Università degli Studi di Milano Bicocca
Scuola di Scienze
Dipartimento di Informatica, Sistemistica e Comunicazione
Corso di laurea in Informatica

RTEMS su RPi per applicazioni "aerospace-like"

Relatore: Prof. Domenico Giorgio Sorrenti

Co-relatore: Prof. Pietro Braione

Tutor aziendale: Ing. Fabrizio Bernardini

Relazione della prova finale di:

Clark Ezpeleta

Matricola 832972

Anno Accademico 2020-2021

Indice

Introduzione

Il lavoro che ho svolto ha due obiettivi principali: il 'porting' di RTEMS su Raspberry Pi e la creazione di applicativi RTEMS per validare il corretto funzionamento delle interfacce GPIO, UART, I2C, SPI e l'utilizzo degli interrupts tramite le API di RTEMS.
Per poter svolgere il 'porting' ho fatto riferimento al RTEMS User Manual[1], per comprendere meglio i concetti di RSB(RTEMS Source Builder) e BSP (board support packages), ed ho utilizzato la guida fornita da ing. Basile [2], di BIS-Italia, che raccoglie tutti i passaggi esposti sul blog di Alan Tech per il 'porting' della versione 4.11.
Purtroppo i passaggi illustrati sul blog non sono totalmente corretti, poichè sono per il 'porting' della versione di RTEMS precedente a quella che ho utilizzato, cioè la 5.1 che è la più recente e stabile. Il 'porting' puo' essere definito corretto, se alla fine della procedura si riesce a caricare uno degli applicativi di test forniti da RTEMS, su Raspberry Pi senza errori. Dopo aver effettuato correttamente il 'porting', ho creato una guida in italiano che raggruppa tutti i passaggi effettuati integrando le correzioni necessarie, ed è stata corretta anche la guida di ing. Basile [3].
Dopo aver impostato l'ambiente di lavoro ho iniziato a creare gli applicativi RTEMS da eseguire sulla Raspberry Pi.
Per poter creare gli applicativi RTEMS ho dovuto familiarizzare con il linguaggio C, leggere l'RTEMS Classic API Guide [4] ed analizzare i codici sorgente di esempio trovati nel git repository di asuol[5] per poter compredere l'utilizzo delle API.
Tutto il lavoro è stato eseguito in modalità "smart-working", per questo motivo mi è stata messa a disposizione da BIS-Italia la scheda Raspberry Pi 3B+ per poter effettuare l'attività.Microchip Technologies ha gentilmente offerto dei componenti aggiuntivi utili per gli applicativi RTEMS di test dell'interfaccia I2C e SPI.
Oltre all'attività software ho dovuto eseguire una piccola attività hardware, cioè creare dei circuiti saldando i vari componenti e utilizzando la breadboard in modo da poterli collegare alla Raspberry Pi, per fare ciò ho seguito gli schemi elettrici che mi ha inviato ing. Bernardini e ho letto i datasheet dei componenti dell'interfaccia I2C [6] [7] e SPI [8] [9] in modo da comprendere il loro funzionamento e poter creare i driver.
Premesso tutto ciò ho suddiviso la mia relazione nei seguenti capitoli:

- **Capitolo 1** - in questo capitolo vengono descritte le principali tecnologie utilizzate durante il mio lavoro. Innanzitutto viene descritto RTEMS che è il sistema operativo su cui si basa tutta l'attività, dopodichè viene descritta la Raspberry Pi su cui verranno eseguiti gli applicativi RTEMS, ed infine viene descritto Eclipse che è l'IDE utilizzato per creare gli applicativi.
- **Capitolo 2** - in questo capitolo viene descritta tutta l'attività di 'porting' e la definizione della toolchain per poter realizzare applicativi RTEMS. Vengono esposte tutte le problematiche rilevate e le loro soluzioni.
- **Capitolo 3** - in questo capitolo vengono descritti le API che RTEMS ha a disposizione, la loro struttura e in che modo li ho testati e per quali motivi si è scelto di testarli.
- **Capitolo 4** - in questo capitolo viene descritta l'attività software che si basa sulla creazione degli applicativi RTEMS per testare il corretto funzionamento delle API di RTEMS. Viene esposto anche una descrizione dei componenti aggiuntivi offerti da Microchip di cui ho creato i driver per poterli utilizzare con RTEMS.
- **Capitolo 5** - in questo capitolo viene descritto ciò che si è raggiunto e la possibile estensione del mio lavoro.

