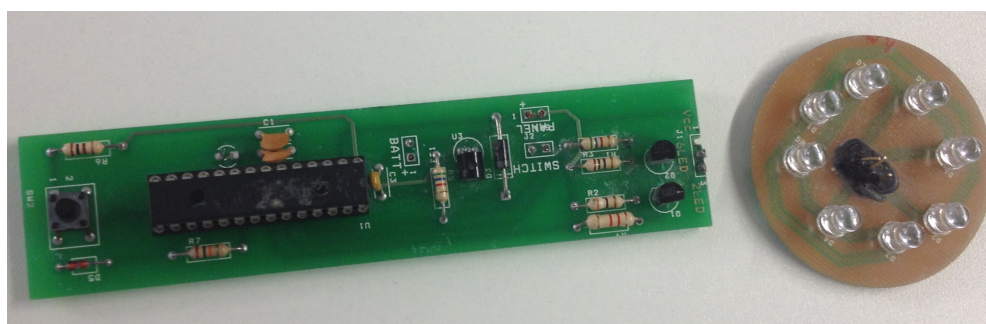
Es feia necessari dissenyar un aparell amb un consum extremament baix i una eficiència màxima perquè tots els W consumits possibles es converteixin de manera efectiva en llum de la balisa.

I un petit grup del departament d'Electrònica de la UPC s'encarrega de desenvolupar un primer prototip que certifiqui el que els estudis de la consultora demostressin la viabilitat tècnica del producte. I ho fa amb èxit: es desenvolupa un prototip en tecnologia convencional basat en un microprocessador que gestiona el funcionament del sistema mentre que un senzill sistema de càrrega basat en un díode impedeix que la cèl·lula solar consumeixi energia de la bateria quan aquesta no està irradiada per la llum solar.

En les següent figures podeu veure l'esquema electrònic i la una imatge del prototip realitzat per la UPC en aquesta primera fase del projecte:



Il·lustració 3: Esquemàtic Sisllum v1



Il·lustració 4: Imatge del Sisllum v1

En aquesta fase del projecte, internament coneguda com a Sisllum versió 1 del producte, es realitzen diverses proves a l'estació d'esquí de Baqueira-Beret, a la Vall d'Aran, per la

que es produeix una petita sèrie d'un parell de dotzenes d'unitats que es cedeixen temporalment a l'estació a canvi d'un cert *feedback* del producte. El prototips es munten manualment, com s'observa en l'anterior fotografia, però resulten una primera molt bona aproximació a projecte.

Les proves afluïren resultats positius, com a mínim fins a garantir la viabilitat tècnica del projecte, i les primeres impressions del client resulta ser molt positives (sobretot en quant a utilitat i robustesa de la solució proposada), fins al punt de comprometre's en les primeres compres del producte. I d'aquesta manera s'entra en una nova fase en la que l'objectiu passa a ser realitzar totes aquelles modificacions o afegits a l'equip necessaris per convertir-lo en un equip de mercat.

I és en aquest punt on tant la consultora tecnològica que havia desenvolupat la idea inicial com l'equip universitari que s'havia encarregat de fer els primers demostradors de la tecnologia, es desmarquen del projecte que cau en mans de l'enginyeria Advancare, SL, en un petit grup de treball encapçalat per qui escriu aquestes línies que treballarà juntament amb un tècnic electrònic per portar a cap els següents passos d'aquest disseny, la versió 2 del producte, passos que s'expliquen en detall en els successius següents capítols.

3.2 Requeriments i especificacions de disseny i producció

El projecte arriba a les nostres mans amb uns requeriments mínims força clars, que llistem a continuació:

1. Es tracta d'un sistema que ha d'anar alimentat amb una cèl·lula solar amorfa, per poder doblegar-se fins a adquirir la forma cilíndrica que el Client ha dissenyat i protegit (sota una patent de Disseny Industrial), forma que es pot veure en la il·lustració 7.
2. La cèl·lula solar escollida en els fases prèvies del projecte té unes dimensions 15mm x 12mm, i es deixa la possibilitat de trobar una altra amb major rendiment.
3. L'autonomia desitjada pel sistema és infinita, és a dir, que consumeixi tanta energia com és capaç de generar amb l'esmentada cèl·lula solar. Evidentment, però, això topa amb una limitació de les bateries, acumuladors necessàries per els períodes amb poca càrrega solar, ja que aquestes tenen una vida finita pel que fa al número de càrregues. S'empraran, doncs, bateries que tinguin el màxim nombre de càrregues possibles.
4. El sistema ha de ser totalment estanc, capaç de suportar l'aigua dolça i la salada (es plantegen des d'un principi aplicacions nàutiques), amb una IP^[1], per tant, mínim de 57 (és a dir, certa protecció a l'entrada de pols i submergible fins a 1 metre de profunditat).
5. El rang de temperatures de funcionament ha de ser extens, suportant la neu de fins a -25°C i la calor solar intensa (80°C). No és veu necessari que sigui ignífug (per l'increment en cost que això suposaria) ni que suporti les temperatures del foc i les flames (què fàcilment es troben per sobre els 300°C, fins i tot en focs petits).
6. La col·locació natural de l'equip és en vertical pel que la llum haurà de ser visible des d'una orientació ortogonal a l'eix de l'esmentat cilindre que mecànicament conformarà el sistema, amb una visibilitat de 360° respecte l'eix visible.
7. Ha d'anar instal·lat dins del disseny mecànic industrial registrat com a model d'utilitat pel client (veure annex 7.6) i ha de funcionar instal·lat amb qualsevol orientació

respecte l'eix vertical, de la mateixa manera que il·luminarà en qualsevol direcció respecte aquest eix.

8. La visibilitat mínima de la llum de balisa en situació de boira s'estableix en uns 30 metres i, en condicions normals, de 100 metres.
9. El sistema ha de poder apagar-se totalment quan no es fa servir per tal d'allargar-ne l'autonomia però la activació/desactivació d'aquest s'ha de poder fer amb facilitat. Com a escenari d'exemple, suposem que els llums estan col·locats al llarg d'una pista d'esquí i que un "pister" (encarregats del manteniment i la seguretat en una pista d'esquí) ha de poder activar-los/desactivar-los amb relativa facilitat baixant amb esquís per la pista.
10. La cadència de la llum establerta en les primeres proves del sistema és de un centelleig, d'entre 30 i 60 mil·lisegons de durada, cada segon.
11. La llum, sense entrar en detall de la longitud d'ona exacte que ha de tenir, ha d'estar entre els colors vermell i ambre, valorant-se positivament la possibilitat d'emprar altres colors que permetin utilitzar el sistema en d'altres entorns i aplicacions com ara:
 - Llum de jardí, tènue llum blanca.
 - Senyalització en vaixells o en sistemes d'aparcament , vermella i verda.
 - En aplicacions decoratives s'utilitza molt el color blau.
12. Per últim, el preu de cost de la part electrònica del sistema i en fabricació a gran escala ha d'estar per sota el 30€ (impostos no inclosos).

3.3 Estructura de la memòria

Després de posar en context el projecte, amb la motivació, l'origen i els requeriments inicials del projecte, en el següent capítol, es presenta el disseny ideat per resoldre les problemàtiques presentades pel Client. En aquesta explicació s'anirà passant pels diferents aspectes clau del disseny, en particular i especialment els temes relacionats amb la eficiència energètica, que son el fil conductor de tot el disseny realitzat.

A continuació es descriurà detalladament la implementació realitzada, separant clarament entre el desenvolupament de hardware y el del software encastat que corre dins d'aquest hardware basat en microcontrolador.

Finalment es presentaran els resultats de les proves fet als equips finals, extraient les conclusions pertinents i validant l'acompliment, o no, de tots els requeriments inicials plantejats pel Client.

Es deixen pels Annexes tots el programari detallat i els esquemàtics del disseny de maquinari, així com els dissenys mecànics i resultats que no s'han volgut introduir en el cos de la memòria principal per tal de no estendre-la en excés.

4. Disseny

4.1 Consideracions d'eficiència energètica

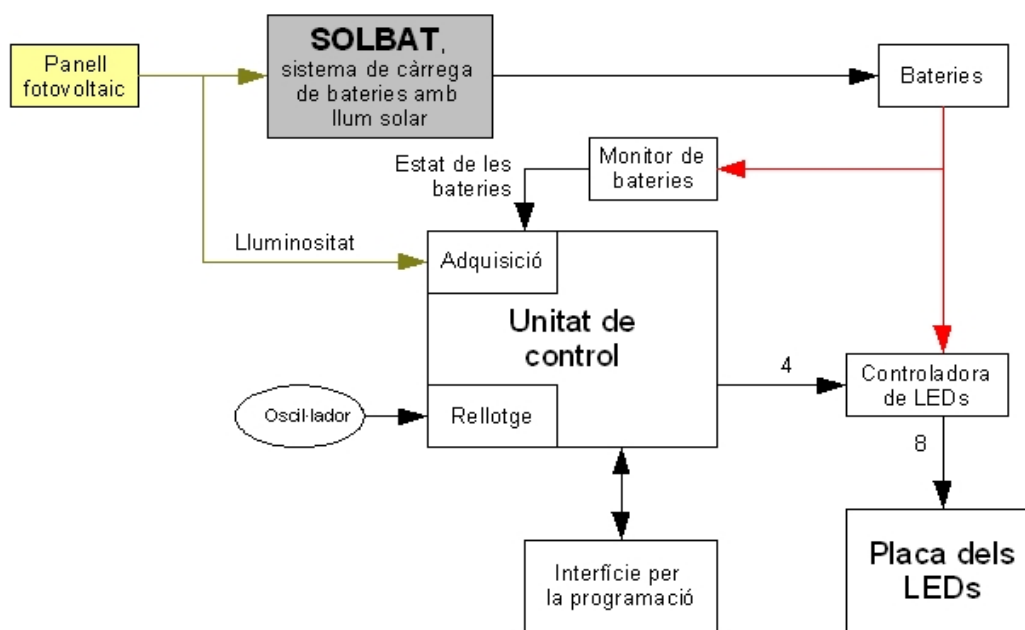
Tractant-se d'un sistema alimentat amb cèl·lules fotovoltaïques, és evident que l'eficiència energètica és un tema clau i un requeriment prioritari per aquest. Així, el criteri energètic regeix quasi totes les decisions tècniques que s'han pres al llarg del desenvolupament però sobretot:

- Els LEDs emprats han d'oferir una eficiència màxima, entesa eficiència com potència lluminosa generada respecte a la potència elèctrica consumida, estan dins un rang de potència baix.
 - Cal propiciar el fer treballar en LED^[2] en marges en els que la pèrdua d'energia en forma de calor és mínima.
 - El microcontrolador emprat per realitzar el control i la funcionalitat del sistema ha de tenir obligatòriament modes de baix consum, del menor consum possible.
 - El programari ha de treure partit d'aquests modes, implementant la funcionalitat esperada entrant durant el major temps possible en baix consum.
 - S'evita l'ús de reguladors de voltatge o convertidors que poden tenir eficiències menors al 95%.
1. Capítol especial, però, trobem en el cas del carregador de les bateries, responsable d'extreure l'energia captada pel sol i emmagatzemar-la temporalment en les bateries, per acabar-la convertint en llum de nou a través dels LEDs, en el que resumeix el cicle energètic que el SisLlum pretén optimitzar. En aquest sentit, el carregador s'ha realitzat seguint un model MPPT^[3], Seguiment del Punt de Màxima Potència, però sense emprar una solució ja existent en el mercat ja que no existia cap solució ja adaptada als requeriments en el moment en què es va desenvolupar el projecte.
- Finalment, el sistema ha de disposar d'un interruptor extern de fàcil accés per aquell tipus d'aplicacions en les que l'equip es pot apagar per reduir al màxim el consum. És necessari, però, que en aquest casos el sistema de càrrega solar no s'aturi mai de manera que fins i tot amb l'equip apagat les bateries es segueixin carregant o mantenint a la càrrega màxima quan disposi de llum solar.

4.2 Diagrama de blocs

El diagrama de blocs del sistema es el següent:

Esquema del sistema SISLLUM V2



Il·lustració 5: Diagrama de blocs del sistema SisLlum, versió 2

On destaca clarament el sistema de càrrega de bateries solar que es detallarà més en els posterior apartat específic per aquest subsistema.

En el següents apartats, es detallaran un per un els diversos components hardware d'aquest sistema aproximadament com apareixen en aquest diagrama, cobrint així completament els aspectes de disseny del nou SisLlum.

Pel què fa al panell, o cèl·lula, fotovoltaic tot i que es podria considerar un component extern al SisLlum, com ho son també les bateries (que es detallen en el subsistema de càrrega) o la camisa, caixa o cos del SisLlum, es considera prou important com per disposar d'un tractament específic dins del disseny del sistema.

4.3 Criteris de selecció de components

La selecció d'alguns dels components claus va ser determinant en el resultat final del disseny pel qual s'ha cregut convenient detallar quins criteris s'han fet servir a l'hora de selecció d'aquests abans de descriure com s'han integrat en el sistema.

Selecció placa solar amorfa

Una de les primeres decisions tècniques i probablement de les més, sinó la que més, rellevant i clau, que es deriva directament dels requeriments tècnics del projecte i que, al seu torn, està molt relacionat, encara que no com a requeriment, recau amb l'eficiència energètica del sistema que es tractava en el capítol anterior, és la elecció de les cèl·lules fotovoltaïques que es faran servir per fer autònom l'equip, carregant les bateries i exercint, a l'hora, la funcionalitat de sensor de lluminositat, per tal de detectar els esdeveniments de posta i sortida del sol, disparadors de l'encesa i l'apagada, respectivament, de l'equip en determinats modes de funcionament, com el mode nit.

Concretament, el requeriment tècnic que ens limita en aquest sentit és el que es deriva al seu torn del fet que la il·luminació sigui omnidireccional en l'eix ortogonal a la col·locació de l'equip, és a dir, que es pugui veure des de qualsevol angle respecte l'equip.

Això significa bàsicament que l'equip es pot instal·lar de manera molt senzilla, sense donar gaire importància a la orientació, i ha de seguir funcionant igualment. L'objectiu d'això és indubtablement l'abaratiment dels costos d'instal·lació, que tan d'impacte poden tenir en aquest producte pel que es buscava un cost unitari baix. De fet, el disseny mecànic, cilíndric i vertical, ja dona a entendre aquest requeriment.

Davant d'això, apareix un clar desavantatge respecte altres sistemes similars en quant a l'alimentació solar, ja que en no poder orientar els panells solars fotovoltaics, la irradiació solar mai cobrirà el 100% de la superfície del/s panell/s del sistema i el rendiment en aquest sentit serà baix. Com que la autonomia desitjada del sistema és infinita, això obliga a que el consum energètic, que serà igual a l'energia solar generada, també serà baix, molt baix.

Després d'una dissertació inicial i per motius principalment de preu i pel fet que el model d'utilitat registrat pel client inclou la placa solar amorfa, es decideix mantenir aquesta com a estàndard.

Amb això, es tria el model MPT6-150 amb les següents característiques principals:

- Voltatge nominal: 6V
- Potència: 0,6W
- Corrent nominal: 100mA
- Tensió màxima, en circuit obert: 8V
- Corrent màxima, en curt-circuit: 130mA
- Potència tipus a ple sol: 110mA @ 6V
- Ample: 146 mm (5,75")
- Llarg: 114 mm (4,49")
- Pes: 4,6gr
- Gruix: 0,22mm



Il·lustració 6: Panell o cèl·lula solar amorfa del SisLlum

Entre les característiques principals del panell destaca la potència de 0,6W que determinarà, segons el comentat en l'apartat 4.4 el consum de l'equip, que haurà de ser en mitja lleugerament inferior a la meitat d'aquesta potència. També cal destacar la corrent típica de sortida, que determinarà la corrent amb què es carregaran les bateries del SisLlum, paràmetre determinant en la vida de les bateries, com s'analitzarà en capítols posteriors. Finalment, la tensió nominal del sistema determina les característiques del carregador de bateria així com, de retruc, la tensió màxima de les bateries i, per tant, d'alimentació del sistema, tal i com es detalla en el següent apartat.

Bateries

Donades les característiques del panell fotovoltaic, que dona nominalment una tensió de 6V, amb un màxim de 8V, el més adequat resulta ser utilitzar una bateria amb una tensió d'entre 4,8 i 6V que no pugui ser danyada en cas d'aplicar tensions de fins a 8V, tot i que finalment, com es veurà en el disseny del sistema de càrrega, es limitarà la tensió per evitar la degradació de les bateries i els riscos per sobre-tensió.

Per motius de preu s'escolleix el níquel metal-hidrur (NiMH) com a tecnologia per les bateries perquè en el moment en què es va dissenyar els sistema era la més emprada més econòmica: el níquel-cadmi estava en desús per la baixa eficiència, els derivats del plom també però per contaminants i els derivats del Liti resultaven en aquell aleshores massa cars i no s'empraven de forma massiva en aparells autònoms com els telèfons mòbils, cosa que si que passa actualment i que n'ha fet baixar enormement el cost.

En concret, s'encarregaran a diversos fabricants la realització de empaquetats de cel·les de tipus AA, molt comuns, disponibles i econòmiques, amb 4 cel·les per paquet: recordem que cada cel·la té un valor nominal de 1,2V, arribant fins els 1,5V a plena càrrega.

Ja la versió 1 del sistema funcionava amb aquesta tecnologia però fent servir un porta-piles comercial per piles AA, de 4 piles en serie, emprant bateries de NiMH de 2100mAh.

Per la versió 2 ja des d'un inici es treballa amb bateries de 2300mAh de capacitat, que més endavant en el projecte s'incrementen fins els 2800mAh gràcies a la millora de la tecnologia. El paquet de bateries queda perfectament encabit en els sistema, entre el cos i la placa mare del sistema i, fins i tot podria quedar espai per un segon paquet que duplica la capacitat si fos necessari, encara que a les hores el muntatge quedaria certament complicat.



Il·lustració 7: Sisllum v2

En l'apartat 4.9 d'aquest mateix capítol es detalla l'estudi de consums del SisLlum que es relaciona també amb aquestes característiques de les bateries.

Val a notar que d'aquest paquets es van provar diversos fabricants, la majoria d'ells originaris d'Àsia, principalment la Xina i Japó, i diverses qualitats, observant-se clares diferències entre les bateries de més baix cost i les més cares, sobretot en quan a la vida útil de les bateries quan eren sotmeses a les micro-càrregues típiques d'uns sistema alimentat amb energia solar. Finalment i a pesar de posar en compromís el cost del

producte, es va optar per emprar les bateries de més qualitat (de fabricants com Panasonic o Sanyo) perquè eren les úniques que donaven la qualitat final al producte que el client, i el mercat, podien acceptar.

Dispositius LED

Potser caldria començar aquest apartat determinant perquè es va optar per fer servir dispositius LED (*Light Emitting Diodes* o díodes d'emissió de llum) en comptes d'altres tecnologies de generació de llum.

Però la realitat és que son tants els motius i els avantatges que suposa aquesta tecnologia, que es feia bastant difícil pensar amb una altra opció en aquest sentit. Entre els motius a favor del LED trobem:

- Llum freda: freda en el sentit que l'escalfament que tenen els punts de llum és relativament baix en comparació amb d'altres tecnologies per la mateixa potència de llum emesa i, tan mateix, hi ha disponibles fonts de llum de baixa potència (i baix consum) en les que la seva dissipació de calor es negligible. El fet que la font de llum provoqui un escalfament baix és cabdal degut a que la camisa del SisLlum és de plàstic i totalment estanca pel què pots dissipar poc la calor originada internament i el plàstic es pot degradar si aquesta era massa gran.
- La vida útil: els dispositius SisLlum estan dissenyats per ésser instal·lats sovint en llocs molt remots i de difícil accés, fent-ne inviable o molt costos el manteniment. És per això que la llarga vida útil del LED també resultava un avantatge a l'hora d'evitar-ne el recanvi i reduir les averies. A més, el LED permet la col·locació de diferents punts de llum en una superfície petita, fet observable en els semàfor LED que s'utilitzen actualment arreu; d'aquesta manera el sistema també es fa més robust perquè en cas que un LED tingui una mor sobtada, abans del seu temps de vida mig, el SisLlum segueix essent útil gràcies als altres LED disponibles (8 en total en el SisLlum, com es veurà a posterior en el disseny de la placa de LED).








Il·lustració 8: Semàfor LED que manté la seva funcionalitat a pesar d'haver perdut alguns punts de llum

- Directivitat: de la llum. Atès que el sistema SisLlum només ha de il·luminar, o ser visible, des de un determinat angle de visió, no té cap sentit il·luminar en totes direccions. Tot i que les primeres versions del SisLlum, inclosa la versió 2 que aquí es documenta, inclouen un caputxó difusor que dispersa la llum més o menys en totes direccions, ja es preveia en aquell moment que la llum es dirigís cap a determinades direccions i, en aquest sentit, la tecnologia LED, que ja no és de *per se* omnidireccional, es clarament una opció favorable, sobretot en aquells LED que

porten inclosa la òptica, de manera que amb una col·locació adequada estalviaríem d'haver d'implementar dita òptica en el caputxó del SisLlum, el qual el faria molt més costós.

- Eficiència energètica: en part pel fet que sigui una llum amb poca dissipació de calor, en part també pel fet que la radiació de llum té certa directivitat, l'eficiència energètica del LED entesa com les candeles de llum generades en la direcció de visualització per cada W de potencia consumit, es realment alta en aquesta tecnologia. Cal recordar les candeles (cd) és una unitat de intensitat lluminosa.
- Dimensions: les petites dimensions de les unions PN que permeten al díodes LED emetre llum, fotons, fan que amb molt poca superfície s'emeti gran quantitat de llum, sobretot si ho comparem amb tecnologies d'incandescència. D'aquesta manera, amb el poc espai disponible es poden col·locar més punts de llum que amb d'altres tecnologies.
- Colors: els LED disponibles en aquell moment al mercat ja permetien cobrir tot l'espectre de llum i, fins i tot, a pesar que no es va explorar al llarg del projecte, existia la possibilitat d'implementar la solució amb LED RGB^[4] que hagués permès crear qualsevol color amb un mateix aparell. Si bé en el moment de la realització del projecte els LED blau i, per extensió, els RGB, encara eren força costos en relació als colors més madurs com el vermell o el verd, en general, el fet d'emprar LED ens permet implementar de manera senzilla SisLlums de diferents colors, fet que tindrà lloc amb els diferents modes que es desenvoluparan. Al final, però, els més emprats van ser el vermell i l'ambre, tot i que també es van arribar a treballar el verd i el blanc.
- Cost: probablement l'avantatge principal dels LED, ja en aquell moment del projecte i probablement ara encara seria més accentuat degut a l'abaratiment per l'ús massiu que se'n fa, era el cost d'aquest component, especialment si s'utilitzen models que son d'ampli ús. Com es veurà en l'anàlisi de costos de l'equip, més endavant en aquest document, es van emprar 8 LED a un cost de 0,31€ cadascun, 2,48€ en total que, tractant-se d'un dels elements clau del sistema, té un impacte molt baix en el cost global de l'equip.

