
SISTEMI OPERATIVI

Architetture e Sistemi Operativi - II Semestre

Corso A

Autore

Giuseppe Acocella

2024/25

<https://github.com/Peenguino>

Ultima Compilazione - March 29, 2025

Contents

1	Caching	4
1.1	Gerarchia di Memorie	4
1.2	Hit/Miss Rate, Miss Penalty, AMAT	5
1.3	Principio di Località	6
1.4	Tempi CPU (CPI e Miss Penalties)	6
1.5	Tipi di Indirizzamento	7
1.5.1	Indirizzamento Diretto	7
1.5.2	Indirizzamento Associativo	9
1.5.3	Indirizzamento Set Associativo	10
1.6	Accenni di Gestione Stalli Miss Penalties	11
1.7	Tipologie di Miss	12
1.8	Scrittura in Cache	12
1.8.1	Problemi in Scrittura	12
1.8.2	Inconsistenza Cache/Memoria - Write Back/Write Through	12
1.9	Politiche di Rimpiazzamento - Sequenziale/LRU	13
1.10	Cache Coherence	14
1.10.1	Cache Coherence Protocols	14
1.10.2	False Sharing	14
2	Gestione I/O e Periferiche	15
2.1	Legge di Amdahl	15
2.2	Prima Descrizione Gestione I/O	15
2.3	Protocolli di Arbitraggio del Bus	17
2.4	Meccanismi di Gestione Bus	18
2.4.1	Memory Mapped I/O	18
2.4.2	Interruzioni	18
2.5	Metodi di Query sullo Stato dell'I/O	19
3	Introduzione ai Sistemi Operativi	21
3.1	Struttura Kernel - Monolitica vs a Micro Kernel	22
3.2	Computazioni nel Tempo - (Batch, Spool, Time Sharing)	22
3.3	Protezione del Calcolatore	23
3.3.1	Dual Mode - User/System	23
3.3.2	Meccanismi Necessari alla Gestione del Dual Mode	23
3.4	Descrizione di un Processo	25
3.4.1	Thread e Processi	25
3.4.2	PCB - Process Control Block	25
3.5	Descrizione Interruzioni	26
3.5.1	Handler di Interruzioni	26
3.6	Esempi d'Implementazione su Architettura ARM	27
3.6.1	CPSR ed Interrupt Masking	27
3.6.2	Modalità di Esecuzione	27
3.6.3	Banked Registers	28
3.7	System Calls	28

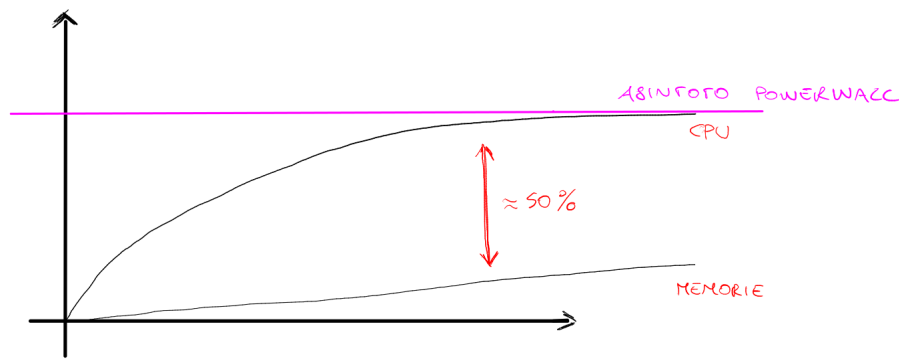
3.7.1	Call Handler in ASM ARM v7	29
3.8	Upcalls - Segnali	29
3.9	Kernel Boot	29
3.10	Sommario Specifiche Hardware Necessarie all'OS	30
4	Interfaccia di Programmazione di Applicazioni di un OS	31
4.1	Gestione Processi - (Fork, Exec, Wait, Sleep, Exit)	31
4.2	Comunicazioni tra Processi - (Pipe)	32
4.3	Gestione Threads	34
4.3.1	Schedulazione e Potenziale Inconsistenza	35
4.3.2	Yield/Interruzione di Thread	36
5	Sincronizzazioni	37
5.1	Spinlock	37
5.2	Lock	38
5.3	Condition Variables	39
5.4	Semafori	40
5.5	Esempi di Implementazioni Lock/Unlock	41
5.5.1	Monitor e Sincronizzazioni Multi Object	43
5.6	Schema Lettore/Scrittore	44
5.7	Problema dei Filosofi a Cena e Condizioni di Stallo	47
5.7.1	Prevenzione e Cura degli Stalli	47
5.8	Algoritmo del Banchiere	48
5.8.1	Esempio d'Istanza e Rappresentazioni	49
5.8.2	Pseudocodice dell'Algoritmo del Banchiere	50
5.9	Scheduling	50
5.9.1	Politiche di Schedulazione	51
5.9.2	Multi Level Feedback Queue	52
5.9.3	Schedulazione Multi-Processor	53

1 Caching

Il Caching ha come obiettivo quello di astrarre sulle gerarchie di memoria e creare l'**illusione** di avere la stessa quantità di memoria "lenta" ma alla velocità della memoria "veloce". Questo è solo un esempio che cerca di illustrare l'obiettivo del caching. Si vuole creare una gerarchia di memorie, classificate per velocità e "vicinanza" alla CPU, permettendo l'accesso a dati ricorrenti in tempo breve.

1.1 Gerarchia di Memorie

Classifichiamo le memorie secondo la loro velocità. Più veloci saranno e più saranno costose e piccole in termini di spazio in *byte*. Oltre a questo dobbiamo tenere in considerazione il modo in cui si stanno evolvendo le CPU e le memorie:



Questo è un altro motivo per cui si vuole gestire in maniera più intelligente la comunicazione tra processore e memoria.

Istanza di Caching Assumiamo di avere quattro memorie:

$$A1, A2, A3, A4$$

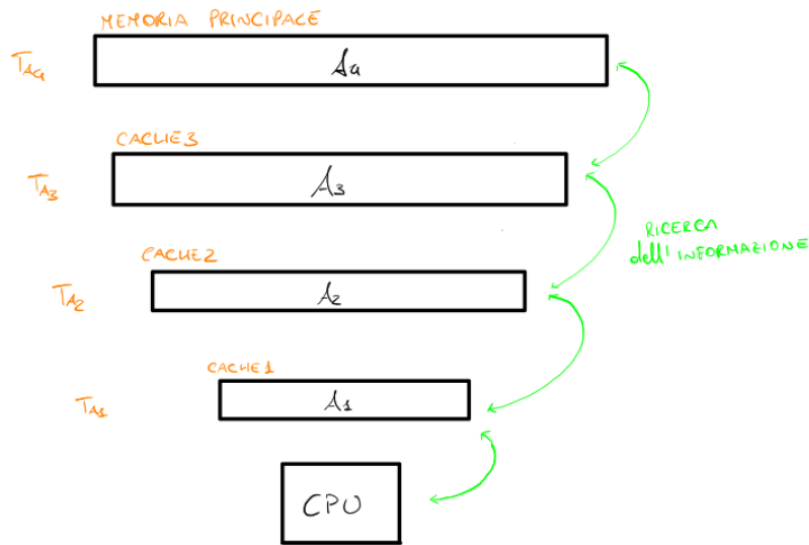
Ed ognuna di queste memorie sarà caratterizzata da un tempo, ordinate in tempo crescente:

$$T_{A1}, T_{A2}, T_{A3}, T_{A4}$$

E' necessario tenere in considerazione come modello di riferimento quello di *Von Neumann*, di conseguenza abbiamo una **CPU** che interagisce con una **memoria** grazie ad un canale di comunicazione. Spesso l'utilizzo di questo canale causa un effetto di **bottleneck**. Si vuole quindi trovare un compromesso che possa velocizzare la comunicazione tra **CPU** e **memoria**. Le prestazioni di una memoria dipendono fortemente dalla tecnologia del supporto¹.

¹La classificazione di tecnologia delle memorie è presente nel primo modulo di appunti: Architetture degli Elaboratori.

Illustriamo la gerarchia delle memorie e la loro "distanza" dalla CPU.



Possiamo assumere queste tempistiche delle memorie:

$$T_{A_1} = 4\tau \quad T_{A_2} = 10\tau$$

$$T_{A_3} = 20\tau \quad T_{A_4} = 60/80 \text{ nsec}$$

1.2 Hit/Miss Rate, Miss Penalty, AMAT

Una volta impostata la gerarchia rappresentata sopra, è necessario capire se un **indirizzo** dato sia o meno presente ad uno specifico **livello** tra quelli illustrati.

1. **Hit Rate:** Percentuale di "Hit", ossia dati **trovati**.
2. **Miss Rate:** Percentuale di "Miss", complementare a quella di "Hit", ossia dati **non trovati**.
3. **Miss Time:** Tempo impiegato per effettuare la fetch con esito di "Miss".
4. **Miss Penalty:** Tempo impiegato per risalire la gerarchia delle cache fino al ritrovamento del dato cercato.
5. **AMAT:** Average Memory Access Time:

$$AMAT = HIT_TIME + (MISS_RATE * MISS_PENALTY)$$

La differenza tra **Miss Time** e **Miss Penalty** può variare anche di ordini di grandezza. L'**Hit Rate** deve essere superiore al 90% per rendere efficiente lo schema delle cache così impostate.