1 Tecnologie

1.1 RTEMS

RTEMS sta per Real-Time Executive MultiProcessor System ed è un sistema operativo real-time (RTOS) general purpose open source (licenza GPL 2.0 modificata) progettato e gestito da OAR Corporation. Il suo sviluppo iniziò nella fine degli anni 80 utilizzando i linguaggi Ada e C, e venne usato inizialmente per scopi militari, invece le prime versioni utilizzabili sono state rese open-souce su server ftp nel 1994.
Attualmente viene utilizzato in molti settori tra cui quello aereospaziale, infatti è stato utilizzato in alcune missioni spaziali sia a livello di on-board computer che come computer embedded in altre attività di volo RTEMS è stato validato dall'ESA, European Space Agency, ciò vuol dire che sono stati scritti dei programmi che riproducono gli scenari critici (ad esempio la gestione di molti device oppure la gestione e l'esecuzione concorrente dei task), e sono stati eseguiti sul sistema operativo per poter verificare il suo corretto funzionamento in quei casi. La validazione viene tutt'ora aggiornata poiché è un sistema operativo che è in continua evoluzione e avrà più funzionalità con il passare del tempo.
RTEMS non è un sistema operativo a sé stante, usato epr caricare altri programmi, ma è un executive che viene compilato con l'applicazione in un unico codice monolitico da eseguire.

RTEMS puo' essere visto come un insieme di direttive raggruppate in una serie di manager, che si occupano di varie funzionalità tra cui il controllo e la sincronizzazione dei task e processori, la gestione della memoria e la mutua esclusione. Invece la gestione dello scheduling, dispatching e object management sono forniti dal executive core.

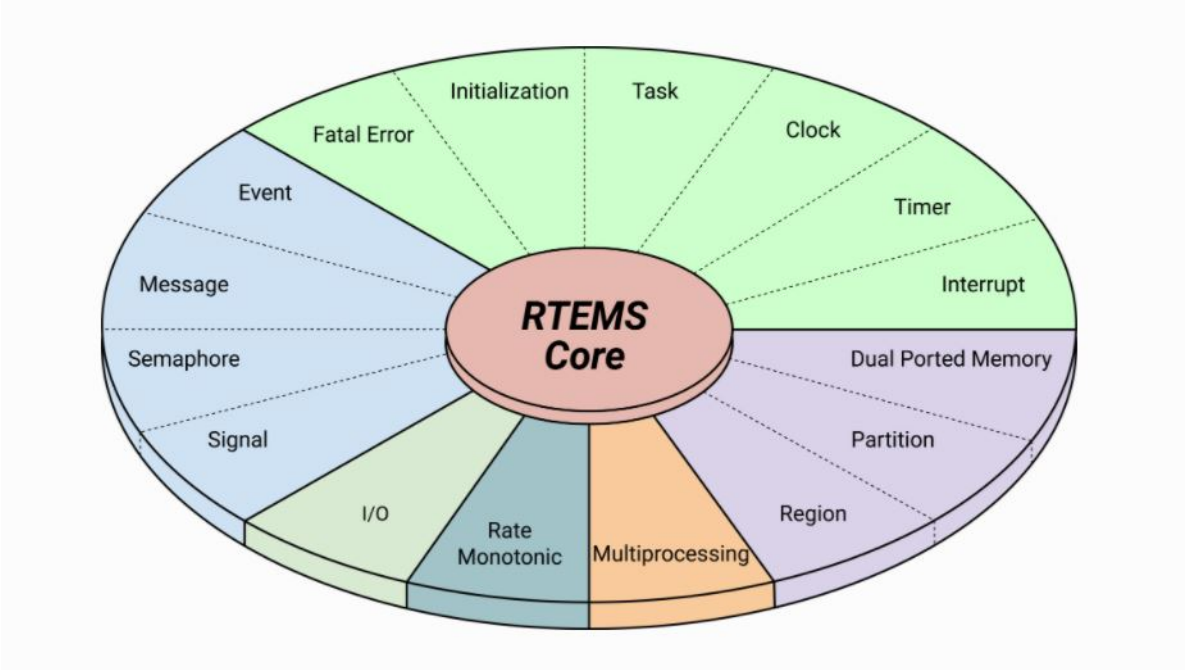


Figura 1.1: Architettura RTEMS

Utilizzando i managers di RTEMS lo sviluppatore puo' concentrarsi al solo sviluppo del applicativo e ciò riduce notevolmente il tempo di sviluppo.
La figura successiva mostra la logica di utilizzo di RTEMS.