Després de parlar amb diversos proveïdors d'aquesta tecnologia, les opcions que més o menys teníem disponibles es resumeixen en la següent taula:

LED Type	Photo	Wavelength [nm]	Light color	Lens color	Voltage [V]	Current [mA]	Luminosity [mcd]	View angle [°]	Temp.range [°C]	Price [€/each]
Standard LED lamp		700	Red	White clear	2,1	20	14	20	-25 to +85	0,21
		660	Superbright red		1,9		1100	10		
		572	Yellow green		2,1		220	20		
		589	Yellow		2,1		130	15		
		630	Orange		3,2		160	10		
		470	Blue		3,2		1800	15		
			White		3,2		11000	10		
Chip LED (SMD)		645	Ultrabright red	White clear	2,1	20	60	140	-30 to +80	0,36
		523	True green		3,5		105			
		593	Yellow		2,1		60			
		640	Orange		2,1		6			
		610	Amber		3,5		90	140		
		468	Blue		3,5		50	130		
			White		3,2		50	130		
					3,2		20	600		
Super flux		642	Ultrabright red	White clear	2,2	20	1500	60	-25 to +85	0,25
		520	Green		3,2		1400			
		589	Yellow		1,9		1500			
		610	Amber		1,9		1300	25		
		620	Reddish orange		3,2		1500	60		
		465	Blue		3,2		600	60		
			White		3,2		3500	50		
Dicroic lamp		642	Ultrabright red	White clear	12	80	4000	20	-25 to +50	4,53
Power LED		625	Red	White clear	2,2	350	6600	120	-30 to +110	2,25
		590	Yellow		3,8		8300			
		525	Green		3,8		2300			
		465	Blue		3,5		10000			
			White		3,5		10000			5,40

Taula 1: Tecnologies LED disponibles

Descartada la làmpada dicroica pel seu cost, les dimensions i l'excessiva directivitat i les LED chip per la seva baixa lluminositat que obligaria a posar desenes d'aquests per tenir quelcom visible a les distàncies requerides, les opcions ja quedaven més reduïdes.

Es va analitzar aleshores les possibilitats dels LED de potencia però es va topa amb el problema de la dissipació del calor, que podia portar problemes com ja s'ha comentat anteriorment. A més, en aquell aleshores, eren relativament voluminosos i poc potents comparat amb com ho són actualment, i el cost per candela encara era elevat: l'únic avantatge que presentaven era que arribaven a potències lluminoses que cap altra tecnologia arribava, tot i que no era tan necessari en aquest projecte en el que, insistim, el baix consum continuava essent clau.

L'elecció final, doncs, quedava reduïda a els LED estàndard, amb els que s'havien fet els prototips versió 1 del SisLlum, o als Superflux. A la vista de les especificacions, clarament els Superflux, que en aquell aleshores era la tecnologia emergent i es començava a utilitzar en indústries com l'automoció, precisament per implementar dispositius de senyalització, mostra per tant de la seva maduresa tecnològica, era la opció a escollir i la que es va fer servir finalment per substituir el LED convencional de la versió 1.

4.4 Unitat de control

Tota la funcionalitat del sistema SisLlum és exercida per unitat de control, basada principalment en un microprocessador i els perifèrics necessaris perquè aquest funcioni.

Microprocessador

La versió 1 del sistema de la qual es partia, utilitzava un microcontrolador de la família PIC18 del fabricant nord-americà Microchip^[5], concretament el PIC18LF252^[6], un microcontrolador de 8-bits amb força capacitats i, en el cas de la versió LF, de baix consum. El codi existent fins aleshores estava realitzat amb C, amb un sol programa per ser compilat amb el compilador de C de Microchip. El cost unitari del microcontrolador era de 7,17€ per la versió DIP^[7] (codi -SP). La programació es feia externament de manera que el microcontrolador s'inseria en el circuit a través d'un sòcol DIP que encara encaria una mica més el cost del conjunt.

El primer canvi que es va fer va afectar principalment a la família emprada, passant del PIC18, una família àmpliament utilitzada i popular però un tant obsoleta, a la família PIC16F, concretament el PIC16F689^[8], de prestacions pràcticament idèntiques al PIC18 utilitzat en la versió 1, però en qualsevol cas suficients per l'ús requerit i un cost molt més baix, 1,77€.

En concret, les característiques principals d'aquest nou microcontrolador seleccionat son:

- 7kB de memòria de programa reprogramable de tipus Flash; el programa de les versions prèvies no passava de 1kB
- Velocitat del microprocessador de fins a 5 MIPS
- 256 bytes de memòria volàtil RAM
- 256 bytes de memòria no volàtil EEPROM
- Busos de comunicació digital: 1 x UART, 1 x A/E/USART (bus sèrie, síncron o asíncron, millorat, compatible amb bus LIN), 1 x SSP(per implementar busos SPI o I²C™)
- Comptadors interns (timers): 1 x 8-bit, 1 x 16-bit. El de 8-bits, a més, pot tenir un consum molt baix i sincronitzable externament.
- Fins a 12 canals ADC amb una resolució de 10-bit
- 2 comparadors integrats
- Rang de temperatura: de -40°C a 125°C
- Voltatge d'alimentació: de 2 a 5,5V
- Encapsulat en 20 pins
- WDT integrat amb capacitats esteses respecte famílies precedents
- Suport de programació a través de l'eina MPLAB® ICD 2, amb possibilitat de debug a través d'un adaptador opcional (només per encapsulats DIP)
- Oscil·lador intern de precisió, configurable per software, amb opció de 8 MHz i de 32 KHz
- Tecnologia de molt baix consum nanoWatt de Microchip
- Sistema BOR seleccionable per software

A més de les millores que afegia al sistema el emprar un microcontrolador més actualitzat, sobretot en la relació prestacions/preu, en el baix consum de l'equip i en el temps de vida (i el suport del fabricant) d'aquest component en concret, també es va optar per canviar a un encapsulat SOIC-20^[9], que a més de reduir-ne encara més el cost, també en redueix l'espai ocupat en l'equip, permetent posar més components en la placa, o reduir les dimensions, i per tant el cost, de la placa, o encabir més bateries en el cos del SisLlum.

Rellotge/oscil·lador

A tractar-se d'un equip que genera cadències lluminoses amb períodes múltiples de segons de rellotge, que no requereix resolucions de temps inferiors al mili-segon i que requereix el mínim consum possible, la millor opció en quant al rellotge és sense cap mena de dubte i com ja venia essent en la versió 1 l'ús d'un cristall de 32,768kHz de precisió.

Així, a pesar de que el microcontrolador permeti treballar fins a 8MHz, consumirà molt menys si utilitzem un rellotge molt més lent i si fem servir tots els temporitzadors interns amb aquest, podent utilitzar la prestació del PIC16F seleccionat de fer servir un comptador intern de ultra baix consum energètic.

Malgrat que el microcontrolador porta també de fàbrica un rellotge intern de 32kHz de precisió, aquest presenta força derives en funció de la temperatura i tractant-se d'un equip d'intempèrie que, a més, té força casos d'ús en entorns de temperatura extrema com ara les pistes d'esquí, es decideix mantenir un cristall oscil·lador extern de precisió i menys derives que doni més garanties en aquests casos.

Interfície de programació

En la versió 1 del sistema, com s'ha esmentat, la programació era totalment externa a l'equip, utilitzant un programador DIP extern que obligava a treure i reposar el microcontrolador PIC18 en el seu sòcol cada cop que s'havia de re-programar.

Degut a que un mateix hardware podia de manera factible, segons preveia el client, tenir diferents usos, simplement canviant el firmware, es decideix dota a la placa base del SisLlum d'un connector RJ11 que connecta directament amb el sistema de programació MPLAB® ICD 2 de Microchip per poder re-programar ràpidament els equips en les fases de pilot però també en producció. Aquest connector simplement exposa els pins del microcontrolador que gestionen el bus ICSP, el qual permet només amb 2 senyals (una de rellotge i una de dades), el reset del micro, i l'alimentació i massa del mateix, programar/esborrar/comprovar per sèrie un firmware.

A pesar que el client també desitjava una interfície de programació que permetés programar l'equip (o si més no configurar-lo) sense haver d'obrir l'aparell ni afectar a l'estaqueïtat, aquesta opció es descarta finalment per la versió 2 de l'equip i es deixa com a futura millora perquè els costos de desenvolupament i els costos unitaris que suposa no apliquen al moment actual del projecte i el producte.

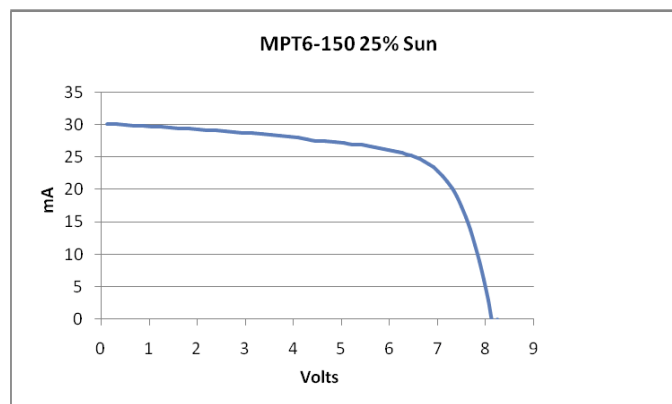
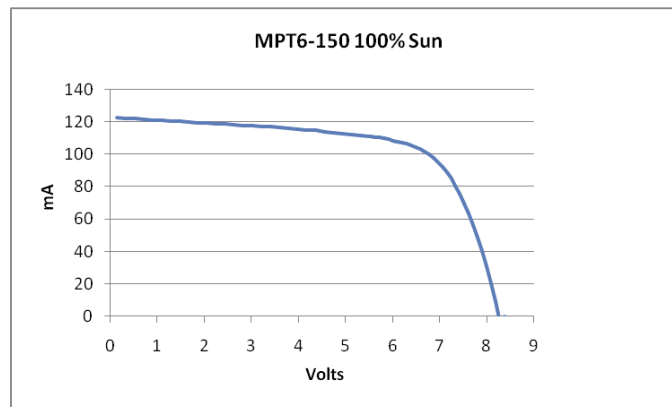
4.5 Sistema de càrrega solar

El sistema de càrrega solar és, per extensió de la importància que té en aquest sistema la placa solar, una de les parts clau del sistema i, tan mateix, la part que va requerir més dedicació en el disseny, desenvolupament i les posteriors proves fins a ajustar tot el sistema correctament.

Els precedents

També és una de les parts que més es va canviar respecte el disseny inicial de la versió 1 que, simplement, connectava bateries i placa solar directament a través d'un díode estàndard (concretament el més que clàssic 1N4148) que evitava la descàrrega de la bateria sobre la placa quan aquesta estava a una tensió per sota la de la bateria.

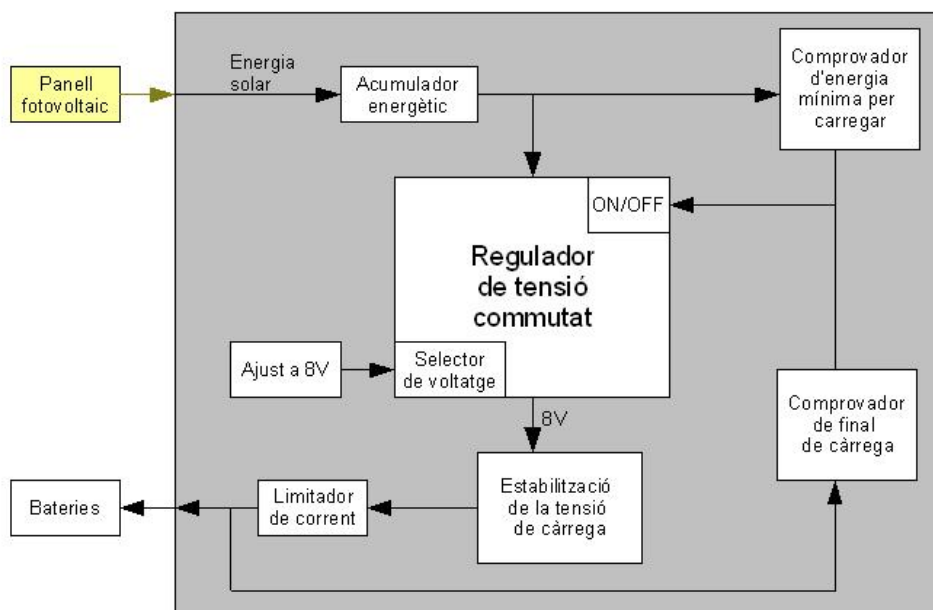
Això significa que la bateria es carregava només quan la tensió a la placa solar era 0,7V per sobre del nivell de bateria, cosa que experimentalment s'observava que només passava en les situacions de sol directe perquè la demanda de corrent de la bateria sempre és la màxima (I_{SC} , corrent de curt circuit). Però si observem les gràfiques que proporciona el fabricant de la placa, veiem que hi ha molta potència disponible en les plaques que no s'aprofitava d'aquesta manera.



Il·lustració 9: Corbes de potència de la cèl·lula solar amorfa MPT6-150

Per aquest motiu es va optar per re-dissenyar tota aquesta part del sistema amb un nou controlador de la càrrega de les bateries amb el següent diagrama de blocs:

ESQUEMA DEL SISTEMA SOLBAI



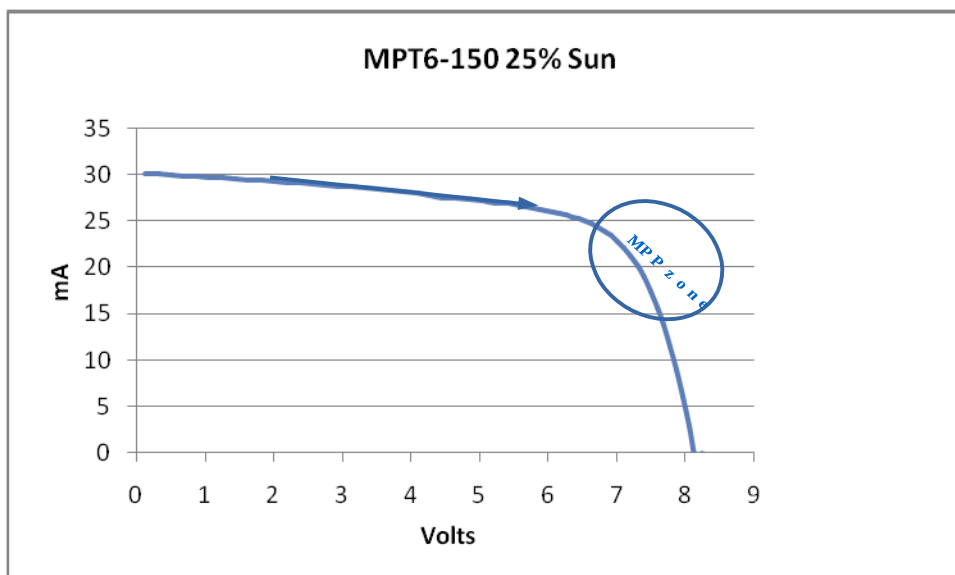
Il·lustració 10: Diagrama de blocs del sistema de càrrega solar

En aquest nou esquema destaquen especialment el regulador de tensió commutat i els subsistemes que controlen l'inici i el final de càrrega. Ambdós juntament amb la resta del sistema de càrrega s'explicarà i es raonarà més detalladament en els següents apartats.

Sistema de càrrega de bateries

Per la càrrega de bateries es van analitzar diverses fórmules fent benchmarking amb solucions existents i, finalment, després de consultar diverses notes d'aplicació (inserir referències) es decideix implementar un sistema de càrrega basat en el punt de transferència màxima de potència (MPPT⁽³⁾), que en essència, el que intenta fer es treballar en qualsevol situació de radiació solar en els punts on la potència és màxima, que coincideix en les gràfiques de l'apartat anterior on la corba de corrent-tensió (I-V) té més angle de gir.

Aquesta tècnica, àmpliament utilitzada en sistemes fotovoltaics de gran potència, principalment emprant inversors que incorporen ja aquesta tecnologia, té diferents maneres d'implementació. En el cas del SisLlum la idea que vàrem aplicar es basà en un regulador commutat de ampli rang d'entrada que portava la tensió de la placa solar fotovoltaica sempre al punt MPP, sobre els 7-8V, extraient-ne el màxim de potència per generar encara que fos una mínim corrent que permetés carregar les bateries.



Il·lustració 11: Translació del punt de potència a la zona MPP de la corba que efectua el sistema de càrrega, per una radiació solar del 25%

Comprovador d'energia mínima

El funcionament del regulador commutat fa que comenci a funcionar a partir de la tensió mínima d'aquest, que en el cas de l'element seleccionat, el LM2623^[10], també en format SOIC (codi -MM), de National Semiconductors, era de 0,8V. No obstant, en aquest punt, la placa fotovoltaica realment disposa de molt poca energia pel qual no interessa que el sistema arranqui perquè s'amorranà segur.

Per això es va dissenyar en paral·lel un circuit d'activació, i desactivació, del regulador basat en un comparador, el MAX931^[11] de Maxim, sobre la tensió a l'entrada del sistema. Quan la tensió era suficient, el regulador s'activava des de la seva senyal de on/off i quan començava a ser massa baixa, es desactivava de la mateixa manera, per no arribar a amorrar el sistema del tot.

Experimentalment es va determinar que la tensió d'arrancada del sistema serien els 3V i per apagar-lo serien 1V. Això permet al sistema arrancar fins i tot en condicions de núvol i aguantar carregant, encara que sigui una petita corrent en condicions de poca llum. Els dos desavantatges d'aquest sistema són:

1. L'eficiència del sistema de càrrega depèn de la tensió d'entrada i, per tant, en tensions baixes, a pesar de carregar la bateria, es fa amb una eficiència molt baixa que pot arribar al 50% (la meitat de l'energia de la cèl·lula fotovoltaica es perd).
2. Les càrregues petites sacrifiquen part de la vida de la bateria, especialment reduint-ne la seva capacitat al provocar cristallitzacions de l'electròlit que ja no seran útils per la càrrega.

Malgrat això, el requeriment de autonomia del sistema va prevaldre per sobre d'aquests inconvenients i es va decidir mantenir aquesta implementació.

Acumulador

Pel funcionament intrínsec del regulador commutat, l'arrancada del sistema requereix d'una gran corrent per iniciar la càrrega de la bobina amb la que es basa en part la commutació del sistema. Tot i que el comportament del panel solar té un cert component capacitiu, el cert és que la capacitat de la cèl·lula és realment baixa, com demostren experiments senzills connectant panell a condensadors i mesurant la tensió.

Aquesta petita capacitat és insuficient per donar la corrent pic inicial que necessita així que s'ha afegit al sistema un condensador extra de 220 μ F que acumula càrrega procedent del panell, que, per cert, es connecta, a diferència de la versió 1, amb un connector que en permet el canvi o la connexió/desconnexió de manera simple (afegeix el cost d'un component però redueix el cost de muntatge perquè requereix de menys manipulació), fins que arriba als 3V que posaran en marxa tot el sistema de càrrega.

Cal notar que el valor de 220 μ F es va determinar experimentalment en diverses proves del sistema utilitzant diferents valors de capacitat amb el sistema complet, cèl·lula, acumulador, disparador de tensió mínima, regulador commutat, estabilitzador de tensió, limitador de corrent (aquests dos últims s'expliquen a continuació) i, finalment, bateria. El valor de 220 microfarads era el mínim que permetia posar en marxa el regulador de manera que s'intenta que el carregador funcioni de seguida que sigui possible.

4.6 Monitor de nivell de llum ambiental

Per alguns modes de funcionament del SisLlum, en particular el mode "nit", "jardí" o fins el "boira", es feia necessari mesurar la llum ambiental per detectar situacions de baixa lluminositat en el que fos interessant activar la balisa lluminosa del SisLlum.

Tot i que incorporar un sensor de llum al sistema sempre era una possibilitat:

- sempre suposava un cost més afegit al sistema, encara que en aquest cas era francament baix,
- el disseny de la camisa del SisLlum no permetia trobar un lloc adequat per la col·locació d'aquest sensor, ja que la major part del sistema està cobert en la seva col·locació estàndard, i la única part que no ho està, el caputxó, està cobert per aquest de manera que no es podia assegurar el correcte funcionament del sensor,
- de facto, el sistema ja incorpora un sensor de llum que és la cèl·lula solar fotovoltaica, que ens donarà una relació tensió/corrent proporcional a la lluminositat ambiental.

Així, doncs, ens decidim per obviar aquest sensor i fer servir la placa solar per aquest propòsit.

Degut a que la mesura real de la lluminositat correspon a la mesura de potència en la cèl·lula, en teoria requeriríem de mesurar la tensió i la corrent en la placa. No obstant, implementar una mesura de corrent resulta o bé car o bé ineficient perquè consumirà potència de la poca que ja ens dóna la placa fotovoltaica de per si. Com que la mesura de la tensió en la placa és molt més senzilla i econòmica de fer i té un consum ridícul perquè es fa a través de ports d'alta impedància (normalment convertidors analògic-digital, ADC, que ja incorpora el microcontrolador, es decideix estimar la lluminositat ambiental a partir de la tensió en bornes de la placa.

Pel propi sistema de càrrega solar, com s'ha explicat en els apartats anteriors, aquesta tensió fluctua i, en particular, s'amorra quan s'activa el sistema de càrrega per extreure l'energia de la cèl·lula. Davant d'aquesta situació i amb la pressuposició que no es farà

mesura de la corrent per treballar sobre la potencia i no sobre la tensió només, ens queden aquestes opcions:

1. Mesurar la tensió de la placa en circuit obert, és a dir només quan el sistema de càrrega està desactivat i no hi ha consum de corrent en la placa. Això requereix simplement d'utilitzar un pin més del microcontrolador per conèixer l'estat del on/off del regulador commutat que activa tot el procés de càrrega, que és automàtic i desatès del microcontrolador a través d'un comparador.
2. Realitzar diverses mesures sobre el voltatge de la placa i fer una mitjana que, de manera digital, implementi un filtre pas baix que elimini les fluctuacions degudes a l'arrancada i parada del sistema de càrrega. El problema principal d'aquesta opció és que, al marge de requerir una certa potencia computacional, amb tot podem no estar mesurant la lluminositat real de l'ambient, especialment quan aquesta fa que els sistema de càrrega s'activi i es desactivi constantment.
3. Mesurar la tensió d'entrada amb una resolució molt baixa, és a dir, amb un voltatge de quantificació molt alt, més alt que les fluctuacions que té la tensió en la placa degut a les commutacions de la càrrega. Més enllà del intrínsec problema de resolució, aquesta opció no té cap desavantatge.

Analitzant amb cura els casos d'ús del sistema que s'implementaran en aquesta primera versió, concretament els ja mencionats "boira", "nit" i, en darrera instancia i en fase de proves, el "jardí", veiem que en tots els casos el sensor de lluminositat ambiental pretén detectar, simplement, una situació de baixa lluminositat.