1.3 Principio di Località

Risulta necessario stabilire il criterio con il quale vengono caricati questi blocchi di memoria più performanti e vicini alla CPU. Le informazioni caricate sulla cache seguono il cosiddetto **principio di località**:

1. **Località Spaziale**: Solitamente per un certo periodo di tempo, molti dati potrebbero risultare vicini tra di loro. In questo caso si stabilisce quindi la grandezza di un blocco e questo verrà caricato tutto sulla cache. Questo permetterà probabili accessi successivi in tempi ridotti, anche di svariati ordini di grandezza. Secondo questo principio, accedendo a $M[PC]$, molto probabilmente accederò a $M[PC + 4]$, $M[PC + 8]$...
2. **Località Temporale**: Spesso un dato corrente potrebbe essere riutilizzato in breve tempo. Di conseguenza si preferisce mantenere il dato in cache. Secondo questo principio, accedendo a $M[PC]$, probabilmente in breve tempo potrei riaccedere a $M[PC]$.

Grazie a questo principio si stabilisce il criterio con cui vengono caricati i blocchi in cache. Questo procedimento permette in $1\tau^2$ di caricare in cache un blocco di grandezza arbitraria. E' necessario ricordare che questi principi possono essere applicati a tutti i tipi di dato (codice oppure effettivo dato in memoria).

1.4 Tempi CPU (CPI e Miss Penalties)

Elenchiamo diverse formule di calcolo dei tempi CPI (clock per instructions), illustrando anche l'influenza su questi tempi delle penalties causate dalle informazioni non trovate nella cache.

$$CPU_{TIME} = (CPI_{PERFECT} + CPI_{MISS_PENALTY}) * LEN_CICLO_CLOCK$$

$$CPI_{PERFECT} = \frac{IC_{CPU}}{IC} CPI_{CPU} + \frac{IC_{MEM}}{IC} CPI_{MEM}$$

$$CPI_{MISS_PENALTY} = \frac{IC_{MEM}}{IC} * MISS_RATE * MISS_PENALTY$$

$$CPI_{STALL} = CPI_{STALL_IST} + CPI_{STALL_DATA}$$

$$CPI = CPI_{PERFECT} + CPI_{STALL}$$

$$CPI_{STALL} = MISS_RATE_{IST} * MISS_PENALTY$$

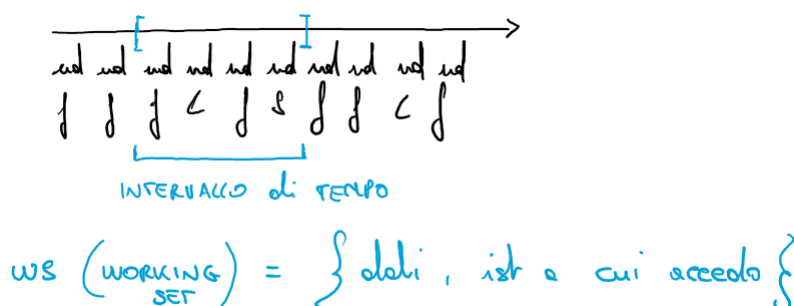
L'identificatore IC corrisponde al contatore di istruzioni. Un caching efficiente tende a minimizzare la percentuale di miss rate. Questa minimizzazione spesso è forzata da tecniche di **prefetching**, ossia si manda in background il caricamento della cache cercando di "prevedere" i dati che verranno utilizzati in caso siano validi i principi di località.

²Tempo breve generico, abbiamo assunto un ciclo di clock, per rendere l'idea che un blocco viene caricato tutto sulla cache in un singolo tempo, essendo appunto in "blocco".

1.5 Tipi di Indirizzamento

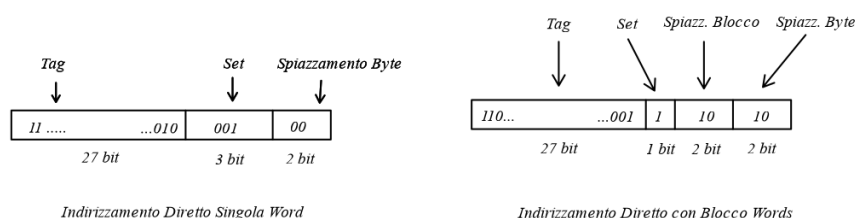
Abbiamo definito i criteri e l'organizzazione fisica del caching. Ma non abbiamo ancora definito come possiamo effettivamente trovare/non trovare un determinato indirizzo dato in cache. Se assumiamo che la cache sia un sottoinsieme della memoria principale, allora abbiamo la certezza (conoscendo le dimensioni di entrambe le memorie citate) che degli indirizzi possono collidere. Sicuramente almeno due indirizzi della memoria principale avranno la stessa locazione in cache. Di conseguenza elenchiamo tre tipi di indirizzamento caratterizzati da proprietà diverse.

Working Set Insieme di istruzioni/dati consecutivi in un certo intervallo di tempo. L'analisi della località di questi set permette la gestione logica delle cache.



1.5.1 Indirizzamento Diretto

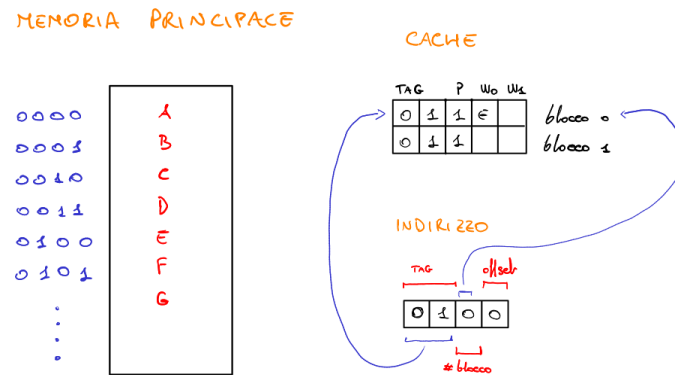
Immaginiamo di avere una memoria principale di dimensioni N , la cache a disposizione della CPU sarà invece di dimensioni N^I con $N \gg N^I$. Alla base dell'indirizzamento diretto c'è l'interpretazione di parte dell'indirizzo cercato come **tag** da cercare nelle linee della cache.



Trashing A causa delle differenze di dimensioni tra memoria e cache, sicuramente più indirizzi avranno la stessa chiave, di conseguenza se dovesse capitare di dover caricare in cache più indirizzi con la stessa chiave si andrebbe in contro ad un continuo **caricamento** e **scaricamento** di dati tra la cache e la memoria. Questo fenomeno è detto **trashing** ed è un punto di debolezza delle cache ad indirizzamento diretto. Effettuare questi spostamenti continui di dati invaliderebbe infatti tutti i vantaggi ottenuti dall'utilizzo delle cache.

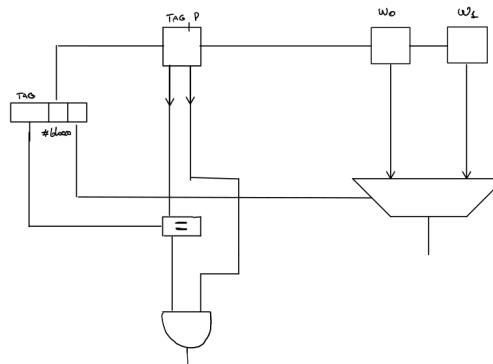
Mostriamo a pagina successiva la logica di questo tipo di indirizzamento e la sua implementazione fisica su rete combinatoria.

1. **Implementazione Logica:** Mostriamo uno schema della logica dietro l'indirizzamento diretto ed analizziamolo a step.



- Ogni dato in memoria avrà un **indirizzo**. Assumiamo un indirizzo composto da 4 bit e diamo un'interpretazione alle cifre.
- Ogni indirizzo sarà dunque composto da un **tag** (bit 0-1), un **blocco** (bit 2) e da un **offset** (bit 3).
- Nella cache saranno presenti vari blocchi (linee) e ciascuna di queste avrà un **tag**, un **bit di presenza** (p) e varie **word**, se saranno selezionabili grazie all'**offset** determinato dall'indirizzo cercato.

2. **Implementazione Fisica:** Mostriamo la rete combinatoria dietro l'indirizzamento diretto ed analizziamola a step.



- Tre moduli rappresentanti la cache, il primo mantiene le informazioni riguardanti il **tag** ed il **bit di presenza**.
- L'indirizzo in input è interpretato come nell'implementazione logica.
- Il confrontatore prende in input il tag dell'indirizzo in ingresso ed il tag della cache.
- La porta **AND** produce in output l'esito di **hit/miss**, mentre il multiplexer permette di selezionare la word cercata, se presente.

1.5.2 Indirizzamento Associativo

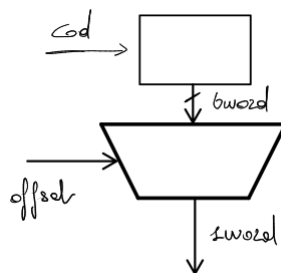
Questo tipo di indirizzamento interpreta parte dell'indirizzo in ingresso come chiave e dedica, ad ogni possibile chiave, una linea di cache. Questo permette di avere una cache molto flessibile e non presenterà problemi causati dalle collisioni. Questa gestione della cache però è davvero costosa, dato che saranno presenti un numero molto alto di confrontatori. Mostriamo le implementazioni di questo schema di cache:

1. **Implementazione Logica:** Illustriamo la gestione delle linee di cache e dell'indirizzo in ingresso.