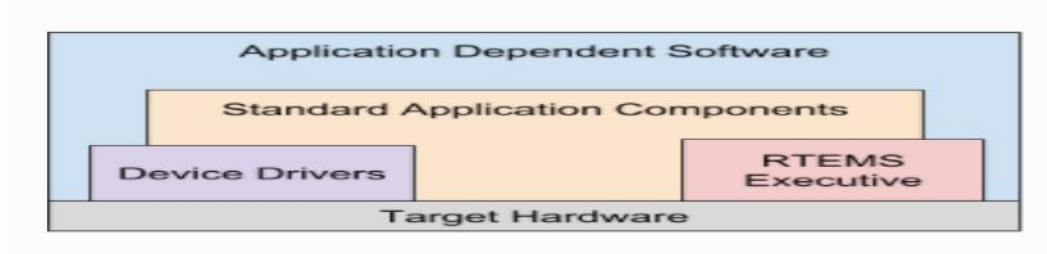
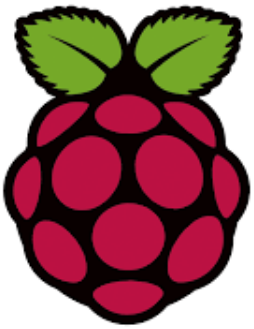


Figura 1.2: Struttura applicativo RTEMS

Come si puo' notare RTEMS Executive è un intermediario tra il codice dell'applicativo e il target hardware, invece le dipendenze hardware con altri device sono localizzati nel livello "device drivers". Il RTEMS I/O manager incorpora queste dipendenze hardware nel sistema mentre allo stesso momento fornisce all'application code l'accesso ad esse. Queste dipendenze hardware

sono isolate in specifiche BSP, Board Support Packages, per questo motivo il 'porting' di un applicativo RTMES su altri processori è semplice poichè basterebbe selezionare la BSP del microprocessore su cui si vuol eseguire l'applicativo e compilare con le sue librerie.
In questo modo durante lo sviluppo di un applicativo real-time si ha la totale indipendenza dall'architettura dei microprocessori.
E' disponibile il 'porting' di RTEMS su molte architetture CPU tra cui ARM, MIPS, LEON,ERC32 e i PowerPC; durante il mio lavoro ho trattato il 'porting' su architettura ARM utilizzando una Raspberry Pi 3B+.

1.2 Raspberry Pi



Raspberry Pi è una serie di computer a scheda singola sviluppata da Rasberry Pi Foundation in collaborazione con la Broadcom, in Inghiterra.
Originariamente è stato usato per insegnare le basi dell'informatica nelle scuole e nei paesi in via di sviluppo, ma attualmente grazie al suo basso prezzo viene usato anche nel settore della robotica, domotica e in molti altri. Al momento sono state rilasciate quattro generazioni di Raspberry Pi, e tutti i modelli hanno un Broadcom SoC (System on Chip) con processore ARM integrato e on-chip GPU (Graphics Processing Unit).
Durante il mio lavoro viene usata la **Raspberry Pi 3B+** che utilizza il Broadcom BCM2837B0 SoC [10] con processore Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit 1.4GHz.

Figura 1.3: Scheda Raspberry Pi 3B+

Tra le specifiche tecniche quelle che ci interessano maggiormente sono:

- SDRAM LPDDR2 da 1GB.
- supporto per la micro SD.
- accesso a 40 GPIO.

La memoria micro SD viene utilizzata per il caricamento degli eseguibili RTEMS nel seguente modo:

1. viene copiato il firmware di Raspberry Pi compatibile con RTEMS nella memoria SD.
2. bisogna cancellare i file 'kernel*.img'.
3. compilare i sorgenti di un applicativo RTEMS in modo da ottenere il file con estensione'.img'
4. copiare l'eseguibile RTEMS nella memoria SD.
5. impostare l'eseguibile RTEMS come kernel della scheda Raspberry Pi, modificando il file 'config.txt'

In questo modo all'accensione della Raspberry Pi, l'eseguibile è il kernel della scheda e viene eseguito automaticamente.