Per tant, a nivell del sensor de llum, només hi ha 2 estats possibles: fosc o no fosc, en el cas dels modes "nit" i "jardí" i boira o no boira, en el cas del mode "boira". Això simplifica enormement la mesura de lluminositat, requerint molt poca resolució de la mesura. A més, en els 2 primers modes, en els que es vol detectar la fosc, coincideix que en aquest estat i per definició, la càrrega a partir de la cèl·lula fotovoltaica no està mai activada, perquè precisament no hi ha, a efectes pràctics, energia per carregar. Per tant, no és necessari controlar l'estat del sistema de càrrega.

Experiments realitzats de manera empírica en els casos de boira, determinen que en aquest casos, en els que el llindar que dispara l'activació del sistema lluminós és lleugerament més alt, tampoc es donen les condicions perquè el sistema s'activi (recordem, una tensió en la cèl·lula fotovoltaica de 3 o més Volts).

Per tant, s'opta per la 3a opció, realitzant simplement les mesures a baixa resolució i fent servir llindars d'activació sense resolució, com es veurà en la descripció de la implementació del firmware. També més endavant es veurà que s'implementa per firmware un sistema amb histèresi de manera que els llindars d'activació i desactivació tenen valors diferents per impedir una activació i desactivació constant quan els valors mesurats estan prop dels llindars.

Amb tot, l'únic inconvenient que finalment incorpora aquest sistema de mesura el trobem només en el mode "boira" i és que la lluminositat ambiental no és prou mesura per detectar aquest esdeveniment, ja que situacions de boira poden donar els mateixos valors de lluminositat ambiental que els mesurats experimentalment en casos de boira. Com a millora de futur, com també s'especificarà en els apartats finals d'aquesta memòria, es proposa incorporar sensors d'humitat i de temperatura que, junt amb la lluminositat, permetin asseverar que ens trobem davant una situació de boira.

4.7 Controladora LED

Per la controladora del LED certament no es va canviar massa respecte al disseny que ja teníem en la versió 1 del sistema. Però sí que es va innovar en la implementació.

En aquesta primera versió es partia d'un connector molt simple que només exposava a la placa de LED dues senyals de control independents i un pin d'alimentació. Això permetia activar dues línies independents de LED a través de col·lectors de transistors BJT que s'utilitzaven en aquell model per controlar 2 LED o per controlar-ne 6, poden generar 4 nivells de llum, apagat, 2 LED, 6 LED i 8 LED, en funció de la situació, l'esdeveniment o de la lluminositat ambiental.

Si bé el control dels LED es va seguir fent a través de BJT en saturació que funcionaven com a interruptors electrònics, es generen 4 línies de control dels LED des de la placa principal per controlar els LED de 2 en 2, que era la mínima divisió que es podia fer de manera eficient ja que els 4,8-6V de la bateria que es feien servir per alimentar els LED només permeten posar 2 LED Superflux en sèrie.

D'aquesta manera, permetem tenir una mica més de combinatòria en la il·luminació dels SisLlum, poden no activar cap LED, activar-ne 2, 4, 6 o tots 8. I, fins i tot, també es deixen dues senyals més connectades però sense ús en la primera versió per un supòsit de plaques LED que necessitin de més senyals de control o de més corrent d'activació.

La interfície per implementar això consta de 2 connectors en 90° en la placa base, que tindran els seu homòlegs en angle recte a la placa de LED, de 6 pins cadascun, 4 de implementats més els 2 que comentàvem que es deixen de reserva. Un s'utilitza per transportar les senyals d'alimentació, directament connectades a la tensió de la bateria, i l'altre porta les senyals de control, que connecten al col·lectors dels BJT que activen i desactiven els LED. Cal esmentar que la versió 1 dels sistema no incorporava aquests connectors que permeten intercanviar les plaques de LED, tant en color com en tipus, donant molta més escalabilitat al sistema, sinó que simplement anaven soldades en 90° utilitzant els 3 pins esmentats, 1 d'alimentació i 2 de control.

L'altra innovació que s'incorpora en aquesta versió 2 és que les resistències que limiten el corrent que passa pels LED es mouen de la placa base a la placa de LED. La raó principal és que aquestes resistències de polarització, en realitat, depenen dels LED que s'estiguin emprant de manera que una mateixa placa de control pot intercanviar diferents plaques de LED amb diferents tecnologies, permetent que els sistema pugui tenir més escalabilitat en el futur.

De fet, en aquesta mateixa línia, va quedar pendent una altra innovació que era passar també els BJT de control a la placa de LED perquè, estrictament, aquests també estan lligats a la tecnologia LED emprada i, si, per exemple, es volia implementar una placa LED amb LED de potencia, feia falta emprar un altre model de transistor de més corrent.

En les proves amb LED de potencia que es van fer durant aquesta fase del projecte, això es va resoldre simplement posant en paral·lel diverses línies controlades amb BJTs de les 4 disponibles. Però sens dubte era quelcom que quedava pendent de millora pel futur.

4.8 Placa de LED

La placa de LED va ser una de les parts menys modificades respecte de la versió 1 ja que, al marge del canvi de la tecnologia LED, de LED convencional a LED Superflux, i de la incorporació de les resistències de polarització en la mateixa placa dels LED, per la cara de sota, junt amb la nova interfícies de connectors per la placa principal, que permet desmuntar la placa amb facilitat, aquesta placa té exactament les mateixes dimensions, respectant el

model d'utilitat del client, els LED van col·locats amb el seu centre, la font d'emissió de llum, en la mateixa ubicació, i la funcionalitat és la mateixa.

El valor de les resistències de polarització s'ajusten perquè els LED donin la potencia màxima recomanada pel fabricant (sense perdre, per tant, vida útil), concretament amb una tensió de caiguda ($V_{f_{MAX}}$) de 2,5V i una corrent ($I_{f_{MAX}}$ de 30mA que, considerant que la tensió d'alimentació pot arribar a ser de fins a 6V resulta:

$$R_{LED} = \frac{(V_{CC_{MAX}} - 2 \cdot V_{f_{MAX}})}{I_{f_{MAX}}} = 20 \Omega$$

4.9 Altres aspectes del disseny

Càlcul de consums i dimensionat de les bateries

Amb tot el sistema SisLlum versió 2 ja pràcticament dissenyat, és el moment de comprovar que tot quadra a nivell energètic amb un breu estudi de consums.

Per a fer aquest petit estudi es prenen les següents consideracions:

- Només es treballarà amb el pitjor dels casos, ja que l'objectiu d'aquests càlculs és dimensionar les bateries o, millor dit, preveure'n la vida útil, perquè la bateria màxima que permet el sistema ja està localitzada i arriba fins als 2800mAh.
- Aquests pitjors casos s'aplicaran primer al mode "boira", que és el que emet més llum (concretament, com es veurà en el disseny del firmware, activa els 8 LED amb ràfegues de 60ms i intervals d'1 segon), després el mode "jardí" en els que els llums estan permanentment il·luminats però amb una llum polsada i, finalment, en el "nit" caracteritzat per ràfegues curtes (de 30ms per cada interval d'1 segon), que seria el cas més favorable però el que també intentarem buscar els casos més extrems.
- Es considerarà que el consum dels LED és màxim en tot moment (30mA per línia de LED, amb 2 LED per línia), tot i que a mesura que la càrrega de la bateria va baixant, la corrent (i la tensió) dels LED també es redueix proporcionalment. Es considera el mode Actiu quan els LED estan il·luminats i el mode Inactiu quan no s'emeten llum alguna.
- El MCU, si bé es treballarà amb el seu menor consum en actiu, el corresponent al rellotge de 32kHz, que és el que s'emprarà, es considerarà que està sempre actiu a pesar que en funció del mode en el que s'estigui treballant i de la implementació del firmware es podria posar en mode de baix consum (amb 2uA) en els intervals en els que els LED no estan activats i el sistema no està fent res. A l'hora de la veritat, però, com es veu més avall, l'impacte del consum del microcontrolador és tan baix sobre el sistema que no acaba tenint efecte pràctic en l'autonomia d'aquest fet d'estar sempre actiu o intercalant períodes de mode *sleep*. En canvi, implementar aquestes modes de baix consum compromet el desenvolupament del programari d'un sistema tant cronometrat perquè els temps de inici i d'apagat són difícils de preveure.
- Més enllà dels LED i del microcontrolador no es considerarà cap més consum dels components menors perquè, a efectes pràctics, és nul.
- Tampoc es tindrà en compte el consum del sistema de càrrega, que té cert consum energètic però que es pot considerar autosuficient doncs, tot i alimentar-se de la bateria (requeriment necessari pels pics de consum del regulador a l'inici de la càrrega), només funcionarà quan està aportant càrrega a aquesta. Si que es tindrà

en compte l'eficiència del sistema de càrrega, que s'estableix en el 85%, per estimar la corrent de càrrega necessària perquè el sistema sigui autònom.

Amb aquestes consideracions, doncs, el càlcul del consum del sistema pels diferents modes és:

Part	Unitats	Consum [mA]	Duty Cycle [%]	Total [mA]
Línia LED	4	30,000	0,06	7,2
	2		0,2	12
			0,03	1,8
MCU	1	0,035	1	0,04
Consum total en mode boira actiu				7,24
Consum total en mode jardí actiu				12,04
Consum total en mode nit actiu				1,84
Consum total en mode inactiu				0,04

S'observa que el consum en mode actiu és realment gran a pesar del *duty cycle* aplicat, principalment pel consum dels LED i perquè en aquest cas s'activen totes les línies possibles.

Amb aquests valors, agafem diversos supòsits d'hores de boira i de no boira, que es correspondrien a les situacions en diferents llocs del territori *target* del nostre client, fins al moment de la realització del projecte, el territori català. Així trobem situacions extremes que van:

- des d'una localització com Lleida, que pot passar fins a 3-4 setmanes amb una boira densa durant tot el dia, situació en la que considerarem que no hi ha càrrega, a pesar que el sistema és capaç d'obtenir una petita càrrega de la llum que travessa la boira,
- fins a les nits més curtes de l'any, que en aquestes latituds son de 8 hores consecutives en les quals els modes "nit" i "jardí" estaran actius.

El resultat és la següent taula de duracions de vida de la bateria seleccionada per aquesta aplicació per motius d'espai, recordem, de 2800mAh:

Mode boira

Temps actiu [h]	Temps càrrega [h]	Demanda [mAh]	Corrent necessària de càrrega [mA]	Vida de les bateries de 2800mAh sense càrrega [dies]
24	0	173,64	n/a	0,67
20	4	144,84	36,21	0,81
16	8	116,04	14,51	1,01
12	12	87,24	7,27	1,34
8	16	58,44	3,65	2
4	20	29,64	1,48	3,94
2	22	15,24	0,69	7,66

Mode jardí

Temps actiu [h]	Temps càrrega [h]	Demanda [mAh]	Corrent necessària de càrrega [mA]	Vida de les bateries de 2800mAh sense càrrega [dies]
20	4	240,84	60,21	0,48
16	8	192,84	24,11	0,6
12	12	144,84	12,07	0,81
8	16	96,84	6,05	1,2

Mode nit

Temps actiu [h]	Temps càrrega [h]	Demanda [mAh]	Corrent necessària de càrrega [mA]	Vida de les bateries de 2800mAh sense càrrega [dies]
20	4	36,84	9,21	3,17
16	8	29,64	3,71	3,94
12	12	22,44	1,87	5,2
8	16	15,24	0,95	7,66

Com a conclusions d'aquest estudi podem esdevenir que:

- El sistema no podrà aguantar més de 16 hores de boira en un supòsit de no càrrega, el qual és suficient si es pretén tenir una mesura de contingència davant una boira sobtada però no servirà com a mesura preventiva en un cas de boira permanent.
- El mode jardí tal com s'ha especificat també compleix amb les expectatives en el sentit que, si bé només funcionarà durant tota la nit en les nits d'estiu de les latituds de Catalunya, només funcionarà durant unes 10-12 hores cada nit durant l'hivern, més que suficient amb el benentès que es busca una il·luminació només durant les primeres hores de la nit, quan és possible que alguna persona hagi de circular pels escenaris que es pretenen il·luminar.
- El mode nit, que si que requereix de funcionar tota la nit, compleix amb robustesa aquesta especificació arribant fins i tot a suportar fins a 3 nits seguides malgrat durant el dia no es compleixin les condicions de càrrega solar.

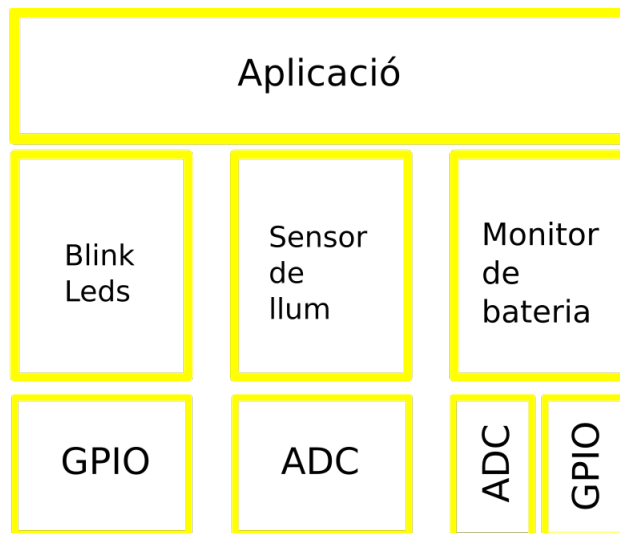
Pressupost del cost del producte, material i fabricació

Es pot trobar el pressupost dels materials emprats en el sistema en l'apèndix, apartat Llista de components (BOM)

4.10 Firmware

Diagrama de blocs

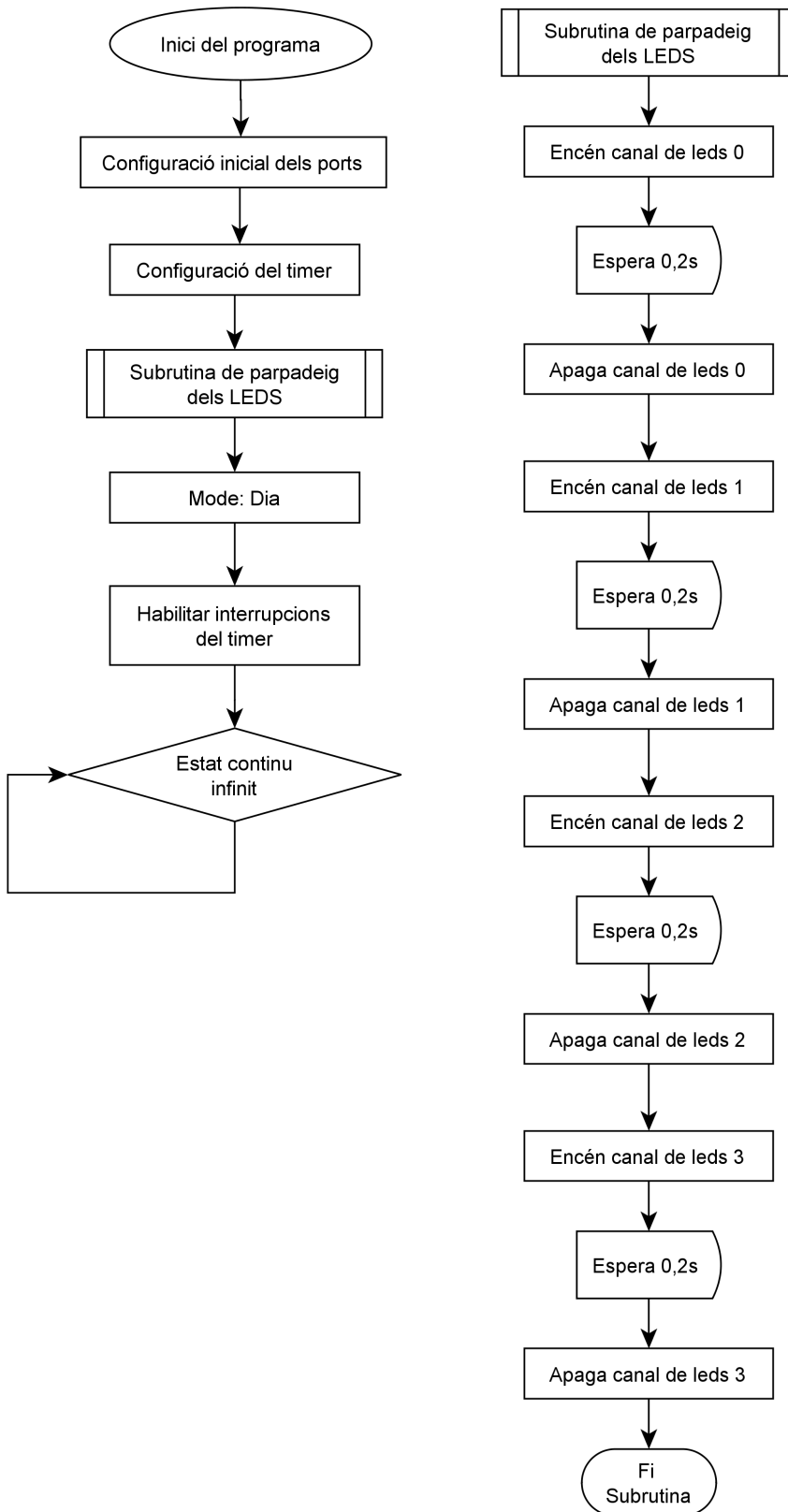
S'entén com a diagrama de blocs la representació gràfica d'aquelles parts de tot el sistema i les relacions que aquells tenen. En el sistema del Sisllum bàsicament tenim un mòdul que controla tot el sistema. L'aplicació principal corre cada vegada que l'aplicació es dispara. L'aplicació té control sobre el sensor de llum, usant ports generals d'entrada i sortida. També té control sobre el sensor de llum (la placa amorfa) que es llegeix mitjançant un ADC, i el monitor de bateria, que es controla mitjançant un altre ADC en un canal diferent i un GPIO per activar-ho. Llavors, el diagrama de blocs bàsic quedaria de la següent manera:

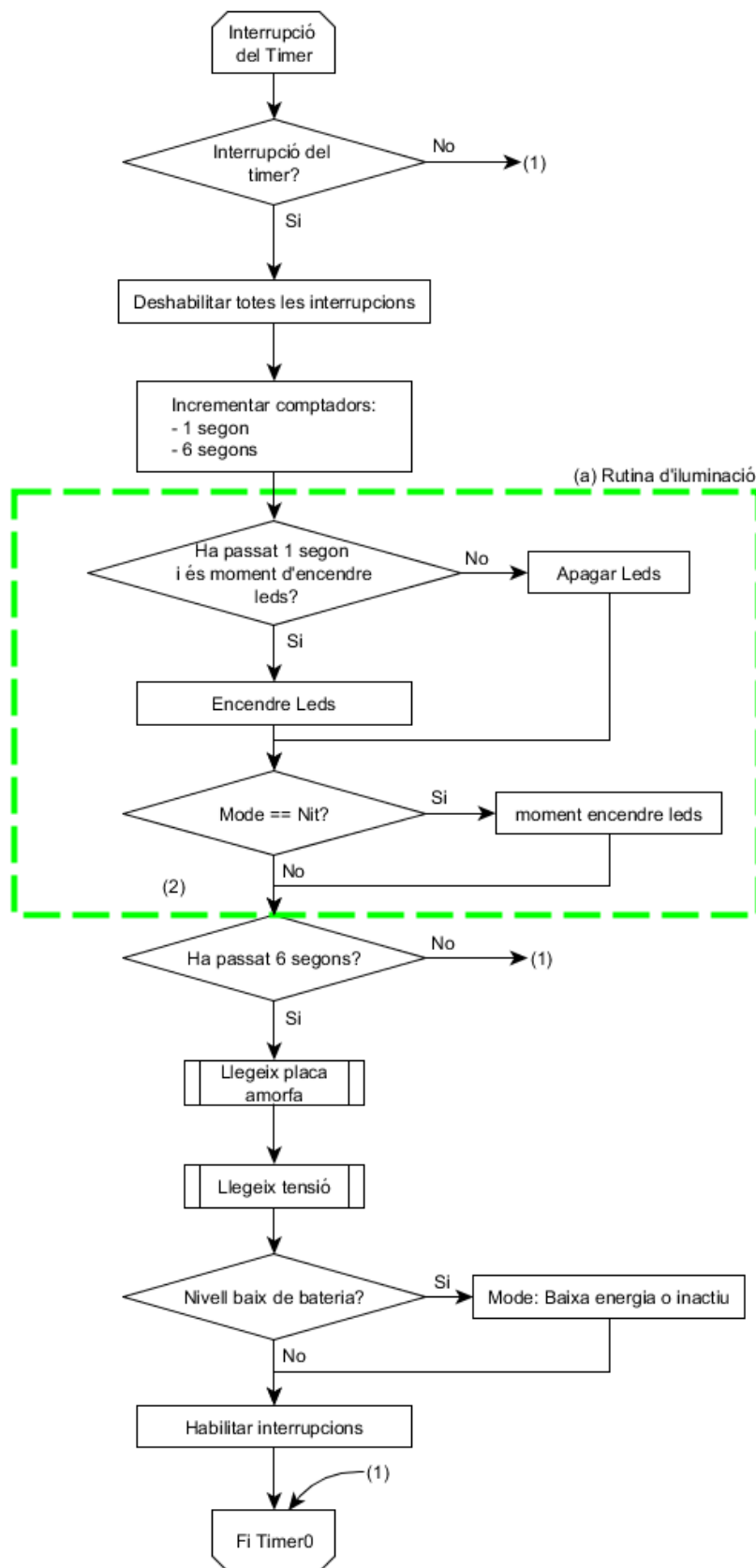


Il·lustració 12: Diagrama de blocs del Firmware

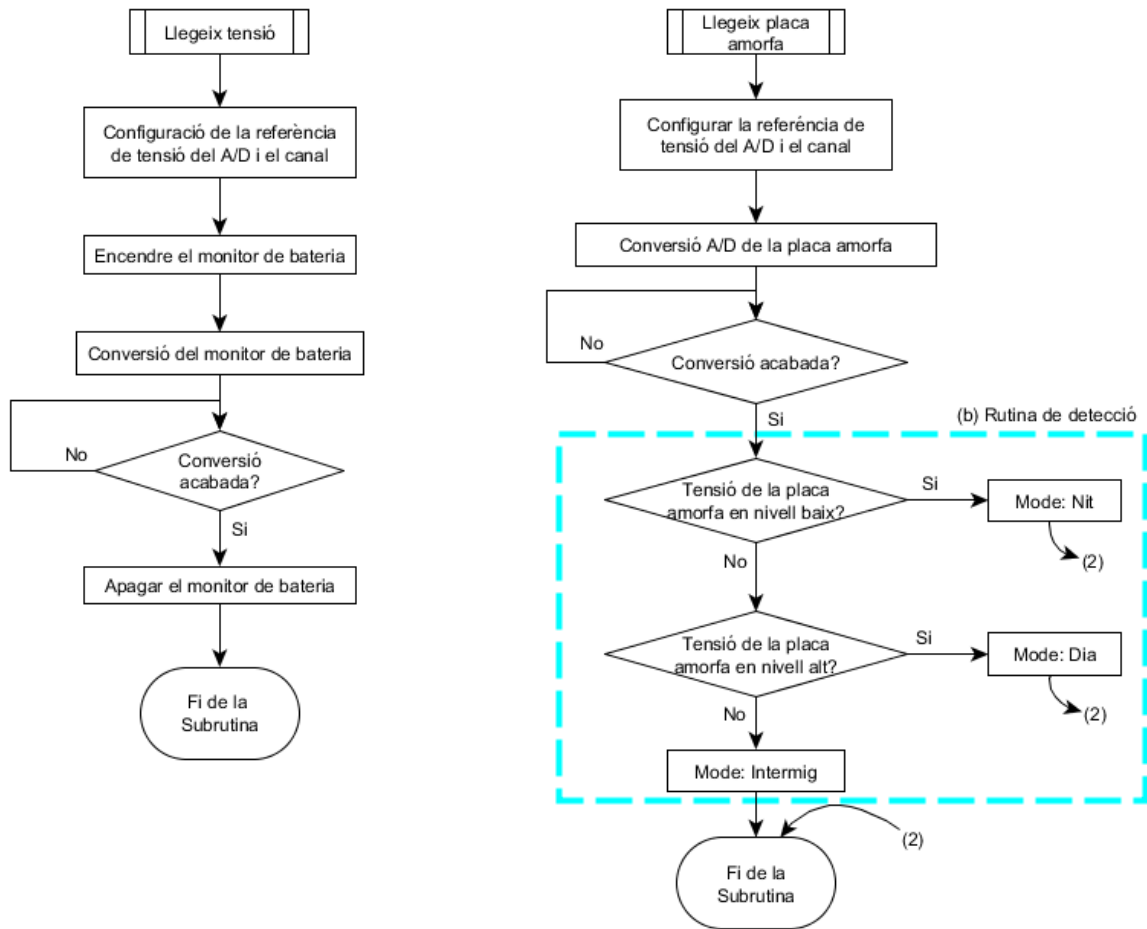
Diagrames de flux i algoritmes

El diagrama bàsic del Sisllum, en totes les versions comentades anteriorment (boira, nit, jardí, etc.), té en comú els següents diagrames de flux:



