



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
de Telecomunicació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE FINAL DE CARRERA

Implementació d'un BSP en un sistema encastat

Estudis: Enginyeria Electrònica

Autor: Pau Pajuelo Llagostera

Director: Agustí Fontquerni Gorchs

Ponent: Manuel Domínguez Pumar

Any: 2016

Resum del projecte

En aquest projecte es realitza el disseny i implementació del programari de suport (BSP) per a un sistema de desenvolupament encastat de l'empresa ISEE 2007.SL. El BSP és un conjunt de paquets de programari que incorporen un sistema operatiu i eines de desenvolupament. Aquesta plataforma està basada en el microcontrolador i.MX6 que aporta grans prestacions multimèdia i connectivitat mantenint un consum reduït.

En aquest document, s'introdueix el maquinari del sistema encastat i s'avaluen els programes i eines de treball disponibles al voltant del microcontrolador tant per part del fabricant NXP com la comunitat de desenvolupadors.

Un cop analitzats els recursos disponibles, es descriuen els programes escollits que conformen el BSP i es detallen les modificacions realitzades per donar suport al sistema.

A més, es defineixen i s'apliquen els tests per avaluar els perifèrics i busos de comunicació de la plataforma. En cas que els resultats no siguin vàlids, es detallaran els canvis realitzats al maquinari per poder corregir els errors en revisions posteriors del producte.

Finalment, es descriuen les eines de gravació i treball que utilitzarà el desenvolupador final en les seves aplicacions.

Resumen del proyecto

En este proyecto se realiza el diseño e implementación del software de soporte (BSP) para un sistema de desarrollo empotrado de la empresa ISEE 2007.SL. El BSP es un conjunto de paquetes de software que incorporan un sistema operativo y herramientas de desarrollo. Esta plataforma esta basada en el microcontrolador i.MX6 que aporta grandes prestaciones multimedia y conectividad manteniendo un bajo consumo.

En este documento, se introduce el hardware del sistema embebido y se evalúan los programas y herramientas de trabajo disponibles alrededor del microcontrolador tanto por parte del fabricante NXP como la comunidad de desarrolladores.

Una vez analizados los recursos disponibles, se describen los programas escogidos que conforman el BSP y se detallan las modificaciones realizadas para dar soporte al sistema.

Además, se definen y aplican los tests para evaluar los periféricos y buses de comunicación de la plataforma. En caso de que los resultados no sean válidos, se detallarán los cambios realizados en el hardware para poder corregir los errores en revisiones posteriores del producto.

Finalmente, se describen las herramientas de grabación y trabajo que utilizara el desarrollador final en sus aplicaciones.

Abstract

This project is the design and implementation of the software support (BSP) for embedded system development from ISEE 2007.SL company. The BSP is a set of software packages that incorporate an operating system and development tools. This platform is based on the i.MX6 microcontroller that provides great multimedia and connectivity features while maintaining low power consumption.

This document introduces the embedded system hardware and evaluates programs and work tools available around the microcontroller from the manufacturer NXP and community developers.

Once analyzed the available resources, describes selected programs that make up the BSP and outlined its modifications made to support the system.

In addition, tests are defined and applied to assess the peripherals and communication buses from platform. When the results aren't valid, the changes made to the hardware will be detailed in order to solve errors in subsequent revisions of the product.

Finally, describes the flashing and work tools that the end developer will use in their applications.

Índex general

Resum del projecte.....	1
Resumen del proyecto.....	3
Abstract.....	5
Índex general.....	7
Llistat de figures.....	11
Llistat de taules.....	12
1 Introducció.....	13
1.1 Els sistemes encastats.....	13
1.2 Motivació del treball.....	14
1.3 Objectius.....	15
1.4 Estructura de la memòria.....	16
2 Maquinari involucrat en el projecte.....	19
2.1 Estàndard SMARC.....	19
2.2 Plataforma i.MX6.....	20
2.3 IGEP SMARC i.MX6.....	22
2.4 IGEP SMARC Expansion.....	24
3 Programari involucrat en el projecte.....	27
3.1 Sistema Embedded GNU/Linux.....	27
3.2 Yocto Project.....	28
3.3 Bootloader U-boot.....	32
3.3.1 Característiques de l'U-boot per a l'IGEP SMARC i.MX6.....	33
3.3.2 Afegir suport a l'U-boot per a l'IGEP SMARC i.MX6.....	33
3.4 Linux Kernel.....	34
3.4.1 Modificacions al Linux Kernel per a l'IGEP SMARC i.MX6.....	35
3.4.2 Configuració al Linux Kernel per a l'IGEP SMARC i.MX6.....	36
3.4.3 Device Tree.....	37

3.4.4	WIFI i Bluetooth backports per al WiLink 8.....	41
3.5	Eines de gravació.....	43
3.6	Eines de compilació.....	44
3.6.1	Yocto Project Application development SDK.....	44
3.6.2	Eclipse Plugin.....	45
3.6.3	Projectes de demostració.....	45
4	Resultats del BSP.....	47
4.1	Memòria RAM externa.....	47
4.2	Port sèrie.....	47
4.2.1	Port sèrie de depuració.....	48
4.2.2	Port sèrie RS232.....	48
4.2.3	Port sèrie RS485.....	49
4.3	Arrencada BOOT_SEL.....	50
4.4	LEDs.....	52
4.5	Parada i reiniciï.....	52
4.6	Sortida vídeo.....	54
4.6.1	Sortida HDMI.....	54
4.6.2	Sortida LVDS.....	56
4.7	Ethernet.....	57
4.8	I2Cs.....	59
4.9	EEPROM.....	60
4.10	Polsador.....	61
4.11	Àudio analògic.....	61
4.12	Port CAN.....	62
4.13	SPI NOR Flash.....	63
4.14	Dispositius d'emmagatzement massiu.....	64
4.14.1	SD.....	64
4.14.2	eMMC.....	65
4.14.3	SATA.....	65

4.15 USBs.....	66
4.15.1 Mòdem USB Host.....	66
4.15.2 USBs Host.....	67
4.15.3 USB OTG.....	67
4.16 Connectivitat sense fil.....	68
4.16.1 WIFI.....	68
4.16.2 Bluetooth.....	70
4.17 Càmera.....	71
5 Resum desenvolupament.....	73
6 Conclusions.....	75
7 Agraïments.....	77
8 Referències.....	79
8.1 Referències Bibliogràfiques.....	79
8.2 Bibliografia.....	82



Aquesta obra està subjecta a una llicència de
[Reconeixement 4.0 Internacional de Creative Commons](#)

Llistat de figures

Figura 1: Canvis i principals característiques entre models i.MX6.....	23
Figura 2: Vista superior del miniordinador IGEP SMARC i.MX6 amb el muntatge IGEP0046RA01....	26
Figura 3: Vista de la placa d'expansió IGEP SMARC Expansion amb el muntatge BASE0040RA01.	28
Figura 4: IGEP SMARC i.MX6 Kit amb el muntatge IGEP0046RA02 més la part inferior de la caixa.	28
Figura 5: entorn de desenvolupament de "Yocto Project".....	33
Figura 6: Capes de "Yocto Project" per l'IGEP SMARC i.MX6.....	33
Figura 7: Un kernel connecta l'aplicació de programari al maquinari d'un ordinador.....	38
Figura 8: abans del "device tree", el bootloader passa la ID de la màquina i un punter al descriptor ATAGS al Kernel.....	42
Figura 9: amb "device tree", el bootloader passa el punter del "device tree blob" al Kernel.....	44
Figura 10: Estructura completa del "device tree" de l'IGEP0046RA.....	45
Figura 11: diagrama entre un processador i el xip WL183XMOD.....	47
Figura 12: conversor sèrie "IDC 10" a DB9.....	55
Figura 13: connexió RS485 entre dues IGEP SMARC Expansion.....	56
Figura 14: mecanisme de reiniciï de l'i.MX6 SABRE SD.....	61
Figura 15: Resultat fb-test al monitor HDMI.....	62
Figura 16: Resultat fb-test a la pantalla LVDS.....	64
Figura 17: Configuració del maquinari per a la prova Ethernet.....	65
Figura 18: connexió CAN entre dues IGEP SMARC Expansion.....	70
Figura 19: Configuració del maquinari per a la prova WIFI.....	76
Figura 20: Imatge captura amb el mòdul Raspberry Pi càmera i l'IGEP SMARC i.MX6 Kit.....	79

Llistat de taules

Taula 1: Característiques principals de l'IGEP SMARC i.MX6.....	23
Taula 2: Muntatges de l'IGEP SMARC i.MX6 versió RA.....	23
Taula 3: Característiques principals de l'IGEP SMARC Expansion i comptabilitat amb els models IGEP SMARC i.MX6.....	25
Taula 4: Xips WIFI i Bluetooth compatibles amb l'IGEP SMARC i.MX6 versió A.....	42
Taula 5: Comportament del bus RS485 en dues IGEP SMARC Expansion.....	50
Taula 6: Taula d'arrencada de l'IGEP SMARC i.MX6 revisió A.....	51
Taula 7: Repartició de busos I2C entre el connector SMARC i el microcontrolador i.MX6.....	59
Taula 8: Perifèrics I2C detectats a l'IGEP SMARC i.MX6 Dual Lite i LEC-BASE R1.....	60
Taula 9: Resolucions disponibles al controlador ov5647_mipi pel sensor OV5647.....	71

1 Introducció

1.1 Els sistemes encastats

En les últimes dècades, un dels desenvolupaments més importants i que han tingut major impacte en la nostra civilització han estat els ordinadors. Tan importants són que avui en dia hi ha més ordinadors que persones habitant la Terra.

Els ordinadors es classifiquen primàriament com ordinadors compatibles i ordinadors encastats. Els ordinadors compatibles són aquells equips concebuts per realitzar un gran nombre de tasques genèriques com portàtils i equips de sobretaula amb arquitectura x86. En canvi, els ordinadors encastats estan dissenyats per realitzar unes tasques específiques.

Normalment els ordinadors encastats no són considerats ordinadors, perquè associem la paraula "ordinador" als ordinadors compatibles, però generalment la societat no sap que el 98% dels ordinadors que existeixen són encastats^[1].

Els sistemes encastats, popularment anomenats sistemes embedded, són equips formats per un maquinari: elements electrònics i mecànics que tenen com a nucli una computadora, i un programari que s'executa a la computadora per realitzar una seqüència d'instruccions. Conjuntament, el programari i maquinari tenen els recursos imprescindibles per poder realitzar una o diverses tasques específiques.

El següent exemple permet comprendre millor la diferència entre les tasques específiques d'un ordinador encastat i les tasques genèriques d'un ordinador compatible. Un fabricant d'ordinadors portàtils personals no sap quin ús realitzaran els seus clients amb el seu producte, perquè les tasques poden ser molt variades: programar, realitzar presentacions, jugar, veure vídeos, etc. En canvi, un fabricant de sistemes encastats que comercialitza reproductors MP3 sap que els seus usuaris escoltaran àudio amb els seus equips.

Per comprendre la gran rellevància dels dispositius embedded, es poden trobar equips per aquest propòsit a: forns, màquines expendedores, reproductors de vídeo, impressores, telèfons, encaminador, mòdems, televisors, fax, rellotges, dispositius GPS, etc. Generalment la major part de dispositius electrònics complexos.

Per aconseguir un producte versàtil i econòmic en dispositius electrònics complexos, una solució encastada formada per maquinari i programari és una bona opció. Les actualitzacions de programari afegeixen versatilitat al sistema en poder corregir errors de programari o ampliar les funcionalitats. Per una altra banda, treballar amb un microcontrolador existent permet reduir el temps de desenvolupament i cost del producte.

Tot i ser el sector embedded molt rellevant i estès en l'actualitat, aquest sector tecnològic no ha parat de créixer i expandir-se. Es preveu que el mercat embedded creixi un 14% durant el període 2015-2019^[2] gràcies a la seva alta demanda en altres sectors com: el transport, l'energia, les telecomunicacions i la tecnologia mèdica. A més, la propera revolució tecnològica anomenada "Internet de les coses" (IoT) que es basa en la interconnexió digital d'objectes de la vida quotidiana a Internet, demandarà molts professionals i empreses del sector dels dispositius encastats.

Finalment, les companyies de semiconductors estan realitzant avanços molt importants per augmentar el nivell d'integració als xips. Concretament, en el camp dels microcontroladors ofereixen solucions anomenades "System on-a-Chip" (SoC) que incorporen un gran nombre de perifèrics al mateix encapsulat. Els SoCs permeten reduir la complexitat del disseny i el nombre de components externs al microcontrolador.

1.2 Motivació del treball

L'empresa ISEE 2007.SL, a partir d'ara anomenada ISEE, ha decidit dissenyar una nova gamma de miniordinador industrial. El nou miniordinador IGEP SMARC i.MX6 vol ser un producte que ofereixi a la indústria un dispositiu potent per a la fabricació de productes o sistemes finals que necessitin prestacions avançades de control, computació i comunicacions. El miniordinador té el format d'un mòdul, popularment anomenat "Computer on Module" (COM), i està basat en l'estàndard "Smart Mobility ARChitecture" (SMARC) i el microcontrolador i.MX6. L'empresa Freescale Semiconductor va desenvolupar el microcontrolador i.MX6, però a partir d'ara es parlarà de NXP Semiconductors perquè va adquirir recentment Freescale.

Durant el desenvolupament del projecte, s'han dissenyat i fabricat els primers prototips. Ara, és necessari plantejar i dissenyar el programari, comunament anomenat "Board support

package" (BSP), per validar el bon funcionament del producte i donar les eines de desenvolupament adients als seus usuaris.

1.3 Objectius

L'objectiu principal del projecte és implementar el BSP pel producte encastat IGEP SMARC i.MX6. El paquet de programari incorporarà un sistema operatiu i eines de desenvolupament per facilitar la creació d'aplicacions finals.

Per l'execució d'aquest objectiu, com en qualsevol projecte d'enginyeria, cal buscar la millor solució al problema: la més eficient, amb el mínim cost i procurant satisfer totes les necessitats. Per complir els requisits anteriors, es donarà prioritat a la utilització de programes amb llicència lliure pel desenvolupament de tot el projecte, inclosa l'elaboració de la documentació. Si dos o més requisits no són compatibles o un requisit no es pot assolir, es justificarà en la memòria.

L'objectiu del treball es limita al desenvolupament del BSP per a la primera versió de l'IGEP SMARC i.MX6. Com que el maquinari del producte no té llicència, no es poden publicar fragments d'esquemàtic i altres arxius relacionats. A més, el maquinari l'ha dissenyat un altre empleat de l'empresa. En canvi, el programari només l'ha realitzat l'autor d'aquesta memòria i la seva llicència permet publicar el seu contingut lliurement.

El fabricant NXP ofereix suport per a diferents sistemes operatius als usuaris del microcontrolador i.MX6. Per desenvolupar un BSP pel producte IGEP SMARC i.MX6 cal decidir entre sistemes operatius de temps real com FreeRTOS i "MQX RTOS" i sistemes operatius multi-usuari com "Windows Embedded CE" i "Embedded GNU/Linux". Dintre dels sistemes "Embedded GNU/Linux" existeixen projectes suportats com: Android, Ubuntu, OpenWRT, Buildroot, OpenEmbedded, "Yocto Project" entre altres.

En el cas dels sistemes operatius de temps real, com FreeRTOS i "MQX RTOS", no existeix suport complet pel SoC perquè el fabricant només donà suport als processadors Cortex M4 que inclouen alguns microcontroladors de la plataforma^[3]. Quedant descartats aquests sistemes en ser una solució molt limitada.

Per l'altra banda, el sistema operatiu multiusuari "Windows Embedded CE" queda també descartat perquè no utilitza una llicència lliure. En canvi, els sistemes "Embedded

GNU/Linux" si compleixen els requisits anteriors, perquè el nucli del sistema operatiu, anomenat "Linux Kernel", és llicenciat sota "GNU General Public License" (GNU GPL). Els programes amb llicència "GNU GPL" poden publicar, modificar i distribuir gratuïtament el codi font.

Finalment, la versió de "Linux Kernel" mantinguda per NXP té suport complet pels SoCs i.MX6 utilitzats. A més, la comunitat de Linux pel microcontrolador i.MX6 és molt popular i els seus desenvolupadors intercanvien informació, moltes vegades de manera altruïsta, a través de fòrums, xats IRC, pàgines web i llistes de correu.

1.4 Estructura de la memòria

Els pròxims capítols d'aquesta memòria s'estructuren de la següent manera:

En el capítol 2 "Maquinari involucrat en el projecte" es detallen els elements físics que conformen l'IGEP SMARC i.MX6 versió A. S'introdueixen les característiques dels microcontroladors i.MX6 i l'estàndard SMARC. S'acaba explicant les funcions i especificacions dels dos dispositius involucrats a la plataforma: el miniordinador en format mòdul (COM) i la placa base de desenvolupament.

Un cop es coneix el maquinari utilitzat, el capítol 3 "Programari involucrat en el projecte" es detallen els programes i eines valorats pel BSP. S'explica el perquè s'ha escollit "Yocto Project" per crear el sistema operatiu "Linux Embedded". Es continua exposant la resta de programes involucrats: l'arrencador U-boot, el nucli del sistema operatiu "Linux Kernel", les eines de gravació "igep tools" i el compilador. Finalment, s'explica com s'ha implementat el programari.

Al capítol 4 "Resultats del BSP" es detalla com s'han validat els perifèrics i busos de comunicació del miniordinador. Si els resultats no són satisfactoris, s'analitza el problema per resoldre'l en la següent versió del producte.

Al capítol 5 "Resum desenvolupament" s'explica en quin ordre s'han portat a terme les fases del projecte i es fa un breu resum de cada part. Al capítol 6 "Conclusions" s'avaluen els objectius inicials, els mètodes de desenvolupament i els resultats obtinguts del projecte. Al capítol 7 "Agraïments" es valoren els ajuts rebuts durant el desenvolupament del treball i al

capítol 8 "Referències" conté elements bibliogràfics perquè l'usuari pugui ampliar els seus coneixements.

2 Maquinari involucrat en el projecte

Abans d'implementar un BSP en un sistema encastat és necessari conèixer el maquinari que s'utilitzarà per desenvolupar. En aquest capítol es detallen els elements físics que conformen l'IGEP SMARC i.MX6 versió A. S'introdueixen les característiques dels microcontroladors i.MX6 i l'estàndard SMARC i s'acaba explicant les funcions i especificacions dels dos dispositius involucrats a la plataforma: el miniordinador en format mòdul (COM) i la placa base de desenvolupament.

2.1 Estàndard SMARC

"Smart Mobility ARChitecture" (SMARC)^[4] és un estàndard de lliure accés per a "Computer on Modules" (COMs) mantingut per l'organisme "Standardization Group for Embedded Technologies" (SGeT)^[5]. Aquest estàndard especifica les dimensions, les interfícies de dades i nivells de tensió entre altres característiques per poder homogeneïtzar els COMs de diferents fabricants i arquitectures.

Els mòduls que compleixen l'estàndard SMARC presenten: dues opcions de factor de forma de dimensions reduïdes (82 mm. per 50 mm. o 82 mm. per 80 mm.), baix consum (típicament menor de 6 W) i un connector d'expansió anomenat "Mobile PCI Express Module III" (MXM-III).

A diferència d'altres estàndards, com el NUC o Qseven, el SMARC facilita el disseny de COMs per a múltiples arquitectures, com ARM, RISC i x86, essent una opció versàtil per a desenvolupar. Les característiques principals del SMARC són:

- Múltiples entrades i sortides multimèdia: HDMI, LVDS, MIPI DSI, DisplayPort, RGB LCD, I2S, SPDIF, MIPI CSI i MIPI CPI.
- Fast o Gigabit Ethernet.
- PCI Express.
- Busos de comunicació de baix nivell: CAN, UART, I2C, SPI, I2S, GPIO, JTAG, PWM i Watchdogs.
- Busos de memòria externa: MMC (SDIO) i SATA.
- Busos USB Host i OTG.
- Entrades de control per seleccionar l'arrencada del sistema.

- Entrades i sortides d'administració i control: reset, arrencada i estat.
- Adequat per utilitzar dissipadors passius.

L'IGEP SMARC i.MX6 està basat en la versió 1.1 de l'estàndard SMARC. Els següents documents de SGeT descriuen les característiques de l'estàndard:

- "SMARC Hardware Specification"^[6]: aquest document narra les especificacions de l'estàndard SMARC: dimensions, nivells de tensió, funcionalitat de les entrades i sortides, interfícies de comunicació obligatòries i alternatives, paràmetres mecànics i tèrmics entre altres per poder fer compatibles COMs i plaques base.
- "SMARC Design Guide"^[7]: aquest document complementa l'estàndard aportant exemples i notes d'aplicació per a COMs i plaques base. A més, per comprendre les possibilitats que atorguen els dispositius SMARC, realitza una descripció dels busos i funcionalitats.

2.2 Plataforma i.MX6

"innovative Multimedia eXtension 6" (i.MX6) és una gamma de microcontroladors pensats per aplicacions multimèdia de la companyia NXP Semiconductor. i.MX6 és un SoC, perquè conté en un únic xip un gran nombre de perifèrics que simplifiquen el nombre de components externs: processador, memòria, còdecs de vídeo, acceleradors gràfics 2D i 3D entre altres.