La figura successiva mostra tutti i pin GPIO che Raspberry Pi 3B+ ha a disposizione:

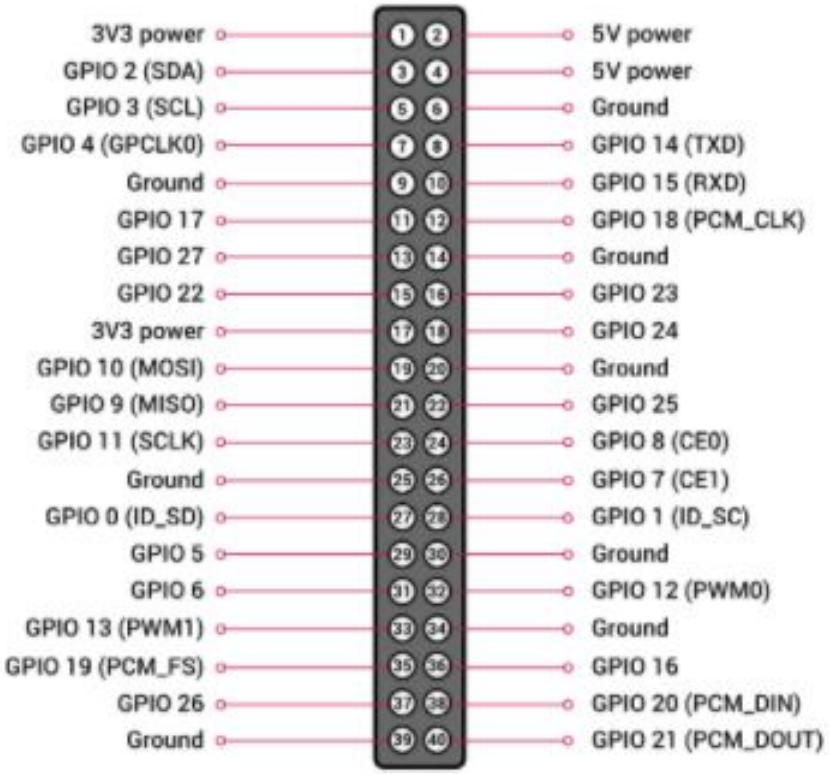


Figura 1.4: Raspberry Pi 3B+ GPIO

Tutti i pin configurabili hanno un output da 0v a 3v3 e come input sono 3v3 'tollerant'.

1.3 Eclipse

Eclipse è un IDE open source rilasciato con licenza EPL (Eclipse Public License) creato da IBM usato principalmente per la programmazione in Java ma grazie a vari plugin puo' essere usato per altri linguaggi di programmazione come C, C++, COBOL, Python e molti altri.
L'ambiente di sviluppo Eclipse include l'Eclipse Java development tools per Java, e l'Eclipse CDT per C/C++.
Per utilizzare RTEMS gcc cross compiler su Eclipse C, bisogna installare il plugin di RTEMS e settare le variabili di ambiente.