- Ogni cache avrà due colonne, la prima rappresenterà i **tag** mentre la seconda le *keyword* per ogni linea.
- Ogni indirizzo avrà quindi una corrispondente linea in cache, e la word singola in output sarà determinata dalla parte di **offset**.

2. **Implementazione Fisica:** Illustriamo l'implementazione fisica di una **singola** linea di cache.

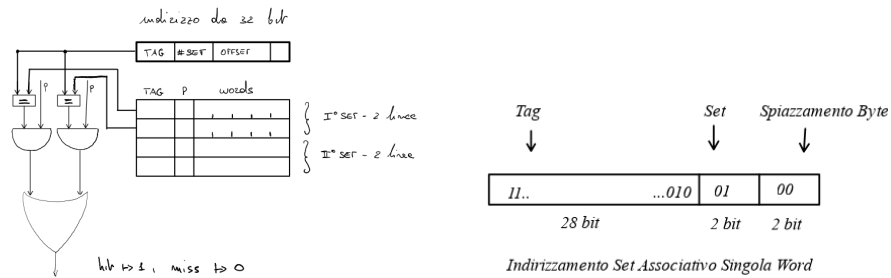


Questa illustrazione permette di capire il costo di questa gestione della cache. Ogni **singola linea** di cache richiederà un **confrontatore** ed un multiplexer. Solitamente una cache contiene una quantità di linee che si aggira sull'**ordine delle migliaia**.

1.5.3 Indirizzamento Set Associativo

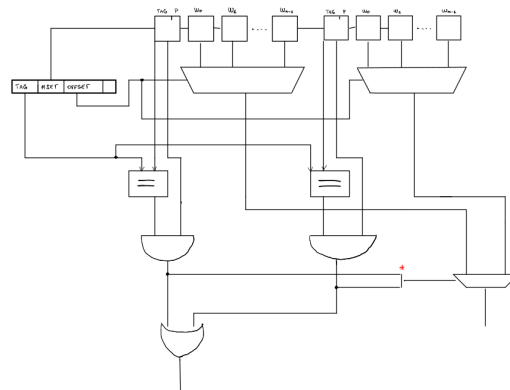
Le due precedenti gestioni di cache offrivano pro e contro. Di conseguenza si preferisce un ibrido tra indirizzamento diretto ed associativo, in modo tale da poter bilanciare rispettivamente sia i problemi causati dalle collisioni sia i costi eccessivi. Illustriamo la gestione di questo tipo di indirizzamento:

1. **Implementazione Logica:** Descriviamo per step il funzionamento di questo schema:



- Ogni **indirizzo** in **ingresso** sarà interpretato con **tag**, **numero set** ed **offset**.
- Le **linee** di cache vengono raggruppati in **set**. Di conseguenza si effettua un indirizzamento **associativo** sul **set** di appartenenza.
- Una volta selezionato il **set** si effettua un indirizzamento **diretto** utilizzando il **tag** tra le varie linee del **set** corrente.
- Infine, se si ha un segnale di **hit**, allora si utilizza l' **offset** per ricavare la **singola word** tra le **kword**.

2. **Implementazione Fisica:** Descriviamo la composizione di questa rete di una cache a 2 vie.



- Ogni via è caratterizzata da un modulo contenente **tag** e **bit di presenza** ed i restanti le **word** di quella linea.

- (b) L'**indirizzo** in ingresso è caratterizzato da **tag**, **numero di set** ed **offset**.
- (c) Tutti i moduli contenenti **word** danno in input ad un **multiplexer** il loro contenuto, il cui segnale di controllo è rappresentato dall'**offset** dell'**indirizzo** in ingresso.
- (d) Viene utilizzato un numero di comparatori pari al numero di **set**, questi avranno in input il **tag** del primo modulo del corrente **set** ed il **tag** dell'**indirizzo** in ingresso.
- (e) Delle porte **AND** prendono in ingresso il **bit di presenza** e l'output dei **comparatori** per ogni **set** e producono un segnale di **hit/miss** entrando in una porta **OR**.
- (f) Infine, l'output delle porte **AND** viene portato ad un multiplexer come segnale di controllo, permettendo la scelta tra le uscite dei **multiplexer** di **ciascun set**. In questo particolare caso non è necessario utilizzare un codificatore prima dell'ingresso di controllo sull'ultimo multiplexer in basso, essendo il caso di soli due set, altrimenti sarebbe stato necessario anche quel componente.

Confronto Caratteristiche Indirizzamenti Riassumiamo le caratteristiche di ciascun tipo di indirizzamento sopra illustrato:

	#vie	#insiemi
diretto	1	#linee cache
associativo	#linee cache	1
set associativo	#vie	$\frac{\#linee}{\#vie}$

1.6 Accenni di Gestione Stalli Miss Penalties

Nel momento in cui accade una **miss penalty** il processore entra in **stallo** per un periodo di tempo abbastanza ampio. Per questo motivo si preferisce attuare delle politiche grazie alle quali si "nasconde" il tempo di stallo in questione:

1. **Out of Order Execution:** Si eseguono operazioni future non in ordine e che permettano di non invalidare le Condizioni di Bernstein.
2. **Esecuzione Speculativa Salti:** Si prevede un salto, assumendo che porti a qualcosa di già fatto.
3. **Prefetching:** Si cerca di prevedere cosa verrà caricato in cache, avviando veri e propri caricamenti in cache in **background**. Questo non sempre può essere realizzato, ma quando possibile permette un efficace minimizzazione degli stalli causati dalle miss penalty.

1.7 Tipologie di Miss

I miss si dividono in **specifiche categorie** rispetto alla "causa" che li genera:

1. **Fisiologici**: Cronologicamente il primo miss necessario al caricamento della cache.
2. **Capacità**: La grandezza del **Workspace** supera quella della **cache**.
3. **Conflitto**: Causato dal tipo di indirizzamento. Questa tipologia può essere risolta a tempo di compilazione.

1.8 Scrittura in Cache

Elenchiamo tutte le caratteristiche e le problematiche della scrittura in cache e della sua consistenza in relazione ai dati presenti in memoria principale.

1.8.1 Problemi in Scrittura

Elenchiamo le possibili problematiche causate dalla scrittura in cache:

1. **Scrittura 1 word/b word**: Assumiamo di avere un indirizzo su cui vogliamo effettuare una *STR* in una cache set associativa a 2 vie. Non posso semplicemente scrivere il **dato (singola word)** e segnare a quella linea il bit di presenza ad 1 perché starei sprecando tutte le $b - 1$ word presenti in quella linea su cui potrei ancora scrivere. Dunque si effettua lo stesso procedimento delle *LDR*, favorendo il caricamento di tutti i dati adiacenti a quello corrente nella linea di cache.
 - (a) **Eccezione**: Questo comportamento può causare problematiche nel caso in cui si voglia inizializzare un array con elementi arbitrari (da modificare successivamente) al suo interno. In quel caso non avrebbe senso caricare in cache tutti i dati, dato che verrebbero riscritti poco dopo. Questi tipi di ottimizzazioni vengono controllate dal compilatore, se è in grado di accorgersi di queste problematiche.

1.8.2 Inconsistenza Cache/Memoria - Write Back/Write Through

La scrittura in cache causa un altro tipo di problematica, ossia la **consistenza** dei dati in **cache** ed in **memoria principale**. Tutte le locazioni parallele dovrebbero essere "informate" di una potenziale modifica. Esistono 2 approcci diversi che risolvono questa problematica:

1. **Strategia Write Back**: Si aggiunge un nuovo **bit flag** alle linee di cache, ossia $M \in \{0, 1\}$, se il contenuto della linea è stato modificato allora la flag va ad 1, altrimenti resta a 0. Sarà dunque necessario ad un certo punto un "refresh" della memoria, trasportando tutti i dati modificati ai livelli superiori.
2. **Strategia Write Through**: Non utilizzo un bit flag, ma ogni modifica effettuata in cache viene messa in coda ad un **buffer** e l'aggiornamento dei livelli superiori avverrà in maniera **asincrona**. Questo approccio dipende fortemente dalla dimensione del buffer, questo dovrà essere abbastanza grande da contenere tutte le modifiche in coda fino all'effettivo refresh.

3. **Strategia Write Back Bufferizzata:** Versione asincrona del write back, si compone di queste fasi:

- (a) Si copia la modifica nel buffer di scrittura.
- (b) Senza attendere la fase precedente, carico le b parole nuove in cache.
- (c) Finisce l'accesso in cache.

1.9 Politiche di Rimpiazzamento - Sequenziale/LRU

Che criterio segue ogni tipologia di indirizzamento di cache nel caso in cui bisogna aggiungere un nuovo dato in una cache già piena?

1. **Indirizzamento Diretto:** Viene sostituita in maniera secca la linea di cache a cui sta facendo riferimento il nuovo indirizzo.
2. **Indirizzamento Associativo:** Dato che questo tipo di indirizzamento non provocava collisioni, siamo costretti a scegliere una "vittima" in cache da sostituire con l'indirizzo corrente, essendo certi di aver finito lo spazio.
3. **Indirizzamento Set Associativo:** Viene scelta una "vittima" da sostituire come nel caso precedente ma in uno specifico set.