La gamma de SoCs i.MX6 cobreix un rang d'especificacions ampli, de solucions basades en un sol nucli ARM Cortex A7 (i.MX6 UltraLite) a quatre nuclis ARM Cortex A9 (i.MX6 Quad). Alguns models inclouen addicionalment processadors menys potents, ARM Cortex M4, que executen aplicacions en temps real paral·lelament a l'ARM Cortex A.

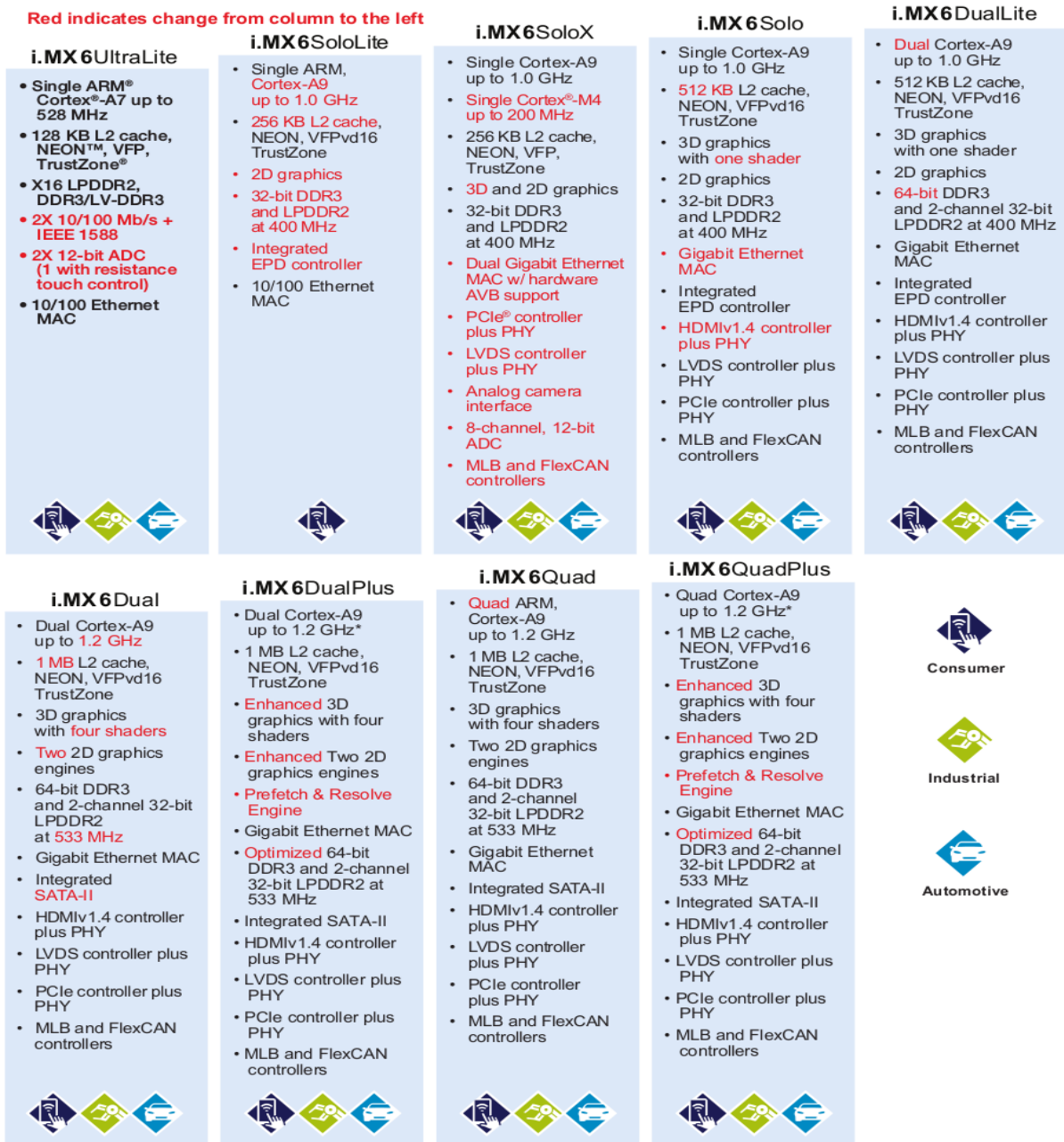


Figura 1: Canvis i principals característiques entre models i.MX6.

Entre alguns models i.MX6, de l'i.MX6 Solo a l'i.MX6 QuadPlus, són pin a pin compatibles i comparteixen les mateixes entrades d'alimentació^[8]. Les propietats anteriors permeten utilitzar el mateix disseny de maquinari (esquemàtic) i intercanviar només el model de SoC. A més, el programari que ofereix NXP és molt similar per a tota la gamma i permet escalar amb facilitat el producte.

A part dels models i.MX6 existents, NXP ofereix diferents versions segons els rangs de temperatura operatius: consumer (0 °C a 95 °C), extended (-20 °C a 105 °C), industrial (-40 °C a 105 °C) i auto (-40 °C a 125 °C).

A més, NXP dona com a garantia la producció de SoCs i.MX6 entre 10 i 15 anys a partir del llançament del producte. Aquesta política de suport extens als desenvolupadors permet oferir solucions de llarg termini, ideals en entorns industrials.

2.3 IGEP SMARC i.MX6

El producte IGEP SMARC i.MX6, codificat internament com IGEP0046, és un miniordinador en format COM de l'empresa ISEE. Aquest COM està basat en versió 1.1 de l'estàndard SMARC i els SoCs i.MX6 del fabricant NXP. El disseny del maquinari s'ha plantejat per poder utilitzar d'un microcontrolador i.MX6 Solo a un microcontrolador i.MX6 Quad.

Durant el desenvolupament del projecte, els microcontroladors i.MX6 DualPlus i QuadPlus no tenien suport pel programari utilitzat pel BSP. Com a resultat, el BSP actual no és compatible amb les noves variants.

Les característiques principals dels mòduls són:

	IGEP SMARC i.MX6 Solo	IGEP SMARC i.MX6 DualLite	IGEP SMARC i.MX6 Dual & Quad
Memòria: (* memòria opcional)	512 MB de SDRAM DDR3 4 GB d'eMMC SPI NOR de 4 Mb * EEPROM de 4 Kb	1 GB de SDRAM DDR3 4 GB d'eMMC SPI NOR de 4 Mb * EEPROM de 4 Kb	2 GB de SDRAM DDR3 8 GB d'eMMC SPI NOR de 4 Mb * EEPROM de 4 Kb
Vídeo de sortida:	1 x LVDS (amb 4 parells de dades diferencials) 1 x HDMI 1.4a (amb sortida àudio digital) 1 x MIPI DSI (amb 2 parells de dades diferencials)		
Vídeo d'entrada:	1 x MIPI CSI2 (amb 2 parells de dades diferencials)		1 x MIPI CSI2 (amb 4 parells de dades diferencials)
Xarxa:	10/100/1000 Mbps Interfície Ethernet PHY WiFi IEEE 802.11 b/g/n Bluetooth v4.0 classe 1		
Altres perifèrics:	1 x USB 2.0 Host 1 x USB 2.0 OTG		1 x USB 2.0 Host 1 x USB 2.0 OTG

	IGEP SMARC i.MX6 Solo	IGEP SMARC i.MX6 DualLite	IGEP SMARC i.MX6 Dual & Quad
	3 x UART 4 x I2C 1 x MMC 1 x I2S 2 x SPI 2 x PWM 2 x CAN 1 x SD 12 x GPIO 1 x Interfície JTAG		3 x UART 3 x I2C 1 x MMC 1 x I2S 2 x SPI 2 x PWM 2 x CAN 1 x SD 12 x GPIO 1 x Interfície JTAG 1 x SATA II 1 x PCIe 2.0 (amb 1 parell de dades diferencial)
Altres característiques:	Alimentació d'entrada entre 4,7 V a 5,25 V Nivells de tensió digital: 1,8 V 4 x GPIOs amb resistències de pull-up i pull-down, perquè el programari pugui diferenciar la versió del maquinari on s'executa 2 x LED Verd i Vermell Rang Industrial (-40°C a 85°C) Dimensions: 82 mm. x 50 mm.		

Taula 1: Característiques principals de l'IGEP SMARC i.MX6.

Per a la validació dels primers prototips s'han fabricat 2 muntatges diferents i 2 prototips de cadascun. Els muntatges anteriors tenen les següents característiques:

Nom del muntatge	Característiques diferencials:
IGEP0046RA01	Processador: i.MX6 DualLite Memòries: EEPROM, SPINOR, 1 GB SDRAM DDR3 i 8 GB d'eMMC Xarxa: Gigabit Ethernet, WiFi b/g/n, Bluetooth v4.0 (WL1831) i antena interna
IGEP0046RA02	Processador: i.MX6 Quad Memòries: EEPROM, SPINOR, 2 GB SDRAM DDR3 i 8 GB d'eMMC Xarxa: Gigabit Ethernet, WiFi b/g/n, Bluetooth v4.0 (WL1831) i antena interna

Taula 2: Muntatges de l'IGEP SMARC i.MX6 versió RA.

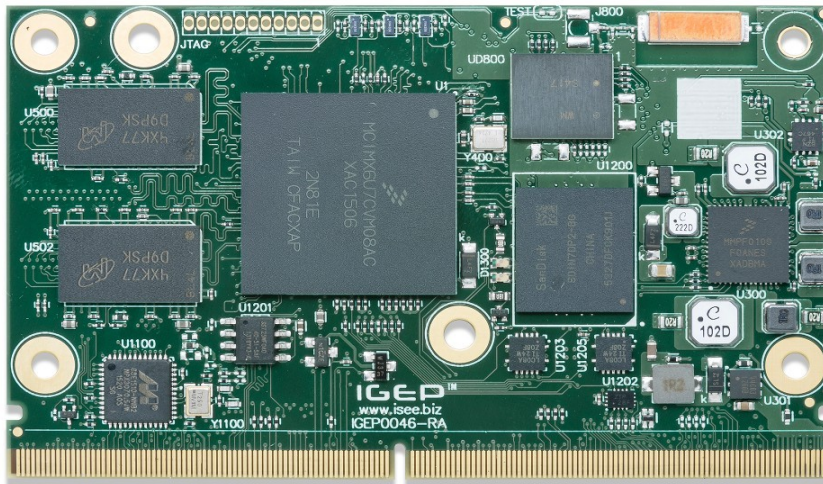


Figura 2: Vista superior del miniordinador IGEP SMARC i.MX6 amb el muntatge IGEP0046RA01.

2.4 IGEP SMARC Expansion

L'IGEP SMARC i.MX6 és un miniordinador en format mòdul que necessita una placa d'expansió per poder ser utilitzat. IGEP SMARC Expansion, amb el nom tècnic BASE0040, és una placa d'expansió per a mòduls SMARC de l'empresa ISEE.

Les dues plaques anteriors més el BSP formen l'IGEP SMARC i.MX6 Kit. El Kit permet als programadors el desenvolupament d'aplicacions abans de la construcció del prototip. Les característiques del conjunt segons el COM són:

	Components i característiques de l'IGEP SMARC Expansion	Compatibilitat amb l'IGEP SMARC i.MX6:
Alimentació i arrencada	3 x Jumpers d'arrencada Connector Jack de 2,5 mm. per alimentació	IGEP i.MX6 Solo/DualLite/Dual/Quad: compatible
USBs	3 x receptacles USB 2.0 tipus A Receptacle USB 3.0 OTG tipus micro AB	IGEP i.MX6 Solo/DualLite/Dual/Quad: USB OTG tipus micro AB només suporta l'estàndard USB 2.0
Interfícies d'expansió	Connector d'expansió 2x14 (PWM, SPI, I2C i MMC) Connector d'expansió 2x5 (2 x RS232)	IGEP i.MX6 Solo/DualLite/Dual/Quad: compatible

	Components i característiques de l'IGEP SMARC Expansion	Compatibilitat amb l'IGEP SMARC i.MX6:
	Connector sèrie depuració 7 pins 3,3 V 5 Bornes (CAN i RS485)	
Multimèdia	Sortida Jack de 3,5 mm. per altaveu Entrada Jack de 3,5 mm. per micròfon Connector LVDS 30 pins (vídeo, alimentació, I2C pantalla tàctil i EDID) Connector 15 pins per a CSI (Raspberry Pi càmera compatible) Connector HDMI tipus A (sortida àudio i vídeo)	IGEP i.MX6 Solo/DualLite/Dual/Quad: compatible
Xarxa	Connector miniPCIe per a mòdem USB Connector RJ45 Gigabit Ethernet	IGEP i.MX6 Solo/DualLite/Dual/Quad: compatible
Emmagatzemen	Connector mSATA Connector microSD	IGEP i.MX6 Dual/Quad: SATA compatible per aquestes versions
Altres	Boto amb LED blau i vermell Rang Industrial (-40 °C a 85 °C) Dimensions: 142 mm. x 90 mm.	IGEP i.MX6 Solo/DualLite/Dual/Quad: compatible

Taula 3: Característiques principals de l'IGEP SMARC Expansion i comptabilitat amb els models IGEP SMARC i.MX6.

Com es pot observar entre la Taula 1 "Característiques principals de l'IGEP SMARC i.MX6" i Taula 3, l'IGEP SMARC Expansion permet provar totes les característiques de l'IGEP SMARC i.MX6 excepte el PCIe 2.0 i MIPI DSI, perquè no estan disponibles aquests busos a l'expansió. Per a la validació del disseny s'ha fabricat un sol muntatge, amb totes les característiques disponibles (BASE0040RA01), i quatre prototips.

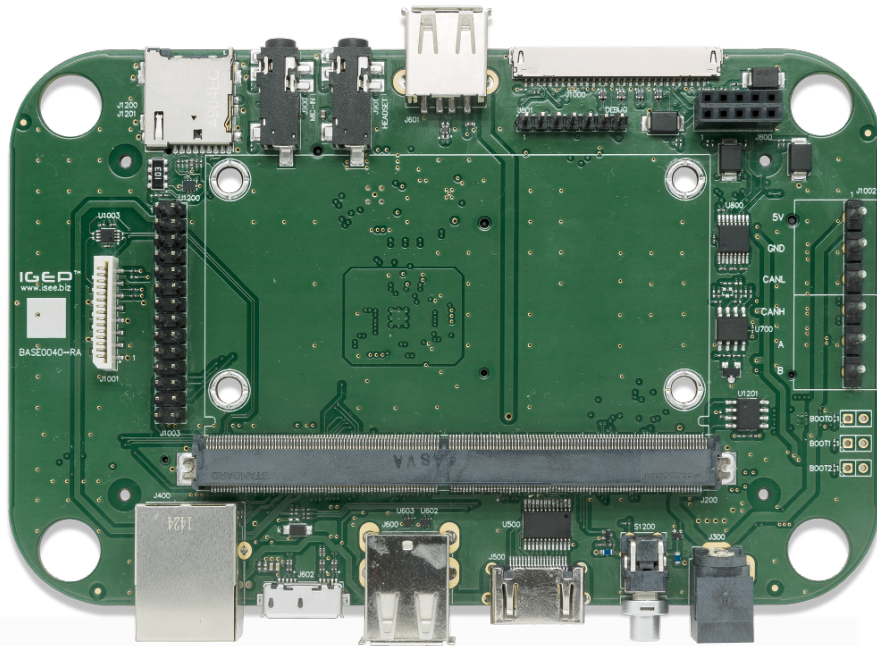


Figura 3: Vista de la placa d'expansió IGEP SMARC Expansion amb el muntatge BASE0040RA01.

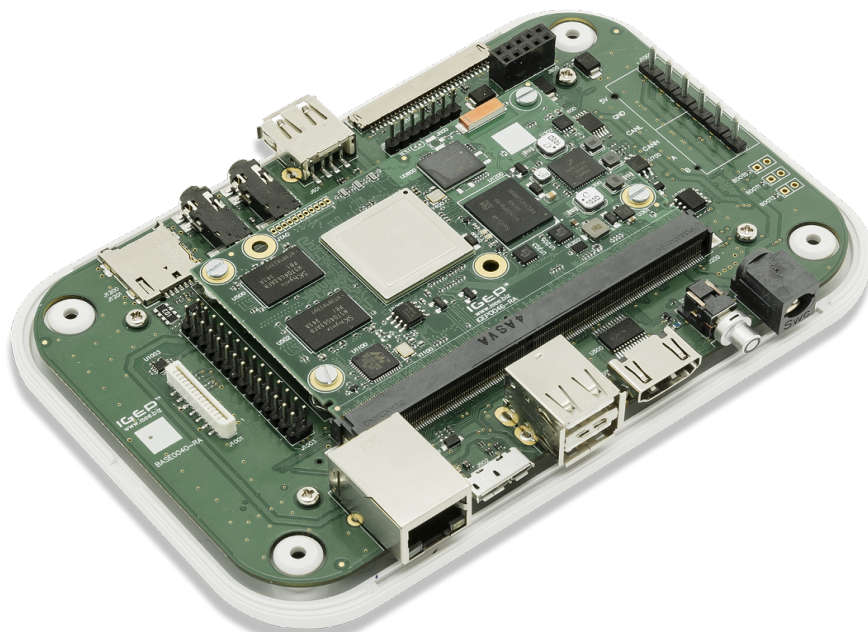


Figura 4: IGEP SMARC i.MX6 Kit amb el muntatge IGEP0046RA02 més la part inferior de la caixa.

3 Programari involucrat en el projecte

Per poder provar el maquinari i desenvolupar aplicacions amb l'IGEP SMARC i.MX6 i l'IGEP SMARC Expansion cal incloure recursos de programari que facilitin el procés al client final. "Board Support Package" (BSP) és el nom comunament utilitzat al sector per referir-se al programari de suport dels sistemes encastats.

Com a mínim, el BSP és un sistema operatiu encastat amb suport al maquinari. Està format per un arrencador, un nucli del sistema operatiu i un sistema de fitxers amb una distribució. Per oferir una millor política de suport, ISEE ha afegit més característiques al BSP de l'IGEP SMARC i.MX6 Kit. En total conté:

- Arrencador: anomenat comunament bootloader.
- Nucli del sistema operatiu: anomenat comunament kernel.
- Sistema de fitxers: anomenat comunament "root filesystem" (rootfs).
- Eines de gravació de maquinari: anomenat comunament "flashing tools".
- Compilador i capçaleres: anomenat comunament toolchain.
- Suport per l'"Integrated Development Environment" (IDE) Eclipse amb projectes de demostració per completar el BSP de l'IGEP SMARC i.MX6.

3.1 Sistema Embedded GNU/Linux

Per a la implementació del BSP es vol utilitzar un sistema operatiu multi-usuari "Embedded GNU/Linux". Aquests són sistemes basats en el nucli "Linux Kernel". Per conèixer els motius de l'elecció llegir l'apartat 1.3 "Objectius".

Abans d'escollir el sistema operatiu "Embedded GNU/Linux", cal conèixer les maneres de generar el sistema:

- TOP-DOWN: desenvolupar un sistema operatiu a partir d'un altre existent. Exemple: Raspbian, una distribució basada en el sistema Debian per a Raspberry Pi.
- BOTTOM-UP: desenvolupar un sistema operatiu de zero. Començant per programar l'arrencador fins al sistema de fitxers i aplicacions. Exemple: "Linux From Scratch" és una guia per ajudar a crear sistemes operatius BOTTOM-UP.

Cada metodologia té els seus avantatges i inconvenients. BOTTOM-UP dóna control de tot el sistema, en canvi, la seva implementació és complicada i les eines disponibles són limitades. TOP-DOWN permet començar a treballar sobre una base existent, però presenta problemes a l'hora d'optimitzar l'entorn si no és conegut.

Hi ha projectes que procuren agafar el millor de les dues metodologies anteriors. Projectes com Buildroot, Openembedded i "Yocto Project" són alguns exemples que faciliten el control i implementació de sistemes operatius. Entre tots ells, per la qualitat, per ser molt complet i evidentment lliure s'ha optat per "Yocto Project", esponsoritzat entre d'altres per Linux Foundation i NXP^[9].

3.2 Yocto Project

"Yocto Project" és un projecte obert, col·laboratiu, que ofereix una infraestructura d'alta qualitat i eines per ajudar als desenvolupadors a crear les seves pròpies distribucions personalitzades basades en "Embedded GNU/Linux".

"Yocto Project" no només és capaç de crear sistemes operatius, també permet generar un compilador que inclou les capçaleres de llibreries i aplicacions remotes. El conjunt compilador més capçaleres, anomenat comunament toolchain, tradueix el codi font d'aplicacions C i C++ al llenguatge màquina del sistema encastat. A més, "Yocto Project" permet utilitzar el toolchain amb el popular IDE Eclipse^[10] a través del connector (plugin) "Yocto ADT".