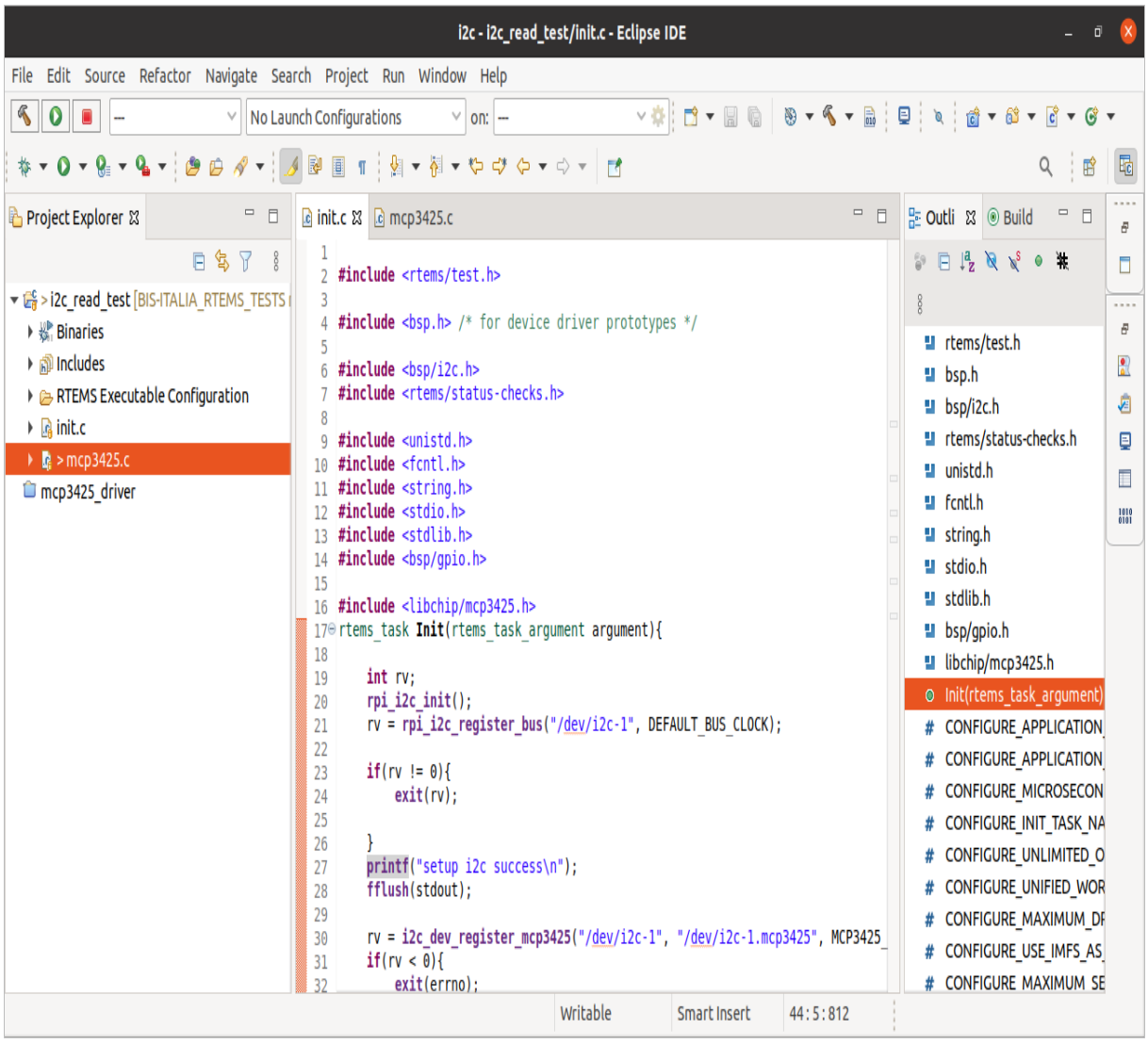


Figura 1.5: Schermata Eclipse del programma I2C

2 Porting di RTEMS su RPi

L'attività di 'porting' è la prima fase del lavoro e consiste in:

1. Installazione dalla tool-suite sul computer host, dove vengono creati gli applicativi RTEMS.
2. Verifica del corretto funzionamento della tool-suite, eseguendo i programmi di test su Raspberry Pi
3. Configurazione del IDE Eclipse C, per la creazione di eseguibili RTEMS
4. Provare a compilare e eseguire i programmi sia da terminale, e sia da Eclipse C

Per svolgere tutta la procedura mi sono munito di un computer con sistema operativo Ubuntu, una scheda Raspberry Pi 3B+, una microsd, e convertitore TTL USB.
RTEMS in sé è complesso per questo il team di RTEMS ci fornisce "l'ecosistema di RTEMS" che è una collezione di strumenti, packages, codici sorgente e documentazione, utile per definire come sviluppare, mantenere e usare RTEMS.
Durante il 'porting' ho utilizzato due importanti strumenti che fanno parte dell'ecosistema RTEMS, e sono :

- RTEMS RSB = l'RTEMS Source Builder è tool molto utile per compilare e buildare i moduli di RTEMS e delle BSP
- BSP raspberrypi = la Build Support Package è il codice di supporto, che contiene le librerie di RTEMS per una specifica scheda (ad esempio la BSP raspberrypi viene usata per la Raspberry Pi 3B+)

Dopo aver effettuato correttamente tutti i passaggi per il 'porting', ho creato una guida che li espone, in questo modo che qualunque utente voglia approcciarsi ad RTEMS su RPi per la prima volta riesca ad eseguirlo senza dover cercare tra le tante fonti sparse su internet.