Il focus diventa quindi la gestione del **working set**, in modo tale da ottimizzare il caricamento/scaricamento delle cache in relazione al corrente working set.

1. **Politica Sequenziale - Indirizzamento Diretto:** Questo approccio è quello più semplice possibile, infatti dopo il primo miss in cache si carica in cache un blocco di b words. Appena sarà richiesta una word fuori da quel blocco viene effettuato un nuovo caricamento di blocco di words in cache.
2. **Politica LRU³ Puro - Indirizzamento Set Associativo:** L'idea è quella di mantenere un tempo di accesso t_a per sostituire quello che servirà tra più tempo. Questo porta però ad un costo molto alto, dato che per ogni linea andrebbe controllato il tempo "mancante" al prossimo accesso. Si preferisce quindi un compromesso, ossia l'LRU Approssimato.
3. **Politica LRU Approssimato - Indirizzamento Set Associativo:** Ogni linea di cache si porta dietro una flag d'accesso $A \in \{0, 1\}$ che viene alzata ad ogni accesso a quella linea. Ogni k cicli di clock viene effettuata un operazione di **azzeramento**, dove tutte le A vengono portate a 0. Questa logica non è molto costosa dal punto di vista implementativo, ma è fortemente influenzata dall'ampiezza del periodo di refresh, dato che un periodo troppo lungo porterebbe a troppi bit $A = 1$, mentre troppo breve porterebbe alla scelta random di locazioni.

³LRU sta per Least Recent Used, dunque utilizzato meno recentemente.

1.10 Cache Coherence

Assumiamo di essere in un contesto multicore, dove ciascun core dispone di almeno un livello di cache completamente dipendente dal core stesso. La gestione concorrente dell'esecuzione complessiva dei programmi va attentamente gestita, dato che facilmente può crearsi inconsistenza tra copie dello stesso dato in cache di core diversi.

Mantenimento Coerenza Abbiamo bisogno di due meccanismi per mantenere la coerenza delle cache:

1. Meccanismo di **tracciamento** copie di un determinato dato x in tutte le cache.
2. Meccanismo di **informazione** a tutte le copie di un dato x sulla **modifica** apportata. Potenzialmente esistono due approcci:
 - (a) Propagazione del nuovo valore di x a tutte le copie in tutte le cache.
 - (b) Invalidazione di tutte le altre copie di x .

1.10.1 Cache Coherence Protocols

Esistono due protocolli che permettono la sincronizzazione dei dati tra tutte le cache di primo livello dei vari core. Elenchiamoli:

1. **Snoopy Based**: Tutti i core sono in ascolto su un **bus**, quando un **core** effettua una **write** in una sua **cache** manda un segnale sul **bus** che permette una sincronizzazione tra tutti i core.
2. **Directory Based**: Si mantiene una **tabella** nel primo livello di **cache comune** tra tutti i core che contiene tutte le informazioni sui dati e sulle locazioni di tutte le sue copie. In questo modo, utilizzando questa **mappa** è possibile **sincronizzare** tutte le copie nelle varie **cache**.

Ogni tipo di protocollo scelto influisce sull'**AMAT** complessivo.

1.10.2 False Sharing

In specifici contesti, questi protocolli di sincronizzazione causano una quantità molto grande di operazioni "inutili" derivate dalla logica alla base della coerenza implementata in questo modo. Mostriamo un esempio:

1. Assumiamo di avere un array molto grande, sull'ordine dei k in grandezza.
2. Assumiamo di avere una macchina con 4 core, suddividiamo l'array in quattro parti e ciascun core calcolerà la somma di ogni quarto di array, depositando il risultato in una specifica posizione di un array risultato di 4 posizioni.

3. Ogni core caricherà in cache una copia dell'array risultato e cercheranno di sincronizzare tutti i valori di quest'ultimo ad ogni operazione effettuata. Ma impostato in questo modo, l'array risultato è "impropriamente condiviso", infatti ogni core si occupa di **una sola** cella. Questo fenomeno è detto **false sharing** ed è un effetto collaterale della **cache coherence** che causa inutile traffico di sincronizzazione non desiderato. Una soluzione è quella di posizionare, grazie al **padding**, i risultati di ciascun core in memoria che **non risulti** condivisa.

2 Gestione I/O e Periferiche

Per rendere un calcolatore in grado di acquisire dati dall'interno/esterno è necessario gestire l'**I/O**. Assumiamo che un programma impiega un tempo t per terminare. Considerando quest'ultimo, si aggiunge circa un $\frac{1}{10}t$ al tempo complessivo. Un concetto fondamentale è anche quello della differenza tra la velocità delle operazioni di I/O e la velocità di esecuzione delle istruzioni della CPU. E' fondamentale che non si crei un collo di bottiglia al processore alla velocità delle operazioni di I/O, la CPU deve essere in grado di eseguire altre istruzioni mentre lavorano le periferiche esterne.

2.1 Legge di Amdahl

Questa legge stabilisce il rapporto "all'infinito" del tempo parallelizzabile e non parallelizzabile, in questo caso rispettivamente tempo generico di esecuzione della **CPU** e tempo dedicato all'**I/O**.

$$T_{seq} = fT_{seq} + (1 - f)T_{seq} =$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{T_{seq}}{fT_{seq} + \frac{(1-f)T_{seq}}{n}} =$$

$$= \frac{T_{seq}}{fT_{seq}} = \frac{1}{f}$$

2.2 Prima Descrizione Gestione I/O

Ogni genere di dispositivo di I/O ha la necessità di gestire:

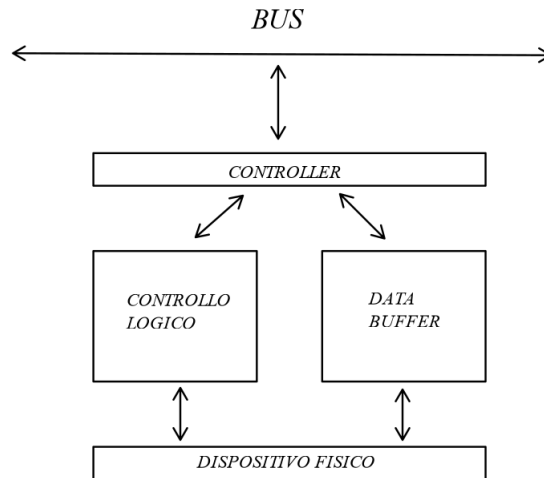
1. **Controllo**: Gestione degli ordini e dei segnali per gli esiti.
2. **Dati**: Dati di input/output.

Descriviamo sommariamente i passi necessari alla comunicazione tra **CPU** e device **I/O**:

1. CPU controlla stato periferica, l'I/O risponde al controllo.
2. CPU se e solo se il dispositivo è libero manda il comando alla periferica.
3. Periferica esegue l'istruzione.

- (a) Se c'è necessità di trasferimento dati alla CPU viene eseguito in questo momento.
4. I/O "fa rapporto" sull'esito dell'operazione appena eseguita.

Device I/O La comunicazione del device in maniera approssimativa si mostra in questo modo:



La rappresentazione del buffer è **approssimativa**, infatti non dobbiamo pensare che sia un semplice cavo da 1 bit, ma un vero e proprio **insieme di cavi** che permettono il trasporto d'informazioni riguardo **indirizzo, controllo, dati** ed **arbitraggio**.

Due **tipologie** comuni di **bus** sono ad esempio **USB** o **PCIe**.

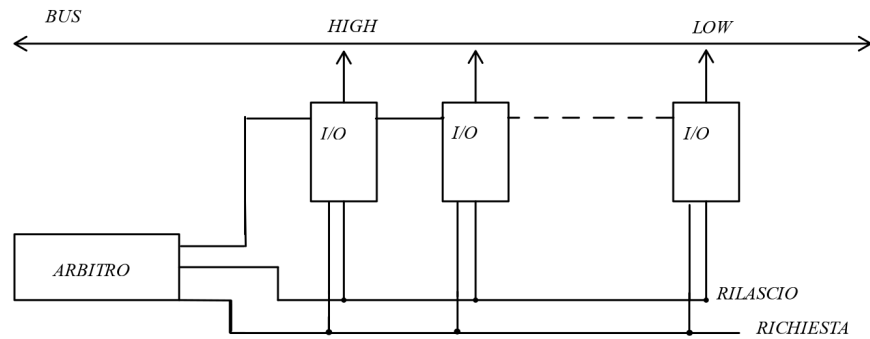
Comunicazioni sul Bus Il bus è condiviso, le informazioni vengono dunque inviate in broadcast a tutti i device, ogni dispositivo però potrebbe avere clock diversi:

1. **Gestione Sincrona:** Il clock è uno solo ed ogni device si adatta a quest'ultimo.
2. **Gestione Asincrona:** Ogni device ha un proprio clock, generando un effetto **skewed**. Questo fenomeno va "ammortizzato" cercando di generare sincronizzazione solo ad uno specifico momento di comunicazione tra dispositivi e CPU.