Les característiques més importants de "Yocto Project" són:

- Organització per capes: a través de les capes el desenvolupador pot treballar en una determinada part de l'estructura del sistema operatiu, del suport al maquinari a les aplicacions de més alt nivell. Aquesta organització permet simplificar el manteniment.
- Descripció del maquinari: utilitzant tan sols un fitxer de configuració, "Yocto Project" pot definir aplicacions i configuracions específiques segons el maquinari. Modificant una variable de la configuració, "Yocto Project" pot generar un sistema operatiu per un altre maquinari.
- Receptes: "Yocto Project" construeix paquets i imatges de sistema operatiu mitjançant receptes (comunament anomenat recipes o metadatas). Les receptes són

un conjunt d'instruccions pel programari que descriuen: com obtenir el codi font, quins pedaços (patches) aplicar-hi, les dependències i llibreries necessàries, les opcions de compilació i empaquetat. Les imatges del sistema poden ser molt variades, segons el nombre i característiques de les receptes, d'una imatge mínima amb la grandària d'1,6 MB^[11] a una imatge molt més gran i complexa amb terminal, pila gràfica, etc. Les receptes són més versàtils que els paquets precompilats de les distribucions, perquè permet tenir el control de la construcció dels binaris.

- Llicències: "Yocto Project" gestiona les llicències dels programes. Cada recepta inclou la seva pròpia llicència i el desenvolupador selecciona les llicències utilitzades al sistema operatiu. Si hi ha alguna incoherència, "Yocto Project" no permet generar els binaris.
- Documentació: "Yocto Project" publica documentació de gran qualitat a cada nova versió.
- Suport: "Yocto Project" disposa de wiki, llistes de correu i xat IRC per donar i oferir suport.

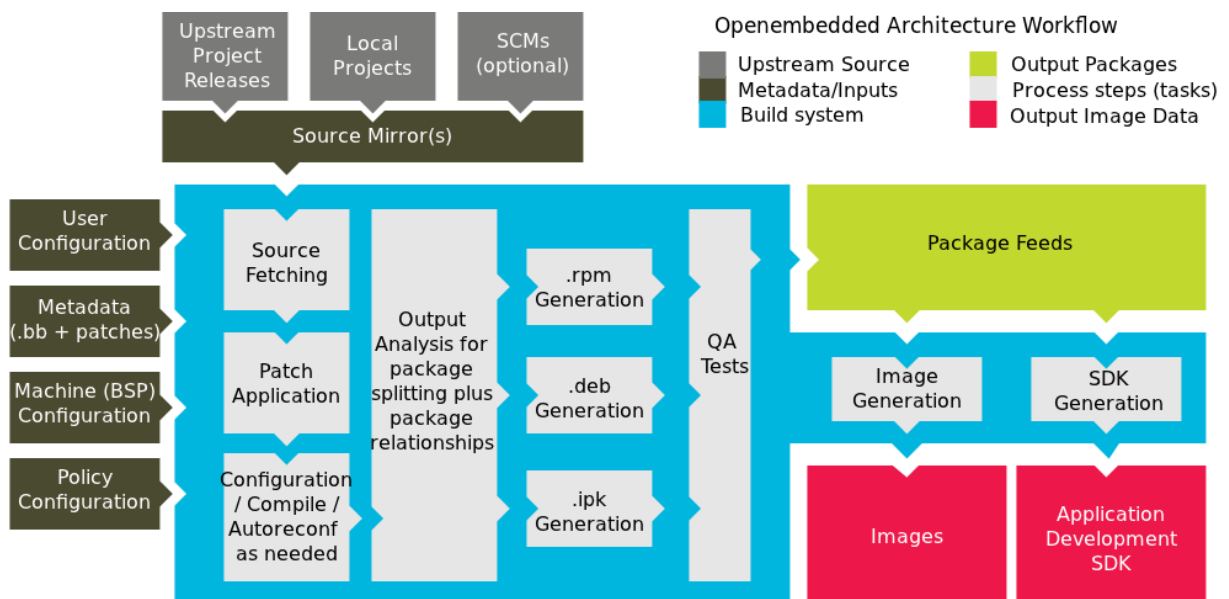


Figura 5: entorn de desenvolupament de "Yocto Project".

Per comprendre com s'ha dissenyat amb "Yocto Project" el BSP de l'IGEP SMARC i.MX6, es recomana la lectura de "The Yocto Project Board Support Package (BSP) Developer's Guide"^[12], perquè alguns conceptes i estratègies utilitzats s'expliquen en aquest manual.

Seguint les indicacions del manual anterior, el BSP de l'IGEP SMARC i.MX6 segueix l'estructura per capes il·lustrada en la següent figura:

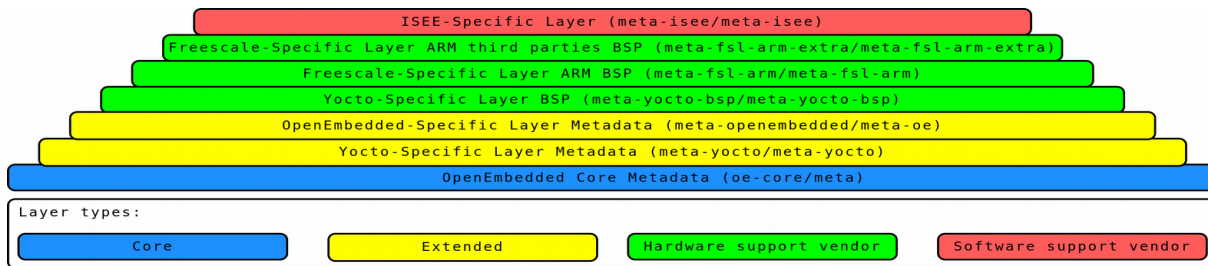


Figura 6: Capes de "Yocto Project" per l'IGEP SMARC i.MX6.

A la il·lustració anterior, cada capa conté: el nom, el nom simplificat, el nom de la carpeta arrel i un color segons el tipus de capa. La funcionalitat de cadascuna és:

- OpenEmbedded Core Metadata^[13]: aquesta capa és la base del sistema i conté les metadades (metadata) per poder generar una imatge amb la funcionalitat bàsica. Capa mantinguda per la comunitat de "Yocto Project" i basada en openembedded-core.
- Yocto-Specific Layer Metadata^[14]: aquesta capa és una extensió de la capa anterior que afegeix més funcionalitats. Per exemple inclou "Yocto Application Development Toolkit" (Yocto ADT), veure apartat 3.6 "Eines de compilació" per a més informació. Capa mantinguda per la comunitat de "Yocto Project".
- OpenEmbedded-Specific Layer Metadata^[15]: aquesta capa inclou un gran nombre de receptes opcionals per a un sistema operatiu. Algunes de les seves receptes són dependències pels programes que controlen el mòdul WIFI i Bluetooth, veure subapartat 3.4.4 "WIFI i Bluetooth backports per al WiLink 8". Capa mantinguda per la comunitat de OpenEmbedded.
- Yocto-Specific Layer BSP^[16]: aquesta capa inclou receptes per interfícies gràfiques (Xorg), audio (ALSA) entre altres per facilitar el control d'elements de maquinari. Capa mantinguda per la comunitat de "Yocto Project".
- Freescale-Specific Layer ARM BSP^[17]: aquesta capa afegeix receptes de suport pels microcontroladors i plaques d'avaluació de NXP. Per exemple inclou gstreamer-imx que permet codificar i decodificar contingut multimèdia utilitzant els acceleradors de vídeo de l'i.MX6. Capa mantinguda per la comunitat de Freescale (ara NXP).
- Freescale-Specific Layer ARM third parties BSP^[18]: aquesta capa és una extensió de la capa anterior. Afegeix suport per a plaques de tercers que utilitzen els microcontroladors de NXP. Capa mantinguda per la comunitat de Freescale (ara NXP).

- ISEE-Specific Layer^[19]: aquesta capa mantinguda per ISEE conté receptes no incloses a les capes anteriors i la descripció del sistema operatiu isee-image-dev. isee-image-dev, basada en fsl-image-machine-test^[20], és ideal per provar i començar a desenvolupar programari per l'IGEP SMARC i.MX6. Inclou els següents programes respecte a la imatge de test de NXP:
 - Openssh^[21] i PPP^[22]: per establir connexions segures amb el protocol TCP/IP.
 - Més eines de test i configuració per a perifèrics: canutils^[23], cpufrequtils^[24], iperf^[25], libsocketcan^[26], mmc-utils^[27] i mtd-utils^[28].
 - Eines per editar particions MMC i SATA: gptfdisk^[29], mtools^[30], parted^[31] i util-linux-sfdisk^[32].
 - Eines de depuració: gdb^[33], gdbserver^[34] i strace^[35].
 - Psplash: programa que mostra una imatge durant l'arrencada i apagada del sistema operatiu^[36].
 - Client i servidor pel protocol de xarxa DHCP^[37].
 - Gestor de paquets RPM^[38].
 - TCF-agent: programa que utilitza el protocol de comunicació TCF per controlar sistemes encastats^[39].
 - Cronie: programador de tasques per a sistemes operatius GNU/Linux^[40].
 - NTP^[41] i ntpdate^[42] permeten sincronitzar el rellotge del sistema operatiu.
 - Binaris i utilitats pel perifèric WIFI/BT WiLink 8^[43].
 - Igep-tools: utilitat per gravar sistemes operatius als dispositius IGEP. Consultar l'apartat 3.5 "Eines de gravació" per a més informació.
 - Escriptori SATO: basat en les llibreries gràfiques de GNOME i orientat a dispositius mòbils^[44].
 - Devmem2: utilitat per llegir o escriure registres en espai d'usuari^[45].

El BSP de l'IGEP SMARC i.MX6 està basat en "Yocto Project" versió Fido (1.8.0). Les úniques capes on s'han realitzat modificacions pel projecte són meta-fsl-arm-extra i meta-isee. En meta-fsl-arm-extra s'ha creat una bifurcació (fork) del projecte origen per incloure el suport a l'IGEP SMARC i.MX6^[46], utilitzant la màquina imx6dl-igep0046 per a les versions Solo i DualLite i imx6q-igep0046 per a les versions Dual i Quad. En canvi, meta-isee és una capa que conté receptes que no estan relacionades directament amb el maquinari^[47], moltes

de les receptes d'aquesta tenen com a origen la capa meta-fsl-demos i són adequades per provar el BSP de l'IGEP SMARC i.MX6.

3.3 Bootloader U-boot

Un gestor d'arrencada, normalment anomenat bootloader, és un programa que s'executa poc després d'encendre el sistema. El bootloader és un programa petit i el seu objectiu primari és inicialitzar tots els components del maquinari necessaris per carregar un sistema operatiu. En el cas del microcontrolador i.MX6, les característiques del bootloader essencials són:

- Configurar els controladors de memòria: RAM externa, MMC i SATA (segons versió).
- Configurar: resets, rellotges, organismes de control (watchdogs) i alimentacions. Les alimentacions solen utilitzar GPIOs i/o el bus I2C.
- Llegir i escriure memòries en cru (RAW) i/o sistemes de fitxers.
- Executar scripts i binaris, per exemple el "Linux Kernel".

Altres característiques que amplien la versatilitat i control del sistema podrien ser:

- Configurar més dispositius: UARTs, I2Cs, SPIs, USBs, GPIOs, vídeo, xarxa, etc. per controlar altres perifèrics i memòries.
- Interpretar protocols de comunicació: ICMP (ping), TFTP, etc.
- Executar terminal de depuració i programes de test per a: memòria RAM, I2C, etc.

A més, els bootloaders són programes molt adequats per depurar el maquinari, perquè els seus algoritmes són senzills comparats amb els del nucli del sistema operatiu.

En el cas de l'IGEP SMARC i.MX6 s'ha utilitzat com a bootloader el programa U-boot de Denx. U-boot és un bootloader sota llicència GPL orientat a sistemes encastats i amb suport a un gran nombre de dispositius. Un d'aquests dispositius suportats és el microcontrolador i.MX6 on NXP dona suport oficialment.

En el plantejament del BSP s'ha optat escollir el mateix U-boot que les plaques i.MX6 utilitzen a la versió Fido de meta-fsl-arm. Aquest U-boot, anomenat patches-2015.04, conté correccions i noves característiques de la comunitat per a SoCs de NXP i es basa en l'U-

boot 2015.04 de Denx. Una de les noves característiques és la facilitat de configurar les sortides de vídeo de l'i.MX6 als paràmetres de "Linux Kernel".

Els següents subapartats detallen les característiques i el desenvolupament realitzat a l'Uboot per a l'IGEP SMARC i.MX6:

3.3.1 Característiques de l'U-boot per a l'IGEP SMARC i.MX6

Com s'ha descrit anteriorment, l'objectiu principal de l'Uboot és inicialitzar tots els components del maquinari necessaris per carregar un sistema operatiu. A més, l'U-boot de l'IGEP SMARC i.MX6 inclou les següents característiques per complementar el BSP:

- Guardar les variables d'entorn en la memòria SATA (segons versió), EEPROM o eMMC.
- Habilitar de manera senzilla, a partir de la variable d'entorn video_interfaces, les sortides de vídeo HDMI i LVDS als paràmetres de "Linux Kernel".
- Carregar el fitxer "device tree blob" de "Linux Kernel" adequat segons la configuració dels quatre GPIOs amb resistències de pull-up i pull-down, veure l'apartat 2.3 "IGEP SMARC i.MX6" i 3.4.3 "Device Tree" per a més informació.
- Carregar el nucli de "Linux Kernel" a través dels dispositius: SD, eMMC, SATA (segons versió), Ethernet o USB OTG. En la configuració per defecte s'ha estipulat el següent ordre d'arrencada:
 - IGEP SMARC i.MX6 Solo i DualLite: SD, eMMC i Ethernet.
 - IGEP SMARC i.MX6 Dual i Quad: SD, SATA, eMMC i Ethernet.

3.3.2 Afegir suport a l'U-boot per a l'IGEP SMARC i.MX6

Per carregar un sistema operatiu i afegir la resta de funcionalitats descrites anteriorment cal afegir suport a l'U-boot. El primer capítol del document "i.MX BSP Porting Guide" amb revisió L3.14.38_6ul-ga^[48] explica com portar l'U-boot 2015.04 a un nou maquinari. A continuació es fa un resum del contingut i desenvolupament realitzat^[49]:

U-Boot Overview: recomana buscar un maquinari suportat per l'U-boot que sigui similar al maquinari a desenvolupar. En l'IGEP SMARC i.MX6 s'ha utilitzat la placa d'avaluació i.MX6 SABRE SD^[50] com a referència, perquè comparteixen: PMIC (model PF0100), interfície de xarxa (anomenada RGMII) i memòria RAM externa (només a l'IGEP SMARC i.MX6 DualLite).

Obtaining the Source Code for the U-Boot: explica com descarregar el codi font de l'U-boot i quins passos cal seguir per duplicar el suport d'U-boot de la placa de referència. El resultat són dues configuracions de maquinari que suporten la placa de referència, però el codi font del suport de cada màquina és independent a l'altre. L'origen del suport per a la màquina IGEP0046 (IGEP SMARC i.MX6) és la màquina MX6SABRES (i.MX6 SABRE SD).

Customizing the i.MX6 or i.MX7 Custom Board Code: a partir de la còpia realitzada a l'apartat anterior, explica com modificar la configuració de la memòria RAM externa (taules DCD) i les funcions `board_early_init_f()`, `board_init()`, `board_late_init()` i `checkboard()` del fitxer `system_board.c`. En tenir accés als esquemàtics del maquinari es coneixen les diferències entre l'IGEP SMARC i.MX6 i l'i.MX6 SABRE SD. Els principals canvis són la configuració de: GPIOs, MUX (IOMUXC), Ethernet PHY, RAM externa (a l'IGEP SMARC i.MX6 Quad) i noms dels "device tree blobs".

Debugging: explica com depurar amb l'U-boot per detectar problemes al maquinari o programari.

El resultat de la compilació de l'U-boot configurat per la màquina igep0046 és el fitxer binari `u-boot.imx`. Si s'utilitza la SD, eMMC, SATA (segons versió) o USB OTG es pot carregar el binari en memòria RAM i executar-lo. Per a més informació de com gravar l'`u-boot.imx` es recomana llegir l'apartat 4.3 "Arrencada BOOT_SEL".

3.4 Linux Kernel

El Kernel de Linux, o "Linux Kernel", és un nucli de sistema operatiu sota llicència GPL orientat a un gran nombre d'ordinadors com: servidors, sistemes encastats, ordinadors personals entre altres. És un programa multiarquitectura i es basa en la filosofia Unix que advoca a què el codi font sigui senzill, modular, interpretable i curt^[51].

"Linux Kernel" és un programari més complex que un bootloader i el seu objectiu és fer d'enllaç entre les aplicacions i el maquinari. Les funcions més importants del nucli, però no les úniques són:

- Administrar la memòria de tots els processos.
- Administrar el temps del processador pels processos actius.
- Permet utilitzar els perifèrics i altres elements de l'ordinador de manera homogènia.

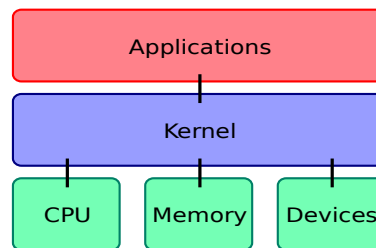


Figura 7: Un kernel connecta l'aplicació de programari al maquinari d'un ordinador.

En el plantejament del BSP s'ha optat escollir el mateix "Linux Kernel" que les plaques i.MX6 utilitzen a la versió Fido de meta-fsl-arm. Aquest "Linux Kernel", anomenat `imx_3.14.28_1.0.0_ga`, és el "Linux Kernel" de NXP pels seus microcontroladors i es basa en el "Linux Kernel" 3.14.28 mainline de Linus Torvalds. Les diferències, respecte al "Linux Kernel" de Torvalds, són el suport per a les IP propietàries del SoC: GPU 2D, GPU 3D i vídeo CODEC.

Els següents subapartats detallen les característiques i el desenvolupament realitzat al "Linux Kernel" per a l'IGEP SMARC i.MX6:

3.4.1 Modificacions al Linux Kernel per a l'IGEP SMARC i.MX6

Com s'ha descrit anteriorment, el "Linux Kernel" de NXP dona suport complet als elements del microcontrolador i.MX6. Ara cal completar aquest suport pels elements externs al SoC. Concretament s'han realitzat les següents modificacions^[52]:

- Canvis als controladors MMC i UART de l'i.MX6, perquè els backports dels controladors WIFI i Bluetooth s'integrin correctament. Per a més informació consulta l'apartat 3.4.4 "WIFI i Bluetooth backports per al WiLink 8".
- Incloure correccions de la comunitat de NXP que el fabricant no ha aplicat^[53].
- Canvis al controlador Ethernet PHY 88E1510 de Marvell per modificar la configuració dels registres. Els canvis s'han realitzat utilitzant la documentació propietària del fabricant.
- Afegir suport al mòdem UC20 de Quectel utilitzant la documentació del fabricant^[54].
- Ampliar el suport al controlador "userspace consumer" perquè pugui ser utilitzat al "device tree". "userspace consumer" controla resets i reguladors externs a través de GPIOs^[55].

3.4.2 Configuració al Linux Kernel per a l'IGEP SMARC i.MX6

El "Linux Kernel" permet un nombre de configuracions quasi il·limitat que permeten definir les funcionalitats incorporades als binaris. Les funcionalitats poden estar integrades en mòduls externs o permanentment al nucli de la imatge. Quan és possible, incloure funcionalitats en mòduls permet: alliberar recursos del sistema quan no s'utilitzen i afegir o eliminar funcionalitats en calent del "Linux Kernel".

A més, el "Linux Kernel" inclou fitxers anomenats configuradors que modifiquen la configuració de compilació. Aquests fitxers es guarden amb la terminació `_defconfig` al directori `/arch/«arquitectura_cpu»/configs`. En utilitzar nuclis ARM el microcontrolador i.MX6, tots els seus configuradors es localitzen a `/arch/arm/configs`.

Concretament, el Kernel de Linux `imx_3.14.28_1.0.0_ga` conté tres configuradors adequats pels microcontroladors i.MX6 i i.MX7: `imx_v6_v7_defconfig`, `imx_v7_defconfig` i `imx_v7_mfg_defconfig`.

Seguint els mateixos passos que al desenvolupament de l'U-boot, s'ha escollit el configurador `imx_v7_defconfig` com a referència perquè és el mateix que s'utilitza en la placa d'avaluació i.MX6 SABRE SD. En `imx_v7_defconfig` s'han realitzat algunes modificacions per adaptar el "Linux Kernel" al maquinari de l'IGEP SMARC i.MX6. Com a resultat, `imx6_igep0046_defconfig` recull les diferències del fitxer d'origen `imx_v7_defconfig`, els canvis són:

- Modificat el terminal de depuració al dispositiu `ttymxc1`.
- Afegit el controlador `marvell_phy` per donar suport al PHY 88E1510 de Marvell.
- Afegit el controlador `regulator-userspace-consumer` per donar suport a resets i reguladors externs en espai d'usuari.
- Afegit el controlador `ppp` (Point-to-Point) més una configuració per donar suport de xarxa al mòdem UC20 de Quectel.
- Modificada la infraestructura de xarxa per poder instal·lar els backports de WIFI i Bluetooth del xip Wilink 8. Aquesta adaptació té els següents canvis:
 - Configurat com a mòduls els controladors de la infraestructura de xarxa que utilitza el xip Wilink 8. Aquest canvi permet substituir els mòduls generats pel codi font del "Linux Kernel" pels mòduls creats amb els backports.