3 Integrazione hardware e software

Effettuato il 'porting' sono passato all'attività software, cioè la creazione di RTEMS executive per testare il funzionamento delle RTEMS Classic API che sono le API per l'utilizzo delle interfacce.

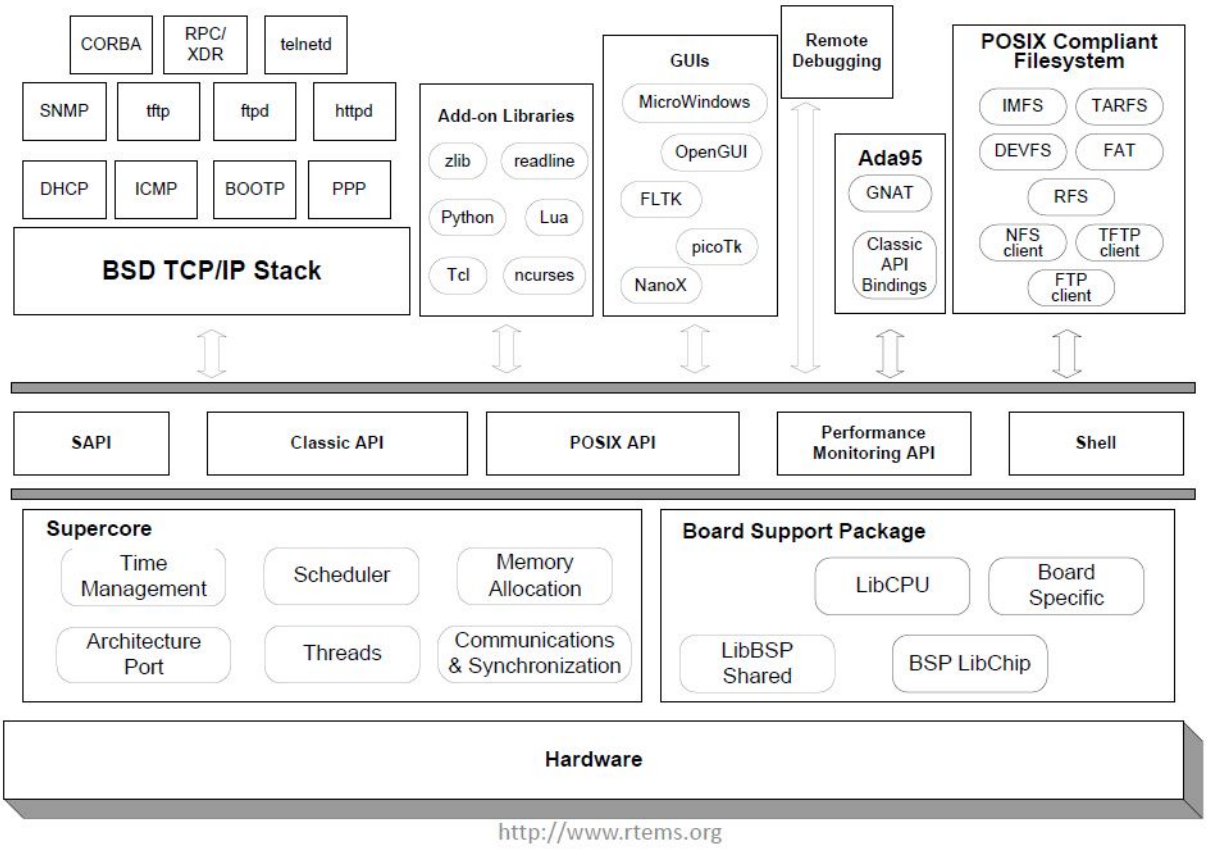


Figura 3.1: Architettura dettagliata sistema RTEMS

Le interfacce che ci interessano validare sono:

- UART
- GPIO
- I2C
- SPI

—
TODO
—-

4 Attività sperimentale

4.1 Obiettivi

Gli obiettivi dell'attività sperimentale sono:
TODO

4.2 Test set-up

Ogni programma di test creato implica un circuito elettrico differente costruito con jumper, breadboard, resistenze, condensatori, pulsanti, LED e schede aggiuntive mandate dalla Microchip su cui ho dovuto saldare cavetti e componenti per poterli utilizzare e collegare alla Raspberry Pi.
I componenti aggiuntivi sono :

- MCP3425 SOT23-6 Evaluation Board [6]: un evaluation board, con un ADC (Analog Digital Converter) MCP3425, controllato tramite protocollo I2C
- MSOP-10 and MSOP-8 Evaluation Board [9]: un evaluation board generica che serve per il collegamento del componente MCP4822 alla Raspberry Pi
- MCP4822 [8]: un DAC (Digital Analog Converter) controllato tramite protocollo SPI, montato sulla evaluation board sopracitata.