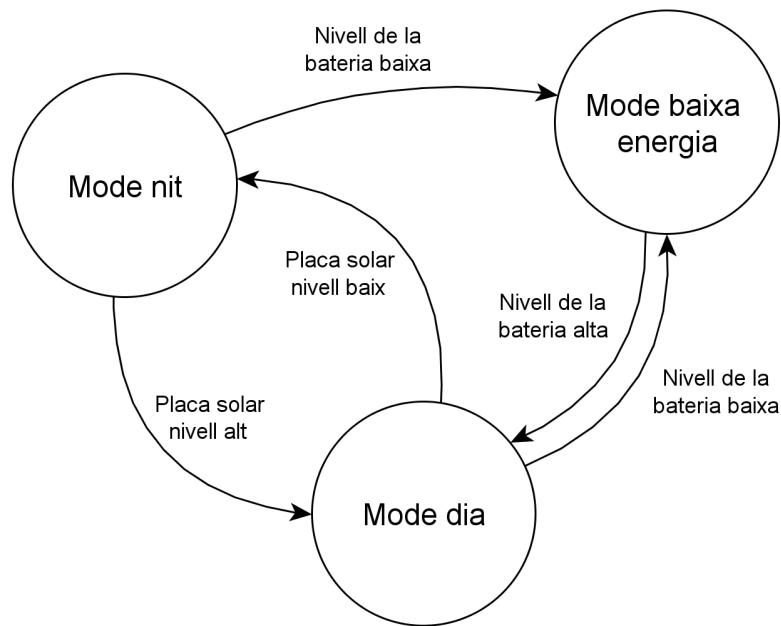


(a) Rutina d'iluminació: Especificat en l'apartat «Especificitats de cada mode de funcionament»



(b) Rutina de detecció: Especificat en l'apartat «Diagrama d'estats del FW»

Diagrama d'estats del FW.



Il·lustració 13: Diagrama d'Estats del Firmware mode nit

El diagrama d'estats del Sisllum es resumeix en tres estats principals: «Mode dia» significa que la placa solar té un nivell alt de tensió. «Mode nit» és quan en la placa solar detectem un nivell baix, i el «mode de baixa energia» o «inactiu» monitoritza les bateries i pren el control del sistema depenent de la tensió que hi tingui.

En inici del sistema, el Sisllum sempre iniciarà en «Mode dia», i prendrà la decisió segons quin estat físic tingui en aquell moment. L'estat «Nit» s'aplica tot just quan la tensió de la placa amorfa decau per sota d'un nivell baix de tensió. Fins que la placa solar no supera el llindar del *nivell alt*, no canviarà d'estat. Aquest intercanvi d'estats defineixen i fixen els límits d'histeresi entre el nivell baix i el nivell alt, mantenint el mode constant (mode intermig) fins que no es supera qualsevol d'aquests estats. Mentre que la bateria estigui per sobre del llindar alt de bateria, els estats de «dia» i «nit» funcionaran perfectament. Però si en qualsevol dels dos estats es detecta un nivell baix de bateria, es passarà al mode «baixa energia» i es quedarà en aquest estat fins que s'hagi carregat prou la bateria.

Tant el mode dia com el mode nit, l'única cosa que comparteixen en comú és el nivell de detecció de la placa solar. Hi han casos, com el de la boira, que es necessita un nivell de llum específic per poder encendre els leds. Per tant, el diagrama d'estats quedaria de la mateixa manera però substituint els estats de «Mode dia» i «mode nit» per «Hi ha boira» i «No hi ha boira».

Tècniques d'optimització del consum per firmware

El que s'ha fet amb el PIC16F689 ha sigut implementar tot el sistema en ensamblador. Això ens permet una major eficàcia en els algorismes que usem i reduir el temps d'instrucció al màxim. Si haguéssim triat programar-ho en C, el compilador ens hagués convertit les nostres instruccions C a ensamblador, i molt probablement aquesta conversió no hagués sigut tant eficient. En l'inici del projecte, ja s'havia plantejat la possibilitat de fer-ho en C, però en aquell moment els compiladors que hi havia eren de pagament per el microcontrolador que vam triar.

Degut a que el sistema funciona amb un rellotge de 32K, això significa que el temps d'instrucció i el temps invertit en càlculs serà lent, és per aquest motiu principal per el qual s'ha triat definir els límits tant de tensió de la placa fotovoltaica com del monitor de bateria com a constants precalculades per reduir el temps d'execució del sistema. Els algorismes matemàtics com multiplicacions i divisions haguessin suposat molt temps d'instrucció només per obtenir la conversió del mòdul Analògic/Digital en un nivell base de tensió en Volts, però també ens hagués donat un paràmetre més simple alhora de configurar els nivells i límits de tensió. Tanmateix, degut a que l'objectiu del sistema era que consumís el mínim possible, es va descartar aquesta opció.

Especificitats de cada mode de funcionament

Tal i com s'ha dit anteriorment, existeixen diferents versions del programa que tenen les seves peculiaritats. Aquests canvis de llum usades en diferents aplicacions afecten al programa principal que gestiona la placa de leds. Les diferències de cada mode (boira, nit, jardí) tenen les seves peculiaritats tant de lluminositat com de període.

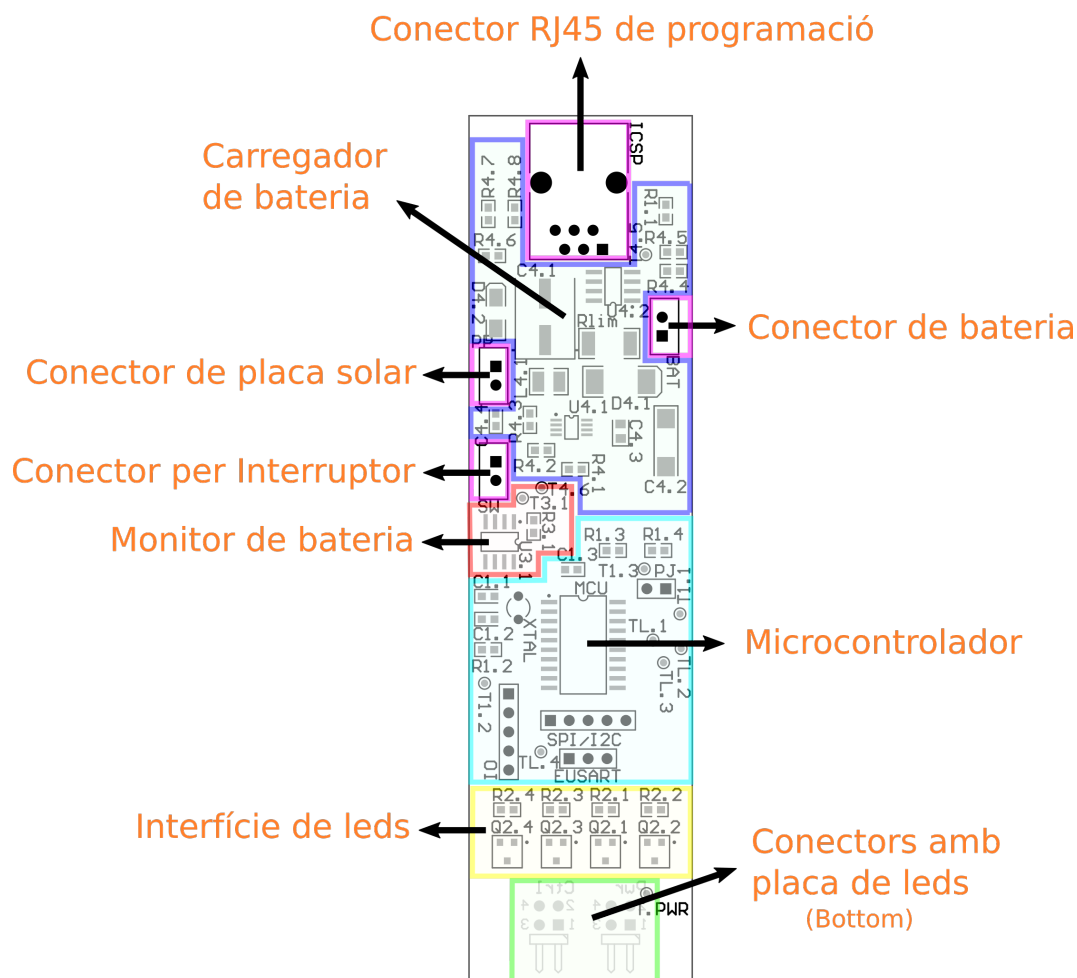
- Mode boira: Parpadeig dels 4 canals durant ~60ms, en dos intervals d'un segon quan el nivell de lluminositat exacte és detectat.
- Mode nit: El parpadeig es fa en un sol canal cada segon, durant 30ms quan el mode nit és detectat.
- Mode jardí: El parpadeig és continuu durant tota la nit, durant 8 hores.
- Altres modes futurs (autopista, vaixell o decoratiu):

La il·luminació del sisllum també es pot utilitzar en altres ambients a on és necessari una balisa. Sistemes de senyalització com autopistes o vaixells. Tanmateix, aquests altres modes necessitarien unes característiques pròpies tant de lluminositat com de període s'hauran de definir. Tots aquests canvis no suposarien gaire esforç aplicar-los

5. Desenvolupament

5.1 Hardware

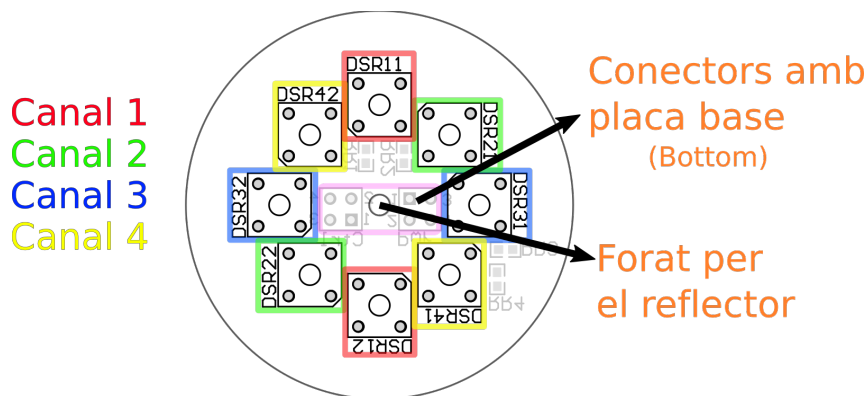
Posicionament del components



Il·lustració 14: Posicionament del components

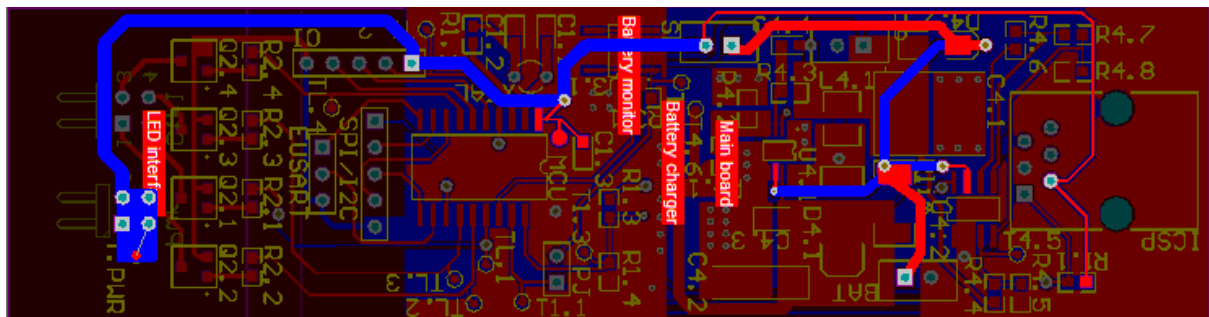
L'emplaçament dels components del Sisllum en la placa de circuit imprès s'ha desenvolupat tenint en compte les diferents parts diferenciades en l'esquemàtic. Aquest ordre s'ha triat així per un millor manteniment i anàlisi de prova del circuit a posteriori. Com es pot veure en l'il·lustració 14, cada part es diferencia clarament gràcies a la notació que li hem posat en l'esquemàtic, tenint la nomenclatura 1.x com a la part del microcontrolador, 2.x com a la interfície de leds, 3.x defineix els components del monitor de bateria i 4.x els components del carregador de bateria. A part, també s'han deixat nombrosos punts de test per el manteniment de la placa.

La placa de leds ha hagut de ser circular per adaptar-nos a la camisa del disseny original. Els quatre canals dels leds de potència s'han emplaçat en els extrems d'aquesta, formant un cercle. És important dir que la distància del centre dels leds amb el forat per el reflector correspon aproximadament a 12mm. Posteriorment especificarem l'importància d'aquesta distància en la secció Optimització del diagrama d'irradiació de la llum.



Il·lustració 15: Placa de Leds del Sisllum

En el moment de dissenyar la placa de circuit imprès, s'ha tingut en compte que la corrent de càrrega de bateria (encara que es carregarà lentament degut a la poca corrent de la placa fotovoltaica) pot arribar a ser la màxima corrent que traspassa en el sistema. Per tant, s'ha deixat un gruix superior a la resta de pistes. El mateix passa amb el gruix de pista dels leds, que resulta ser la mateixa que la alimentació de la bateria després de l'interruptor:



Il·lustració 16: Selecció de la pista VCC en el disseny

El gruix d'aquestes pistes que s'ha deixat en la PCB ha sigut d'un mil·límetre. Amb aquest, es calcula de que podrà deixar passar una corrent màxima de aproximadament 3 Amper, mitjançant la següent fórmula (Es basa en l'aplicació de l'estàndard general per circuits impresos ANSI-IPC 2221^{[12][13]}):

$$\text{Gruix} = \left[\frac{I}{(k_1 * \Delta T^{k_2})^{k_3}} \right] / L * 1,378$$

A on:

I és la corrent màxima que volem que passi per la pista.

ΔT és l'increment màxim de temperatura en °C que volem que la pista es calenti.

L són les micres de coure (en el nostre cas, 1 onza/peu² (35um)).

k1 és una constant definida com per 0,0647 per pistes externes.

k2 és una constant definida com a 0,4281 per pistes externes.

k3 és una constant definida com a 0,6732 per pistes externes.

Si volem que passin 3 Amper (recordem que les bateries son de 2800mA/h) amb un increment màxim de temperatura de 15 graus, tenim:

$$\text{Total ample de pista (mils)} = \left[\frac{3}{(0,0647 * 10^{0,4281})^{(1/0,6732)}} \right] / 1 * 1,378$$

$$\text{Total ample de pista (mils)} = (3/0,206)^{1,485} / 1,378 = 53,29 / 1,378 = 38,6 \text{ mils}$$

Per tant, el total d'ample de pista (en mm) que hem calculat és de aproximadament 0,98mm.

En el circuit podem veure una pista molt fina que va al connector ICSP. Aquesta pista d'alimentació s'ha deixat així perquè suposem que quan programem el dispositiu no requerirà de gaire corrent.

El circuit ha sigut dissenyat des del primer moment per adaptar-se a la camisa que l'envolta i al tap que se li enrosca amb unes arandel·les de goma. Això permet que, en el moment en que tot el conjunt de l'electrònica es col·loqui a dins de la camisa, l'estanqueïtat del sistema ja estigui gran part resolta.



Il·lustració 17: Muntatge final del Sisllum

5.2 Firmware

El Firmware es va desenvolupar sota MPLAB versió 5.5, que en un primer moment va ser la única plataforma que hi havia per poder desenvolupar sota el microcontrolador. L'entorn complet ens permetia programar en ensamblador i en C, però en aquell moment un compilador de C era de pagament, i es va triar seguir el codi en ensamblador.

Funcions implementades

Event del Timer0:

L'event del timer0 és el que corre contínuament, cridant a les subrutines de detecció del panell solar i la tensió del sistema. Es defineix la zona d'operació i si és moment d'encendre els leds o no:

Lectura de la placa solar, a on el retorn directament es guarda en el paràmetre «zone» i es compara el resultat de la detecció de la tensió de bateria, controlant el mode baix consum:

```

272 | CALL    readZone          ; Call readZone subroutine
273 | MOVWF   zone              ; the light zone is returned on W register
274 | CALL    lowVoltage        ; Call the lowVoltage subroutine; the voltage is returned directly on
ADC_voltage variables
275 | MOVLW   LOW_VOLTAGE_H
276 | SUBWF   ADC_voltageH,W    ; ADC_volt_h - LOW_VOLTAGE_H
277 | BTFSS   STATUS,C          ; If ADC_volt > LOW_VOLT => the voltage is low
278 | GOTO    isr_cont3
279 | BTFSS   STATUS,Z
280 | GOTO    low_volt
281 | MOVLW   LOW_VOLTAGE_L
282 | SUBWF   ADC_voltageL,W    ; ADC_volt_l - LOW_VOLTAGE_L
283 | BTFSS   STATUS,C          ; if(ADC_voltage > LOW_VOLTAGE) ...
284 | GOTO    isr_cont3

```

Subrutina d'il·luminació de leds

```

233 | MOVLW   0x1
234 | ADDWF   blink_tmr,F      ; 1sec counter ++
235 | ADDWF   event_tmr,F      ; 6sec counter ++
236 |
237 | BTFSC   led_status,0x0
238 | GOTO    isr_cont
239 | MOVLW   d'32'           ; 32 isr = 1 second @ 30ms interrupt (aprox)
240 | SUBWF   blink_tmr,W
241 | BTFSS   STATUS,Z        ; if(led_status==0 && blink_tmr==16) ...
242 | GOTO    isr_cont
243 | CLRF   blink_tmr        ; Clear blinking counter
244 | MOVLW   0x1             ; Check zone status
245 | SUBWF   zone,W
246 | BTFSS   STATUS,Z        ; Case zone = 1, darkness
247 | GOTO    case2
248 | BSF    led_status,0x0    ; led_status = 1
249 | BSF    PORTC,0x0        ; 2 LEDs turned ON
250 | GOTO    end_case        ; break;

```

En la part del codi, podem veure com el comptador Blink_tmr és incrementat, i fins que no sigui igual a 32 (1 segon aproximadament de l'event del timer0) no encendrà els leds si no és que el sistema no estigui en mode nit.

Lectura de la tensió

La lectura de la tensió es fa mitjançant una referència externa. Depenent de la tensió de la bateria, el resultat de la conversió Analògica/Digital tindrà un valor concret que s'emmagatzemarà en les dues direccions ADC_voltageH (per els bits de major pes) i ADC_voltageL (per els bits de menor pes). L'espera de la conversió és activa, i un cop obtenim el resultat, és comparat pel valor constant que hem fixat com a límit de detecció baix de bateria (LOW_VOLTAGE_H i LOW_VOLTAGE_L). En la següent figura es mostra la comparació dels registres i la detecció del nivell baix de bateria:

```

274 | CALL    lowVoltage        ; Call the lowVoltage subroutine; the voltage is returned directly on
ADC_voltage variables
275 | MOVLW   LOW_VOLTAGE_H
276 | SUBWF   ADC_voltageH,W    ; ADC_volt_h - LOW_VOLTAGE_H
277 | BTFSS   STATUS,C          ; If ADC_volt > LOW_VOLT => the voltage is low
278 | GOTO    isr_cont3
279 | BTFSS   STATUS,Z
280 | GOTO    low_volt
281 | MOVLW   LOW_VOLTAGE_L
282 | SUBWF   ADC_voltageL,W    ; ADC_volt_l - LOW_VOLTAGE_L
283 | BTFSS   STATUS,C          ; if(ADC_voltage > LOW_VOLTAGE) ...
284 | GOTO    isr_cont3

```

Cal esmentar que s'ha optimitzat aquest sistema per que la referència externa no consumeixi res quan no s'està convertint. Mitjançant el port «RA2» aconseguim alimentar la referència externa quan desitgem i així poder adquirir la referència. D'aquesta manera la conversió consumeix pràcticament el mínim:

```

200 lowVoltage
201     BCF     STATUS,RP0
202     BCF     STATUS,RP1           ; Bank 0
203     MOVLW  b'10000101'         ; Right justified, VDD ref & ch 1
204     MOVWF  ADCON0
205     BSF     PORTA,0x2           ; Battery monitor (RA2) --> turned ON
206     CALL   DelayAD            ; Wait for AD
207
208     BSF     ADCON0,GO           ; Start conversion
209     BCF     STATUS,RP1         ; (?)
210     BTFSC  ADCON0,GO           ; Poll for conversion ending
211     GOTO   $-1                 ; Poll again if not

```

Lectura de la placa solar

La lectura de la placa solar es realitza de forma bastant semblant a la lectura de la referència externa, però amb la subrutina readZone. Mitjançant el canal 0, podem adquirir el nivell actual de tensió en la placa amorfa. Aquest nivell és comparat amb les constants dels «modes» que hem definit per poder especificar l'estat en el que estem.

Tal i com hem implementat els dos nivells de «mode dia» i «mode nit», aconseguim un sistema d'histèresi entre tots dos. Els nivells són bastant grans com per que un estat s'intercanviï amb l'altre a l'atzar: Per l'estat de nit, és necessari que la placa detecti un nivell inferior a 32, mentre que per l'estat de dia, ha de detectar qualsevol valor per sobre de 256. A efectes pràctics, el sisllum només encendrà els leds quan hi hagi pràcticament poca o casi nul·la il·luminació.