- Tret el suport als controladors WIFI i Bluetooth que no utilitza l'IGEP SMARC i.MX6.
- Afegits els controladors WIFI i Bluetooth del xip Wilink 8. El Kernel `imx_3.14.28_1.0.0_ga` conté els controladors WIFI i Bluetooth en estat de desenvolupament. Aquests controladors ni funcionen ni s'utilitzen, però es configuren perquè els backports generen els mòduls a través de la configuració de "Linux Kernel".
- Afegits els controladors `ti_st` (TI Shared transport) i `st_hci` (Shared transport HCI), perquè el Bluetooth del Wilink 8 utilitza aquest protocol de comunicació.
- Afegides altres funcionalitats dependents de les anteriors.

Durant el desenvolupament de l'IGEP SMARC i.MX6, `imx6_igep0046_defconfig` ha rebut més modificacions, però no s'expliquen perquè no afecten la revisió A del maquinari. Per obtenir més informació dels backports del xip Wilink 8 consulta l'apartat 3.4.4 "WIFI i Bluetooth backports per al WiLink 8" de la memòria.

Un cop configurat el "Linux Kernel" per a l'IGEP SMARC i.MX6 cal donar suport al maquinari. Les versions més recents de "Linux Kernel", a diferència del `system_board.c` de l'U-boot, utilitzen l'estructura "device tree". El següent subapartat explica que és el "device tree" i com s'ha donat suport al maquinari de l'IGEP SMARC i.MX6.

3.4.3 Device Tree

"Device tree" és un estàndard de lliure accés que permet descriure el maquinari d'un sistema, perquè un programari pugui controlar un o més dispositius a través de controladors amb base a la informació que rep del "device tree". Com el nom indica, l'estructura "device tree" es presenta amb format arbre amb nodes a les branques.

Sembla un llenguatge similar a VHDL o Verilog, però presenta diferències molt importants. Els llenguatges VHDL i Verilog permeten dissenyar un maquinari sencer, seria equivalent a disposar dels esquemàtics del maquinari. En canvi, el llenguatge "device tree" descriu només com està connectat i quines són les característiques del maquinari, seria equivalent al manual d'instruccions tècnic de l'usuari per conèixer les utilitats, capacitats i ús d'un determinat dispositiu.

Actualment, l'estructura "device tree" és popular en sistemes encastats basats en processadors ARM, perquè aquests encastats contenen molts busos de comunicació que no detecten dinàmicament els perifèrics connectats. Busos com el MMC, UART, I2C i SPI cal descriure els perifèrics connectats per saber com comunicar-se.

En versions més antigues del "Linux Kernel", les característiques del maquinari es declaren en fitxers C anomenats "system board". `system_board.c` és compila com qualsevol funcionalitat del Kernel fent que els binaris disposin de tota la informació del maquinari configurat.

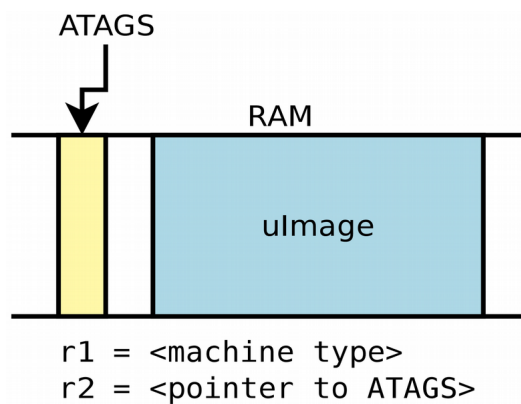


Figura 8: abans del "device tree", el bootloader passa la ID de la màquina i un punter al descriptor ATAGS al Kernel.

En versions més recents del "Linux Kernel", les característiques del maquinari només es declaren al fitxer "device tree blob" que conté tota la informació de l'estructura "device tree" de la màquina.

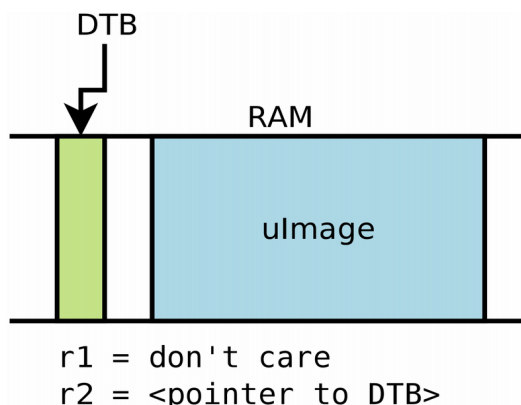


Figura 9: amb "device tree", el bootloader passa el punter del "device tree blob" al Kernel.

Els principals avantatges d'utilitzar l'estructura "device tree" respecte al `system_board.c` són:

- Interpretació: les màquines basades en system_board utilitzen el llenguatge C. El C és un llenguatge molt versàtil que permet barrejar elements característics del maquinari i controladors als system_board. A més, com que els fitxers system_board no estan estandarditzats, no segueixen pautes de desenvolupament. Per exemple, és possible que dos maquinaris similars utilitzin per al mateix propòsit noms diferents en variables i funcions. Aquest desordre dificulta la interpretació del codi.
- Classificació: l'estructura en arbre "device tree" només permet la descripció del maquinari. Com a resultat, les descripcions de maquinari amb "device tree" estan més ben organitzades que les descripcions amb system_board.
- Temps de desenvolupament: els fitxers font i binaris (blobs) del "device tree" no estan vinculats amb el codi font del "Linux Kernel". Com a resultat, no cal compilar el "Linux Kernel" cada vegada que es fan modificacions al "device tree". A més, per donar suport a diferents maquinaris sols cal un binari de "Linux Kernel" més un "device tree blob" per a cada màquina.

Per l'altra banda, el principal inconvenient del "device tree" és que no tots els controladors del "Linux Kernel" suporten aquesta estructura, perquè cal modificar els controladors per afegir suport al "device tree".

En aquest BSP, tant l'U-boot com el "Linux Kernel" ja inclouen suport per a "device tree". La següent estructura de fitxers en arbre d'inclusió dóna suport a l'IGEP SMARC i.MX6 versió A:

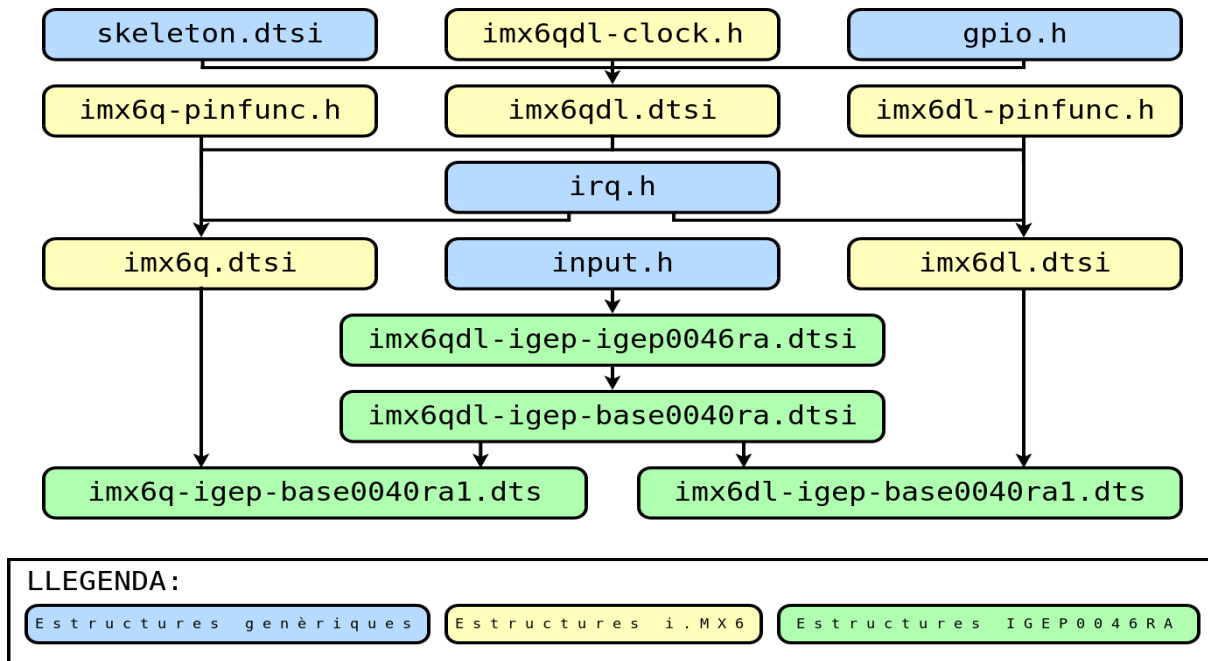


Figura 10: Estructura completa del "device tree" de l'IGEP0046RA.

A continuació, per comprendre l'organització i el desenvolupament realitzat, s'expliquen cadascuna de les parts:

- Estructures genèriques: descriptors i estructures comunes vàlides per a qualsevol maquinari.
- Estructures i.MX6: descriptors i estructures comunes vàlides per a qualsevol maquinari que utilitzi un SoC i.MX6. En aquesta part es descriuen els rellotges, perifèrics, entrades i sortides del microcontrolador. Els fitxers amb l'etiqueta `imx6dl` fan referència als models i.MX6 Solo i DualLite. En canvi, els fitxers amb l'etiqueta `imx6q` fan referència als models i.MX6 Dual i Quad.
- Estructures IGEP0046RA: estructures pròpies de l'IGEP SMARC i.MX6 versió A més la primera versió de l'IGEP SMARC Expansion. En aquesta part es descriuen els components externs al microcontrolador i s'habiliten els nodes que utilitza el maquinari. Com ha estat la part desenvolupada durant el projecte es farà una explicació més detallada de cada arxiu:
 - `imx6qdl-igep-igep0046ra.dtsi`: els nodes d'aquest fitxer fan referència als components interns de l'IGEP SMARC i.MX6 (IGEP0046-RA). Totes les plaques d'expansió que utilitzin l'IGEP SMARC i.MX6 dependran d'aquest arxiu.

- `imx6qdl-igep-base0040ra.dtsi`: els nodes d'aquest fitxer fan referència als components de l'IGEP SMARC Expansion (BASE0040-RA). Aquest fitxer depèn de `imx6qdl-igep-igep0046ra.dtsi` i és independent del model de processador utilitzat al mòdul.
- `imx6q-igep-base0040ra1.dts`: aquest fitxer inclou els nodes d'`imx6q.dtsi` i `imx6qdl-igep-base0040ra.dtsi` per donar suport al conjunt IGEP SMARC i.MX6 model Dual o Quad amb l'IGEP SMARC Expansion. A més, habilita i configura les característiques pròpies d'aquestes versions, concretament els 4 framebuffers de vídeo, el perifèric SATA i l'enllaç de la sortida LVDS.
- `imx6dl-igep-base0040ra1.dts`: aquest fitxer inclou els nodes d'`imx6dl.dtsi` i `imx6qdl-igep-base0040ra.dtsi` per donar suport al conjunt IGEP SMARC i.MX6 model Solo i DualLite amb l'IGEP SMARC Expansion. A més, habilita i configura les característiques pròpies d'aquestes versions, concretament els 2 framebuffers de vídeo, l'enllaç de la sortida LVDS i els perifèrics I2C4 i PXP.

Algunes descripcions de les estructures IGEP0046A són similars als fitxers "device tree" que donen suport a la placa d'avaluació i.MX6 SABRE SD: `imx6qdl-sabresd.dtsi`, `imx6q-sabresd.dts` i `imx6dl-sabresd.dts`.

Per facilitar el desenvolupament, els nodes i característiques de l'IGEP SMARC i.MX6 Kit s'han repartit entre el mòdul (`imx6qdl-igep-igep0046ra.dtsi`) i la placa d'expansió (`imx6qdl-igep-base0040ra.dtsi`). Amb aquest plantejament, sense haver de modificar els descriptors del mòdul, els desenvolupadors es poden centrar en la seva placa d'expansió per donar suport al "device tree".

3.4.4 *WIFI i Bluetooth backports per al WiLink 8*

L'IGEP SMARC i.MX6 té connectivitat WIFI i Bluetooth amb les opcions d'utilitzar una antena SMD integrada al mòdul o una antena externa a través del connector U.FL. El microcontrolador i.MX6 es comunica amb el mòdul LBEP de Murata que es basa en la família de xips WiLink 8 de Texas Instruments. L'IGEP SMARC i.MX6 disposa d'una sola antena (comunicació SISO) i és compatible amb les següents opcions de la família WiLink 8:

Nom del xip:	Característiques principals:
WL1801	WiFi: IEEE 802.11 b/g/n
WL1831	WiFi: IEEE 802.11 b/g/n Bluetooth: 4.0 classe 1
WL1803	WiFi: IEEE 802.11 a/b/g/n
WL1833	WiFi: IEEE 802.11 a/b/g/n Bluetooth: 4.0 classe 1

Taula 4: Xips WiFi i Bluetooth compatibles amb l'IGEP SMARC i.MX6 versió A.

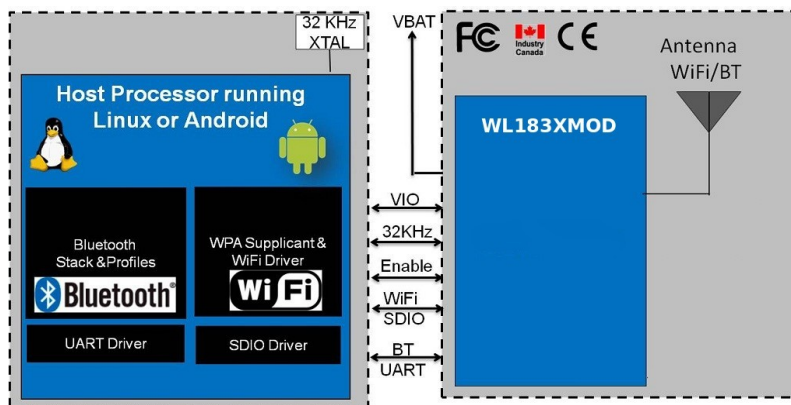


Figura 11: diagrama entre un processador i el xip WL183XMOD.

En la part de programari, el Kernel `imx_3.14.28_1.0.0_ga` conté els controladors pels mòduls WiLink 8, però aquests no són funcionals perquè estan inacabats. El primer "Linux Kernel" mainline amb suport complet és a partir de la versió 4.1^[56].

No obstant això, Texas Instruments ha desenvolupat varis backports. Un backport al Kernel de Linux consisteix a adaptar un controlador d'una versió més moderna a una més antiga. Els backports de Texas Instruments estan publicats al repositori WiLink 8 WLAN^[57]. Durant el desenvolupament del BSP, el backport més recent i compatible amb el Kernel `imx_3.14.28_1.0.0_ga` era la versió R8.6^[58].

A més, per facilitar el desenvolupament publica també l'eina WiLink 8 WLAN Build utilities^[59] que conté scripts de backporting per automatitzar fases del procés, aquesta eina permet:

- Descarregar controladors i utilitats per al WiLink 8.

- Aplicar pegats als controladors MMC i UART del "Linux Kernel" que són suportats als backports. El Kernel imx_3.14.28_1.0.0_ga de ISEE ja els integra^[60].
- Compilar i instal·lar controladors i utilitats per al WiLink 8 en el rootfs del sistema encastat.

Tot i així, continua sent tediós haver de compilar i copiar per separat el "Linux Kernel" i els backports del WiLink 8. Per automatitzar el procés completament, a la capa meta-fsl-arm-extra s'integren les receptes "Yocto Project" dels backports del WiLink 8.

3.5 Eines de gravació

L'empresa ISEE ven targetes de memòria amb sistemes operatius gravats als clients. També, durant la fabricació dels dispositius es copia el firmware més recent a la memòria interna. Pels processos de producció anteriors i facilitar als desenvolupadors la gravació de programari s'ha creat igep-tools.

Igep-tools és un conjunt d'utilitats escrites en Bash per automatitzar el procés de gravació en memòries. Les principals utilitats d'aquest conjunt són:

- igep-media-create: utilitat pensada per gravar memòries externes SDs i discs durs SATA. Permet arrencar un sistema operatiu en els dispositius anteriors preparant les particions i copiant el firmware. A més, pot copiar el firmware necessari perquè l'igep-flash gravi la memòria interna. Igep-media-create és compatible amb Linux i els seus paràmetres principals són: ruta del dispositiu a gravar, nom del dispositiu IGEP i ruta del fitxer amb el firmware.
- igep-flash: utilitat pensada per gravar la memòria interna del dispositiu, perquè pugui arrencar un sistema operatiu. Quan el dispositiu arrenca amb una memòria externa es pot utilitzar l'igep-flash per preparar les particions i copiar el firmware a la memòria interna. Igep-flash és compatible amb Linux i el seu principal paràmetre és la ruta del fitxer amb el firmware.

Per producció, igep-tools conté un "init script" per executar l'igep-flash sense la intervenció de l'usuari durant l'arrencada del sistema operatiu. Per activar la funcionalitat cal definir com a paràmetre de "Linux Kernel" l'etiqueta "igep-tools.auto=flash".

Igep-tools és compatible amb els dispositius: IGEPv2 (igep0020), IGEP COM MODULE (igep0030), IGEP COM PROTON (igep0032) i IGEP COM AQUILA (igep0033). Pel BSP de l'IGEP SMARC i.MX6 s'ha afegit suport al dispositiu igep0046.

3.6 Eines de compilació

3.6.1 Yocto Project Application development SDK

"Yocto Project" no és només una eina per crear sistemes operatius "Embedded GNU/Linux", també és capaç de generar utilitats per compilar creudament programes. Un compilador creuat, popularment anomenat "cross compiler", és un compilador capaç de crear codi executable per a una arquitectura de processador diferent de l'arquitectura on s'executa el compilador.

En el BSP de l'IGEP SMARC i.MX6, el compilador creuat s'executa en una màquina amb arquitectura x86 per generar binaris compatibles amb el processador ARM Cortex A9 (arquitectura ARMv7-A^[61]) del microcontrolador i.MX6.

A més, el compilador creuat de "Yocto Project" incorpora un directori amb les capçaleres del "Linux Kernel", programes i llibreries del sistema operatiu encastat^[62]. Aquest directori simplifica al desenvolupador el procés de compilació en programes amb dependències externes. Quan un compilador inclou totes les capçaleres del sistema operatiu s'anomena toolchain i "Yocto Project" anomena el seu "Yocto Project Application development SDK".

ISEE ofereix una versió de "Yocto Project Application development SDK" adaptat al sistema operatiu oficial dels productes IGEP suportats per "Yocto Project". En el cas de l'IGEP SMARC i.MX6, el toolchain té suport per la imatge isee-image-dev. No obstant això, els usuaris del BSP que generin altres imatges amb "Yocto Project" podran generar un SDK personalitzat i ajustat amb la comanda "bitbake -c populate_sdk <nom_imatge_SO>".

"Yocto Project Application development SDK" permet compilar programes escrits en C i C++. Per utilitzar el toolchain cal afegir i modificar les variables d'entorn del terminal amb el script environment-setup-cortexa9hf-vfp-neon-poky-linux-gnueabi.

3.6.2 Eclipse Plugin

Pels usuaris acostumats a desenvolupar aplicacions amb entorns gràfics de desenvolupament (IDEs), "Yocto Project" és compatible amb Eclipse IDE. Eclipse és un popular IDE per a diversos idiomes de programació, escrit principalment en Java i compatible amb Linux, MAC i Windows. L'entorn és molt personalitzable a través de connectors (plugins) i permet donar suport als BSPs basats en "Yocto Project" utilitzant el connector "Yocto Eclipse IDE".

"Yocto Eclipse IDE" integra les funcionalitats de "Yocto Project Application Development Toolkit (ADT)"^[63] i "Yocto Project Application development SDK" a l'Eclipse. Aquest connector permet utilitzar el protocol TCF per enviar, compilar, executar i depurar remotament entre el PC i el sistema encastat.

El connector de "Yocto Project" per Eclipse s'ha testejat i validat utilitzant un Ubuntu 14.04 de 64 bits amb Eclipse IDE versió Luna i l'IGEP SMARC i.MX6 corrent el sistema operatiu isee-image-dev. Els passos per instal·lar el programari estan explicats al capítol adt-eclipse del document "Yocto Project Development Manual"^[64].

3.6.3 Projectes de demostració

Pels usuaris del BSP menys experimentats, ISEE inclou projectes de demostració per Eclipse IDE amb el connector de "Yocto Project". Aquests projectes permeten provar el maquinari sense escriure cap línia de codi i són una adaptació dels projectes preparats per un altre producte^[65]. Els projectes de demostració són:

- Cairoproject: projecte basat en autotools, utilitza les llibreries de Cairo per generar una imatge amb la frase "Hello World".
- Cppproject: projecte basat en autotools, utilitza el llenguatge C++ per escriure "Hello World" al terminal.
- Cproject: projecte basat en autotools, utilitza el llenguatge C per escriure "Hello World" al terminal.
- Cprojectwithoutautotools: projecte basat només en Makefiles, utilitza el llenguatge C per escriure "Hello World" al terminal.
- Dbusproject: projecte basat en autotools, utilitza el sistema de comunicació entre processos D-Bus^[66] per enviar el missatge "Hello World".