Il componente MPC3425 è un ADC da 16 bit che ha come input due tensioni V_{IN}^{+} e V_{IN}^{-} e come output una tensione pari a $V_{IN}^{+} - V_{IN}^{-} \times PGA$. Il componente ha la seguente configurazione predefinita:

- Programmable Gain Amplifier(PGA) = 1
- Continuos Conversion
- Programmable Data Rate = 12 bit

Durante il lavoro viene utilizzata questa configurazione, ma nel caso si volesse cambiare la configurazione del componente, si puo' eseguire una scrittura di due byte dove il primo byte rappresenta l'indirizzo di periferica e il bit R/W (nel nostro caso è 11010000) invece il secondo contiene i bit di configurazione

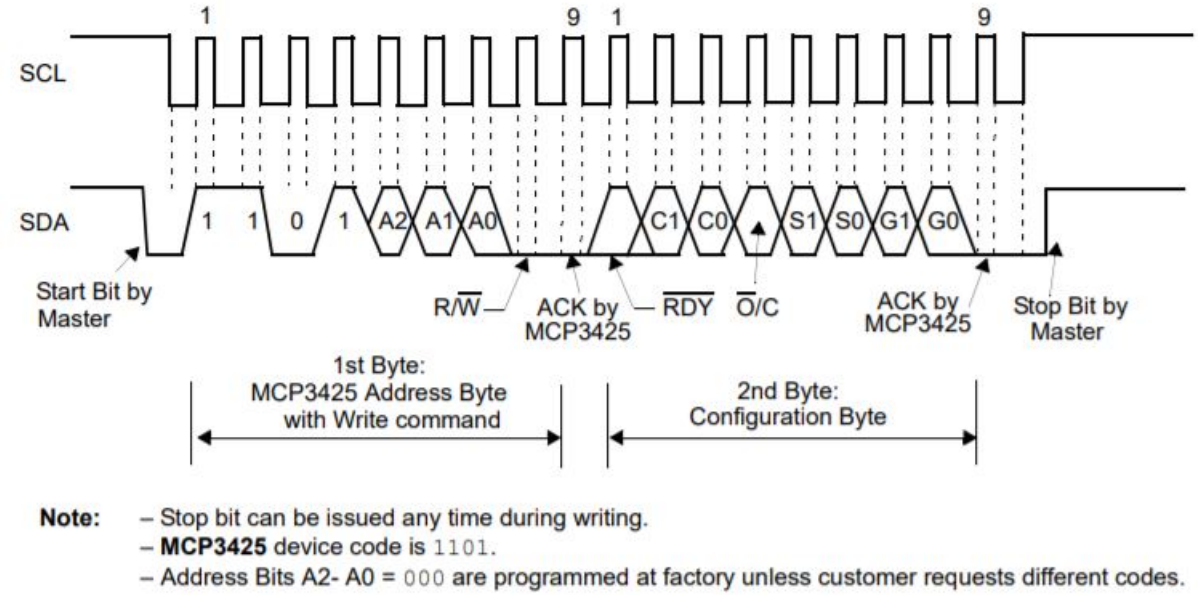


Figura 4.1: Diagramma temporale scrittura su MCP3425

La lettura del valore in uscita dal DAC deve essere eseguita nel seguente modo:

1. mandare sul bus I2C l'indirizzo di periferica con R/W pari a 1
2. lettura dei due byte
3. conversione dei byte per avere il valore effettivo della tensione

—

TODO : DESCRIZIONE COMPONENTE MCP4822

—

TODO: DESCRIZIONE CIRCUITI

—

4.3 Test application software

La struttura principale che tutti i programmi seguono è la seguente:

- init.c = è il file sorgente contenente la funzione Init che è il punto di partenza dell'eseguibile. E' come se fosse il metodo main in Java.
- init.h = è un file header che contiene tutte le direttive RTEMS per configurare il sistema
- task_helper.c = è il file sorgente contenente la definizione dei task, le funzioni per la manipolazione delle variabili globali, le funzioni aggiuntive
- task_helper.h = è un file header che contiente tutte le dichiarazioni delle funzioni defi2 Logs and output files nite in task_helper.c che si vogliono usare in init.c, ad esempio la definizione dei task.