Tècniques per la millora de l'eficiència

Utilització de la llum polsada

Quan la llum emesa d'un focus és constant, el contrast en vers l'entorn es manté també constant. Això significa que l'ull s'adapta a les condicions actuals de lluminositat, donant lloc a una possible pèrdua d'atenció per part de l'usuari. La llum polsada és, per naturalesa, un interval d'emissions de llum amb un cert període. Per tant, l'interval del focus de llum amb l'entorn canvia dràsticament, cridant l'atenció de l'espectador.

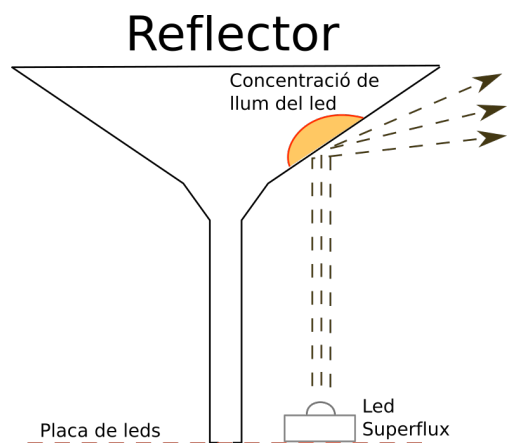
Aquest fenomen és usat en el projecte com a avantatge visual de les balises que hem dissenyat. En els diferents modes que hem implementat, és en el mode nit que la llum polsada és posada en gran contrast amb l'entorn. El mode boire resulta ser el pitjor cas, ja que l'entorn interfereix amb el contrast de la llum polsada. És per aquest motiu que en el mode boire la llum triga ~60ms (el doble que el mode nit) i s'encenen els 4 canals, repetidament dues vegades. El cas de l'interval del pols en el mode Boira és excepcional perquè l'entorn afecta a la llum i es va decidir doblar el temps d'encesa per estar segurs de que tot i la refracció de la boira es veurà bé.

En el cas de l'interval del pols que s'ha triat ha hagut de ser superior a 20ms, ja que l'interval mínim que té l'ull humà per poder diferenciar un canvi en la llum és de 50Hz. Per tant, s'ha triat 32ms perquè és el temps mínim que la llum pot emetre la màxima radiació i que l'ull humà pugui captar amb major intensitat.

Optimització del diagrama d'irradiació de la llum

En el cas dels leds, tal i com s'ha dit anteriorment, la llum resulta ser molt directiva. Un dels reptes de disseny que hi ha hagut en el projecte ha sigut el com poder fer que la llum del led vertical fos visible des de qualsevol punt de vista horitzontal. Això es va aconseguir gràcies a un reflector que era una peça dissenyada de plàstic cromada

col·locada en el forat de la placa de leds que feia que la directivitat dels leds es repartís al voltant de la peça circular. La distància a la que els leds s'han ficat és crític per obtenir el màxim reflex en el conus cromat per poder copsar tota la il·luminació dels Leds.



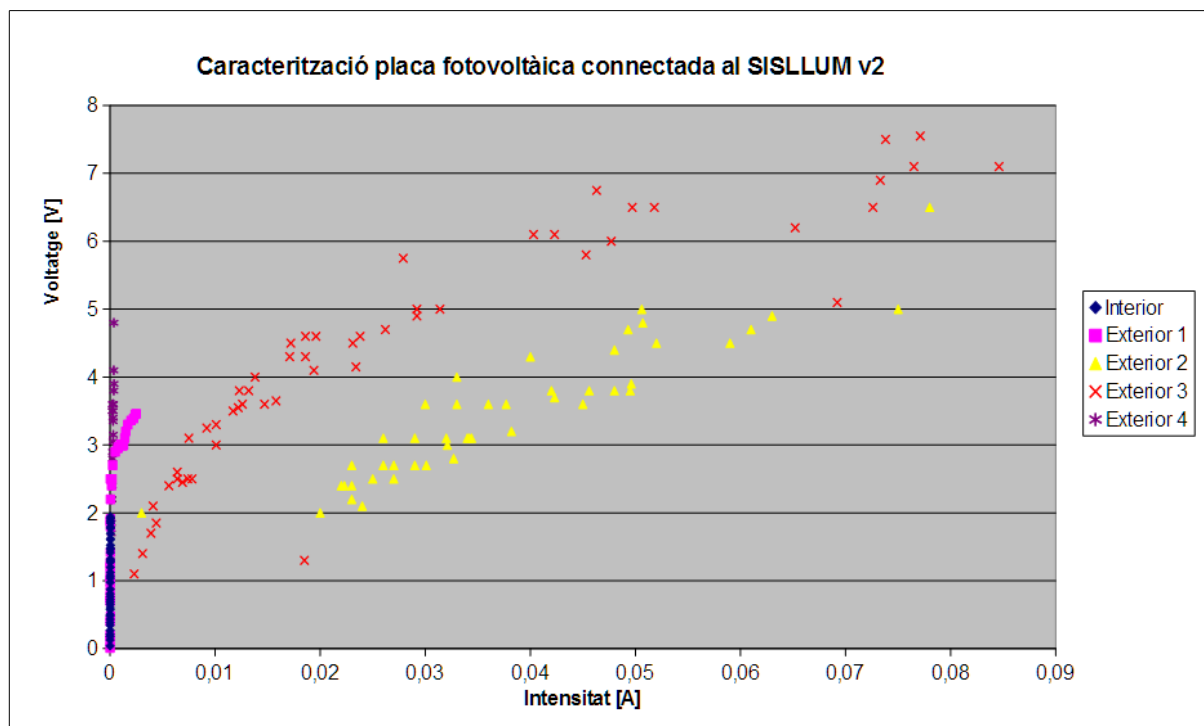
Il·lustració 18: Reflector del Sisllum

6. Resultats, conclusions i futures millores

Descripció de les proves realitzades al sistema i resultats obtinguts

Proves de lluminositat

Atesa la col·locació de la placa, es comprova que l'eficiència d'aquesta sempre serà aproximadament el 50% del seu total, lleugerament empobrida per la transparència del plàstic emprat en el cos del SisLlum i per l'angle d'incidència dels rajos solars, que en aquest darrer cas queden compensats perquè en les latituds i en les èpoques en les que aquest angle azimutal és més elevat, hi ha més hores de sol. Tanmateix, les mesures de corrent de la placa fotovoltaica s'han mesurat en diferents escenaris, i el resultat en exteriors ha sigut força òptim per el sistema de càrrega de bateries. En la figura 19 es pot veure que la placa pot proporcionar en ambient exterior (3 i 4) amb sol directe aproximadament fins a 80mA en les millors condicions i al voltant de 25 i 40mA entre els valors mitjos de corrent mesurats. Això només passa quan el SisLlum està exposat a la llum directe del sol, veiem que si es fica a l'ombra o en altres ambients a on la intensitat lluminosa és molt baixa, també la corrent és molt baixa. En els annexes es presenten les gràfiques per separat d'aquestes proves.



Il·lustració 19: Mesures de corrent de la placa fotovoltaica en el SisLlum

La prova es va realitzar amb un equip muntat en diferents escenaris a ple dia.

Interior: il·luminació amb làmpara fluorescent, canviant la distància amb l'equip.

Exterior 1: dia nuvolat amb mesures en zones amb visió del sol i sense.

Exterior 2: dia amb intervals de núvols, mesures en zones amb visió del sol.

Exterior 3: dia amb bastant sol, mesures en zones amb visió del sol.

Exterior 4: dia amb bastant sol, mesures en zones d'ombra.

Proves d'eficiència del sistema de càrrega fotovoltaica

La gràfica general de la càrrega de la bateria en l'equip es mostra la figura 20. L'interval de la mesura es va fer durant un mes i els resultats, si ben bé es poden considerar òptims en relació a la càrrega, depèn molt dels dies a on hi ha molta intensitat de llum.

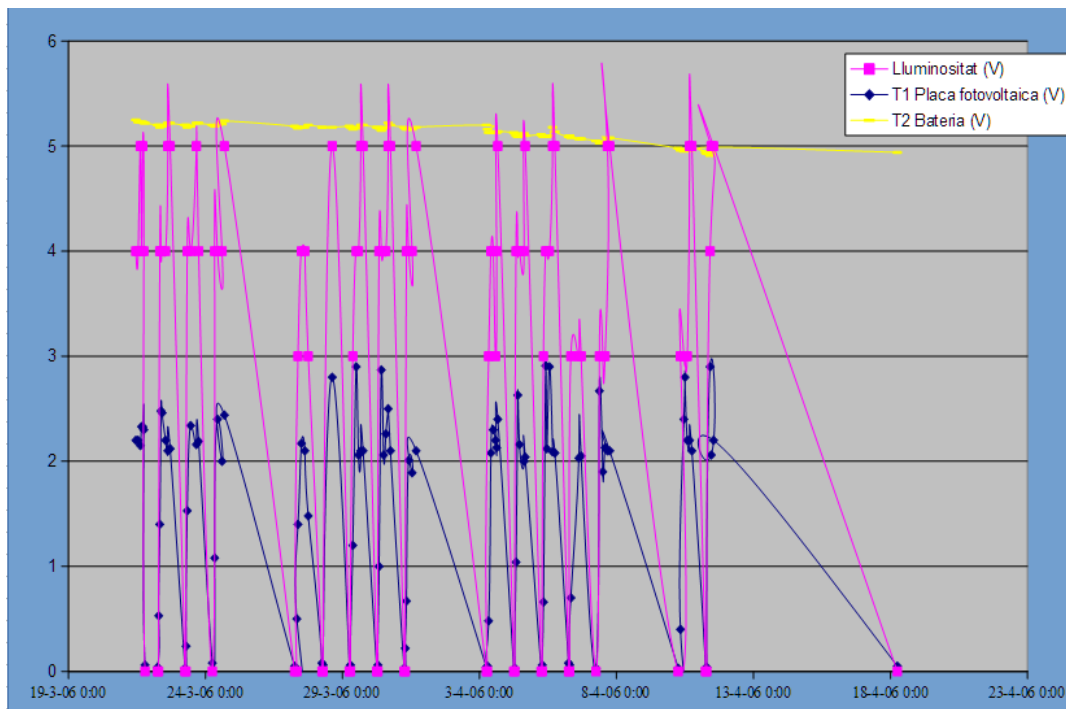


Illustration 20: Mesura real de càrrega del Sisllum (mesures puntuals)

La gràfica es pot veure que la placa solar en el moment a on la llum proporciona una tensió superior a 4,5V carrega la bateria fins a aconseguir un estat de manteniment energètic. La placa fotovoltaica proporciona energia per que la bateria es carregui:

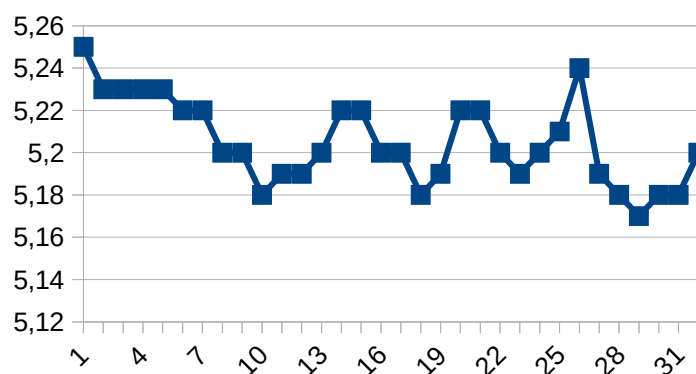


Illustration 21: Zona inicial de càrrega (mesures puntuals)

Quan el SisLlum rep el sol directe (en relació amb la il·lustració 20) és capaç de carregar prou la bateria, però es demostra que la dependència energètica vers la llum és fonamental.

Conclusions

Al començament del projecte, teniem uns requeriments que el client ens va especificar i que ara especificarem les conclusions obtingudes punt per punt:

1. El disseny no ha canviat i s'ha mantingut la principal premisa d'anar alimentat amb una cèl·lula solar.
2. La cèl·lula que hem triat té les mateixes característiques que amb la que el client va fer les primeres proves del sistema.
3. L'equip es pot considerar infinit, mentre que hi hagi prou període de càrrega solar: les bateries romandran en un estat òptim fins que s'esgoti el cicle de vida.
4. Hem complert les especificacions del client en l'estanqueïtat del producte. Al estat totalment a dins de la camisa, enroscat amb el caputxó mitjançant arandel·les de goma, aconseguim una protecció de IP67.
5. Ho aconseguim amb tots els components menys amb el cristall, que té un rang òptim de temperatura fins als 60°C. Tanmateix, el cristall que s'ha triat és òptim per preu i ens arriquem a tindre temperatures superiors a aquesta assolint la inestabilitat que podem tindre (en un orde de 100ppm amb temperatures superiors a 75°C).
6. Gràcies al reflector i a l'emplaçament dels leds al voltant de tot el radi, aconseguim l'efecte visual de 360° col·locat verticalment.
7. La placa s'ha dissenyat per adaptar-se al disseny mecànic. L'amplada de la placa de 30mm, junt amb el connector de programació encaixa perfectament al disseny que el client tenia.
8. El parpadeig en condicions normals si que assoleix la visualització de 100 metres, però en casos de boira es deixa al client, ja que aquest cas d'ús pot variar depenent de la intensitat de la boira.
9. S'ha implementat el botó d'encesa i apagada just per assolir el requeriment de desconexió de l'equip.
10. El parpadeig, gràcies a l'interval del cristall intern assoleix un temps de ~32ms encès, i en casos especials s'incrementa al doble del període.
11. El led superflux tipus «piranha» que hem triat pot tindre diferents colors en cas de voler usar el SisLlum per altres aplicacions. Veure Annex.
12. El requeriment del cost de l'electrònica s'ha aconseguit, tot i ser bastant just en 30€ (placa base i placa de leds muntada) amb els components passius comprats a un proveïdor de components genèric.

Tal i com hem vist en els punts anteriors, tots els requeriments del client s'han assolit. El SisLlum té unes prestacions satisfactòries per el client.

Millors del sistema de cara al futur

Introducció de la comunicació sense fils (control remot, selecció de mode i sincronització)

La balisa lluminosa és totalment autònoma, però això fa que cadascun tingui un parpadeig aleatori entre ells. Una millora bastant sorprenent seria dotar-los d'una comunicació sense fils i els equips podrien ser configurats remotament en el mode que es requereixi, o es podria definir remotament els nivells de detecció, o fins i tot, els mateixos equips es podrien comunicar entre ells per fer esteles de llum a la vegada transmetent un paquet entre ells.

- Programació completa del firmware per IrDA

Actualment el SisLlum desenvolupat s'ha de programar obrint l'equip, i això és una tasca feixuga veure «programació del sisllum». Una millora important seria implementar un transceptor IrDA per poder-lo programar remotament, sense tindre que obrir l'equip. Tot i que suposa una avantatge molt important, també té inconvenients: la comunicació IrDA tendeix a consumir bastant, i ens hem d'assegurar que l'equip estigués en un estat de prou càrrega per poder fer-ho. A la vegada, també s'incrementaria el cost del producte, tot i que es simplificaria bastant el cost de desmuntar l'equip.

- Versatilitat de colors de la placa de leds

La placa de leds que teniem implementada en aquell moment, responia als estàndard leds «piranha» en format 4-DIP, i cadascun tenia colors definits per a cada model. Avui dia és possible trobar leds en el mateix format amb la possibilitat de poder polaritzar els diferents pins i obtenir els colors bàsics vermell, verd i blau (RGB). Barrejant-los entre ells mitjançant polsos modulats es podria arribar a obtenir una àmplia gamma de colors. Per fer-ho, es necessitaria redissenyar la placa de leds i definir els canals que usem ara mateix per aquest propòsit.

Introducció de sensors al sistema

- Disparadors

Es podria arribar a implementar diferents sensors que millorarien i obririen un gran ventall de possibilitats al sistema. Tot i sent present que el cost augmentaria bastant més (i era una restricció bastant important en el projecte) i energèticament es tindria que tornar a calcular, diferents sensors en el sistema amb efecte disparador seria una avantatge important: el microcontrolador podria quedar adormit contínuament esperant un canvi d'algun dels seus pins connectats a diferents sensors.

En el sistema que hi ha actualment en el Sisllum per detectar la boira es fa amb un nivell d'intensitat de llum específica i en molts casos pot ser insuficient. La detecció de boira ideal és possible si afegim al nostre sistema un sensor de temperatura i un altre d'humitat (o al-hora, si triem un SHT2x).

Anteriorment ja s'ha dit que existeix un repte al-hora de que el producte final quedi totalment estanc si es fica qualsevol sensor d'aquestes característiques en el disseny actual, que quedaria com a un nou repte mecànic a solucionar.

Millora de la eficiència energètica

- Cèl·lules solar monocristal·lines

Una de les millores en el hardware que es pot arribar a fer és utilitzar cèl·lules solars monocristal·lines en ves de la placa amorfa que tenim ara. Tenint en compte que l'eficiència teòrica que tenim amb una placa amorfa és molt inferior a la monocristal·lina (d'ordre d'un 7% menys) podríem arribar a adquirir molta més energia i assegurar-nos que el sistema es podria carregar molt millor en dies nuvolats o casos de boira.

- Bateries basades en Liti3

Anteriorment s'ha explicat perquè s'ha triat bateries de NiMh en el sistema. Tanmateix, una millora bastant més efectiva seria usar bateries basades en Liti.

Avui dia aquestes bateries són emprades per quasi qualsevol equip portàtil, i s'ha reduït bastant es cost de producció. De les diferències principals que hi han és que en principi el Liti no té efecte memòria i la càrrega intermitja i es mantindria constant sense perdre capacitat de càrrega, allargant el temps de funcionament. A part, les bateries basades en Liti tenen la mateixa capacitat que les Ni-Mh amb un pes i mida molt inferior i possibilitat de fer un «paquet» ajustat a la camisa del producte.

Implementació d'una WSN sobre el sistema

Havent parlat ja de comunicació sense fils, altres sensors amb capacitat de detectar altres condicions en el medi, possibles millores en el disseny de la cèl·lula solar i liti, perquè no ho juntem tot i formem una xarxa de sensors intel·ligent?

Actualment, les xarxes de sensors (wireless sensor networks) és una tecnologia emergent avui dia. Nombroses xarxes es poden trobar avui dia recaptant un munt de dades sobre l'entorn i enviant-les a servidors. En el nostre cas, degut a que el nostre sistema és autònom es podria arribar a implementar una xarxa d'aquestes característiques convertint el Sisllum en un node que enviés directament les dades del seu estat i del que mesura a través d'un encaminador a internet.

7. Apèndix

7.1 Llista de components (BOM)

PLACA BASE						
Designator	Value	Description	Manufacturer	Distributor	OrderCode	Price
BAT		Header, 2-Pin	Generic Components			
C1,1	22pF	Chip capacitor, 0603, C0G, 50V	Murata	RS Amidata	204-0511	0,03
C1,2	22pF	Chip capacitor, 0603, C0G, 50V	Murata	RS Amidata	204-0511	0,03
C1,3	100nF	Chip capacitor, 0603, X7R, 16V, 10%, RoHS	Murata	RS Amidata	220-7922	0,06
C4,1	220uF	EEVFK1C221XP Polarized Capacitor (Surface M	Panasonic	RS Amidata	433-9908	0,71
C4,2	68uF	TAJC686K010R Polarized Capacitor (Surface M	AVX	RS Amidata	464-8044	0,88
C4,3	2,2uF	GRM40Y5V225Z16U539 Chip capacitor, 0805, Y	Murata	RS Amidata	312-3156	0,11
C4,4	Non-mounted	Chip capacitor, 0603, C0G, 50V	Murata	RS Amidata		
Ctrl		Header, 2-Pin, Dual row, Right Angle, 2,54 pitch	Generic Components	RS Amidata	472-966	0,37
D4,1		MBRS320 Schottky Rectifier	International Rectifier	RS Amidata	469-0815	0,31
D4,2		MRA4003 1,0 Ampere General Purpose Rectifier	ON Semiconductor	RS Amidata	419-1368	0,14
EUSART		Header, 3-Pin	Generic Components	RS Amidata	251-8092	0,08
ICSP		95001-2661 Right Angle, Low Profile, Flangeles	Molex	RS Amidata	240-0929	1,38
IO		Header, 5-Pin	Generic Components	RS Amidata	251-8121	0,13
L4,1	4,7uH	LQH3C4R7M34 LQH3C SMD Inductor 1210	Murata	RS Amidata	469-2782	0,41
MCU		PIC16F689 20-pin, Flash-Based, 8-Bit CMOS Micr	Microchip	Sagitron		1,77
PJ		Header, 2-Pin	JST	RS Amidata	515-1383	0,124
PP		Header, 2-Pin	JST	RS Amidata	515-1383	0,124
Pwr		Header, 2-Pin, Dual row, Right Angle, 2,54 pitch	Generic Components	RS Amidata	472-966	0,37
Q2,1		MMBT3904LT1 General Purpose Transistor NPN	Motorola	RS Amidata	348-4748	0,06
Q2,2		MMBT3904LT1 General Purpose Transistor NPN	Motorola	RS Amidata	348-4748	0,06
Q2,3		MMBT3904LT1 General Purpose Transistor NPN	Motorola	RS Amidata	348-4748	0,06
Q2,4		MMBT3904LT1 General Purpose Transistor NPN	Motorola	RS Amidata	348-4748	0,06
R1,1	10k	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 5%	Multicomp	Farnell	933-1700	0,029
R1,2	330k	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 5%	Multicomp	Farnell	933-2057	0,029
R1,3	10k	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 5%	Multicomp	Farnell	933-1700	0,029
R1,4	30k	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 5%	Multicomp	Farnell	933-1700	0,029
R2,1	560R	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 5%	Multicomp	Farnell	933-2200	0,029
R2,2	560R	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 5%	Multicomp	Farnell	933-2200	0,029
R2,3	560R	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 5%	Multicomp	Farnell	933-2200	0,029
R2,4	560R	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 5%	Multicomp	Farnell	933-2200	0,029
R3,1	3k3	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 5%	Multicomp	Farnell	933-2022	0,029
R4,1	560k	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 1%	Multicomp	Farnell	933-1379	0,032
R4,2	100k	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 1%	Multicomp	Farnell	933-0402	0,032
R4,3	150k	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 1%	Multicomp	Farnell	933-0623	0,032
R4,4	820k	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 1%	Multicomp	Farnell	933-1581	0,032
R4,5	43k	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 1%	Multicomp	Farnell	933-1204	0,032
R4,6	47k	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 1%	Multicomp	Farnell	933-1255	0,032
R4,7	1M	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 1%	Multicomp	Farnell	933-0410	0,032
R4,8	100k	Chip Resistor, 0603, RoHS, 63mW, 1%	Multicomp	Farnell	933-0402	0,032
Rlim	39R	Carbon Resistor, 0,33W, 5%, body 6,4mm	Neohm	RS Amidata	131-081	0,03
SPI/I2C	Non-mounted	Header, 5-Pin	Generic Components	RS Amidata	251-8121	0,13
SW		Header, 2-Pin	JST	RS Amidata	515-1383	0,124
U3,1		TL431CD Adjustable Precision Shunt Regulator	Texas Instruments	RS Amidata	857-979	0,28
U4,1		LM2623MM General Purpose, Gated Oscillator B	National Semiconduct	RS Amidata	471-7601	1,82
U4,2		MAX931ESA Ultra Low-Power, Low-Cost Compar	Maxim	RS Amidata	379-1709	2,7
XTAL		Crystal Oscillator, 3x8mm, cilindrical	CMAC Frequency Prod	RS Amidata	226-1443	0,32
PLACA BASE		RF4, 30x116mm, 1,6mm, white, silk white, 100u	2CI	Unitary Price		4,05
Mounting		Price aprox.	Onaur			1,5
					TOTAL	18,739