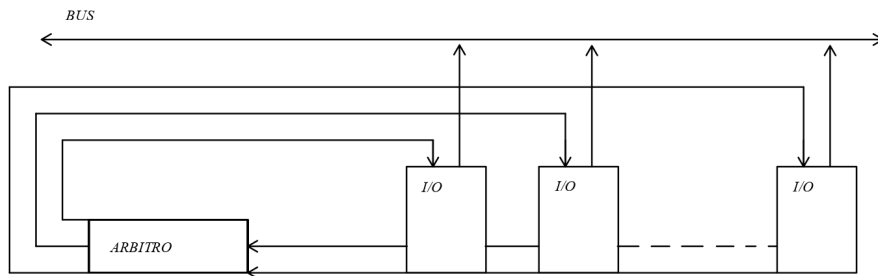
2.3 Protocolli di Arbitraggio del Bus

Dopo aver definito il **bus** come mezzo di **comunicazione condiviso** tra tutti i dispositivi, è necessario stabilire come questi ultimi vengano arbitrati in modo tale da **non operare in conflitto** tra loro.

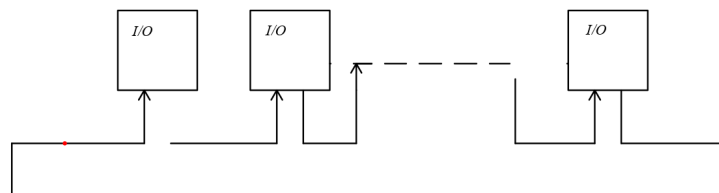
1. **Daisy Chaining:** Sul bus è settata una priorità per device:



2. **Richiesta Indipendente:** Una componente **arbitro** sceglie chi può o meno comunicare sul bus tra tutte le periferiche esterne:



3. **Token Passing:** Esiste una sorta di comunicazione "ad anello" su cui gira un **token**. Chi acquisisce il token ha il permesso di comunicare sul bus e al termine della loro operazione dovranno restituire il token:

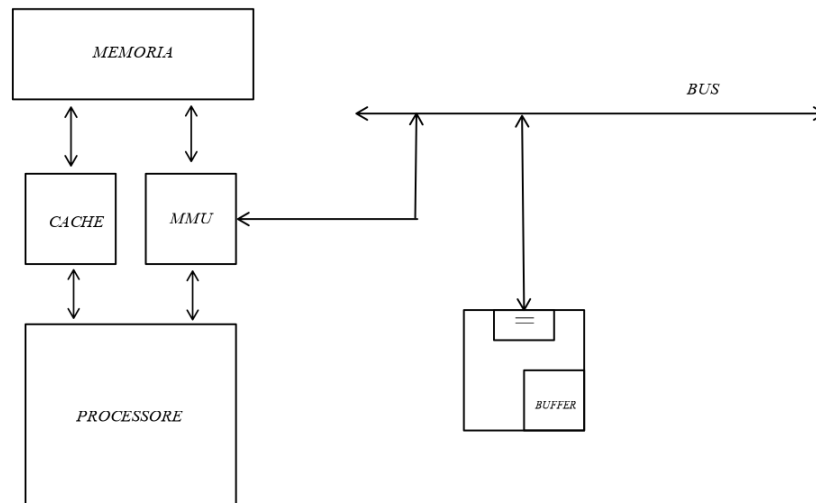


2.4 Meccanismi di Gestione Bus

Una volta definita la composizione e gli arbitraggi del bus bisogna descrivere in che modo vengono inviati i dati ed i segnali grazie a specifici meccanismi.

2.4.1 Memory Mapped I/O

Immaginiamo di star lavorando con un architettura a 32 bit, **riserviamo** una quantità di questi **bit** in ogni indirizzo come **flag** che indichi se bisognerà o meno **dirottare** il contenuto verso la **memoria principale** o la **memoria** di qualche **periferica**.



L'unità che ci permette di effettuare questa scelta è la *Memory Managment Unit* (**MMU**) che ha accesso sia alla memoria sia alle periferiche. Abbiamo quindi un modo per reindirizzare operazioni di load/store anche sul buffer delle periferiche.

2.4.2 Interruzioni

Un altro meccanismo fondamentale è quello della gestione delle interruzioni, ossia dei segnali che permettono la comunicazione tra periferiche e CPU. Immaginiamo che la CPU stia eseguendo questo loop:

```
1  while (true){
2      fetch
3      decode
4      execute
5      memory
6      write back
7      interruzione?
8  }
```

Questo ci permette di ottenere un segnale sul chi e perchè sia stata lanciata un interruzione (se è stata lanciata), in modo che la CPU possa agire di conseguenza.

2.5 Metodi di Query sullo Stato dell'I/O

Assumiamo che la CPU abbia ordinato l'esecuzione di un'istruzione ad una periferica. Come fa la CPU a sapere quando la periferica ha terminato l'operazione in questione?

<i>CMD</i>
<i>PARAMS</i>
<i>BUSY</i>
<i>IDLE</i>
<i>READY</i>

Presentiamo le due principali metodologie:

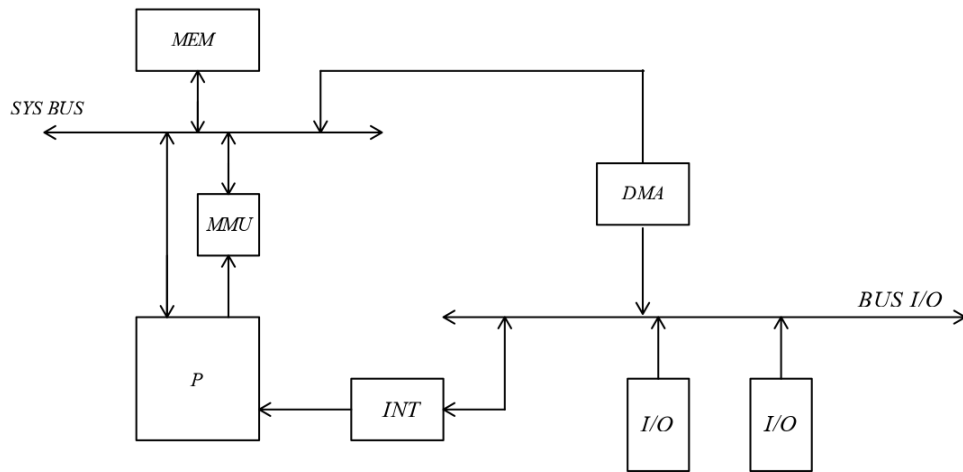
1. **Programmed I/O:** Metodologia sincrona, la CPU effettua continue richieste alla periferica (nello specifico al campo *ready* del suo buffer) per capire se l'operazione è conclusa. Elenchiamo nello specifico le fasi della CPU:
 - (a) Controlla se la periferica è in *idle*. Se lo è, assegna l'operazione (passando *cmd* e *params*).
 - (b) Controlla attivamente lo stato *ready* della periferica in questione.
 - (c) Quando la periferica ha finito, acquisisce il risultato.

Polling E' possibile modificare questa attesa attiva grazie al fenomeno del polling, ossia una **frequenza** di **richiesta** al campo *ready* del buffer della periferica. Questa frequenza va settata con cura, dato che richieste troppo frequenti si avvicinerebbero all'attesa attiva, mentre richieste poco frequenti causerebbero poca reattività. Questa metodologia causa quindi un rallentamento della CPU dato che si effettuerebbero molte operazioni inutili, ma si cerca di evitare la piena attesa attiva.

2. **Interrupt Driven I/O:** Metodologia asincrona, la CPU carica l'istruzione alla periferica e attende non attivamente un segnale di terminazione da parte della periferica stessa. Illustriamo per step:
 - (a) CPU legge l'*idle* della periferica, se trova 1 carica *cmd* e *params*.
 - (b) CPU riprende il suo ciclo standard, controllando ad ogni ciclo di clock se sono presenti segnali d'interruzione.
 - (c) Se dovessero incorrere delle interruzioni, la CPU salverebbe il corrente stato dell'operazione e analizzerebbe l'interruzione data.

Questa metodologia ci permette di evitare il calcolo di un **polling** ottimale dato che sarà la periferica stessa a notificare il completamento dell'operazione grazie all'unità delle **interruzioni**.

System Bus Notiamo che dopo le ultime modifiche è necessario che la memoria non sia collegata solo al processore. Di conseguenza viene posizionato un nuovo bus che permetta l'interazione diretta tra memoria e device esterni.



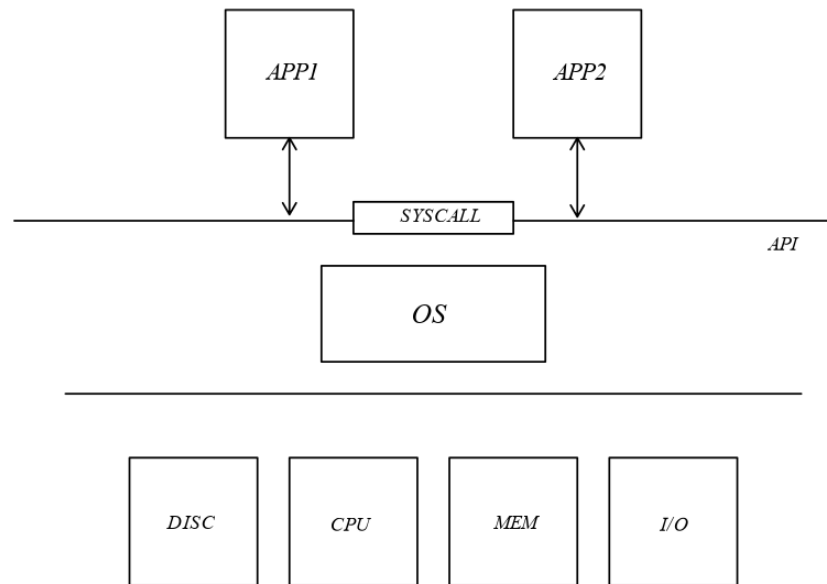
Il modulo *Direct Memory Access* (**DMA**) permette l'interazione stabilita prima.