Il programma di test del UART si tratta di un semplice "hello world!" è stato il più semplice da creare, poichè durante il 'porting' è stato usato un programma di esempio simile per visualizzare i log di sistema. Dal codice sorgente dei programmi di esempio, come quelli per il ticker.img, si puo' ipotizzare correttamente che per far stampare un messaggio sulla console è sufficiente definire la direttiva di sistema

```
#define CONFIGURE_APPLICATION_NEEDS_SIMPLE_CONSOLE_DRIVER
```

e usare le funzioni della libreria standard st2 Logs and output files dio.h

```
printf("log");
fflush(stdout);
```

L'interfaccia GPIO è stata testata con tre programmi per coprire le seguenti situazioni :

- accensione e spegnimento di un led ad intervalli di 1 secondo.
- alla pressione di un bottone si ha l'accesione o spegnimento di un led.
- alla pressione di un bottone, viene avviato un task.

—

TODO : DESCRIZIONE DEL PRIMO PROGRAMMA

—

TODO: DESCRIZIONE DEL SECONDO PROGRAMMA, DESCRIVENDO COME è STATA GESTITA LA SEZIONE CRITICA

—

TODO: DESCRIZIONE DEL TERZO PROGRAMMA, DESCRIVENDO LA GESTIONE DEI TASK CON INTERRUPT

—

L'interfaccia I2C è stata testata creando un programma che legge dal SDA l'output del componente ADC che manipolandolo come indicato dal datasheet mi da come risultato la tensione in entrata al ADC. Poichè bisogna utilizzare un componente aggiuntivo, ho dovuto creare il driver associato.

—

TODO : DESCRIZIONE PROGRAMMA I2C E DEL DRIVER

—

Per testare l'interfaccia SPI è stato creato un programma che legge dal MOSI l'output del componente che dovrebbe rappresentare la tensione in uscita. Anche in questo caso si è dovuto creare il driver associato

—

TODO : DESCRIZIONE PROGRAMMA SPI E DEL DRIVER

—

4.4 Risultati finali

TODO

5 Conclusioni

TODO

—-

Il lavoro svolto fa parte dei progetti di BIS-Italia, sezione italiana della British Interplanetary Society, società storica britannica di cui sono membro, che mi ha seguito durante lo stage. BIS-Italia prevede di utilizzare RTEMS su RPi per il progetto di una replica in scala 1:3 di ExoMars Rover che verrà utilizzato per divulgazione.
Tutto il lavoro è stato svolto con l'aiuto dei membri di BIS-Italia e la collaborazione di Microchip.

Ringraziamenti

Bibliografia

[1] RTEMS Team. *RTEMS User Manual*. URL: https://docs.rtems.org/branches/master/user/index.html.

[2] Giorgio Basile. *RTEMS v4.11 on RasperryPi*. URL: https://gist.github.com/giorgiobasile/461d8b8c15d59c6c4445066af6a3124b.

[3] Giorgio Basile. *RTEMS v5 on RasperryPi*. URL: https://gist.github.com/giorgiobasile/1c1930a8a3ff8e36061cd7f4ef83da95.

[4] RTEMS Team. *RTEMS Classic API Guide*. URL: https://docs.rtems.org/branches/master/c-user/index.html.

[5] asuol. *RTEMS rpi testing*. URL: https://github.com/asuol/RTEMS_rpi_testing.

[6] Microchip. *MCP3425 SOT23-6 Evaluation Board User's Guide*. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51787a.pdf.

[7] Microchip. *16-Bit Analog-to-Digital Converter with I2C Interface and On-Board Reference*. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22072b.pdf.

[8] Microchip. *MCP4802/4812/4822 Data Sheet*. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20002249B.pdf.

[9] Microchip. *10-Pin MSOP and 8-Pin MSOP Evaluation Board User's Guide*. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002569A.pdf.

[10] Broadcom. *BCM2835 ARM Peripherals*. URL: https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/bcm2835/BCM2835-ARM-Peripherals.pdf.