PLACA DE LEDS

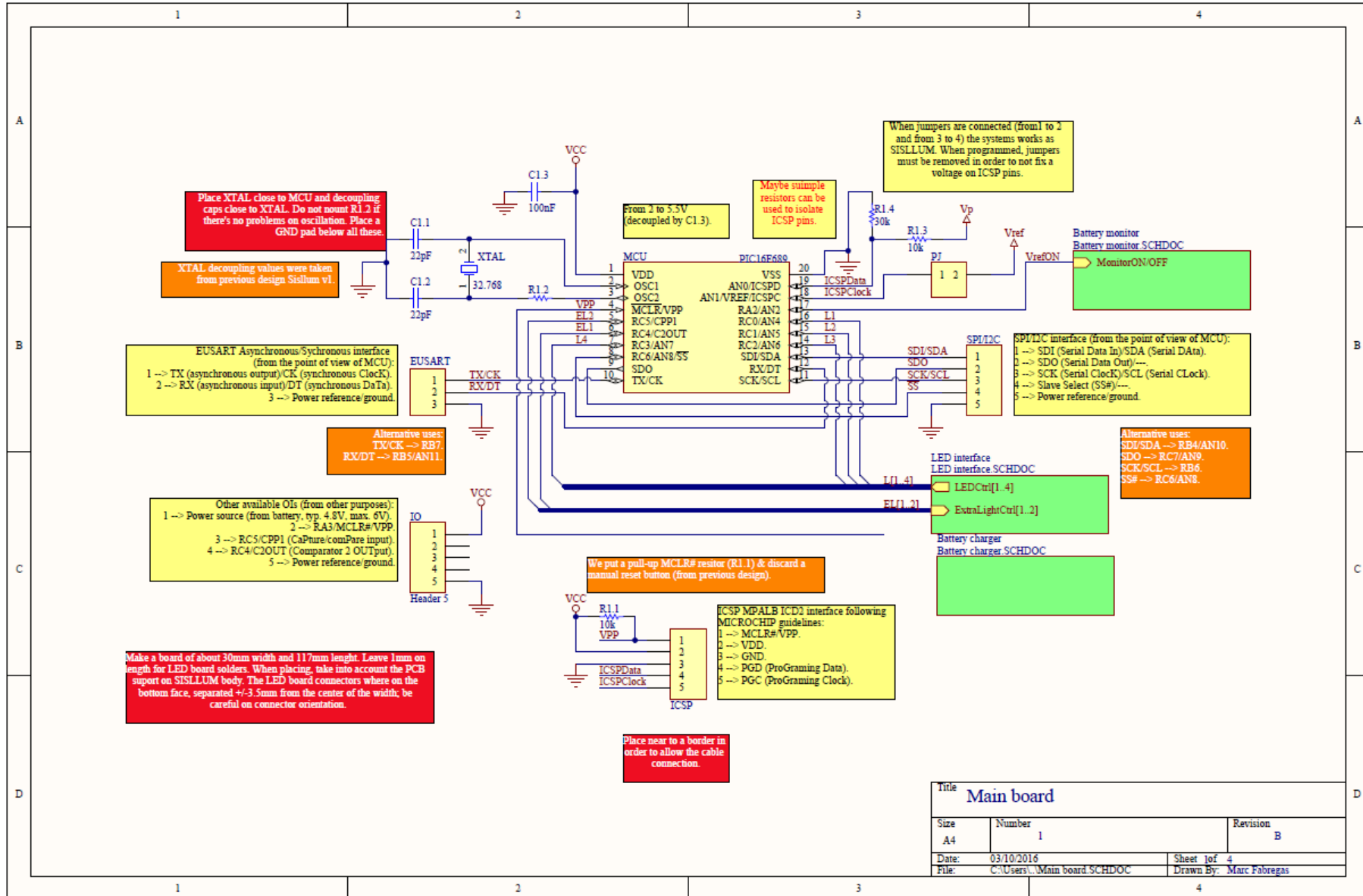
Designator	Value	Description	Manufacturer	Distributor	OrderCode	Price
Ctrl		Header, 2-Pin, Dual row, 2,54 pitch	Generic Components	RS Amidata	251-8216	0,51
DSY11		LT6V33-AH-UC9T Superflux LED	Ledtech	Monolithic		0,31
DSY12		LT6V33-AH-UC9T Superflux LED	Ledtech	Monolithic		0,31
DSY21		LT6V33-AH-UC9T Superflux LED	Ledtech	Monolithic		0,31
DSY22		LT6V33-AH-UC9T Superflux LED	Ledtech	Monolithic		0,31
DSY31		LT6V33-AH-UC9T Superflux LED	Ledtech	Monolithic		0,31
DSY32		LT6V33-AH-UC9T Superflux LED	Ledtech	Monolithic		0,31
DSY41		LT6V33-AH-UC9T Superflux LED	Ledtech	Monolithic		0,31
DSY42		LT6V33-AH-UC9T Superflux LED	Ledtech	Monolithic		0,31
Pwr		Header, 2-Pin, Dual row, 2,54 pitch	Generic Components	RS Amidata	251-8216	0,51
RY1	10R	Chip Resistor 0603	Multicomp	Farnell	933-0429	0,032
RY2	10R	Chip Resistor 0603	Multicomp	Farnell	933-0429	0,032
RY3	10R	Chip Resistor 0603	Multicomp	Farnell	933-0429	0,032
RY4	10R	Chip Resistor 0603	Multicomp	Farnell	933-0429	0,032
PLACA LEDS		RF4, 46,5x46,5mm, 1,6mm, white, silk white	2CI	Unitary Price		3,52
Mounting						1,5
TOTAL						8,616

Amb tot, el cost de l'electrònica gira al voltant de 27€

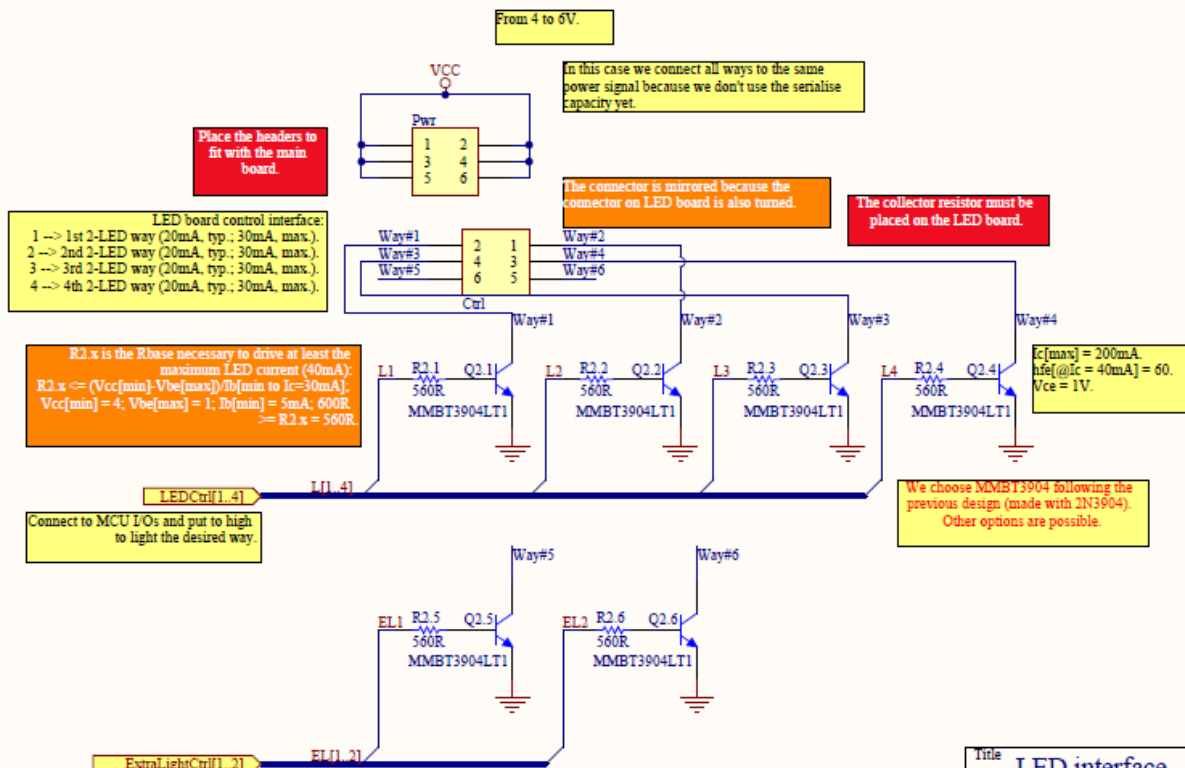
Nota: Segons el requeriment del client de tindre diferents possibilitats de color, s'han trobat els següents models de leds tipus 4-DIP per diferents aplicacions d'altres fabricants sense entrar en altres colors de leds que la pròpia família proporciona:

Color	Component	Fabricant	Preu (100u)
Blau	VLWB9600	Vishay	0,59
Blanc	CP41B-WES-CL0P0134	Cree	0,29
Verd	OVFSG7C8	TT Electronics / Optek Technology	0,39

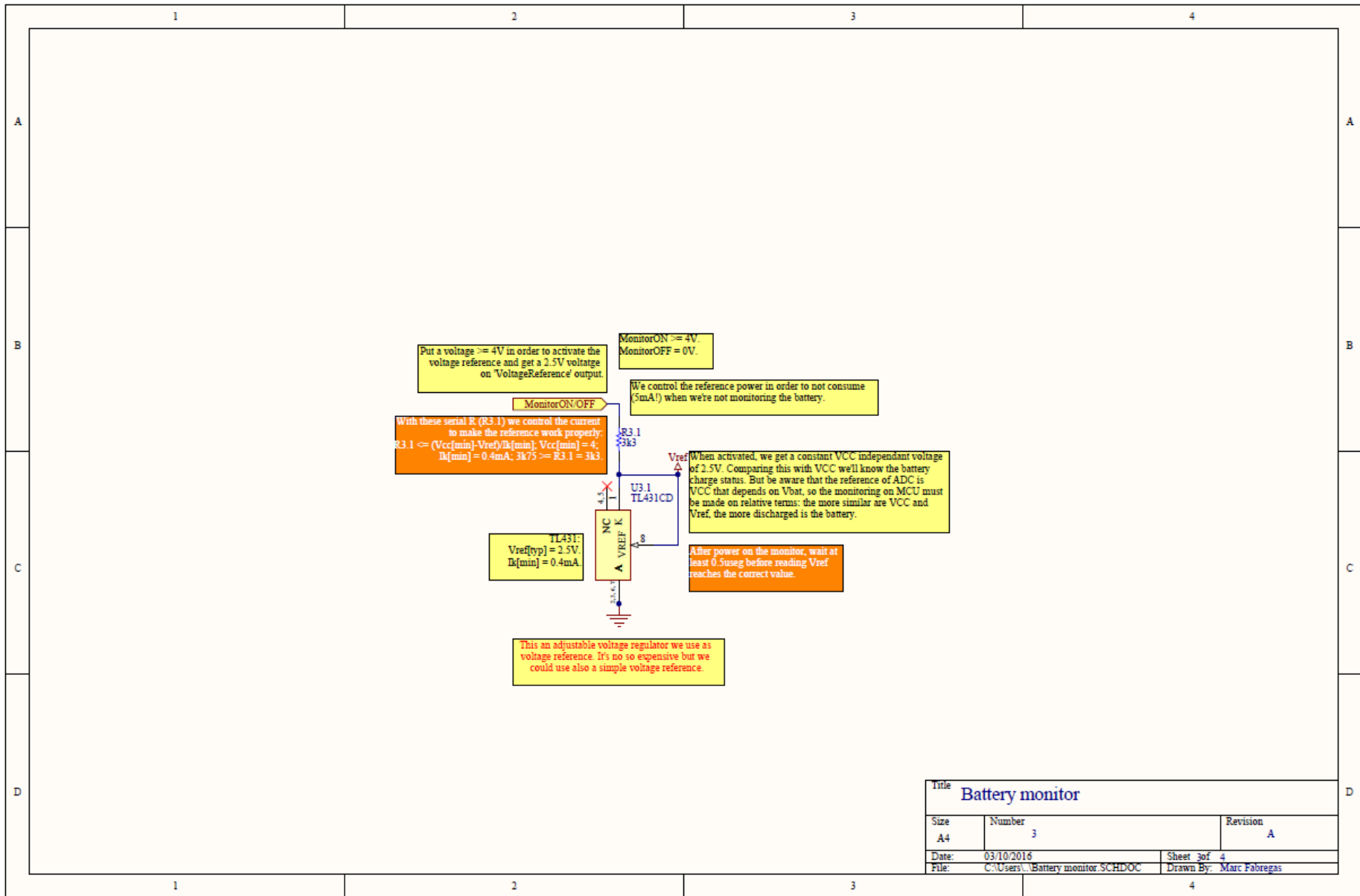
7.2 Esquemàtics v2



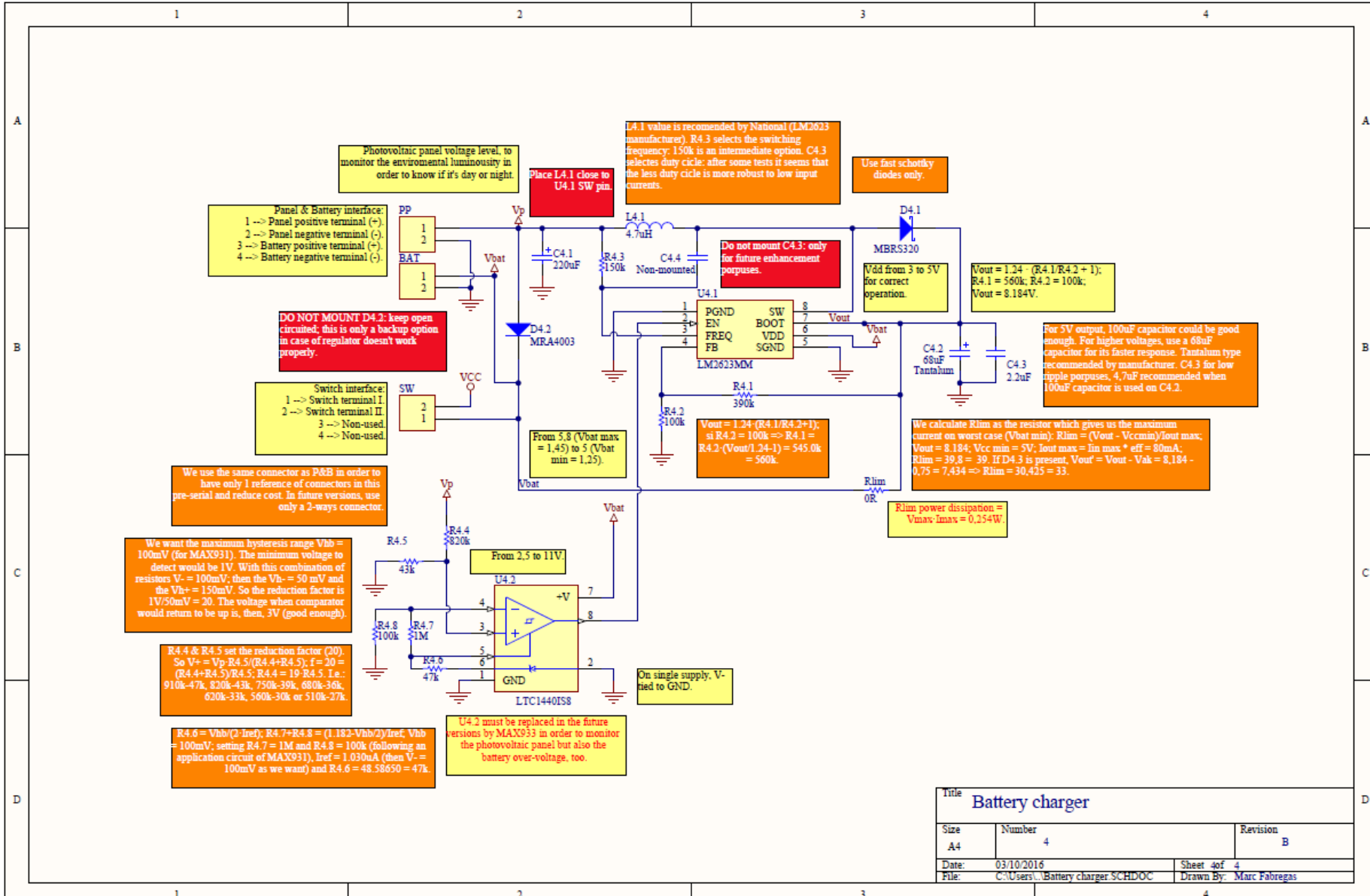
Title		
Main board		
Size	Number	Revision
A4	1	B
Date:	03/10/2016	Sheet of 4
File:	C:\Users\...Main board SCHDO	Drawn By: Marc Fabregas



Title LED interface		
Size A4	Number 2	Revision A
Date: 03/10/2016	Sheet 2 of 4	
File: C:\Users\... \LED interface.SCHDOC	Drawn By: Marc Fabregas	



Title		
Battery monitor		
Size	Number	Revision
A4	3	A
Date:	03/10/2016	Sheet 3 of 4
File:	C:\Users\...Battery monitor.SCHDOC	Drawn By: Marc Fabregas



Photovoltaic panel voltage level, to monitor the environmental luminosity in order to know if it's day or night.

Panel & Battery interface:
 1 --> Panel positive terminal (+)
 2 --> Panel negative terminal (-)
 3 --> Battery positive terminal (+)
 4 --> Battery negative terminal (-)

DO NOT MOUNT D4.2: keep open circuited; this is only a backup option in case of regulator doesn't work properly.

Switch interface:
 1 --> Switch terminal I
 2 --> Switch terminal II
 3 --> Non-used
 4 --> Non-used.

We use the same connector as P&B in order to have only 1 reference of connectors in this pre-serial and reduce cost. In future versions, use only a 2-ways connector.

We want the maximum hysteresis range $V_{hb} = 100mV$ (for MAX931). The minimum voltage to detect would be 1V. With this combination of resistors $V = 100mV$; then the $V_{h-} = 50 mV$ and the $V_{h+} = 150mV$. So the reduction factor is $1V/50mV = 20$. The voltage when comparator would return to be up is, then, 3V (good enough).

R4.4 & R4.5 set the reduction factor (20). So $V = V_p \cdot R4.5 / (R4.4 + R4.5)$; $f = 20 = (R4.4 + R4.5) / R4.5$; $R4.4 = 19 \cdot R4.5$. I.e.: 910k-47k, 820k-43k, 750k-39k, 680k-36k, 620k-33k, 560k-30k or 510k-27k.

$R4.6 = V_{hb} / (2 \cdot I_{ref})$; $R4.7 + R4.8 = (1.182 \cdot V_{hb} / 2) / I_{ref}$; $V_{hb} = 100mV$; setting $R4.7 = 1M$ and $R4.8 = 100k$ (following an application circuit of MAX931); $I_{ref} = 1.030uA$ (then $V = 100mV$ as we want) and $R4.6 = 48.58650 = 47k$.

U4.2 must be replaced in the future versions by MAX933 in order to monitor the photovoltaic panel but also the battery over-voltage, too.

L4.1 value is recommended by National (LM2623 manufacturer). R4.3 selects the switching frequency: 150k is an intermediate option. C4.3 selects duty cycle: after some tests it seems that the less duty cycle is more robust to low input currents.

Place L4.1 close to U4.1 SW pin.

Use fast schottky diodes only.

Do not mount C4.3: only for future enhancement purposes.

V_{dd} from 3 to 5V for correct operation.

$V_{out} = 1.24 \cdot (R4.1 / R4.2 + 1)$;
 R4.1 = 560k; R4.2 = 100k;
 V_{out} = 8.184V.

For 5V output, 100nF capacitor could be good enough. For higher voltages, use a 68nF capacitor for its faster response. Tantalum type recommended by manufacturer. C4.3 for low ripple purposes, 4.7nF recommended when 100nF capacitor is used on C4.2.

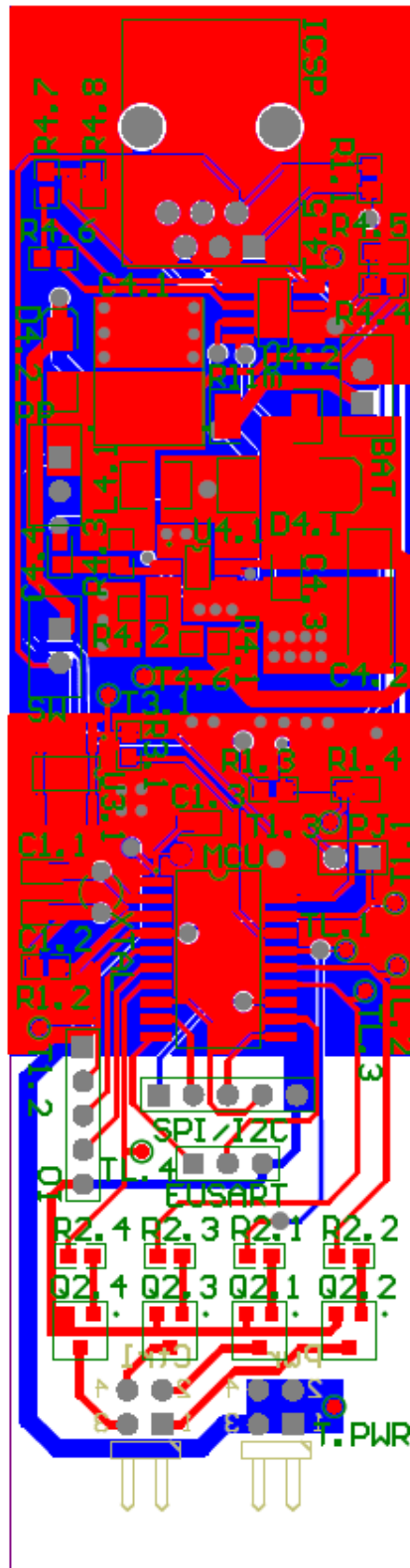
$V_{out} = 1.24 \cdot (R4.1 / R4.2 + 1)$;
 si $R4.2 = 100k \Rightarrow R4.1 =$
 $R4.2 \cdot (V_{out} / 1.24 - 1) = 545.0k$
 $= 560k$

We calculate R_{lim} as the resistor which gives us the maximum current on worst case (V_{bat} min): $R_{lim} = (V_{out} - V_{ccmin}) / I_{out\ max}$;
 $V_{out} = 8.184$; $V_{cc\ min} = 5V$; $I_{out\ max} = I_{in\ max} \cdot \text{eff} = 80mA$;
 $R_{lim} = 39.8 = 39$. If D4.3 is present, $V_{out}' = V_{out} - V_{ak} = 8.184 - 0.75 = 7.434 \Rightarrow R_{lim} = 30.425 = 33$.