Priorità tra i due Bus E' necessario stabilire a quale **bus** dare **priorità**. Sappiamo che le operazioni sui dispositivi di I/O sono molto più lente delle operazioni del processore, ma se ricevessimo un segnale d'interruzione risulterebbe molto probabile che il buffer del device che ha inviato l'interruzione è pieno. Di conseguenza, per prevenire perdite di dati dei buffer, si preferisce dare priorità al bus I/O.

DMA e Coerenza Cache La coesistenza di **cache**, **buffer I/O** e **memoria** principale causata dal **DMA** può causare forte inconsistenza. Conosciamo infatti i meccanismi che permettono di tenere coerenti le linee di cache e le informazioni in memoria principale. In presenza del **DMA** si preferisce invalidare la cache, per evitare a monte di avere problemi con i meccanismi di coerenza citati prima.

3 Introduzione ai Sistemi Operativi

Il sistema operativo è il software fondamentale per un calcolatore. Solitamente scritto in un linguaggio ad "alto" livello (es. C), si occupa della gestione del calcolatore (processi, I/O, memoria).



Astrazioni del Sistema Operativo Uno degli obiettivi del'OS è quello di rendere questi tre tipi di astrazione all'user:

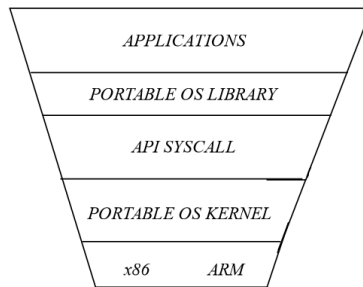
1. **Illusionist:** Il sistema operativo permette di immaginare spazi di memoria allocati in maniera contigua. Questo è più un concetto **logico** che fisico, infatti sarà lo stesso **OS** ad occuparsene a basso livello, astraendo l'user dalla gestione fisica della memoria.
2. **Referee:** Il sistema operativo deve gestire le risorse condivise ed il settaggio delle proprietà di ciascun utente.
3. **Glue:** Il sistema operativo mette a disposizione le librerie e le utilities necessarie alla coesistenza di CPU, memoria e disco.

Proprietà Garantite dal Sistema Operativo Per costruire l'astrazione, il sistema operativo deve garantire specifiche proprietà:

1. **Affidabilità**
 - (a) Disponibilità
2. **Sicurezza**
3. **Portabilità**

4. Performance

- (a) Latenza
- (b) Throughput (Tasso di produzione per unità di tempo)
- (c) Overhead (Quanto lavoro aggiuntivo necessario alla resa dell'astrazione)
- (d) Fairness (In presenza di più utenti, questi devono avere stesse possibilità di utilizzo delle risorse)
- (e) Predictability (Possibilità di prevedere sommariamente il comportamento del sistema operativo in base al contesto)



3.1 Struttura Kernel - Monolitica vs a Micro Kernel

Esistono diversi modi per organizzare il nucleo di un sistema operativo, illustriamo le due metodologie agli antipodi:

1. **Kernel Monolitico:** Tutto ciò che è a disposizione dell'OS è nel suo kernel, di conseguenza ogni modifica o aggiunta di funzionalità integrate comporta l'estensione del kernel stesso.
2. **Micro Kernel:** L'effettivo kernel contiene solo pochissime funzionalità (come lo scheduling di attività o l'acquisizione dell'I/O), il resto delle attività vengono integrate come veri e propri processi.

3.2 Computazioni nel Tempo - (Batch, Spool, Time Sharing)

Elenchiamo tre metodologie di gestione delle elaborazioni nei primi calcolatori:

1. **Sistema Batch:** Assumiamo di avere una lista di *jobs* da elaborare.

$$Batch = \{job_1, job_2, job_3\}$$

Ognuno di questi *job* si compone di parte CPU e parte I/O. Il sistema Batch è il più semplice, infatti eseguirà in maniera sequenziale i lavori.

2. **Spool:** Con lo *spool* si tenta di riempire i "vuoti" di elaborazione durante operazioni di I/O con calcoli con CPU del *job* successivo che non risulti in nessun modo dipendente da quello prima.

3. **Time Sharing:** La CPU eseguirà frazioni alternate di ogni *job* in coda. Quando viene richiesto dell'I/O da un *job* questo non sarà più contato in questa operazione di interleaving.

3.3 Protezione del Calcolatore

Il sistema operativo deve occuparsi anche di meccanismi di **protezione** del calcolatore. Nello specifico, con protezione intendiamo dei meccanismi per cui ogni operazione sia legata a relativi **diritti** e **permessi**.

3.3.1 Dual Mode - User/System

Esistono vari ruoli in base al sistema operativo utilizzato che permettono o meno di eseguire determinate istruzioni. Mostriamo uno schema semplice basato su due ruoli, ossia **User** e **System**:

1. **User Mode:** L'user avrà **meno privilegi**, di conseguenza potrà eseguire meno istruzioni. Spesso l'user avrà modo di utilizzare funzioni "più ad alto livello" come ad esempio una *fread* oppure una *syscall*, senza avere accesso direttamente alla routine di esecuzione effettuata dal sistema.
2. **System Mode:** Il System avrà **più privilegi**, di conseguenza ha il permesso di eseguire più istruzioni. Una particolarità del "ruolo" System è quello di poter eseguire le routine invocate dalle *syscalls* degli user. Per questo l'invocazione di *syscall* causa uno switch di modalità, per fare in modo che la sua routine possa essere eseguita dal lato system.

3.3.2 Meccanismi Necessari alla Gestione del Dual Mode

Per garantire una dual mode consistente l'OS deve prima fornire questi meccanismi:

1. **Istruzioni Privilegiate:** Operazioni non eseguibili dall'user, sarà la *CPSW* ad indicare se sarò o meno user. Degli esempi di istruzioni privilegiate:
 - (a) Disabilitare le interruzioni.
 - (b) Scrivere manualmente nella *CPSW*.
 - (c) Scrivere manualmente nel *timer*.

2. **Limitazione sugli Indirizzi di Memoria:** Si limitano gli indirizzi di memoria accessibili dall'user, rendendo visibile all'user solo una memoria virtuale che mappa su quella reale secondo degli schemi specifici, come ad esempio il *Base & Bound*.

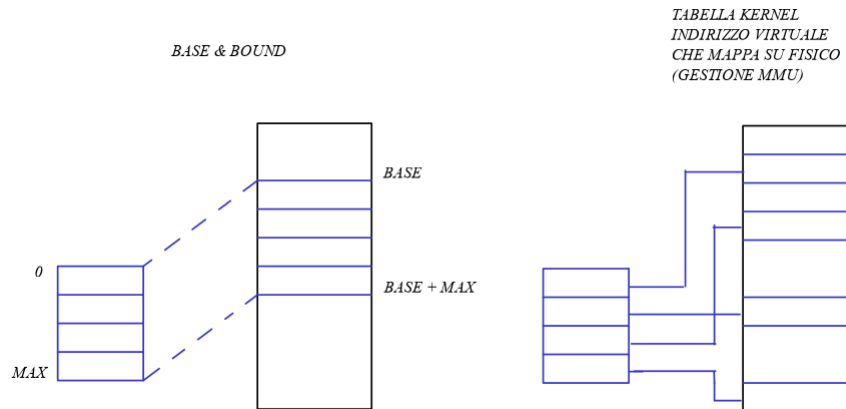


Figure 1: Due esempi di limitazione e mapping di memoria virtuale su quella fisica.

3. **Timer:** Si definisce un modo per gestire interruzioni in caso di **overtime**, se un processo dovesse infatti "bloccarsi" avremmo un modo per gestire in maniera semiautomatica il suo overtime, interrompendolo nel caso in cui sia trascorso troppo tempo.
4. **Safe Ways per Switch Mode:** L'OS deve anche garantire metodologie **sicure** per lo **swap** tra le modalità user e system. In **ARM** una di queste metodologie è la **SVC** (supervisor call), che funziona esattamente come una chiamata di funzione, ossia si aspetta i parametri nei registri $R_0, R_1, R_2 \dots$ e nello specifico in R_7 si aspetta il codice della *syscall* che si sta effettuando.

- (a) **Esempio di una read:** Vediamo un esempio di syscall, ossia a cosa corrisponde effettuare una read:

```
read(file_desc, buff, len)
```

```
1      MOV R0, "file_desc"
2      MOV R1, "buff"
3      MOV R2, "len"
4      MOV R7, "#CODICE_READ"
5      SVC 0
```

Stiamo descrivendo in "pseudo ARM" le operazioni effettuate dall'invocazione della read, ossia una comune *syscall*.