- Glibproject: projecte basat en autotools, utilitza les llibreries Glib per escriure "Hello World" al terminal.
- Gstreamerproject: projecte basat en autotools, aquest programa és un reproductor d'àudio que utilitza les llibreries de Gstreamer per reproduir fitxers en format Ogg. Cal passar-li com a paràmetre la ruta completa del fitxer d'àudio.
- GTKproject: projecte basat en autotools, utilitza les llibreries GTK per escriure "Hello World" en una finestra.

4 Resultats del BSP

Un cop explicat el maquinari i programari de l'IGEP SMARC i.MX6, cal comprovar el funcionament del sistema encastat. En aquest capítol es detalla com s'han validat els perifèrics i busos de comunicació del miniordinador. Si els resultats no són satisfactoris, s'analitza el problema per resoldre'l en la següent versió del producte.

4.1 Memòria RAM externa

Segons la Taula 2 "Muntatges de l'IGEP SMARC i.MX6 versió RA" de la memòria, les dues especificacions de cada muntatge utilitzant diferents configuracions de memòria RAM externa. Per configurar el programari de l'IGEP SMARC i.MX6, l'U-boot utilitza taules "Device Configuration Data" (DCD)^[67] adaptades a l'estructura de la memòria RAM. Aquestes taules configuren els registres de la memòria RAM externa i d'altres elements essencials del SoC com els rellotges, perquè el bootloader pugui executar-se. Com a resultat, el configurador mx6dl_igep0046_defconfig utilitza la taula mx6dl_igep0046_4x256.cfg^[68] i per mx6q_igep0046_defconfig s'utilitza la taula mx6q_igep0046_4x512.cfg^[69].

L'eina utilitzada per comprovar la memòria RAM externa s'anomena memtester^[70]. Aquest programa demana espai de memòria virtual al sistema operatiu per realitzar operacions de lectura i escriptura.

Per validar el sistema, la comanda "memtester 400M" s'executa paral·lelament al terminal de l'IGEP tantes vegades com processadors conté el SoC. La comanda anterior reserva gairebé tota la memòria virtual del sistema operatiu i només deixa lliure un petit espai per a altres processos. Els resultats han estat satisfactoris, perquè no hi ha hagut errors de memòria als dos muntatges al llarg de dos dies executant l'aplicació repetitivament.

4.2 Port sèrie

Segons la Taula 1 "Característiques principals de l'IGEP SMARC i.MX6" de la memòria, l'IGEP SMARC i.MX6 conté 3 ports sèrie (UARTs) disponibles al connector SMARC. La funcionalitat de cadascun dels ports en la placa IGEP SMARC Expansion s'exposa als següents subaparts.

4.2.1 Port sèrie de depuració

Un port sèrie és una via de comunicació eficaç per testejar i depurar, en un sistema encastat pot tenir accés a: missatges de "Linux Kernel", la consola sèrie del bootloader i sistema operatiu.

En l'IGEP SMARC i.MX6, el port sèrie de depuració utilitza l'UART2 del microcontrolador i un connector de 7 pins amb interfície TTL a 3,3 volts. El connector és compatible amb el convertidor USB a UART TTL-232R-3V3 de FTDI^[71] o similar. Les característiques del port sèrie són: 115200 bauds per segon, codificació de 8 bits i comunicació a través dels senyals TX i RX.

L'eina utilitzada per comprovar el port sèrie de depuració s'anomena minicom^[72]. Aquest programa emula un terminal sèrie en sistemes Linux per rebre i enviar dades.

Per validar el sistema, la comanda "minicom -b 115200 -D <dispositiu sèrie del TTL-232R-3V3 al PC>" configura el convertidor sèrie del PC amb els mateixos paràmetres que el sistema encastat. Els resultats han estat satisfactoris, perquè s'han enviat i rebut caràcters entre els dos equips.

4.2.2 Port sèrie RS232

L'IGEP SMARC i.MX6 utilitza l'UART4 del microcontrolador i un connector "IDC 10" amb interfície RS232^[73]. El connector conté els senyals TX i RX i és compatible amb convertors "IDC 10" a DB9 o similars.

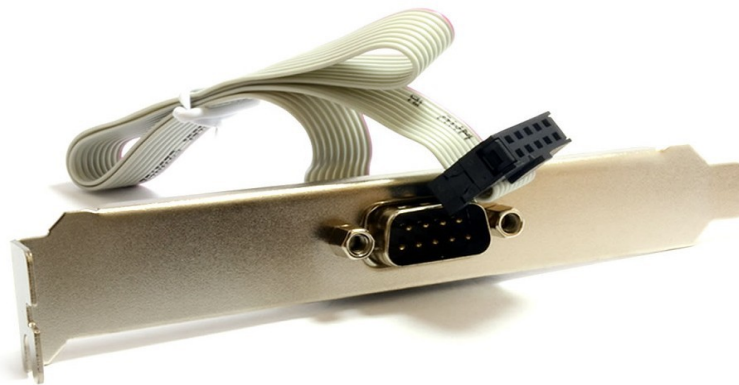


Figura 12: convertidor sèrie "IDC 10" a DB9.

L'eina utilitzada per comprovar el port sèrie RS232 s'anomena microcom, perquè el minicom no està disponible a les capes de "Yocto Project". Aquest programa, integrat al sistema

operatiu encastat a través de la suite Busybox^[74], emula un terminal sèrie per rebre i enviar dades.

Per validar el sistema, cal realitzar un bucle als senyals TX (pin 8) i RX (pin 9) del connector "IDC 10". Finalment, executar la comanda "microcom -s 115200 /dev/ttymx3" al terminal de l'IGEP. Els resultats han estat satisfactoris, perquè cada caràcter enviat al terminal ha estat retornat per pantalla.

4.2.3 Port sèrie RS485

Pel protocol de comunicació sèrie RS485^[75], l'IGEP SMARC i.MX6 utilitza l'UART3 i el GPIO3_IO31 del microcontrolador. Mentre, l'IGEP SMARC Expansion disposa d'un connector de cable a placa per accedir-hi.

L'eina utilitzada per comprovar el port sèrie RS485 torna a ser el microcom utilitzat ja al subapartat anterior. Per establir la direccionalitat del bus cal controlar manualment la sortida del port RS485 amb el GPIO anterior.

Per validar el sistema, s'han utilitzat dues IGEP SMARC i.MX6 Kit connectats de la següent manera on la connexió massa GND és opcional:

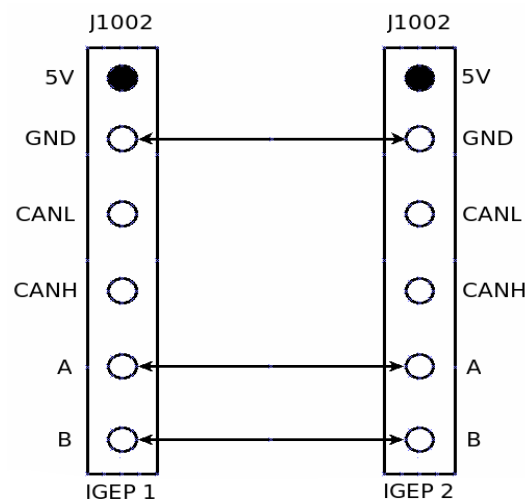


Figura 13: connexió RS485 entre dues IGEP SMARC Expansion.

On segons la sortida del GPIO3_IO31 de cada IGEP, la comunicació del bus és:

IGEP1: valor del GPIO3_IO31	IGEP2: valor del GPIO3_IO31	Comportament del bus
0	0	Cap, sense transmissió
0	1	L'IGEP2 envia dades a l'IGEP1
1	0	L'IGEP1 envia dades a l'IGEP2
1	1	Cap, estat no vàlid

Taula 5: Comportament del bus RS485 en dues IGEP SMARC Expansion.

Els resultats han estat satisfactoris, perquè s'han enviat caràcters en els dos sentits de la comunicació. Per assolir l'objectiu, cal executar la comanda "microcom -s 115200 /dev/ttymx2" en cada IGEP i controlar els GPIO3_IO31 com mostra la taula anterior.

4.3 Arrencada BOOT_SEL

Seguint les especificacions de l'estàndard SMARC, l'IGEP SMARC i.MX6 és capaç d'arrencar un bootloader de diferents orígens segons els valors dels pins BOOT_SEL. La següent taula mostra l'origen d'arrencada segons la configuració:

BOOT_SEL2# (P125)	BOOT_SEL1# (P124)	BOOT_SEL0# (P123)	Origen d'arrencada	Comentaris
GND	GND	GND	Base SATA	Compatible en i.MX6 Dual i Quad
GND	GND	Flotant	Base SD	Compatible
GND	Flotant	GND	Base eMMC	No validat, BASE0040RA no conté eMMC
GND	Flotant	Flotant	Base SPI	No validat, BASE0040RA no conté memòria SPI
Flotant	GND	GND	COM dispositiu (USB)	Compatible
Flotant	GND	Flotant	Boot remot (USB)	Compatible

BOOT_SEL2# (P125)	BOOT_SEL1# (P124)	BOOT_SEL0# (P123)	Origen d'arrencada	Comentaris
Flotant	Flotant	GND	COM eMMC	Compatible
Flotant	Flotant	Flotant	COM SPI	Error de disseny al maquinari

Taula 6: Taula d'arrencada de l'IGEP SMARC i.MX6 revisió A.

Per controlar l'origen d'arrencada del bootloader, els pins BOOT_SEL configuren portes lògiques i un descodificador per assignar els registres del microcontrolador BOOT_CFG1, BOOT_CFG2, BOOT_CFG3 i BOOT_CFG4. Els registres anteriors són capturats a través dels pins "External Interface Module" (EIM) durant l'execució del "boot ROM"^[76]. Per a més informació sobre el sistema d'arrencada llegir el capítol 8 del manual IMX6SDLRM^[77] o IMX6DQRM^[78].

Perquè el "boot ROM" de l'i.MX6 carregui un bootloader dels dispositius eMMC, SD i SATA, és necessari guardar el binari sense partició entre les adreces de memòria 1 Kibibyte (2^{10} bytes) i 4 Megabytes (2^{20} bytes)^[79].

L'eina utilitzada per gravar el bootloader s'anomena dd^[80]. Aquest programa permet llegir i copiar fitxers o dispositius en cru. On els paràmetres de la comanda "dd if=u-boot.imx of=/dev/sda bs=512 seek=2" serveixen per:

- if: input file, especifica la direcció al binari. On l'u-boot.imx, amb mida aproximada a 367 KB, és inferior a ($2^{20}-2^{10}$) Bytes.
- of: output file, especifica la direcció al dispositiu de memòria eMMC, SD o SATA. Per exemple: /dev/sda.
- bs=512: copia en blocs de 512 Bytes.
- seek=2: grava a partir de l'adreça 1 Kibibyte (2^{10} bytes = 512 x 2 Bytes).

Gravant el bootloader i configurant els pins de BOOT_SEL, s'ha arrencat el bootloader satisfactòriament al microcontrolador excepte a la memòria SPI NOR Flash de l'IGEP SMARC i.MX6. L'origen del problema és l'incorrecte multiplexació dels pins SPI pel "boot ROM", la solució està a la taula 8-23 del manual IMX6SDLRM.

4.4 LEDs

En un sistema encastat, els LEDs són útils per conèixer l'estat del sistema i donar indicacions a l'usuari. L'IGEP SMARC i.MX6 Kit conté 2 LEDs bicolor (verd i vermell) al mòdul més 1 LED bicolor (blau i vermell) a l'expansió. Al BSP s'utilitzen els LEDs del mòdul en les següents situacions:

- L'U-boot s'està executant: activats quatre LEDs.
- El "Linux Kernel" s'està executant: activat un LED verd.
- El sistema està apagat i alimentat: activats dos LEDs vermells.
- Igep-flash d'igep-tools: diferents indicacions segons l'estat de la gravació a l'eMMC^[81].

Tots els LEDs del Kit es poden controlar en espai d'usuari a través del controlador gpio-leds. En el sistema operatiu, els LEDs estan localitzats a la ruta `/sys/class/leds/` i els noms dels sis són: `igep:red:led0`, `igep:red:led1`, `igep:green:led0`, `igep:green:led1`, `base:blue:led0` i `base:red:led0`.

Les eines utilitzades per comprovar els LEDs són `echo`^[82] i `cat`^[83] per escriure i llegir al camp `brightness` de cadascun, per exemple el LED blau s'activa amb la comanda `"echo 1 > /sys/class/leds/base:blue:led0/brightness"`. Els resultats han estat satisfactoris, perquè tots els LEDs funcionen correctament.

4.5 Parada i reiniciï

En apartats anteriors del capítol 4 "Resultats del BSP" s'ha inicialitzat el sistema operatiu a través del bootloader per obtenir una consola sèrie de depuració i testejar els primers components. Continuant amb la validació del BSP, el següent apartat confirma si l'IGEP SMARC i.MX6 pot finalitzar i reiniciar el sistema operatiu amb seguretat.

Les eines utilitzades per comprovar la parada i reiniciï s'anomenen `halt`^[84] i `reboot`^[85] respectivament. Aquests programes modifiquen l'estat (`runlevel`) del procés `init`^[86] per terminar el sistema operatiu.

Per validar la parada del sistema, la comanda `"halt"` canvia l'estat de l'`init` a valor 0. En aquest punt, `init` comença a executar els scripts per desmuntar i apagar el sistema operatiu.

Finalment, el port sèrie de depuració envia el missatge "System Halted" i el sistema es bloqueja. Els resultats han estat satisfactoris, perquè no hi ha hagut problemes durant la parada de l'IGEP SMARC i.MX6.

Per validar el reiniciï del sistema, la comanda "reboot" canvia l'estat de l'init a valor 6. En aquest punt, init comença a executar els scripts per desmuntar i reiniciar el sistema operatiu. Finalment, el port sèrie de depuració envia el missatge "Rebooting... reboot: Restarting system" i el sistema es reinicia. Els resultats no han estat satisfactoris, perquè posteriorment el sistema no es reinicia. A més, al cap d'un temps apareix el missatge "mxc_restart: Watchdog reset failed to assert reset" al port sèrie de depuració.

L'IGEP SMARC i.MX6 no es reinicia a causa d'un problema al maquinari i la configuració utilitzada al programari. L'origen de l'error és el mètode d'alimentació a l'"ARM power domain" que controla el perifèric "General Power Controller" (GPC) del microcontrolador. "ARM power domain" alimenta la memòria cau i processador/s del SoC. El mètode enunciat anteriorment s'anomena ldo-bypass i permet deshabilitar els reguladors lineals interns del GPC perquè l'"ARM power domain" sigui alimentat directament pel "Power Management Integrated Circuit" (PMIC). El PMIC és un integrat del mòdul IGEP SMARC i.MX6 amb eficients reguladors commutats.

Per la banda del programari, el "Linux Kernel" executa la funció `mxc_restart`^[87] quan s'ha desmuntat tot el sistema operatiu. `mxc_restart` habilita el temporitzador `watchdog`^[88] 2 per generar al cap d'un temps una interrupció al "cold reset"^[89] del sistema, en el cas de l'IGEP SMARC i.MX6 a l'entrada PWRON del PMIC. El reiniciï no es produeix si el senyal PWRON no es connecta a cap `watchdog`.

No hi hauria error si no s'utilitzes la configuració ldo-bypass, però els avantatges són importants i es decideix modificar el maquinari en la següent versió. La solució es basa en el disseny de l'i.MX6 SABRE SD i s'han validat els canvis realitzant un rework^[90] sobre un dels prototips. Per a més informació sobre els reguladors del GPC llegir el capítol 10.4.1.1.1 del manual IMX6SDLRM o IMX6DQRM.

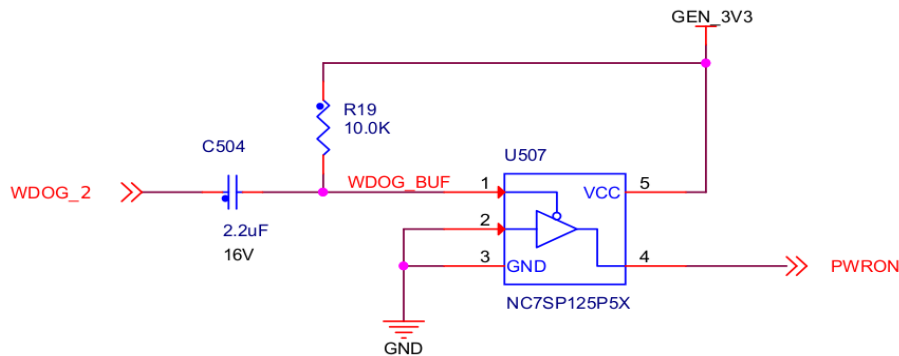


Figura 14: mecanisme de reiniciï de l'i.MX6 SABRE SD.

4.6 Sortida vídeo

Segons la Taula 1 "Característiques principals de l'IGEP SMARC i.MX6" de la memòria, l'IGEP SMARC i.MX6 conté 3 interfícies de sortida vídeo en el connector SMARC: HDMI, LVDS^[91] i MIPI DSI^[92]. En aquest apartat es faran proves en totes les interfícies excepte el MIPI DSI, perquè l'IGEP SMARC Expansion només té accessibles les sortides HDMI i LVDS. La funcionalitat i validació de cada interfície del Kit s'exposa als següents subapartats.

4.6.1 Sortida HDMI

"High-Definition Multimedia Interface" (HDMI) és un estàndard multimèdia digital d'alta definició molt popular per transmetre àudio, vídeo i altres dades sense compressió. L'IGEP SMARC i.MX6 incorpora connectivitat HDMI 1.4a al microcontrolador amb capacitat per transmetre àudio i vídeo. Per aprofitar la funcionalitat, l'IGEP SMARC Expansion conté un connector HDMI amb format A. En proveir la interfície diferents continguts multimèdia, cal validar cadascuna per separat.

L'eina utilitzada per comprovar el vídeo del HDMI s'anomena fb-test^[93]. Aquest programa de test envia patrons al HDMI a través de la memòria intermèdia de vídeo (framebuffer). La informació transmesa és correcta si no hi ha canvis entre el patró conegut i el resultat per pantalla.

Per validar el sistema s'utilitza el monitor Samsung SyncMaster B2030HD amb resolució 1920 x 1080 (1080p) i altaveus integrats. En l'U-boot s'ha configurat la variable d'entorn video_interfaces amb valor hdmi, perquè la sortida vídeo primària sigui la interfície sota test. Com a resultat, la configuració aplicada en la sortida HDMI és: RGB24 (R(8 bits)-G(8 bits)-

B(8 bits)), 1080p i composició alpha^[94] 100% opac. Amb la comanda fb-test s'obté el següent resultat:

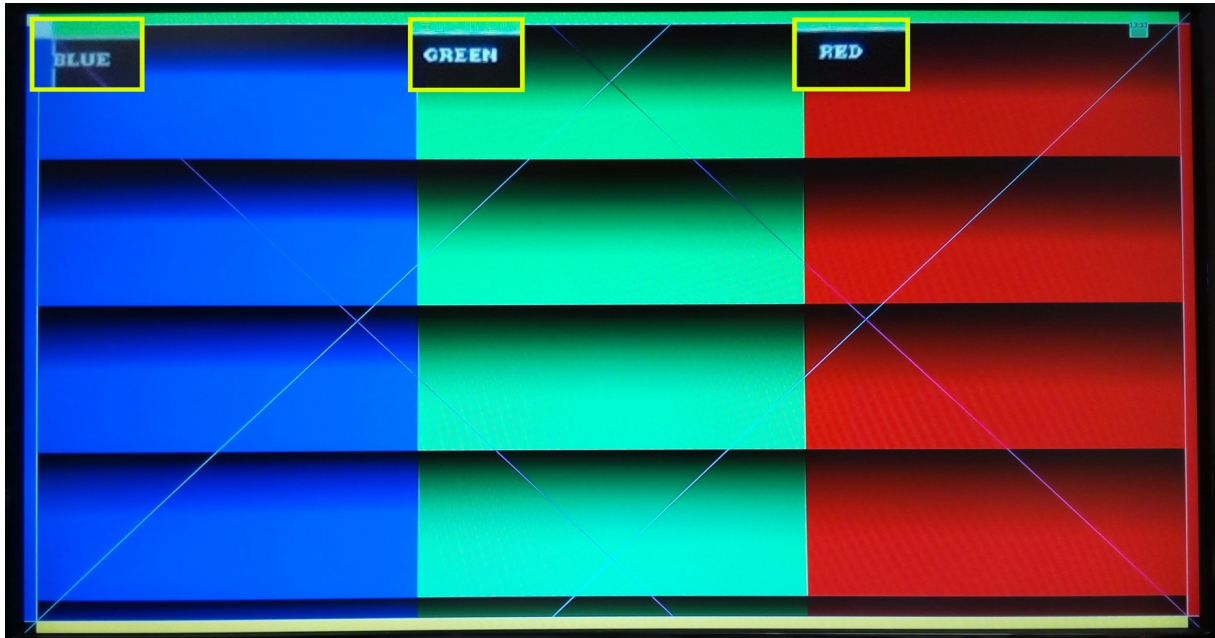


Figura 15: Resultat fb-test al monitor HDMI.