R_{lim} power dissipation = $V_{max} \cdot I_{max} = 0.254W$.

On single supply, V₋ tied to GND.

Title		
Battery charger		
Size	Number	Revision
A4	4	B
Date:	03/10/2016	Sheet 4 of 4
File:	C:\Users\... \Battery charger SCHDOC	Drawn By: Marc Fabregas



7.3 Firmware base: mode nit

```
*****
;
; Filename: Nit.asm *
; Date: 09/10/2005 *
; File Version: 1.0 *
; Author: Marc Fabregas *
; Company: ADVANCARE, SL *
;
; Files required: none *
;
; Notes: This is the first version of assembler code for *
; SISLLUM application on "Nit" user mode. *
;
*****

list      p=16f689      ; list directive to define processor
#include   <P16F689.inc> ; processor specific variable definitions

; Variable definitions -----
w_temp      EQU 0x71      ; variable used for context saving
status_temp EQU 0x72      ; variable used for context saving
pclath_temp EQU 0x73      ; variable used for context saving

loop_temp   EQU 0x74      ; variable used for loops
loop_temp2  EQU 0x75      ; alternative variable used for loops

ADC_result  EQU 0x76      ; to store the result of ADC_low
ADC_voltageH EQU 0x77      ; to store the high bits result of battery monitor
ADC_voltageL EQU 0x78      ; to store the low bits result of battery monitor

blink_tmr   EQU 0x79      ; to store 1sec counter
event_tmr   EQU 0x7a      ; waiting for event timer counter

led_status  EQU 0x60      ; as it says: led status register
hysteresis  EQU 0x61
zone        EQU 0x62      ; light zone: dark, light or intermedium

aux         EQU 0x63      ; auxiliar variable

; Constants -----
CONSTANT    VDARK    = b'00100000'      ; To be set in special for each system
CONSTANT    VLIGHT   = b'01000110'      ; 0.5V aprox @5.5V divided by 3/4 factor of A/D front-end adapter

CONSTANT    LOW_VOLTAGE_H = b'00000010'
CONSTANT    LOW_VOLTAGE_L = b'00111001' ; 2.5V aprox @4.5V of Vbat

CONSTANT    PERIOD_6SEC = d'200'        ; Waiting period for change status

; Interrupts service routines -----
ORG         0x000          ; processor reset vector
GOTO        main          ; go to beginning of program

ORG         0x004          ; interrupt vector location
MOVWF       w_temp        ; save off current W register contents
MOVF        STATUS,W      ; move status register into W register
MOVWF       status_temp   ; save off contents of STATUS register
MOVF        PCLATH,W      ; move pclath register into W register
MOVWF       pclath_temp   ; save off contents of PCLATH register

CALL        isr_timer0    ; Call IS subrutine located below

MOVF        pclath_temp,W ; retrieve copy of PCLATH register
MOVWF       PCLATH        ; restore pre-isr PCLATH register contents
MOVF        status_temp,W ; retrieve copy of STATUS register
MOVWF       STATUS        ; restore pre-isr STATUS register contents
```

```

SWAPF    w_temp,F
SWAPF    w_temp,W           ; restore pre-isr W register contents
RETFIE                                       ; return from interrupt

; Main function -----
main
    BCF   STATUS,RP0
    BCF   STATUS,RP1           ; Bank 0

    CLRF  PORTA               ; Init PORTA
    CLRF  PORTB               ; Init PORTB
    CLRF  PORTC               ; Init PORTC

    BSF   STATUS,RP0
    BCF   STATUS,RP1           ; Bank 1
    MOVLW 0x3b                 ; RA2 as digital output (battery monitor ON) ...
    MOVWF TRISA                ; ... the rest as inputs
    MOVLW 0xff
    MOVWF TRISB                ; All PORTB as input
    MOVLW 0xf0                 ; RC0:3 as outputs (LED drivers) ...
    MOVWF TRISC                ; ... the rest as inputs

    MOVLW b'00000000'         ; AD clock source = Fosc/2
    MOVWF ADCON1
    BSF   STATUS,RP1           ; Bank 2
    CLRF  ANSEL                ; Init A/D port selection
    MOVLW 0x03                 ; AN0(RA0) and AN1(RA1) as A/D inputs ...
    MOVWF ANSEL                ; ... the rest as I/O port
    BCF   STATUS,RP1
    BCF   STATUS,RP0           ; Bank 0

    BSF   PORTC,0x0           ; Blink LED way #1, for test purposes
    CALL DelayBlink           ; A little delay;
    BCF   PORTC,0x0
    BSF   PORTC,0x1           ; Blink LED way #2, for test purposes
    CALL DelayBlink           ; A little delay;
    BCF   PORTC,0x1
    BSF   PORTC,0x2           ; Blink LED way #3, for test purposes
    CALL DelayBlink           ; A little delay;
    BCF   PORTC,0x2
    BSF   PORTC,0x3           ; Blink LED way #4, for test purposes
    CALL DelayBlink           ; A little delay;
    BCF   PORTC,0x3

    MOVLW 0x3
    MOVWF zone                 ; Init on zone 3: light
    MOVLW PERIOD_6SEC
    MOVWF event_tmr
    DECF  event_tmr,F         ; Init event_tmr to PERIOD_6SEC in order to make the first system check at start
    CLRF  led_status
    CLRF  hysteresis

    CLRWDT                     ; Clear watchdog
    CLRF  TMR0                 ; Clear Timer 0 and prescaler
    BSF   STATUS,RP0           ; Bank 1
    MOVLW b'00001000'         ; No prescaler on TMR 0 (interrupt every 30ms, aprox); prescaler assigned to
WDT
    MOVWF OPTION_REG
    BCF   STATUS,RP0           ; Bank 0

    BSF   INTCON,T0IE         ; Enable Timer 0 (8 bits)
    BSF   INTCON,GIE         ; Enable global interrupts

infinite_loop
    GOTO  infinite_loop       ; while(1)
    RETURN

```

```

; DelayBlink: little delay of initial blinking -----
DelayBlink
    MOVLW    0xff
    MOVWF    loop_temp
    MOVLW    0x03                ; 255 x 3 => 765·2·Tc = 0.233sec (Tc = 5/32768)
    MOVWF    loop_temp2
delay_next_loop
    DECFSZ   loop_temp,0x1
    GOTO     delay_next_loop
    DECFSZ   loop_temp2,0x1
    GOTO     delay_next_loop
    RETURN

; DelayAD: the required delay for AD conversion (2·Tosc @
;          32.768kHz --> <1.6usec) -----
DelayAD
    MOVLW    0x14                ; wait for 20 Tclk (aprox 10ms) for security
    MOVWF    loop_temp
delayAD_next_loop
    DECFSZ   loop_temp,0x1
    GOTO     delayAD_next_loop
    RETURN

; readZone: measure the panel voltage to know if it's light or
;           dark -----
readZone
    BCF      STATUS,RP0
    BCF      STATUS,RP1        ; Bank 0
    MOVLW    b'10000001'      ; Right justified, VDD ref & ch 0
    MOVWF    ADCON0
    CALL     DelayAD
    BSF      ADCON0,GO        ; Start conversion
    BCF      STATUS,RP1        ; (?)
    BTFSC    ADCON0,GO        ; Poll for conversion ending
    GOTO     $-1              ; Poll again if not
    MOVF     ADRESH,W
    MOVWF    aux                ; Put higher 2 bits on an auxiliar variable
    BSF      STATUS,RP0        ; Bank 1
    MOVF     ADRESL,0x0        ; Read lower 8 bits of the result (most significant in this case)
    BCF      STATUS,RP0        ; Bank 0
    MOVWF    ADC_result        ; Store on temp variable
    BCF      ADCON0,ADON       ; Stop AD converter

    MOVF     aux,F              ; If ADRESH!=0, there's zone 3
    BTFSS    STATUS,Z
    GOTO     readZone_zone3

    MOVLW    VLIGHT
    SUBWF    ADC_result,0x0     ; ADC_result - VLIGHT
    BTFSS    STATUS,C          ; If ADC_result>=VLIGHT there's no borrow
    GOTO     readZone_cont     ; If ADC_result<VLIGHT, check for VDARK

readZone_zone3
    MOVLW    0x3                ; ADC_result>=VLIGHT --> day: return zone 3 on W
    GOTO     readZone_end

readZone_cont
    MOVLW    VDARK
    SUBWF    ADC_result, 0x0    ; ADC - VDARK
    BTFSC    STATUS,C          ; If ADC_result<VDARK there's a borrow (0 on C bit)
    GOTO     readZone_cont2     ; If ADC_result>=VDARK, return zone 2
    MOVLW    0x1                ; ADC_result<VDARK --> night:return zone 1 on W
    GOTO     readZone_end

readZone_cont2
    MOVLW    0x2                ; else (between), return zone 2 on W
readZone_end
    RETURN

```

```

; lowVoltage: check Vref voltage (after enabling battery monitor
;                to detect low battery (because ADC result on Vref
;                checking depends on Vbat -----
lowVoltage
    BCF     STATUS,RP0
    BCF     STATUS,RP1           ; Bank 0
    MOVLW  b'10000101'         ; Right justified, VDD ref & ch 1
    MOVWF  ADCON0
    BSF     PORTA,0x2           ; Battery monitor (RA2) --> turned ON
    CALL   DelayAD             ; Wait for AD

    BSF     ADCON0,GO           ; Start conversion
    BCF     STATUS,RP1           ; (?)
    BTFSC  ADCON0,GO           ; Poll for conversion ending
    GOTO   $-1                 ; Poll again if not
    BSF     STATUS,RP0           ; Bank 1
    MOVF   ADRESL,W            ; Read lower 8 bits of the result
    BCF     STATUS,RP0           ; Bank 0
    MOVWF  ADC_voltageL        ; Store on a variable
    MOVF   ADRESH,W            ; Read higher 8 bits of the result
    MOVWF  ADC_voltageH        ; Store on other variable

    BCF     PORTA,0x3           ; Battery monitor (RA2) --- turned OFF
    BCF     ADCON0,ADON         ; Stop AD converter
    RETURN

; isr_timer0: ISR for timer0, to control blinking, time, sun
;                light and battery voltage -----
isr_timer0
    BCF     STATUS,RP1           ; Bank 0/1
    BCF     STATUS,RP0           ; Bank 0
    BTFSS  INTCON,T0IF         ; Timer0 interrupt?
    GOTO   end_isr             ; No? There's another interrupt, not used by now
    BCF     INTCON,GIE         ; Disable all interrupts during ISR
    BCF     INTCON,T0IF        ; Clear interrupt flag

    MOVLW  0x1
    ADDWF  blink_tmr,F         ; 1sec counter ++
    ADDWF  event_tmr,F         ; 6sec counter ++

    BTFSC  led_status,0x0
    GOTO   isr_cont
    MOVLW  d'32'               ; 32 isr = 1 second @ 30ms interrupt (aprox)
    SUBWF  blink_tmr,W
    BTFSS  STATUS,Z           ; if(led_status==0 && blink_tmr==16) ...
    GOTO   isr_cont
    CLRF   blink_tmr           ; Clear blinking counter
    MOVLW  0x1                 ; Check zone status
    SUBWF  zone,W
    BTFSS  STATUS,Z           ; Case zone = 1, darkness
    GOTO   case2
    BSF    led_status,0x0       ; led_status = 1
    BSF    PORTC,0x0           ; 2 LEDs turned ON
    GOTO   end_case            ; break;
case2
    MOVLW  0x2                 ; Check zone status
    SUBWF  zone,W
    BTFSS  STATUS,Z           ; Case zone = 2, medium
    GOTO   default
    BTFSC  hysteresis,0x0      ; if(hysteresis[0])
    BSF    PORTC,0x0           ; LEDs ON
    GOTO   end_case
default
    BCF    hysteresis,0x0
end_case

```



```

    GOTO    isr_cont2
isr_cont    ; else --> not (led_status==0 && blink_tmr==35)
    CLRF   led_status    ; Set led_status = 0 (LEDs OFF)
    CLRF   PORTC         ; All LEDs turned OFF
isr_cont2
    MOVLW  PERIOD_6SEC
    SUBWF  event_tmr,W   ; event_tmr - PERIOD_6SEC
    BTFSS  STATUS,C     ; If event counter >= 6sec period ...
    GOTO   isr_cont3
    CLRF   event_tmr    ; Clear event counter
    CALL   readZone     ; Call readZone subroutine
    MOVWF  zone         ; the light zone is returned on W register
    CALL   lowVoltage   ; Call the lowVoltage subroutine; the voltage is returned directly on ADC_voltage variables
    MOVLW  LOW_VOLTAGE_H
    SUBWF  ADC_voltageH,W ; ADC_volt_h - LOW_VOLTAGE_H
    BTFSS  STATUS,C     ; If ADC_volt > LOW_VOLT => the voltage is low
    GOTO   isr_cont3
    BTFSS  STATUS,Z
    GOTO   low_volt
    MOVLW  LOW_VOLTAGE_L
    SUBWF  ADC_voltageL,W ; ADC_volt_l - LOW_VOLTAGE_L
    BTFSS  STATUS,C     ; if(ADC_voltage > LOW_VOLTAGE) ...
    GOTO   isr_cont3
low_volt
    MOVLW  0x4
    MOVWF  zone         ; Clear zone (xone = 4); battery very low, so all LEDs OFF

isr_cont3
    BSF   INTCON,GIE   ; Re-enable interrupts again after ISR
end_isr
    RETURN

; Other segments -----
    ORG 0x2100         ; data EEPROM location
    DE 1,2,3,4        ; define first four EEPROM locations as 1, 2, 3, and 4

    END                ; directive 'end of program'

```

7.4 Firmware base: mode jardí

```

;*****
;
; Filename: Main.asm
; Date: 15/09/2006
; File Version: 1.0.0
; Author: Marc Fabregas
; Company: ADVANCARE, SL
;*****
; Files required: 16f689.lkr
;*****
; Notes: "Jardí" mode, build from v1.0.1 version of "boira+nit"
; mode, it light on, blink as fast as it's
; imperceptible, in the night
;*****
; Changes: 1.0.0.- First release, made from "nit" mode
;*****

list    p=16f689      ; list directive to define processor
#include <P16F689.inc> ; processor specific variable definitions

```

```

; Variable definitions -----
w_temp      EQU 0x71      ; variable used for context saving
status_temp EQU 0x72      ; variable used for context saving
pclath_temp EQU 0x73      ; variable used for context saving

counter_h    EQU 0x74      ; MSB of a variable used for loops
counter_l    EQU 0x75      ; LSB of a variable used for loops

light_zone   EQU 0x76      ; the last light zone detected
light_voltage_h EQU 0x77  ; the photovoltaic panel voltage MSBs
low_batt_flag EQU 0x78      ; the flag that indicates low battery voltage detected
batt_voltage_h EQU 0x79    ; battery voltage MSBs

blink_tmr    EQU 0x7b      ; timer for LED blinking
blink_on_tmr EQU 0x7c      ; timer for LED ON status

tmr_8h_flag  EQU 0x60
clock_5sec_l EQU 0x61
clock_5sec_h EQU 0x62
clock_8h_l   EQU 0x63
clock_8h_h   EQU 0x64

; Constants -----
CONSTANT DARKNESS_TH_H = b'00000011' ; Darkness threshold (left justified): 0.1V aprox @5.5V divided by 3/4
                                        ; factor of A/D front-end adapter
CONSTANT DAYLIGHT_TH_H = b'01011101'  ; Daylight threshold (left justified): 3.0V aprox @5.5V divided by 3/4
                                        ; factor of A/D front-end adapter

CONSTANT DARK_ZONE = 0x1                ; Darkness zone flag
CONSTANT FOG_ZONE = 0x2                 ; Foggy zone (between darkness and daylight) flag
CONSTANT DAYLIGHT_ZONE = 0x3           ; Daylight zone flag

CONSTANT LOW_BATT_TH_L = b'10000101'   ; 2.5V aprox @4.8V of Vbat with left justified
CONSTANT LOW_BATT_TH_H = b'10000000'   ; 2.5V aprox @5.0V of Vbat with left justified

CONSTANT BLINK_PERIOD = d'8';33'       ; 1 second @ 30ms interrupt period ~= 33 ISRs
CONSTANT BLINK_ON_PERIOD_FOG = d'1'    ; 60 msec @ 30ms interrupt period = 2 ISRs
CONSTANT BLINK_ON_PERIOD_DARK = d'4';1' ; 30 msec @ 30ms interrupt period = 1 ISRs
CONSTANT TEST_PERIOD = d'200'          ; 6 seconds @ 30ms interrupt period = 200 ISRs

CONSTANT STARTUP_BLINK_COUNT_H = 0x03 ; ff
CONSTANT STARTUP_BLINK_COUNT_L = 0xff ; Counter 3·255 = 765 => 765~·2·Tc = 0.233sec (Tc = 5/32768)

CONSTANT ACQUISITION_COUNT = d'32'     ; We wait for 10ms (aprox 0.01sec/(2·Tc) = 32 counts) for security

; Interrupts service routines -----
STARTUP      CODE          ; Processor reset vector
GOTO        Main          ; Go to beginning of program
NOP         ; Pad out so interrupt
NOP         ; service routine gets
NOP         ; put at address 0x0004.
GOTO        ISR_init      ; Points to interrupt service routine

PROG0       CODE
; Interrupt Service Routine -----
ISR_init
MOVWF       w_temp        ; save off current W register contents
MOVF       STATUS,W      ; move status register into W register
MOVWF      status_temp   ; save off contents of STATUS register
MOVF       PCLATH,W      ; move pclath register into W register
MOVWF      pclath_temp   ; save off contents of PCLATH register

CALL       ISR_timer0    ; Call IS subroutine located below

MOVF       pclath_temp,W ; retrieve copy of PCLATH register
MOVWF      PCLATH        ; restore pre-isr PCLATH register contents

```

```

MOVF      status_temp,W ; retrieve copy of STATUS register
MOVWF    STATUS         ; restore pre-isr STATUS register contents
SWAPF    w_temp,F      ; restore pre-isr W register contents
SWAPF    w_temp,W      ; restore pre-isr W register contents
RETFIE                               ; return from interrupt

; Main function -----
Main
BANKSEL  PORTA
CLRF     PORTA           ; Init PORTA
BANKSEL  PORTB
CLRF     PORTB         ; Init PORTB
BANKSEL  PORTC
CLRF     PORTC         ; Init PORTC

BANKSEL  TRISA
MOVLW   0x1B           ; RA0 & RA1 as analog inputs, RA2 as digital output (battery monitor ON) ...
MOVWF   TRISA          ; ... and the rest also as inputs
BANKSEL  TRISB
MOVLW   0x30
MOVWF   TRISB         ; PORTB: RB7(TX) & RB6(SCK) as outputs and RB5(RX) & RB4(SDI) as inputs
BANKSEL  TRISC
MOVLW   0x30           ; RC0:3 as outputs (LED drivers) ...
MOVWF   TRISC         ; ... the rest as inputs except RC7(SDO) & RC6(nSS), as outputs

BANKSEL  ADCON1
MOVLW   b'00000000'   ; AD clock source = Fosc/2
MOVWF   ADCON1
BANKSEL  ANSEL
CLRF    ANSEL         ; Init A/D port selection
MOVLW   b'00000011'   ; AN0(RA0) and AN1(RA1) as A/D inputs ...
MOVWF   ANSEL         ; ... the rest as I/O port

BANKSEL  PORTC
BSF     PORTC,0x0     ; Blink LED way #1, for test purposes
CALL    Startup_blink_delay ; A little delay;
BANKSEL  PORTC
BCF     PORTC,0x0
BSF     PORTC,0x1     ; Blink LED way #2, for test purposes
CALL    Startup_blink_delay ; A little delay;
BANKSEL  PORTC
BCF     PORTC,0x1
BSF     PORTC,0x2     ; Blink LED way #3, for test purposes
CALL    Startup_blink_delay ; A little delay;
BANKSEL  PORTC
BCF     PORTC,0x2
BSF     PORTC,0x3     ; Blink LED way #4, for test purposes
CALL    Startup_blink_delay ; A little delay;
BANKSEL  PORTC
BCF     PORTC,0x3

MOVLW   DAYLIGHT_ZONE
MOVWF   light_zone    ; Init on daylight zone
MOVLW   BLINK_PERIOD
MOVWF   blink_tmr     ; Init the LED blink timer
MOVLW   0x1e
MOVWF   clock_5sec_l
MOVLW   0x48
MOVWF   clock_5sec_h
CLRF    clock_8h_l
CLRF    clock_8h_h
CLRF    tmr_8h_flag

CLRWDT                               ; Clear watchdog
BANKSEL  TMR0
CLRF    TMR0           ; Clear Timer 0 and prescaler

```

```

BANKSEL OPTION_REG
MOVLW b'00001000' ; No prescaler on TMR 0 (interrupt every 30ms, aprox); prescaler assigned to WDT
MOVWF OPTION_REG

BANKSEL INTCON
BSF INTCON,T0IE ; Enable Timer 0 (8 bits)
BSF INTCON,GIE ; Enable global interrupts

infinite_loop
GOTO infinite_loop ; while(1)
RETURN

; Startup_blink_delay: little delay of initial blinking -----
Startup_blink_delay
MOVLW STARTUP_BLINK_COUNT_L
MOVWF counter_l
MOVLW STARTUP_BLINK_COUNT_H ; 255 x 3 => 765·2·Tc = 0.233sec (Tc = 5/32768)
MOVWF counter_h
startup_blink_delay_next_loop
DECFSZ counter_l,F
GOTO startup_blink_delay_next_loop
MOVLW STARTUP_BLINK_COUNT_L
MOVWF counter_l
DECFSZ counter_h,F
GOTO startup_blink_delay_next_loop
RETURN

; Acquisition_delay: the required time delay for AD sample
; ; acquisition (Sampling time = 2·Tosc
; ; @ 32.768kHz --> <1.6usec) -----
Acquisition_delay
MOVLW ACQUISITION_COUNT ; wait for 20 Tclk (aprox 10ms) for security
MOVWF counter_l
acquisition_delay_next_loop
DECFSZ counter_l,F
GOTO acquisition_delay_next_loop
RETURN

; Light_test: measure the panel voltage to know if it's light or
; ; dark -----
Light_test
BANKSEL ADCON0
MOVLW b'00000001' ; Left justified, VDD ref & ch 0
MOVWF ADCON0
CALL Acquisition_delay
BANKSEL ADCON0
BSF ADCON0,GO ; Start conversion
BANKSEL ADCON0
BTFSC ADCON0,GO ; Poll for conversion ending
GOTO $-1 ; Poll again if not
BANKSEL ADRESH
MOVF ADRESH,W
MOVWF light_voltage_h ; Put higher bits (MSBs) on a variable; lower bits not used
BANKSEL ADCON0
BCF ADCON0,ADON ; Stop AD converter

MOVLW DAYLIGHT_TH_H
SUBWF light_voltage_h,W ; light_voltage_h - DAYLIGHT_TH_H
BTFSS STATUS,C ; If light_voltage_h>=DAYLIGHT_TH_H there's no borrow
GOTO light_test_check_fog
MOVLW DAYLIGHT_ZONE ; light_voltage_h>=DAYLIGHT_TH_H --> daylight
MOVWF light_zone ; return DAYLIGHT_ZONE on light_zone variable
GOTO light_test_end

light_test_check_fog ; If light_voltage_h<DAYLIGHT_TH_H, check for VFOG
MOVLW DARKNESS_TH_H ; If we are here, light_voltage_h<DAYLIGHT_TH_H