In vari casi si effettuano degli **switch mode**, ad esempio **da user a supervisor** in casi come *syscall*, *interruzioni* o *eccezioni*, mentre **da supervisor a user** in return dalle operazioni elencate prima, in *creazioni di processi* e in *upcall* (ossia se scatta il timer esegui una specifica operazione).

3.4 Descrizione di un Processo

Immaginiamo un processo che "nasce" da queste fasi:

1. Un **programma** (codice sorgente) viene compilato.
2. La **compilazione** produce un **eseguibile**.
3. L'**eseguibile** viene lanciato, creando un **processo**.
 - (a) Verrà allocata della memoria durante il lancio dell'eseguibile, necessaria al corretto funzionamento del processo.
 - (b) Viene generato un **descrittore di processo** durante il lancio dell'eseguibile, per fare in modo che si possano mantenere dei **metadati** riguardanti il processo stesso.

3.4.1 Thread e Processi

Assumendo che ogni **processo** abbia spazio d'indirizzamento indipendente dagli altri, possiamo descrivere le differenze con i **thread** che invece **condividono** tra loro memoria **dati** ed **istruzioni**. Dunque un processo sarà "composto" da più thread, che condivideranno lo spazio allocato per il processo "padre".

3.4.2 PCB - Process Control Block

Il **PCB** descrive un intero processo, portandosi dietro una serie di informazioni utili, elenchi-amole:

1. **PID**: ID del processo.
2. **Stato Processo**: Corrente stato del processo (*running, new, ready, wait, terminated*).
3. **Registri CPU**: Stato architetturale, ossia contenuto dei registri della CPU durante l'esecuzione del processo.
4. **Informazioni di Scheduling**: Priorità d'esecuzione assegnata al processo in questione.
5. **Puntatore ai Thread**: Puntatore a tutti i thread che compongono il processo.
6. **Informazioni su Memoria Allocata**: Informazioni sulla memoria allocata automaticamente che dovrà essere deallocata a tempo di terminazione del processo.
7. **Informazioni su Risorse Allocate**: Informazioni su tutta la memoria allocata a supporto del funzionamento del processo (ad esempio descrittori di file).

3.5 Descrizione Interruzioni

Descriviamo tutti i meccanismi a supporto del funzionamento delle interruzioni:

1. **Interrupt Vector:** La vera e propria interruzione sarà un semplice **codice** numerico. L'Interrupt vector mappa a quel codice l'effettiva routine da eseguire nel caso venga rilevata l'interruzione in questione. Possiamo dunque definirla come zona di memoria che dà contesto alle interruzioni in base al loro codice.
2. **Kernel Interrupt Stack:** Nel momento in cui l'OS si accorge di un interruzione ha la necessità di salvare il corrente stato architetturale⁴. Tutti questi dati corrispondono però a dati di **sistema** e non di **user**, di conseguenza non possono essere pushati sullo stack regolare ma devono essere riposti nel **kernel stack**. In questo modo sappiamo dove il sistema dovrà riacquisire i dati dopo la completa elaborazione dell'interruzione.
3. **Interrupt Masking:** Opzione di apertura/chiusura delle interruzioni, possiamo in questo modo disattivare la ricezione di interruzione durante specifiche fasi critiche.
4. **Swap Mode Atomico:** Meccanismo di swap mode safe.
5. **Ripartenza del Ciclo CPU Regolare:** Meccanismo di ripristino della routine standard del processore.

3.5.1 Handler di Interruzioni

Gli **Handler** sono gestori di interruzioni ed hanno l'obiettivo di eseguire tutte le fasi necessarie all'elaborazione completa di un interruzione. Possono essere visti come **kernel threads**, si fermano solo quando hanno terminato di elaborare l'interruzione e hanno lo scopo di effettuare queste fasi:

1. Salvare lo **stato** a tempo d'acquisizione dell'interruzione.
2. **Trattare l'evento** in base alla **specifica interruzione** ricevuta.
3. **Interagire** con lo schedulatore per dare **priorità** all'evento legato all'elaborazione dell'interruzione.

Dopo la sua esecuzione vanno restabiliti: **stato precedente**, **program stack**, **parola di stato** e **modalità utente**, ripristinando anche il funzionamento delle interruzioni.

Interruzioni in ARM In architettura **ARM** quando il processore coglie un interruzione a fine del suo ciclo standard, va nell'unità **INT**, che ha una "propria memory mapped I/O", ricavando così le informazioni sul chi e sul perchè sia stata sollevata l'interruzione in questione.

⁴Per stato architetturale s'intende il corrente contenuto dei registri.

3.6 Esempi d'Implementazione su Architettura ARM

Mostriamo come meccanismi generici dei sistemi operativi vengano implementati su ARM.

3.6.1 CPSR ed Interrupt Masking

Nel registro **CPSR** (Current Program Status Register) sono presenti delle informazioni riguardanti le interruzioni, infatti:

1. **Bit I (Interrupt)**: Questo bit, solitamente settato a 0 può essere cambiato in 1 effettuando così un mask. Questo ci permetterebbe temporaneamente di ignorare tutte le interruzioni.
2. **Bit F (Fast Interrupt)**: Funziona allo stesso modo, a differenza del normale Interrupt il Fast Interrupt salva parte dello stato architetturale automaticamente in specifici registri ombra.

Un bit tra quelli del **CPSR** è dedicato anche al **Thumb Arm**, settando ad 1 la **flag** si ha infatti la possibilità di **switchare** in direzione di ARM su istruzioni di dimensione dimezzata.

3.6.2 Modalità di Esecuzione

In ARM esistono **diverse** modalità di esecuzione, elenchiamole:

MODE	CODICE NELLA CPSR
User	10000
Supervisor	10011
Abort	10111
Undefined (Reserved)	11011
Interrupt	10010
Fast Interrupt	10001

Nello specifico queste modalità avranno un vettore con locazioni contenenti ciascuna la routine da eseguire in caso di switch di modalità.

Reset
Undefined
Supervisor Call
Prefetch Abort
Data Abort
Reserved
Interruption
Fast Interruption

In questo vettore **non saranno presenti** i puntatori alle routine delle modalità, infatti saranno presenti **direttamente** le routine da eseguire sottoforma di istruzioni ASM.

Fasi di Swap Mode Descriviamo in dettagli tutti i passi necessari ad uno scambio di modalità:

1. In **Banked LR** salvo in corrente **PC**.
2. In **SPSR** (Banked CPSR) salvo la corrente **CPSR**.
3. Cambio i 5 bit che definivano la mia corrente proprietà nella **CPSR**.
4. Cambio **Reg** in **Reg Banked**.
5. Disabilito le **Interrupt**.
6. In **PC** metto il codice del **mode** verso cui voglio switchare

Ognuna di queste fasi viene eseguita in maniera **atomica** per mantenere consistenza.

3.6.3 Banked Registers

In ARM alcuni registri si definiscono **banked** perchè preservati in maniera automatica, anche durante lo swap di modalità.

1. **Int, SVC, Abort, Undefined**: Queste quattro modalità hanno come banked registers *SP* ed *LR*.
2. **Fast Int**: Ha come banked registers *R8 – R12, SP* ed *LR*.

3.7 System Calls

Definiamo le **SYSCALLS**, ossia una sorta di chiamata di procedura ma in direzione del sistema operativo, **caratterizzata** da uno **swap di modalità** durante la sua esecuzione.

Il flusso di una syscall è così definito (esempio su architettura ARM):

1. L'**User** effettua la chiamata al sistema.
2. Si **switcha** verso l'**SVC**.
3. Si **settano** i **parametri** forniti dall'**user** in maniera tale da renderli **leggibili** anche in **modalità system** (scambi con i banked registers oppure effettuando delle pop dal kernel stack).
4. Si chiama la **routine della syscall** indirizzandosi sulla tabella che contiene le routine stesse grazie al **codice assegnato** alla corrente syscall.

Queste operazioni, dallo switch di modalità in poi, sono eseguite dal **Call Handler**.

Mostriamo nel successivo sottocapitolo un esempio di implementazione in ASM ARM v7 di Call Handler.

3.7.1 Call Handler in ASM ARM v7

Mostriamo una possibile implementazione di **Call Handler** commentandola successivamente.

```
1    STMFD SP!, {R0-R12,LR}
2    ADR R8, BASE_SYS_CALL_TABLE
3    @CHECK
4    LDR PC, [R8,R7,LSL #2]
5    LDMFD SP!, {@PARAMETRI PREC.}
6    MOVS PC, LR
```

1. Store multipla dei registri e del link register per **salvare** lo stato **architetturale corrente**.
2. Si mette in *r8* la *BASE_SYS_CALL_TABLE* (base della tabella delle syscalls) grazie all'istruzione *ADR*.
3. Si cambia il *PC* grazie ad una load nella **tabella delle syscall** con **base** d'indirizzamento in *R8* e con il **codice di syscall** in *R7*, ricordando di star lavorando su indirizzi che vanno di quattro in quattro (caratteristica dell'ARM v7).
4. **Restore** dello **stato architetturale** pre-call.
5. Si **ristabilisce** il vecchio **Program Counter** per **ritornare** a chi ha invocato la syscall.