Per millorar la presentació de la figura anterior, el text en pantalla és ampliat 4x. On el degradat de cadascun dels colors primaris no presenta imperfeccions i estan ubicats on pertoca.

L'eina utilitzada per comprovar l'àudio del HDMI s'anomena aplay del paquet alsa-utils^[95]. Aquest paquet integra utilitats per controlar i utilitzar una targeta de so a través del controlador "Advanced Linux Sound Architecture" (ALSA)^[96].

Per validar el sistema s'ha utilitzat el mateix monitor que la prova anterior. Amb la comanda "aplay -D plughw:1,0 /usr/share/sounds/alsa/Side_Left.wav" se selecciona la targeta d'àudio HDMI per reproduir un fitxer WAV.

Durant el desenvolupament de les proves, s'ha observat que l'IGEP SMARC i.MX6 té creuades les línies diferencials Data0 i Clock. El mateix error es torna a repetir en la placa d'expansió i permet transmetre correctament la informació.

Els resultats han estat prou satisfactoris, perquè la sortida vídeo i àudio digital funcionen correctament, però les revisions següents del mòdul i placa d'expansió cal corregir els errors de maquinari detectats.

4.6.2 Sortida LVDS

"Low-voltage differential signaling" (LVDS) és un estàndard de transmissió de dades d'alta velocitat. En la transmissió de vídeo és molt utilitzat per la seva amplada de banda, immunitat al soroll i ús menor de línies de dades respecte als busos paral·lels. L'IGEP SMARC i.MX6 connecta el LVDS0 del microcontrolador amb el connector d'expansió SMARC, LVDS0 permet transmetre fins a 24 bits de color a 1280 x 720 píxels. Per aprofitar la funcionalitat, l'IGEP SMARC Expansion inclou un connector LVDS compatible amb la pantalla Hannstar HSD100PXN1^[97]. El maquinari i programari de la implementació LVDS és similar a la solució de la placa i.MX6 SABRE SD.

L'eina utilitzada per comprovar el LVDS torna a ser el programa fb-test utilitzat ja al subapartat anterior. Per validar el sistema s'utilitza la pantalla HSD100PXN1 amb resolució 1024 x 768 (XGA). En l'U-boot s'ha configurat la variable d'entorn video_interfaces amb valor lvds, perquè la sortida vídeo primària sigui la interfície sota test. Com a resultat, la configuració aplicada en la sortida LVDS és: RGB666 (R(6 bits)-G(6 bits)-B(6 bits)), XGA i sense composició alpha on el bit menys significatiu dels colors vermell i blau no es tenen en compte al framebuffer i es repeteixen amb el segon bit menys significatiu a la sortida LVDS. Amb la comanda fb-test s'obté el següent resultat:

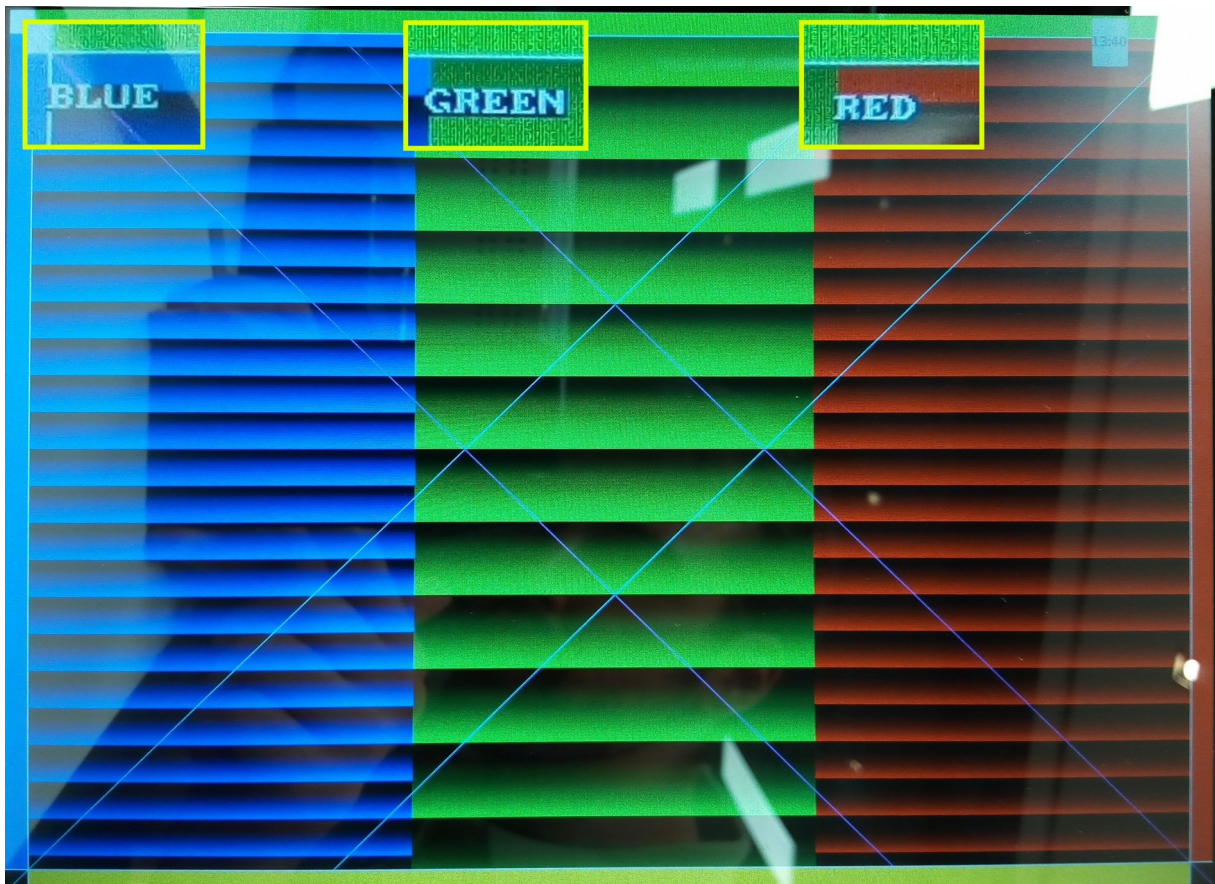


Figura 16: Resultat fb-test a la pantalla LVDS.

Per millorar la presentació de la figura anterior, el text en pantalla és ampliat 3x. On el degradat de cadascun dels colors primaris no presenta imperfeccions i estan ubicats on pertoca.

Els resultats han estat satisfactoris, perquè la sortida vídeo LVDS funciona correctament. El problema de la implementació és la poca versatilitat que aporta poder connectar un sol model de pantalla LVDS. En la pròxima revisió de la placa d'expansió es planteja substituir el connector actual per un segon HDMI i convertidor LVDS.

4.7 Ethernet

Ethernet és un protocol de transmissió de dades per a "Local Area Network" (LAN)^[98]. LAN permet connectar equips que estan dins d'una mateixa organització i àrea geogràfica petita sense la necessitat d'un equip central que gestioni les connexions d'un punt a un altre.

Ethernet utilitza l'accés al medi per contingut CSMA/CD^[99] que detecta les col·lisions entre paquets de dades i millora les prestacions del bus.

L'IGEP SMARC i.MX6 conté una interfície Gigabit Ethernet^[100] Dúplex al connector SMARC. Per utilitzar el bus en el Kit, l'IGEP SMARC Expansion disposa d'un connector amb format RJ45.

En el BSP, l'U-boot pot utilitzar l'Ethernet per poder carregar un sistema operatiu remot amb els protocols TFTP^[101] i NFS^[102]. A més, el sistema operatiu té accés en espai d'usuari a través dels controladors FEC i marvell_phy per donar suport al perifèric MAC del microcontrolador i.MX6 i al controlador Ethernet extern PHY 88E1510 de Marvell respectivament.

L'eina utilitzada per comprovar l'Ethernet s'anomena iperf^[103]. Aquest programa permet enviar un flux de paquets tant TCP com UDP als equips de test. Per provar l'equip sota test s'utilitza el protocol TCP que garanteix l'enviament de dades sense errors, en un mateix ordre i ens servirà per mesurar l'amplada de banda amb el qual pot enviar i rebre dades el sistema. La següent figura mostra la configuració de la prova:

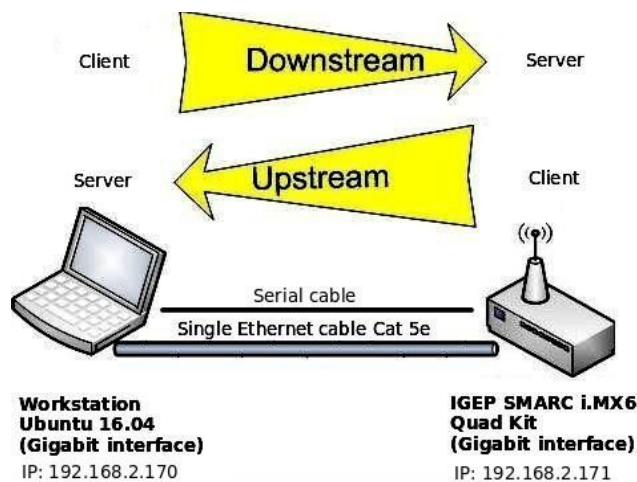


Figura 17: Configuració del maquinari per a la prova Ethernet.

Per validar el sistema, la comanda "iperf -s" estableix un dels equips amb el rol servidor i la comanda "iperf -c <IP server> -t 60s" estableix l'altre equip amb el rol client per enviar dades al servidor durant 60 segons utilitzant el protocol TCP. Els resultats de la prova són 411 Mb/s de pujada i 502 Mb/s de baixada per a l'IGEP SMARC i.MX6.

La comunicació ha estat satisfactòria però els resultats no han estat els esperats, perquè les dades enviades i rebudes no s'acosten als valors teòrics de la interfície Gigabit Ethernet (1 Gbit/s). Investigant les possibles causes del problema, s'ha trobat l'errata ERR004512 del SoC als documents IMX6SDLCE^[104] i IMX6DQCE^[105]. Aquest problema afecta a totes les versions del SoC amb Gigabit Ethernet excepte l'i.MX6 Solo X, la limitació del caudal Ethernet evita un desbordament d'una FIFO interna del xip.

4.8 I2Cs

Segons la Taula 1 "Característiques principals de l'IGEP SMARC i.MX6" la memòria, l'IGEP SMARC i.MX6 conté entre 3 i 4 ports I2C depenen del model de microcontrolador i.MX6. Aprofitant que el bus I2C permet connectar diversos dispositius a les línies de comunicació, els ports estan repartits entre les 5 interfícies del connector SMARC com mostra la següent taula:

Nom I2C SMARC	Pins SMARC	I2C i.MX6 Solo / Dual Lite	I2C i.MX6 Dual / Quad
I2C_CAM	S5 / S7	I2C1	I2C1
I2C_LCD	S139 / S140	I2C4	
HDMI_CTRL	P105 / P106	I2C2	I2C2
I2C_PM	P121 / P122	I2C3	I2C3
I2C_GP	S48 / S49		

Taula 7: Repartició de busos I2C entre el connector SMARC i el microcontrolador i.MX6.

L'eina utilitzada per comprovar els ports I2C s'anomena `i2cdetect` del paquet `i2c-tools`^[106]. Aquest paquet integra utilitats per detectar, llegir i escriure dades a través del bus I2C o les variants del protocol^[107].

L'IGEP SMARC Expansion no permet validar tots els busos I2C, perquè conté errors al maquinari i no s'utilitzen totes les interfícies. Per validar el sistema s'ha utilitzat l'IGEP SMARC i.MX6 Dual Lite (4 I2Cs disponibles) i la placa d'expansió SMARC LEC-BASE R1 d'Adlink^[108] connectada a una pantalla HDMI a través del connector HDMI1. La comanda "`i2cdetect -y <número i2c>`" busca perifèrics I2C en les adreces vàlides d'un determinat bus. A partir dels resultats i els esquemàtics de LEC-BASE R1 s'ha creat la següent taula:

Nom I2C	Dispositiu virtual	COM: adreça (component)	Expansió: adreça (component)
I2C1	/dev/i2c0	-	0x20 (PCF8515)
I2C2	/dev/i2c1	0x08 (MMPF0100)	0x50 (HDMI EDID)
I2C3	/dev/i2c2	0x50 (24AA32A)	0x4C (MMA7660FC)
I2C4	/dev/i2c3	-	0x1A (TLV320AIC23) 0x39, 0x3D, 0x60 (SI9022) 0x54, 0x55, 0x56, 0x57 (AT24C08C) 0x68 (DS1337S+)

Taula 8: Perifèrics I2C detectats a l'IGEP SMARC i.MX6 Dual Lite i LEC-BASE R1.

Els resultats han estat satisfactoris, perquè s'han detectat perifèrics I2C en tots els busos de l'IGEP SMARC i.MX6 Dual Lite. En el cas de les versions Dual i Quad del mòdul, els perifèrics connectats a l'I2C_CAM i l'I2C_LCD compartiran bus i se sumaran el total d'adreces ocupades sense duplicitats.

4.9 EEPROM

Les memòries "Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory" (EEPROM)^[109] són dispositius reprogramables de poca capacitat. Als sistemes encastats, les memòries EEPROM s'utilitzen freqüentment per emmagatzemar característiques úniques del dispositiu com el número de sèrie, direccions MAC^[110] i IP^[111], etc. Els motius d'aquest ús són:

- En moltes EEPROM, un pin d'entrada configura l'escriptura de dades per protegir el contingut.
- El contingut és independent al sistema operatiu, perquè les dades són aïllades dels dispositius d'emmagatzemament massiu.
- Accés senzill a les dades de l'EEPROM, perquè els busos i protocols de comunicació són simples.

L'IGEP SMARC i.MX6 té una memòria EEPROM de 32 Kb connectada al bus I2C3 del microcontrolador amb l'adreça 0x50. En el BSP, l'U-boot l'utilitza per guardar les variables d'entorn i el sistema operatiu té accés en espai d'usuari a través del controlador "at,24c256".

Les eines utilitzades per comprovar la memòria EEPROM són echo i cat per escriure i llegir en espai d'usuari.

Per validar el sistema, la comanda "echo <dades a gravar> > /sys/devices/soc0/soc.0/2100000.aips-bus/21a8000.i2c/i2c-2/2-0050/eeprom" permet escriure la memòria i la comanda "cat /sys/devices/soc0/soc.0/2100000.aips-bus/21a8000.i2c/i2c-2/2-0050/eeprom" permet llegir tot el seu contingut. Els resultats han estat satisfactoris, perquè s'han llegit sense errors les dades escrites prèviament.

4.10 Polsador

En un sistema encastat, els polsadors són útils per interactuar localment amb l'equip. L'IGEP SMARC Expansion conté un polsador normalment obert connectat al GPIO SMARC número 9 i associat al GPIO5_IO27 del microcontrolador i.MX6.

El polsador de l'IGEP SMARC Expansion genera interrupcions a través del controlador gpio-keys que emula la tecla KEY_HOME al sistema operatiu. L'eina utilitzada per comprovar el polsador s'anomena cat. Aquest programa llegeix fitxers i escriu la informació per pantalla.

Per validar el sistema, la comanda "cat /dev/input/event0" llegeix indefinidament el dispositiu d'entrada teclat. Els resultats han estat satisfactoris, perquè s'ha llegit la tecla KEY_HOME quan s'acciona el polsador.

4.11 Àudio analògic

Segons la Taula 1 "Característiques principals de l'IGEP SMARC i.MX6" de la memòria, l'IGEP SMARC i.MX6 conté un bus I2S^[112] per enviar i transmetre àudio en format digital. Per fer ús del bus, l'IGEP SMARC Expansion conté un còdec TLV320AIC3111^[113] de Texas Instruments i dos connectors Jack de 3,5 mm. per incloure una sortida d'altaveu i una entrada de micròfon de dos canals cadascun.

Les eines utilitzades per comprovar les interfícies d'àudio s'anomenen amixer, aplay i arecord del paquet alsa-utils. Aquest paquet integra utilitats per controlar i utilitzar una targeta de so a través del controlador "Advanced Linux Sound Architecture" (ALSA).

Per validar l'àudio analògic del sistema, la comanda amixer modifica la configuració de la targeta de so, aplay és un reproductor d'àudio i arecord és la utilitat germana d'aplay per gravar.

Els resultats no han estat satisfactoris, perquè no s'han pogut ni gravar ni reproduir fitxers d'àudio. El sistema operatiu pot detectar i configurar el còdec amb l'I2C3, però ni envia ni rep mostres d'àudio a causa d'un problema al maquinari. Les línies I2S de transmissió i recepció de dades estan girades entre l'IGEP SMARC i.MX6 i l'IGEP SMARC Expansion. On l'entrada DIN del TLV320AIC3111 està connectat amb l'entrada AUD4_RXD del microcontrolador i.MX6 i la sortida DOUT amb la sortida AUD4_TXD.

La falta de punts de test i components accessibles sobre les línies afectades impossibilita aplicar un rework a les PCBs. Caldrà corregir l'errata en la següent revisió de L'IGEP SMARC Expansion. S'ha discontinuat el desenvolupament de l'àudio analògic i no s'ha integrat el suport en el BSP de l'IGEP SMARC i.MX6.

4.12 Port CAN

Pel protocol de comunicació sèrie CAN^[114], l'IGEP SMARC i.MX6 utilitza el FLEXCAN1 del microcontrolador i l'IGEP SMARC Expansion el PHY MCP2562 de Microchip més un connector de cable a placa per accedir-hi.

Les eines utilitzades per comprovar el port sèrie CAN s'anomenen cansend i candump del paquet can-utils. Aquest paquet integra utilitats per rebre i enviar dades a través del bus CAN.

Per validar el sistema, s'han utilitzat dues IGEP SMARC i.MX6 Kit connectats de la següent manera on la connexió massa GND és opcional:

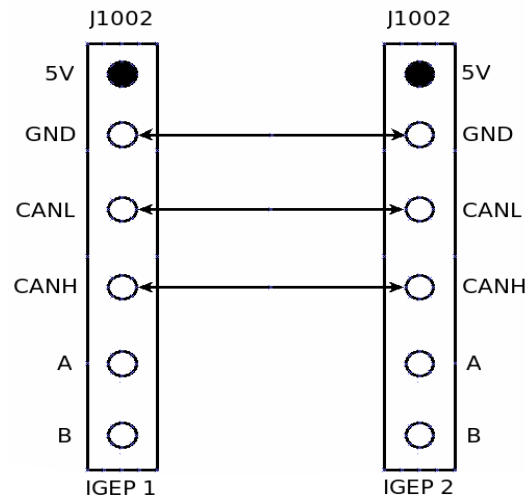


Figura 18: connexió CAN entre dues IGEP SMARC Expansion.

Abans d'establir la comunicació, cal aixecar la interfície CAN amb la comanda "ip link set can0 up type can bitrate 125000". Finalment, el test consisteix a escoltar i rebre dades amb la comanda "candump can0" i enviar dades amb la comanda "cansend can0 -i <identificador> <dades>" entre l'IGEP1 i l'IGEP2. Els resultats han estat satisfactoris, perquè s'han enviat caràcters en els dos sentits de la comunicació.

4.13 SPI NOR Flash

Les memòries SPI^[115] NOR Flash^[116] són dispositius de memòria com les EEPROM, però presenten més capacitat i velocitat d'accés a les dades. Com el seu nom indica, les memòries SPI NOR Flash fan ús del bus SPI per comunicar-se. La seva utilitat és similar a les EEPROM, per a més informació consultar l'apartat 4.9 "EEPROM".

L'IGEP SMARC i.MX6 té una memòria SPI NOR Flash de 4 Mb connectada al bus SPI1 i "chip select" 0 del microcontrolador. En el BSP, el sistema operatiu té accés en espai d'usuari a través del controlador sst25wf040.

L'eina utilitzada per comprovar la memòria SPI NOR Flash és mtd_debug de mtd-utils. Aquest paquet integra utilitats per rebre i enviar dades en memòries que utilitzen l'estructura MTD de "Linux Kernel".

Per validar el sistema, la comanda "mtd_debug write /dev/mtd0 0 1 <fitxer a guardar>" permet escriure un fitxer a la memòria SPI NOR Flash i la comanda "mtd_debug read

`/dev/mtd0 0 1 <fitxer a recuperar>` permet guardar a un fitxer el contingut de la NOR Flash. Els resultats han estat satisfactoris, perquè s'han recuperat sense errors les dades guardades prèviament.

4.14 Dispositius d'emmagatzemament massiu

Segons la Taula 1 "Característiques principals de l'IGEP SMARC i.MX6" de la memòria, l'IGEP SMARC i.MX6 conté fins a 3 interfícies per connectar dispositius d'emmagatzemament massiu: una "embedded MultiMediaCard" (eMMC)^[117] integrada al mòdul, una MultiMediaCard (MMC) i un "Serial Advanced Technology Attachment" (SATA)^[118] (segons model) disponibles al connector SMARC. La funcionalitat de cadascun dels dispositius a l'IGEP SMARC i.MX6 Kit s'exposa als següents subaparts.