```

```

SUBWF  light_voltage_h,W    ; light_voltage_h - DARKNESS_TH_H
BTFSS  STATUS,C            ; If light_voltage_h>=DARKNESS_TH_H there's no borrow
GOTO   light_test_is_dark  ; If light_voltage_h<DARKNESS_TH_H, we know that there's darkness

MOVLW  FOG_ZONE           ; DAYLIGHT_TH_H>light_voltage_h>=DARKNESS_TH_H --> fog light
MOVWF  light_zone         ; return FOG_ZONE on light_zone variable
GOTO   light_test_end

light_test_is_dark
  MOVLW  DARK_ZONE        ; else, return DARK_ZONE on light_zone variable
  MOVWF  light_zone
light_test_end
  RETURN

; Batt_test: check Vref voltage (after enabling battery monitor
;             to detect low battery (because ADC result on Vref
;             checking depends on Vbat -----
Batt_test
  BANKSEL ADCON0
  MOVLW  b'0000101'      ; Left justified, VDD ref & ch 1
  MOVWF  ADCON0
  BANKSEL PORTA
  BSF    PORTA,0x2       ; Battery monitor (RA2) --> turned ON
  CALL  Acquisition_delay ; Wait for AD sampling time

  BANKSEL ADCON0
  BSF    ADCON0,GO       ; Start conversion
  BANKSEL ADCON0
  BTFSC  ADCON0,GO       ; Poll for conversion ending
  GOTO   $-1             ; Poll again if not
  BANKSEL ADRESH
  MOVF   ADRESH,W        ; We only read the higher 8 bits of the result, which keep the major part of information
  MOVWF  batt_voltage_h  ; Store on other variable

  BANKSEL PORTA
  BCF    PORTA,0x2       ; Battery monitor (RA2) --- turned OFF
  BANKSEL ADCON0
  BCF    ADCON0,ADON     ; Stop AD converter
  RETURN

; isr_timer0: ISR for timer0, to control blinking, -----
;             light and battery voltage -----
ISR_timer0
  BANKSEL INTCON
  BTFSS  INTCON,T0IF     ; Timer0 interrupt?
  GOTO   end_isr_timer0  ; No? There's another interrupt, not used by now
  BCF    INTCON,GIE      ; Disable all interrupts during ISR
  BCF    INTCON,T0IF     ; Clear interrupt flag

  INCF   clock_5sec_l,F
  GOTO   check_clock_5sec
  INCF  clock_5sec_h,F
check_clock_5sec
  MOVLW  0x1f
  XORWF  clock_5sec_l,W
  BTFSS  STATUS,Z
  GOTO   isr_timer0_check_blink
  MOVLW  0x48
  XORWF  clock_5sec_h,W
  BTFSS  STATUS,Z
  GOTO   isr_timer0_check_blink

  CLRF   clock_5sec_l
  CLRF   clock_5sec_h
; Then is time to test

```

```

MOVF    light_zone,W
XORLW   DARK_ZONE           ; Check zone status
BTFFS   STATUS,Z           ; Case light_zone = DARK_ZONE
GOTO    isr_timer0_check_batt

BTFSC   tmr_8h_flag,0x0
GOTO    isr_timer0_check_batt

INCFSZ  clock_8h_l,F
GOTO    check_clock_8h
INCF    clock_8h_h,F
check_clock_8h
MOVLW   0x16
XORWF   clock_8h_l,W
BTFFS   STATUS,Z
GOTO    isr_timer0_check_batt
MOVLW   0x80
XORWF   clock_8h_h,W
BTFFS   STATUS,Z
GOTO    isr_timer0_check_batt
CLRF    clock_8h_l
CLRF    clock_8h_h
BSF     tmr_8h_flag,0x0

isr_timer0_check_batt
CALL    Batt_test           ; Call the battery testing subroutine; the voltage MSBs are returned on batt_voltage_h variable
BTFFS   low_batt_flag,0x0
GOTO    low_batt_flag_inactive

low_batt_flag_active
MOVLW   LOW_BATT_TH_H
SUBWF   batt_voltage_h,W   ; batt_voltage_h - LOW_BATT_TH_H
BTFFS   STATUS,C           ; If batt_voltage_h > LOW_BATT_TH_H => the voltage is low
GOTO    isr_timer0_check_light
MOVLW   0xf0               ; All LEDs turned OFF
ANDWF   PORTC,F
GOTO    finish_isr_timer0  ; Don't do anything more

low_batt_flag_inactive
MOVLW   LOW_BATT_TH_L
SUBWF   batt_voltage_h,W   ; batt_voltage_h - LOW_BATT_H
BTFFS   STATUS,C           ; If batt_voltage_h > LOW_BATT_H => the voltage is low
GOTO    isr_timer0_check_light
BSF     low_batt_flag,0x0  ; Set the flag to indicate low battery detected
MOVLW   0xf0               ; All LEDs turned OFF
ANDWF   PORTC,F
GOTO    finish_isr_timer0  ; Don't do anything more

isr_timer0_check_light
BCF     low_batt_flag,0x0  ; If we are here (reading light zone), there's enough battery
CALL    Light_test         ; Call the photovoltaic panel reading subroutine; the result keeps on light_zone variable

isr_timer0_check_blink
BTFSC   low_batt_flag,0x0  ; First of all, check if there's enough battery
GOTO    finish_isr_timer0

DECFSZ  blink_tmr,F        ; Check if is time to blink LEDs
GOTO    isr_timer0_check_led_on_status

MOVLW   BLINK_PERIOD      ; If we are here, blink timer has occurred
MOVWF   blink_tmr         ; Re-init the blinking timer

MOVF    light_zone,W
XORLW   DARK_ZONE           ; Check zone status
BTFFS   STATUS,Z           ; Case light_zone = DARK_ZONE

```

```

GOTO    isr_timer0_check_fog_zone

BTFSC   tmr_8h_flag,0x0    ; First of all, check if there's enough battery
GOTO    finish_isr_timer0

MOVLW   BLINK_ON_PERIOD_DARK
MOVWF   blink_on_tmr      ; Init the LED ON status timer
MOVLW   0x01              ; 2 first LEDs turned ON
IORWF   PORTC,F
GOTO    finish_isr_timer0

isr_timer0_check_fog_zone
MOVF    light_zone,W
XORLW   FOG_ZONE          ; Check zone status
BTFSS   STATUS,Z          ; Case light_zone = FOG_ZONE
GOTO    isr_timer0_is_daylight_zone
; MOVLW   BLINK_ON_PERIOD_FOG
; MOVWF   blink_on_tmr      ; Init the LED ON status timer
; MOVLW   0x0f              ; All LEDs turned ON
; IORWF   PORTC,F
MOVLW   0xf0              ; All LEDs turned OFF
ANDWF   PORTC,F
CLRF    tmr_8h_flag
GOTO    finish_isr_timer0

isr_timer0_check_led_on_status
MOVF    blink_on_tmr,W
BTFSC   STATUS,Z
GOTO    isr_timer0_is_daylight_zone_2
DECFSZ  blink_on_tmr,F    ; Check if is time to light off the LEDs
GOTO    finish_isr_timer0_2
GOTO    isr_timer0_is_daylight_zone_2
isr_timer0_is_daylight_zone    ; Case else: if it's daylight_zone, all LEDs turned off also
CLRF    tmr_8h_flag
isr_timer0_is_daylight_zone_2
MOVLW   0xf0              ; All LEDs turned OFF
ANDWF   PORTC,F
GOTO    finish_isr_timer0

finish_isr_timer0_2
MOVLW   d'3'
XORWF   blink_on_tmr,W
BTFSS   STATUS,Z
GOTO    isr_timer0_is_daylight_zone2
MOVLW   0xf0              ; All LEDs turned OFF
ANDWF   PORTC,F
MOVLW   0x02
IORWF   PORTC,F
GOTO    finish_isr_timer0
isr_timer0_is_daylight_zone2
MOVLW   d'2'
XORWF   blink_on_tmr,W
BTFSS   STATUS,Z
GOTO    isr_timer0_is_daylight_zone3
MOVLW   0xf0              ; All LEDs turned OFF
ANDWF   PORTC,F
MOVLW   0x04
IORWF   PORTC,F
GOTO    finish_isr_timer0
isr_timer0_is_daylight_zone3
MOVLW   d'1'
XORWF   blink_on_tmr,W
BTFSS   STATUS,Z
GOTO    finish_isr_timer0
MOVLW   0xf0              ; All LEDs turned OFF
ANDWF   PORTC,F

```

```

MOVLW 0x08
IORWF PORTC,F

finish_isr_timer0
BSF INTCON,GIE ; Re-enable interrupts again after ISR
end_isr_timer0
RETURN

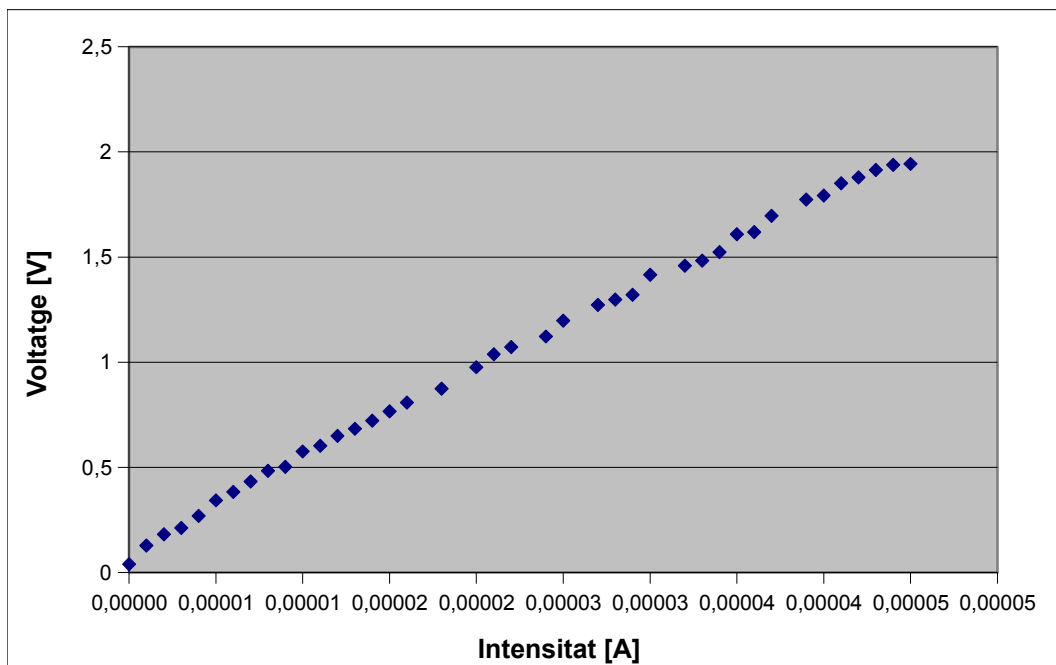
; Other segments -----
ORG 0x2100 ; data EEPROM location
DE 1,2,3,4 ; define first four EEPROM locations as 1, 2, 3, and 4

END ; directive 'end of program'

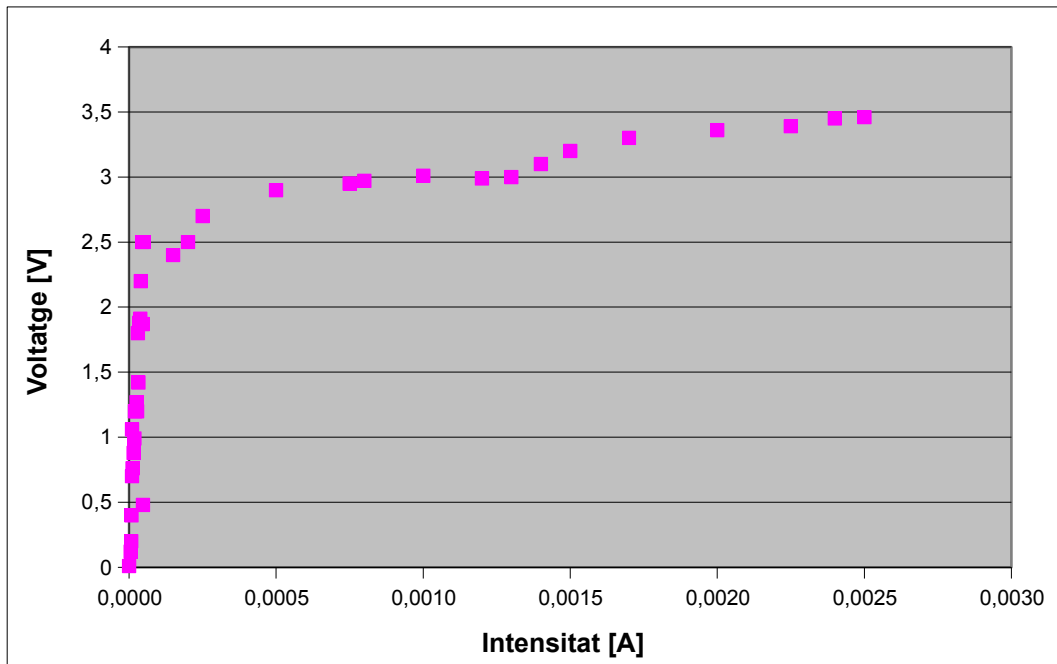
```

7.5 Gràfiques de consums

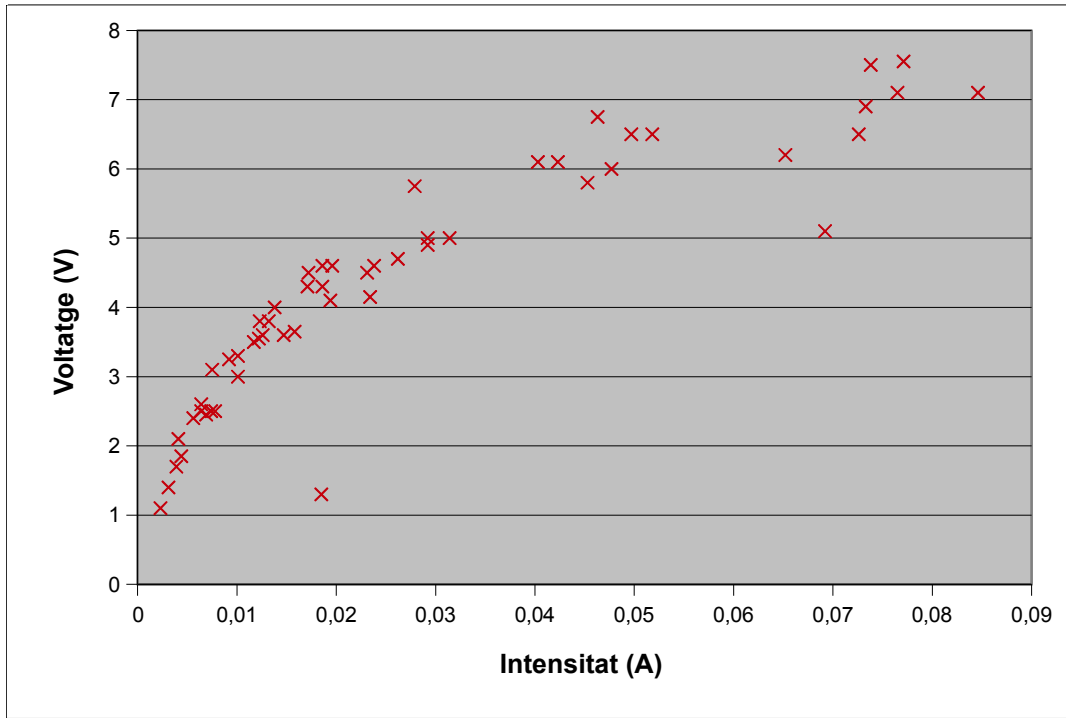
Proves de lluminositat



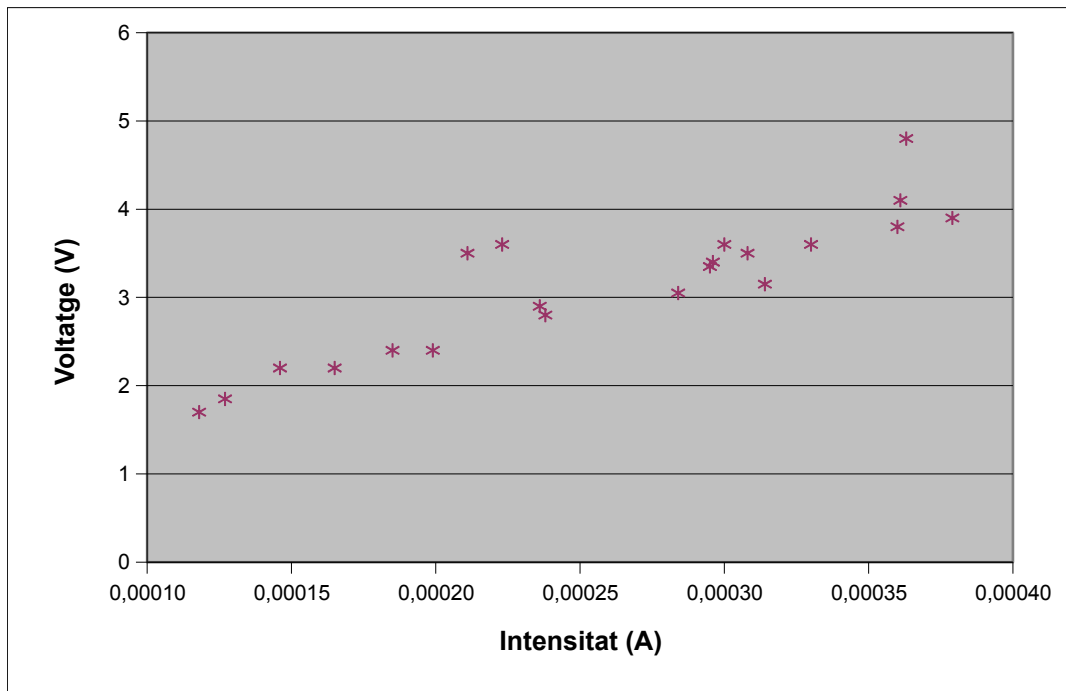
Il·lustració 22: Mesura d'interior. Il·luminació amb l'àmpara fluorescent



Il·lustració 23: Mesura d'exterior 1; dia nuvolat amb mesures en zones amb visió del sol.



Il·lustració 15: Mesura d'exterior 3; dia amb bastant sol, mesures en zones amb visió directe del sol.



Il·lustració 25: Mesura d'exterior 4; dia amb bastant sol, mesures en zones d'ombra.

Gràfiques de càrrega

7.6 Disseny mecànic

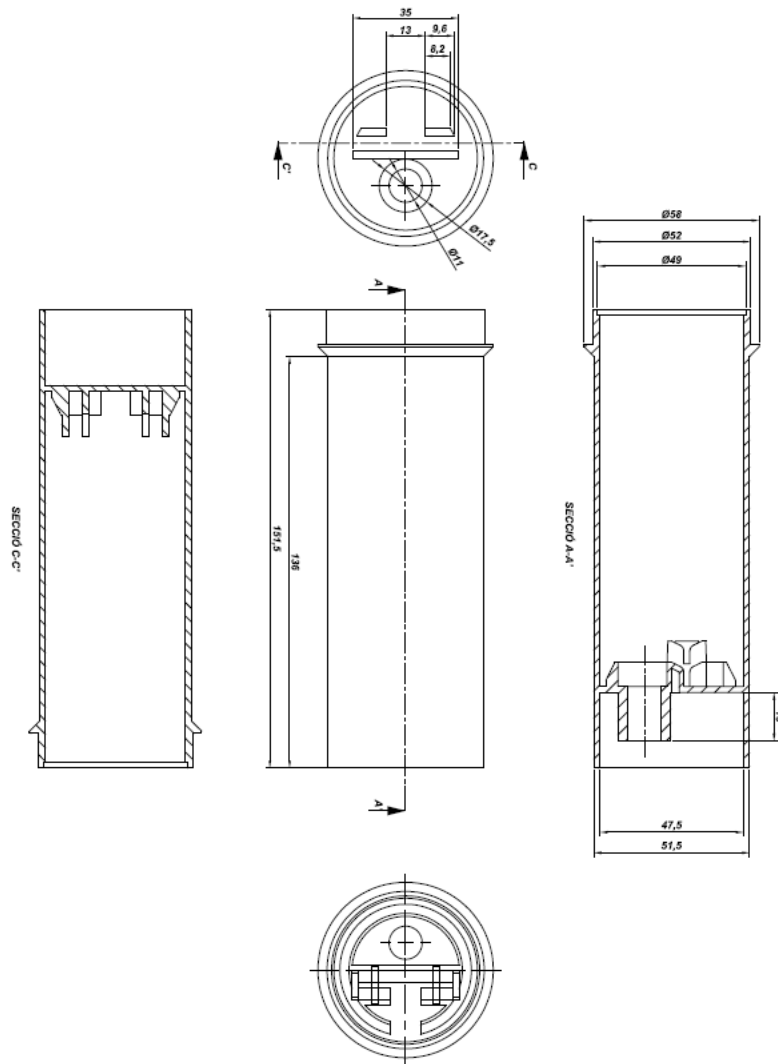


Illustration 26: Disseny de la camisa del Sisllum

8. Referències

Bibliografía

- [1]: Wiki https://en.wikipedia.org/wiki/IP_Code
- [2]: Light Emiting Diode https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
- [3]: Maximum Power Point https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_power_point_tracking
- [4]: Red-Green-Blue https://en.wikipedia.org/wiki/RGB_color_model
- [5]: Microchip www.microchip.com
- [6]: Microchip PIC12F252 Datasheet
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39564c.pdf>
- [7]: DIP Package https://en.wikipedia.org/wiki/Dual_in-line_package
- [8]: Microchip PIC16F689 <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F689>
- [9]: SOIC Package https://en.wikipedia.org/wiki/Small_Outline_Integrated_Circuit
- [10]: LM2623 DC/DC Boost Converter <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2623.pdf>
- [11]: MAX931 Low power comparator <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/ds/MAX931-MAX934.pdf>
- [12]: Generic Standard on Printed Board Design <http://www.ipc.org/TOC/IPC-2221A.pdf>
- [13]: Càlcul ample de pista <https://cuningan.files.wordpress.com/2010/10/calculos-ancho-pista.pdf>