4.14.1 SD

La interfície "Secure Digital" (SD)^[119] és un format de targeta de memòria basat en el bus MMC i molt utilitzat en dispositius electrònics multimèdia. En l'IGEP SMARC i.MX6, el bus SD utilitza el MMC1 del microcontrolador més el connector SMARC i és capaç d'arrencar un sistema operatiu. Per utilitzar el bus al Kit, l'IGEP SMARC Expansion conté un connector amb format microSD.

L'eina utilitzada per comprovar la interfície SD s'anomena IOzone^[120]. Aquest programa realitza operacions d'escriptura i lectura per provar els sistemes de fitxers d'un ordinador. Finalment, presenta un informe amb els resultats.

Per validar el sistema, el sistema operatiu arrenca a partir de l'eMMC i es munta una targeta de memòria classe 10 de 8 GB amb una partició ext4^[121]. La comanda `"iozone -R -l 4 -u 4 -r 4k -s 1000m -F /run/media/mmcblk0p1/f1 /run/media/mmcblk0p1/f2 /run/media/mmcblk0p1/f3 /run/media/mmcblk0p1/f4 | tee -a /tmp/iozone_results.txt"` realitza proves sobre 4 fitxers temporals de 1000 MB en paral·lel a la memòria SD. A més, s'ha creat una SD auto arrencable amb l'eina `igep-media-create` d'`igep-tools` per validar el sistema operatiu a partir de la SD, per a més informació consultar l'apartat 3.5 "Eines de gravació".

Els resultats han estat satisfactoris, perquè s'han completat les proves d'IOzone sense errors i es pot arrencar un sistema operatiu a partir de la SD.

4.14.2 eMMC

Les memòries eMMC són dispositius soldats en PCB que es comuniquen amb el bus MMC. En l'IGEP SMARC i.MX6, la memòria eMMC utilitza el MMC3 del microcontrolador i és capaç d'arrencar un sistema operatiu. Els prototips IGEP0046RA utilitzen una memòria eMMC de 8 GB.

L'eina utilitzada per comprovar l'eMMC torna a ser IOzone utilitzat ja al subapartat anterior. Per validar el sistema, el sistema operatiu arrenca a partir de la SD i es crea una partició ext4 a l'eMMC. La comanda "iozone -R -l 4 -u 4 -r 4k -s 1000m -F /run/media/mmcbk2p1/f1 /run/media/mmcbk2p1/f2 /run/media/mmcbk2p1/f3 /run/media/mmcbk2p1/f4 | tee -a /tmp/iozone_results.txt" realitza proves sobre 4 fitxers temporals de 1000 MB en paral·lel a la memòria eMMC. A més, s'ha creat una eMMC auto arrencable amb l'eina igep-flash d'igep-tools per validar el sistema operatiu a partir de l'eMMC, per a més informació consultar l'apartat 3.5 "Eines de gravació".

Els resultats han estat satisfactoris, perquè s'han completat les proves d'IOzone sense errors i es pot arrencar un sistema operatiu a partir de l'eMMC.

4.14.3 SATA

La interfície SATA és un protocol de comunicació, molt utilitzat en PCs compatibles, pensat per a lectors de disc, disc durs i disc d'estat sòlid. En l'IGEP SMARC i.MX6 Dual i Quad, el bus SATA està disponible al connector SMARC i és capaç d'arrencar un sistema operatiu. Per utilitzar el bus al Kit, l'IGEP SMARC Expansion conté un connector amb format miniSATA.

L'eina utilitzada per comprovar la interfície SATA torna a ser IOzone utilitzat ja als subapartats anteriors. Per validar el sistema, el sistema operatiu arrenca a partir de l'eMMC i es munta un disc d'estat sòlid amb una partició ext4. La comanda "iozone -R -l 4 -u 4 -r 4k -s 1000m -F /run/media/sda1/f1 /run/media/sda1/f2 /run/media/sda1/f3 /run/media/sda1/f4 | tee -a /tmp/iozone_results.txt" realitza proves sobre 4 fitxers temporals de 1000 MB en paral·lel al disc. A més, s'ha creat un disc auto arrencable amb l'eina igep-media-create d'igep-tools per validar el sistema operatiu a partir de la memòria SATA, , per a més informació consultar l'apartat 3.5 "Eines de gravació".

Els resultats han estat satisfactoris, perquè s'han completat les proves d'IOzone sense errors i es pot arrencar un sistema operatiu a partir d'un disc SATA.

4.15 USBs

Segons la Taula 3 "Característiques principals de l'IGEP SMARC Expansion i comptabilitat amb els models IGEP SMARC i.MX6" de la memòria, l'IGEP SMARC Expansion conté quatre ports USB Host i un port USB OTG 3.0. Un dels USB Host s'utilitza per a la comunicació del mòdem "PCI Express Mini" i la resta estan connectats a receptacles USB tipus A. L'IGEP SMARC i.MX6 té accés a tots els USBs de la placa d'expansió, però la funcionalitat de l'USB OTG queda limitada a la versió 2.0 (consultar la Taula 1: característiques principals de l'IGEP SMARC i.MX6). Per validar els USBs, les proves a l'IGEP SMARC i.MX6 Kit són les següents:

4.15.1 Mòdem USB Host

Un dels ports USB del microcontrolador (USB1) es bifurca en quatre ports a través d'un USB Hub. Amb un GPIO de reset i un dels USBs resultants es pot tenir accés a un mòdem connectat al port "PCI Express Mini" de la placa d'expansió.

L'eina utilitzada per comprovar el mòdem USB s'anomena microcom. Aquest programa, integrat al sistema operatiu encastat a través de la suite Busybox, emula un terminal sèrie per rebre i enviar dades a través del bus USB. Per controlar el GPIO de reset s'utilitzen les comandes `echo` i `cat` per escriure i llegir el regulador `modem_reset` connectat.

Per validar el sistema s'ha utilitzat el mòdem 3G UC20 de Quectel i una targeta SIM. En el terminal de l'IGEP s'invoca la comanda `"microcom -s 115200 /dev/ttyUSB2"` per comunicar-se amb el mòdem a través d'ordres Hayes^[122]. Amb les ordres AT i `"AT+CPIN=<PIN de la SIM>"` es comprova si el mòdem té comunicació amb el sistema i es registra la SIM respectivament. Finalment, es reinicia el mòdem amb el regulador d'espai d'usuari `modem_reset` i s'observen els resultats a través dels registres del "Linux Kernel". Els resultats han estat satisfactoris, perquè el mòdem es reinicia, rep i transmet ordres.

4.15.2 USBs Host

La resta d'USB Host permeten connectar un gran nombre de dispositius USB a l'IGEP SMARC i.MX6 Kit utilitzant els receptacles tipus A. Per ampliar la funcionalitat de cada port, cada receptacle USB té associat un regulador d'espai d'usuari que gestiona l'alimentació V_{BUS} i l'USB Hub es controla amb un reset. El nom de cada regulador és: usb_pwr1, usb_pwr2, usb_pwr3 i usb_reset.

L'eina utilitzada per comprovar l'USB Host s'anomena IOzone. Aquest programa realitza operacions d'escriptura i lectura per provar els sistemes de fitxers d'un ordinador. Finalment, presenta un informe amb els resultats. No obstant això, per controlar els GPIOs dels reguladors s'utilitzen les comandes echo i cat per escriure i llegir el seu estat.

Per validar el sistema es connecta a l'USB un disc SSD amb partició ext4. El sistema operatiu arrenca a partir de la SD i la comanda "iozone -R -l 4 -u 4 -r 4k -s 1000m -F /run/media/sda1/f1 /run/media/sda1/f2 /run/media/sda1/f3 /run/media/sda1/f4 | tee -a /tmp/iozone_results.txt" realitza proves sobre 4 fitxers temporals de 1000 MB en paral·lel al SSD. Finalment, es modifiquen els GPIOs de control amb els reguladors d'espai d'usuari i s'observen els resultats a través dels registres del "Linux Kernel".

Els resultats han estat satisfactoris, perquè s'han completat les proves d'IOzone sense errors, es pot reiniciar l'USB Hub i controlar l'alimentació de cada receptacle correctament.

4.15.3 USB OTG

L'IGEP SMARC i.MX6 Kit utilitza com a USB OTG 2.0 l'USB0 del microcontrolador amb el receptacle USB microAB de l'expansió. El senyal ID permet al SoC comprovar en quin rol força el perifèric connectat al bus. Per validar l'USB OTG cal fer proves amb els rols Host i Device en el microcontrolador i.MX6.

L'eina utilitzada per comprovar el rol USB Host torna a ser IOzone utilitzat ja al subapartat anterior. Per validar el sistema s'ha utilitzat el mateix disc SSD amb interfície USB i un convertidor microA a USB A que força el pin ID del SoC i.MX6 a massa. El sistema operatiu arrenca a partir de la SD i es crea una partició ext4 al disc. La comanda "iozone -R -l 4 -u 4 -r 4k -s 1000m -F /run/media/sda1/f1 /run/media/sda1/f2 /run/media/sda1/f3 /run/media/sda1/f4 | tee -a /tmp/iozone_results.txt" realitza proves sobre 4 fitxers temporals de 1000 MB en paral·lel al SSD.

En el cas de l'USB OTG amb rol Device, l'IGEP SMARC i.MX6 emularà un dispositiu de xarxa per USB. El "Linux Kernel" conté controladors anomenats "USB Gadget" que permeten utilitzar diferents protocols de comunicació a través del bus USB. Ethernet Gadget" (g_ether) és el controlador escollit per la prova i crea una xarxa Ethernet on el dispositiu Host detectarà al dispositiu Device com a node de xarxa.

L'eina utilitzada per comprovar el rol USB Device s'anomena iperf. Aquest programa permet enviar un flux de paquets tant TCP com UDP als equips de test. Per provar l'equip sota test s'utilitza el protocol TCP que garanteix l'enviament de dades sense errors, en un mateix ordre i ens servirà per mesurar l'amplada de banda amb el qual pot enviar i rebre dades el sistema.

Per validar el sistema s'ha utilitzat un PC compatible i un cable USB tipus A a microB que deixa el pin ID del SoC i.MX6 en alta impedància. Amb la comanda "modprobe g_ether", l'USB OTG de l'IGEP SMARC i.MX6 passarà de mode Host a Device i el PC compatible detectarà un nou dispositiu de xarxa connectat per USB. A continuació, la comanda "iperf -s" estableix un dels equips amb el rol servidor i la comanda "iperf -c <IP server> -t 60s" estableix l'altre equip amb el rol client per enviar dades al servidor durant 60 segons utilitzant el protocol TCP. Els resultats de la prova són 242 Mb/s de pujada i 213 Mb/s de baixada per a l'IGEP SMARC i.MX6. Els resultats han estat satisfactoris, perquè el doble rol de l'USB OTG funciona adequadament superant les proves dels programes IOzone i iperf sense errors.

4.16 Connectivitat sense fil

4.16.1 WIFI

WIFI (o WLAN) és un protocol de transmissió de dades sense fils per a "Local Area Network" (LAN). LAN permet connectar equips que estan dins d'una mateixa organització i àrea geogràfica petita sense la necessitat d'un equip central que gestioni les connexions d'un punt a un altre. WIFI utilitza l'accés al medi per contingut CSMA/CA^[123] que evita les col·lisions entre paquets de dades i millora les prestacions.

L'IGEP SMARC i.MX6 incorpora connectivitat WIFI IEEE 802.11b/g/n gràcies a una antena interna de 2,4 GHz i al mòdul LBEP de Murata que conté el xip WL1831 de Texas Instruments

(família WiLink 8). En el BSP, el sistema operatiu té accés en espai d'usuari al dispositiu de xarxa a través dels backports per al WiLink 8.

L'eina utilitzada per comprovar el WIFI s'anomena iperf. Aquest programa permet enviar un flux de paquets tant TCP com UDP als equips de test. Per provar l'equip sota test s'utilitza el protocol TCP que garanteix l'enviament de dades sense errors, en un mateix ordre i ens servirà per mesurar l'amplada de banda amb el qual pot enviar i rebre dades el sistema. La següent figura mostra la configuració de la prova:

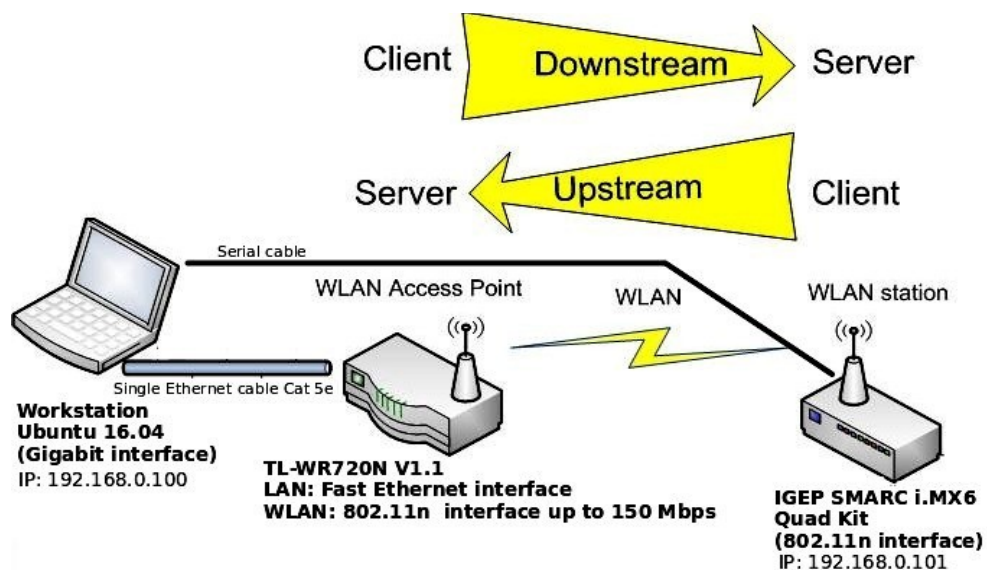


Figura 19: Configuració del maquinari per a la prova WIFI.

On "WLAN Access Point" està configurat perquè es connectin només dispositius amb tecnologia 802.11n i amplada de banda 40 MHz. Per validar el sistema, la comanda "iperf -s" estableix un dels equips amb el rol servidor i la comanda "iperf -c <IP server> -t 60s" estableix l'altre equip amb el rol client per enviar dades al servidor durant 60 segons utilitzant el protocol TCP. Els resultats de la prova són 76.9 Mbits/s de pujada i 70.6 Mbits/s de baixada per a l'IGEP SMARC i.MX6.

Els resultats han estat satisfactoris, perquè el sistema operatiu ha carregat els binaris del WLAN al perifèric i les proves iperf s'han completat sense errors i els resultats pràctics són propers als teòrics. Segons la fitxa de dades del mòdul WL1831^[124], la velocitat teòrica és 80 Mbits/s.

4.16.2 Bluetooth

El Bluetooth és una especificació industrial per a Xarxes d'Àmbit Personal (PAN)^[125] sense fil. Les comunicacions Bluetooth són més econòmiques i eficients energèticament que el WLAN, però l'amplada de banda, la seguretat i el rang són menors. És una interfície adequada per connectar dispositius portables i alimentats per bateries.

L'IGEP SMARC i.MX6 incorpora connectivitat Bluetooth 4.0 gràcies a una antena interna de 2,4 GHz i al mòdul LBEP de Murata que conté el xip WL1831. En el BSP, el sistema operatiu té accés en espai d'usuari al dispositiu a través dels backports per al WiLink 8.

Les eines utilitzades per comprovar el Bluetooth s'anomenen hciconfig i hcitool del paquet BlueZ^[126]. BlueZ és la pila Bluetooth oficial de "Linux Kernel" que conté les eines necessàries perquè els programes d'alt nivell tinguin una interfície genèrica d'accés als controladors Bluetooth del nucli.

Per validar el sistema s'utilitza el protocol de comunicació HCI^[127] que permet configurar i utilitzar els perifèrics Bluetooth. Amb la comanda "hciconfig hci0 up" s'aixeca la interfície de comunicació, "hciconfig hci0 piscan" habilita la cerca de dispositius i "hcitool scan" busca dispositius Bluetooth remots.

Per defecte, el microcontrolador i.MX6 no té accés al perifèric Bluetooth perquè el mòdul SMARC té un error al maquinari. El problema són les línies sèrie RTC i CTS que estan girades i no permet carregar el binari al WiLink 8. NXP defineix les línies sèrie de control al revés respecte altres fabricants com Texas Instruments^[128] donant peu a l'error i confusió en el disseny. Aplicant un rework en quatre resistències de les línies afectades, el bus sèrie s'ha reconnectat adequadament al perifèric.

Els resultats han estat satisfactoris, perquè el sistema operatiu ha carregat els binaris del Bluetooth als prototips modificats i detectat un telèfon Android visible per altres dispositius. En la revisió següent de l'IGEP SMARC i.MX6 caldrà corregir l'errada del bus sèrie per poder utilitzar el Bluetooth sense entrebancs.

4.17 Càmera

Segons la Taula 3 "Característiques principals de l'IGEP SMARC Expansion i comptabilitat amb els models IGEP SMARC i.MX6" de la memòria, l'IGEP SMARC Expansion conté un connector de 15 pins compatible amb els populars mòduls Raspberry Pi càmera. El connector inclou totes les funcionalitats per controlar i capturar imatges del sensor: CSI^[129] amb 3 parells diferencials, I2C, alimentació de 3,3 V i dos GPIOs per encendre el LED de gravació i habilitar la càmera. Per a les següents provés, la versió del mòdul utilitzat és l'1.3 que incorpora el sensor OV5647 de l'empresa OmniVision.

L'eina utilitzada per comprovar la càmera s'anomena yavta^[130]. Aquest programa de test captura i guarda imatges utilitzant la infraestructura V4L2^[131] de "Linux Kernel" que es comunica amb el controlador de l'OV5647 i la IPU del SoC i.MX6. El controlador de la càmera permet configurar la resolució en espai d'usuari amb les comandes echo i cat com mostra la següent taula:

Comanda:	Configuració:
echo 0 > /sys/bus/i2c/devices/0-0036/ov5647_mode	Resolució: 1280 x 960
echo 1 > /sys/bus/i2c/devices/0-0036/ov5647_mode	Resolució: 1280 x 720
echo 2 > /sys/bus/i2c/devices/0-0036/ov5647_mode	Resolució: 1920 x 1080
echo 3 > /sys/bus/i2c/devices/0-0036/ov5647_mode	Resolució: 640 x 480

Taula 9: Resolucions disponibles al controlador ov5647_mipi pel sensor OV5647.

El "Linux Kernel" del BSP no conté el controlador ov5647_mipi, per afegir el suport cal modificar moltes capes del nucli que alterant el comportament d'altres controladors. Pel motiu anterior s'ha creat la versió imx_3.14.28_1.0.0_ga.picam que està basat amb el linux-linaro-lsk-v3.14-mx6-picam^[132] i "Linux Kernel" de l'IGEP SMARC i.MX6.

Per validar el sistema, el mòdul de càmera es connecta a la placa d'expansió i es configura per captura la màxima resolució permesa pel controlador. Amb la comanda "yavta -p -f SBGGR8 -s 1920x1080 -n 4 --capture=4 /dev/video0 -file=img-#.bin;" es guarden 4 binaris que contenen la imatge enviada pel sensor.

Ara, cal processar els binaris anteriors amb un convertidor de format Bayer^[133] per poder visualitzar i interpretar el contingut. El programa `bayer2rgb`^[134] converteix imatges Bayern en format RGB amb extensió TIFF, per a les proves s'utilitza la comanda: `"bayer2rgb -i <imatge>.bin -o <imatge>.tiff -w 1920 -v 1080 -b 8 -f BGGR -m NEAREST -t"`.

Els resultats no han estat prou satisfactoris per diversos factors. Per la part del maquinari, el microcontrolador i.MX6 no conté cap convertidor Bayer accelerat per maquinari, essent necessari descodificar la imatge amb el processador. Com a resultat, el vídeo no es pot capturar en temps real, perquè la CPU dedica molts recursos (gairebé el 100% d'un processador) i la freqüència de captura és molt baixa (2 fps a 1080p). Per la part del programari, el controlador no té suport per autoenfocament i el resultat de la captura perd lluminositat respecte a les condicions de llum originals:



Figura 20: Imatge captura amb el mòdul Raspberry Pi càmera i l'IGEP SMARC i.MX6 Kit.

Durant la posada en marxa del mòdul de càmera, s'ha observat que l'OV5647 no funciona adequadament amb el convertidor d'imatge accelerat de l'i.MX6, perquè el mòdul només transmet dades en Bayer i la IPU del SoC processa els formats RGB i YUV. Sensors com l'OV5640 i l'OV5642 d'Omnivision són més adequats per aquest microcontrolador, perquè també poden transmetre dades en YUV. S'ha discontinuat el desenvolupament de la càmera i no s'ha integrat el suport en el BSP de l'IGEP SMARC i.MX6. Caldrà utilitzar o dissenyar un altre mòdul de càmera més adient al microcontrolador.

5 Resum desenvolupament

Per dur a terme la implementació del BSP a l'IGEP SMARC i.MX6. En primer lloc, cal familiaritzar-se amb els esquemàtics del maquinari per saber quins perifèrics cal programar i com estan connectats.

A continuació, consultant els manuals de desenvolupament i articles de la comunitat, es compila i testeja l'últim BSP de la placa d'avaluació i.MX6 SABRE SD per obtenir una primera presa de contacte de les característiques del sistema i valorar les possibilitats que ofereix. Com a resultat, es llisten els paquets imprescindibles que cal afegir al sistema operatiu de desenvolupament `isee-image-dev`, els paquets anteriors permetran validar a l'IGEP SMARC i.MX6 Kit: les interfícies de xarxa, multimèdia i altres perifèrics.

La segona fase del projecte consisteix a desenvolupar un sistema operatiu mínim basat en el BSP del producte i.MX6 SABRE SD i la imatge `core-image-minimal` de "Yocto Project". La imatge anterior permet validar els perifèrics més importants del sistema com la memòria RAM, la interfície SD i port sèrie. Per a la realització, s'afegeix el suport mínim al bootloader i posteriorment al "Linux Kernel" i sistema operatiu. Amb accés a un terminal sèrie dintre el sistema, es fan proves als perifèrics anteriors. En obtenir resultats correctes, aquests no provocaran errors mentre es facin proves sobre altres perifèrics.

En aquest punt, s'utilitza el sistema de control de versions Git. Aquest programa permet focalitzar-se sobre el codi font que es modifica fent ús de branques i commits. A més, per millorar la productivitat durant el projecte, s'han modificat els scripts de gravació `igep-tools` per automatitzar el procés de gravació del sistema operatiu a les memòries SD, SATA i eMMC de l'IGEP SMARC i.MX6.

A partir d'aquest punt, cal completar el BSP configurant i habilitant el suport a la resta de perifèrics de la plataforma. L'ordre seguit en aquesta fase és: U-boot, "Linux Kernel", "Yocto Project", `toolchain` i Eclipse IDE. En la fase actual s'utilitza "Pin Mux Tool" de NXP, "Pin Mux Tool" és un programa amb interfície gràfica que permet ordenar, classificar i obtenir informació dels pins del microcontrolador i.MX6. Evita que durant el desenvolupament del maquinari i programari s'utilitzin configuracions errònies per duplictat o falta de senyals.

Un cop validats tots els perifèrics i corregits els errors reparables al maquinari, es publiquen els binaris del sistema operatiu i `toolchain` que conformen el BSP.

6 Conclusions

Finalitzat el projecte es procedeix a realitzar un balanç entre els objectius plantejats al començament amb els resultats obtinguts:

S'ha finalitzat el desenvolupament del BSP per a la plataforma IGEP SMARC i.MX6. El BSP conté un bootloader, un sistema operatiu, eines de gravació i un toolchain amb suport pel programa Eclipse IDE. Durant el projecte, s'ha comprovat el funcionament del sistema encastat validant els seus perifèrics. El resultat de cada perifèric es classifica com:

- El programari i maquinari de la plataforma funciona correctament: memòria externa RAM, ports sèrie, LEDs, parada sistema, Ethernet, I2Cs, memòria EEPROM, memòria SPI NOR, polsador, port CAN, dispositius d'emmagatzemament massiu (SD, eMMC i SATA), WIFI, vídeo LVDS, Càmera, ports USB i arranc sistema (excepte SPI NOR).
- El programari s'ha validat realitzant reparacions al maquinari: vídeo HDMI, reiniciï sistema i Bluetooth.
- El programari no s'ha validat a causa d'un error irreparable detectat al maquinari: àudio analògic i arranc sistema amb memòria SPI NOR.

Com a resultat, tot el maquinari funcional i reparable s'ha validat correctament amb el programari. El programari no validat és degut a un error irreparable del maquinari. Per corregir els problemes anteriors, s'han reportat tots els errors del maquinari per aplicar les correccions en la revisió següent del producte.

Les eines utilitzades, el desenvolupament i la documentació realitzada al projecte estan sota llicències lliures. Com a aspecte negatiu, per utilitzar tot el potencial del microcontrolador són necessaris els binaris privatis per habilitar el suport als còdecs i l'acceleració 2D i 3D. L'usuari a través de la plataforma "Yocto Project" pot decidir si fer o no ús d'aquests paquets segons les seves necessitats.

Els mòduls IGEP SMARC i.MX6 són compatibles amb les noves variants del microcontrolador i.MX6 DualPlus i QuadPlus, però el BSP desenvolupat no té suport. En un futur, cal utilitzar una versió de "Linux Kernel" més actual i compatible amb els nous microcontroladors de NXP.

A partir dels resultats de l'apartat 4 "Resultats del BSP". S'ha demostrat que s'han assolit satisfactòriament els objectius del projecte.

7 Agraïments

En primer lloc, voldria agrair al director de projecte, Agustí Fontquerni Gorchs, l'oportunitat de realitzar aquest treball a l'empresa ISEE 2007.SL. Sense la seva confiança i suport no hauria estat possible aquesta obra.

Al ponent Manuel Domínguez Pumar i la resta de professors de l'assignatura Sistemes Digitals utilitzant Linux Incrustat (DSX). Assignatura molt recomanable per aprendre a programar dispositius encastats amb sistema operatiu "GNU/Linux".

Als companys de feina Josep i Eduard per donar-me més d'un cop de mà durant el projecte. Amb ells he passat hores i hores provant i validant l'IGEP SMARC i.MX6 Kit per convertir uns prototips que no arrencaven en un sistema encastat molt capaç.

Al company i amic Victor, una gran persona amb qui he compartit moltes hores de classe i laboratori a la universitat. A la resta de companys i amics de l'ETSETB.

Als amics de sempre, Xavier, Miquel, Pau... i altres que han d'estar aquí.

A la Marta, perquè el seu suport a l'última etapa de la carrera ha estat molt important per mi.

Finalment, i més important, als meus pares. Per la seva generositat i consells al llarg de la meva existència. Aquest projecte els hi dedico a ells.

8 Referències

8.1 Referències Bibliogràfiques

Referències en el contingut de la memòria:

- 1: Llibre: "Programming Embedded Systems, 2nd Edition With C and GNU Development Tools" pàgina 3
- 2: Article: Consultora Technavio l'article "Global Embedded Computer Market 2015-2019", 2016
- 3: Pàgina web: http://www.nxp.com/products/microcontrollers-and-processors/arm-processors/i.mx-applications-processors/i.mx-6-processors/i.mx6qp/i.mx-6-series-software-and-development-tool-resources:IMX6_SW
- 4: Pàgina web: <http://www.sget.org/standards/smarc.html>
- 5: Pàgina web: <http://www.sget.org/>
- 6: Pàgina web: http://www.sget.org/fileadmin/_migrated/content_uploads/SMARC_Hardware_Specification_V1p1.pdf
- 7: Pàgina web: http://www.sget.org/fileadmin/_migrated/content_uploads/SMARC_DG_V1p0.pdf
- 8: Pàgina web: <http://cache.nxp.com/files/32bit/doc/brochure/FLYRIMXPRDCMPR.pdf>
- 9: Pàgina web: <https://www.yoctoproject.org/ecosystem/yocto-project-participants>
- 10: Pàgina web: <https://eclipse.org/>
- 11: Pàgina web: http://elinux.org/images/2/2b/Elce11_hart.pdf
- 12: Pàgina web: <http://www.yoctoproject.org/docs/1.8/bsp-guide/bsp-guide.html>
- 13: Pàgina web: <http://git.yoctoproject.org/cgi/cgit.cgi/poky/tree/meta?h=fido>
- 14: Pàgina web: <http://git.yoctoproject.org/cgi/cgit.cgi/poky/tree/meta-yocto?h=fido>
- 15: Pàgina web: <http://cgit.openembedded.org/meta-openembedded/tree/meta-oe?h=fido>
- 16: Pàgina web: <http://git.yoctoproject.org/cgi/cgit.cgi/poky/tree/meta-yocto-bsp?h=fido>
- 17: Pàgina web: <https://github.com/Freescale/meta-fsl-arm>
- 18: Pàgina web: <http://git.isee.biz/?p=pub/scm/meta-fsl-arm-extra.git;a=shortlog;h=refs/heads/fido-next>
- 19: Pàgina web: <http://git.isee.biz/?p=pub/scm/meta-isee.git;a=shortlog;h=refs/heads/fido-next>
- 20: Pàgina web: <http://freescale.github.io/doc/release-notes/1.8/index.html#images>
- 21: Pàgina web: <http://www.openssh.com/>
- 22: Pàgina web: <http://samba.org/ppp/>
- 23: Pàgina web: <https://github.com/linux-can/can-utils>
- 24: Pàgina web: <https://github.com/emagii/cpufrequtils>
- 25: Pàgina web: <https://sourceforge.net/projects/iperf/>
- 26: Pàgina web: <https://github.com/lalten/libsocketcan>
- 27: Pàgina web: <http://git.kernel.org/cgi/linux/kernel/git/cjb/mmc-utils.git/>
- 28: Pàgina web: <http://www.linux-mtd.infradead.org/>
- 29: Pàgina web: <https://sourceforge.net/projects/gptfdisk/>
- 30: Pàgina web: <http://www.gnu.org/software/mtools/>
- 31: Pàgina web: <http://www.gnu.org/software/parted/parted.html>
- 32: Pàgina web: <http://man7.org/linux/man-pages/man8/sfdisk.8.html>
- 33: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/GNU_Debugger
- 34: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/Gdbserver>
- 35: Pàgina web: <https://sourceforge.net/projects/strace/>
- 36: Pàgina web: <http://git.yoctoproject.org/cgi/cgit.cgi/psplash/>
- 37: Pàgina web: <https://www.isc.org/downloads/dhcp/>
- 38: Pàgina web: https://es.wikipedia.org/wiki/RPM_Package_Manager
- 39: Pàgina web: <https://wiki.eclipse.org/TCF>
- 40: Pàgina web: <https://fedorahosted.org/cronie/>
- 41: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Network_Time_Protocol
- 42: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ntpdate>
- 43: Pàgina web: <http://git.isee.biz/?p=pub/scm/meta-isee.git;a=blob;f=recipes-bsp/images/isee-image-dev.bb;hb=refs/heads/fido-next#l6>
- 44: Pàgina web: <https://github.com/openembedded/openembedded-core/tree/fido/meta/recipes-sato>
- 45: Pàgina web: <http://www.lartmaker.nl/lartware/port/>
- 46: Pàgina web: <http://git.isee.biz/?p=pub/scm/meta-fsl-arm-extra.git;a=shortlog;h=refs/heads/fido-next>
- 47: Pàgina web: <http://git.isee.biz/?p=pub/scm/meta-isee.git;a=shortlog;h=refs/heads/fido-next>
- 48: Pàgina web: http://www.nxp.com/products/software-and-tools/software-development-tools/i.mx-software-and-tools/i.mx-6-series-software-and-development-tool-resources:IMX6_SW?fp=1&tab=Documentation_Tab
- 49: Pàgina web: <http://git.isee.biz/?p=pub/scm/u-boot-fslc.git;a=shortlog;h=refs/heads/isee-imx-patches-2015.04->

next

50: Pàgina web: <http://www.nxp.com/products/microcontrollers-and-processors/arm-processors/i.mx-applications-processors/i.mx-6-processors/i.mx6qp/sabre-platform-for-smart-devices-reference-design-based-on-the-i.mx-6-series:RDIMX6SABREPLAT>

51: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Unix_philosophy

52: Pàgina web: http://git.isee.biz/?p=pub/scm/linux-imx.git;a=shortlog;h=refs/heads/isee-imx_3.14.28.y-next

53: Pàgina web: <http://git.yoctoproject.org/cgi/cgit.cgi/meta-fsl-arm/tree/recipes-kernel/linux/linux-imx-3.14.28?h=fido>

54: Pàgina web: http://www.soyter.pl/system/files/UC20_Linux_USB_Driver_User_Guide_V1.0.pdf

55: Pàgina web: <http://www.serverphorum.com/read.php?12,994470>

56: Pàgina web:

http://processors.wiki.ti.com/index.php/WiLink8_Linux_Getting_Started_Guide#WiLink.E2.84.A2_8_Wi-Fi.C2.AE_Build_Process_.28Mainline_Linux.29

57: Pàgina web: <https://git.ti.com/wilink8-wlan/>

58: Pàgina web: http://processors.wiki.ti.com/index.php/WiLink8_Release_Notes/R8.6#Product_Components

59: Pàgina web: <https://git.ti.com/wilink8-wlan/build-utilites/>

60: Pàgina web: http://git.isee.biz/?p=pub/scm/wilink8-wlan/build-utilites.git;a=tree;f=patches/kernel_patches/imx-3.14.28

61: Pàgina web: http://www.hotchips.org/wp-content/uploads/hc_archives/hc22/HC22.23.220-1-Brash-ARMv7A.pdf

62: Pàgina web: <http://www.yoctoproject.org/docs/1.8/adt-manual/adt-manual.html#sysroot>

63: Pàgina web: <https://www.yoctoproject.org/tools-resources/projects/application-development-toolkit-adt>

64: Pàgina web: <http://www.yoctoproject.org/docs/1.8/dev-manual/dev-manual.html#adt-eclipse>

65: Pàgina web:

http://labs.isee.biz/index.php/How_to_develop_with_Eclipse_IDE_under_IGEP_Technology#Create_and_Build_projects

66: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/D-Bus>

67: Pàgina web: <https://www.christian-gmeiner.info/2013/07/i-mx6-ddr3-setup/>

68: Pàgina web: http://git.isee.biz/?p=pub/scm/u-boot-fslc.git;a=blob_plain;f=board/isee/igep0046/mx6dl_igep0046_4x256.cfg;hb=refs/heads/isee-imx-patches-2015.04-next

69: Pàgina web: http://git.isee.biz/?p=pub/scm/u-boot-fslc.git;a=blob_plain;f=board/isee/igep0046/mx6q_igep0046_4x512.cfg;hb=refs/heads/isee-imx-patches-2015.04-next

70: Pàgina web: <http://pyropus.ca/software/memtester/>

71: Pàgina web: <http://www.ftdichip.com/Products/Cables/USBTTLSerial.htm>

72: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/Minicom>

73: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-232>

74: Pàgina web: <https://busybox.net/downloads/BusyBox.html>

75: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-485>

76: Pàgina web: <http://stackoverflow.com/questions/15665052/what-is-the-difference-between-a-bootrom-vs-bootloader-on-arm-systems>

77: Pàgina web: http://www.nxp.com/files/32bit/doc/ref_manual/IMX6SDLRM.pdf?fasp=1&WT_TYPE=Reference%20Manuals&WT_VENDOR=FREESCALE&WT_FILE_FORMAT=pdf&WT_ASSET=Documentation&fileExt=.pdf

78: Pàgina web: http://www.nxp.com/files/32bit/doc/ref_manual/IMX6DQRM.pdf?fasp=1&WT_TYPE=Reference%20Manuals&WT_VENDOR=FREESCALE&WT_FILE_FORMAT=pdf&WT_ASSET=Documentation&fileExt=.pdf

79: Pàgina web: <https://github.com/Freescale/meta-fsl-arm/blob/fido/scripts/lib/image/canned-wks/imx-uboot.wks>

80: Pàgina web: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dd_\(Unix\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Dd_(Unix))

81: Pàgina web: <http://git.isee.biz/?p=pub/scm/igep-tools.git;a=blob;f=scripts/igep-flash;hb=refs/heads/master#I70>

82: Pàgina web: [https://en.wikipedia.org/wiki/Echo_\(command\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Echo_(command))

83: Pàgina web: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cat_\(Unix\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cat_(Unix))

84: Pàgina web: <http://man7.org/linux/man-pages/man8/halt.8.html>

85: Pàgina web: <http://man7.org/linux/man-pages/man8/reboot.8.html>

86: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/Init>

87: Pàgina web: http://git.isee.biz/?p=pub/scm/linux-imx.git;a=blob;f=arch/arm/mach-imx/system.c;hb=refs/heads/isee-imx_3.14.28.y-next#I42

88: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Watchdog_timer

89: Pàgina web: [https://en.wikipedia.org/wiki/Reboot_\(computing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Reboot_(computing))

90: Pàgina web: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rework_\(electronics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rework_(electronics))

91: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Low-voltage_differential_signaling

92: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Display_Serial_Interface



- 93: Pàgina web: <https://github.com/prpplague/fb-test-app>
- 94: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_compositing
- 95: Pàgina web: <http://www.linuxfromscratch.org/blfs/view/svn/multimedia/alsa-utils.html>
- 96: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Linux_Sound_Architecture
- 97: Pàgina web: <https://boundarydevices.com/wp-content/uploads/2014/12/HSD100PXN1-A00-C11-1.01.pdf>
- 98: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Local_area_network
- 99: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_sense_multiple_access_with_collision_detection
- 100: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Gigabit_Ethernet
- 101: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Trivial_File_Transfer_Protocol
- 102: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Network_File_System
- 103: Pàgina web: <https://sourceforge.net/projects/iperf2/>
- 104: Pàgina web: <http://www.nxp.com/files/32bit/doc/errata/IMX6SDLCE.pdf>
- 105: Pàgina web: <http://www.nxp.com/files/32bit/doc/errata/IMX6DQCE.pdf>
- 106: Pàgina web: <http://www.lm-sensors.org/wiki/I2CTools>
- 107: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>
- 108: Pàgina web: http://www.adlinktech.com/PD/marketing/Datasheet/LEC-BASER1/LEC-BASER1_Datasheet_en_1.pdf
- 109: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/EEPROM>
- 110: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/MAC_address
- 111: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/IP_address
- 112: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2S>
- 113: Pàgina web: <http://www.ti.com/product/TLV320AIC3111>
- 114: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus
- 115: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus
- 116: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Flash_memory#NOR_flash
- 117: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/MultiMediaCard>
- 118: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_ATA
- 119: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Secure_Digital
- 120: Pàgina web: <http://www.iozone.org>
- 121: Pàgina web: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ext4>
- 122: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Hayes_command_set
- 123: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_sense_multiple_access_with_collision_avoidance
- 124: Pàgina web: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/wl1831mod.pdf>
- 125: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Personal_area_network
- 126: Pàgina web: <http://www.bluez.org/>
- 127: Pàgina web: <https://developer.bluetooth.org/TechnologyOverview/Pages/HCI.aspx>
- 128: Pàgina web: http://processors.wiki.ti.com/index.php/WL18xx_Bluetooth_Hardware_Design_Guide#BT_HCI_IF
- 129: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Camera_Serial_Interface
- 130: Pàgina web: <http://git.ideasonboard.org/yavta.git>
- 131: Pàgina web: <https://www.linuxtv.org/docs.php>
- 132: Pàgina web: <https://github.com/n-aizu/linux-linaro-stable-mx6/tree/linux-linaro-lsk-v3.14-mx6-picam>
- 133: Pàgina web: https://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter
- 134: Pàgina web: <https://github.com/jdthomas/bayer2rgb>

8.2 Bibliografia

Altres referències per aprofundir en el contingut de la memòria:

- ◆ Scott Chacon, "Pro Git (2nd Edition)", descarregable de <https://git-scm.com/book/en/v2>
- ◆ Greg Kroah-Hartman, "Linux Kernel in a Nutshell", descarregable de <http://www.kroah.com/lkn/>
- ◆ Jonathan Corbet, Alessandro Rubini i Greg Kroah-Hartman, "Linux Device Drivers (3rd Edition)", descarregable de <http://lwn.net/Kernel/LDD3/>
- ◆ Karl Fogel, "Producing Open Source Software", descarregable de <http://www.producingoss.com/en/producingoss.pdf>
- ◆ Karim Yaghmour, Jon Masters, Gilad Ben-Yossef i Philippe Gerum, "Building Embedded Linux Systems (2nd Edition)", O'Reilly Media, Agost 2008
- ◆ Robert Love, "Linux Kernel Development (3rd Edition)", Addison-Wesley Professional, Juny 2010
- ◆ Sreekrishnan Venkateswaran, "Essential Linux Device Drivers", Prentice Hall, Abril 2008
- ◆ Daniel P. Bovet i Marco Cesati, "Understanding the Linux Kernel (3rd Edition)", O'Reilly Media, Novembre 2005
- ◆ Christopher Hallinan, "Embedded Linux Primer: A Practical Real-World Approach (2nd Edition)", Prentice Hall, Novembre 2010
- ◆ Alexandru Vaduva, "Learning Embedded Linux using the Yocto Project", Packt Publishing, Juliol 2015
- ◆ Alex González, "Embedded Linux Projects Using Yocto Project Cookbook", Packt Publishing, Març 2015
- ◆ Otavio Salvador i Daiane Angolini, "Yocto for Embedded Linux Development Primer", Packt Publishing, Juliol 2014
- ◆ Scott Rifenbark i altres, "Yocto Project Mega-Manual 1.8", descarregable de <http://www.yoctoproject.org/docs/1.8.2/mega-manual/mega-manual.html>