3.8 Upcalls - Segnali

In user mode abbiamo la possibilità di registrare un **handler** che verrà invocato dal **kernel** a tempo dell'occorrenza di uno specifico **evento**. Il concetto di **up** deriva dal fatto che sto definendo qualcosa a livello **user** che verrà eseguito dal **kernel** quando necessario. Elenchiamo altre caratteristiche vantaggiose delle upcalls:

1. Gestiscono lo stack **user-space** in **maniera distaccata** dal resto delle informazioni.
2. Hanno meccanismi di **auto salvataggio** dei **registri**.
3. Permettono il **masking** degli **altri segnali** durante l'esecuzione di un handler.

3.9 Kernel Boot

Descriviamo cosa accade all'accensione di un calcolatore:

1. La **CPU** accede ad una locazione di una memoria ROM/EEPROM facendo in modo che il **BIOS** possa caricare il *first stage bootloader*.
2. Questa **prima forma di bootloader** inizializza il controllo della memoria, qualche dispositivo di I/O e **carica** il *second stage bootloader*.

3. Questa **seconda forma** di **bootloader** si occupa del caricamento del **kernel** del sistema operativo e della **root** del file system, lasciando infine il controllo al kernel.

3.10 Sommario Specifiche Hardware Necessarie all'OS

Possiamo dunque riassumere tutti i minimi meccanismi necessari alla composizione di un sistema operativo consistente:

1. **Livelli di Privilegio:** E' necessaria l'esistenza di **almeno** due livelli di privilegio (user/system) anche se abbiamo visto che in ARM ne sono presenti diversi (SVC, Abort, User, Interrupt...)
2. **Istruzioni Privilegiate:** Istruzioni eseguibili **solo se non** siamo in **modalità user** per garantire sicurezza.
3. **Traduzione Indirizzi Memoria:** Meccanismo di map di **indirizzi virtuali** disponibili a reali **indirizzi** di memoria **fisici**.
4. **Eccezioni:** Routine eseguite in caso di **violazione di privilegi**.
5. **Interruzioni:** Meccanismo di interruzioni che permetta la **comunicazione** tra **device** e **CPU**.
6. **Mask di Interruzioni:** Meccanismo che ci permetta di disattivare le interruzioni in fasi critiche.
7. **Syscalls:** Interfaccia tra **utente** e **macchina** tramite invocazione di operazioni "standard", dunque possibilità di esecuzione di azioni privilegiate da un programma user.
8. **Boot:** Routine di avvio della macchina.
9. **Operazioni Atomiche su Memoria:** Operazioni in memoria il cui utilizzo **garantisce consistenza** anche in contesti multithread.
10. **Virtualizzazione:** Gestione di **hypervisors** che permettano di creare **diversi ambienti virtuali** anche sulla stessa macchina fisica.

4 Interfaccia di Programmazione di Applicazioni di un OS

Un sistema operativo deve fornire un interfaccia che permetta di:

1. Creare **processi** e gestirli.
2. Gestire l'**I/O** fornendo operazioni di apertura, chiusura, scrittura e lettura.
3. Gestire la **comunicazione** tra **processi** (IPC).

In questo capitolo descriveremo quindi la gestione di questi meccanismi fondamentali che dei sistemi operativi devono offrire.

4.1 Gestione Processi - (Fork, Exec, Wait, Sleep, Exit)

I processi vengono creati e differenziati grazie a due specifiche **syscalls**:

1. **Fork**: Crea un processo clone al padre che sta effettuando la chiamata alla fork. Si effettua una **copia** on demand del primo PCB (Process Control Block). Non viene dunque copiato tutto il blocco descrittore del padre a priori, ma verrà utilizzato come riferimento nel caso in cui sia necessario. Si genera dunque un nuovo **PID**, ossia id del processo. Non è assicurato che la syscall sia un successo, di conseguenza se qualcosa dovesse far fallire la syscall verrebbe inserito -1 in *errno*.

```
1  pid_t pid = fork(); // Valore > 0 se padre, == 0 se figlio, -1 se
   fallisce, in modo da distinguere facilmente i processi
2  if (pid > 0) {
3      printf("Sono il padre");
4  } else if (pid == 0) {
5      printf("Sono il figlio");
6  } else {
7      perror("fork failed");}
8
```

2. **Exec**: Differenzia il codice presente nel **PCB** di riferimento. In questo modo il processo figlio avrà modo di eseguire istruzioni diverse dal padre. Esistono due tipi di exec, la **exec list** (**l**) ed **exec vector** (**v**) in base a come si aspettano i parametri che gli stiamo fornendo. Elenchiamo tutte le caratteristiche di questa syscall:

Passi effettuati da una Exec

- (a) **Rimpiazzamento** del **codice** del **padre** nel PCB corrente.
- (b) Se ha successo, non ritorna.
- (c) **Mantiene PID e PCB** assegnati durante la fork.
- (d) **Resetta** segnali (**upcalls**) pendenti.
- (e) Mantiene le risorse assegnate.

3. **Wait:** Se un processo padre, dopo averlo creato volesse l'esito del figlio allora dovrebbe effettuare l'operazione di **wait (attesa)** su quest'ultimo. Se un processo padre effettuasse la exit prima della terminazione del figlio allora quest'ultimo si definirebbe **processo zombie**. Il **sistema operativo** ha però la responsabilità di occuparsi anche di questi casi limite, infatti assegnerà al processo zombie un nuovo processo padre, ossia *init*, che dovrà occuparsi della **deallocazione** delle **risorse** utilizzate per la descrizione del processo figlio.
4. **Sleep:** Questa syscall permette allo scheduler di effettuare degli **swap** tra processi eseguiti in maniera "esplicita". Ricordiamo che infatti lo scheduler non è un vero e proprio componente ma più un automa che ha una quantità di stati a disposizione ed effettua transizioni tra stati in base agli input forniti. Se infatti un *processo1* dovesse invocare la *sleep* allora verrebbe **rischedulato** un **processo pronto** all'esecuzione.
5. **Exit:** Se un processo figlio chiama la exit, quest'ultimo termina chiudendo tutte le risorse ad esso allocate, e viene salvato un codice di uscita passato ad exit come argomento. Il processo figlio sarà zombie fino a quando il processo padre non acquisirà il codice dato in argomento dalla exit e salvato dal kernel. L'acquisizione da parte del padre di questo codice è effettuata con una *wait* oppure una *waiidpid*.

4.2 Comunicazioni tra Processi - (Pipe)

A differenza dei thread che hanno la possibilità di condividere memoria e dunque di comunicare tramite essa, i **processi** hanno **spazi d'indirizzamento dedicati**. Di conseguenza risulta necessario definire dei meccanismi che permettano a due (o più) processi di **comunicare** tra loro. In Unix questo viene gestito in maniera "regolare" grazie alla gestione di ogni cosa come se fosse un file. Questo ci permette di aprire "file speciali" con specifici **descriptori** di file in lettura e scrittura che gestiscono la comunicazione tra processi. Nello specifico in Unix questa gestione "a file" (ossia gestione dell'I/O) segue questi specifici principi:

1. **Tutto** è visto come un **file**.
2. Si segue un principio di **uniformità**, basando ogni operazione di I/O su open, read, write e close.
3. Tutto il sistema è detto **Orientato al Byte**, ossia si stabilisce un'interpretazione al byte delle informazioni lette.
4. Le read/write saranno **Kernel Buffered**, sarà dunque il kernel ad occuparsi del buffer utilizzato durante queste syscalls.
5. Alla fine va effettuata sempre una **close**, che permette il **flush** delle operazioni eseguite.

Ma perchè questo nel capitolo dedicato alla comunicazione interprocesso? Perchè in qualche modo anche questa in Unix è gestita ad apertura e chiusura di file e relativi descriptori in lettura/scrittura. Elenchiamo le caratteristiche nella pagina successiva.

Descrittori in Lettura/Scrittura e Chiusura Duale Ogni "file di comunicazione" aperto avrà queste caratteristiche:

1. **Buffer in Lettura:** Buffer che permette la lettura in un solo verso tra due processi.
2. **Buffer in Scrittura:** Buffer che permette la scrittura in un solo verso tra due processi.
3. **Chiusura Duale:** Fino a quando sarà possibile scrivere in un buffer sarà vietata la sua chiusura

Mostriamo pseudocodice C dell'utilizzo della syscall pipe e dei buffer che genera:

```
1  int fd[2]; // fd[0] parte lettura, fd[1] parte scrittura
2  if (pipe(fd) == -1) { // Creazione della pipe
3      perror("pipe failed");
4      exit(1);
5  }
6  /* Grazie alla gestione dei PID non scriveremo codice diverso
7  per ciascun processo, infatti eseguiremo istruzioni diverse in base al
   valore del PID */
8  pid = fork();
9  if (pid > 0) { // Processo padre
10     close(fd[0]); // Chiude il lato di lettura
11     write(fd[1], "Hello, child!", 14);
12     close(fd[1]); // Chiude il lato di scrittura
13 } else if (pid == 0) { // Processo figlio
14     close(fd[1]); // Chiude il lato di scrittura
15     read(fd[0], buffer, sizeof(buffer));
16     printf("Child received: %s\n", buffer);
17     close(fd[0]); // Chiude il lato di lettura
18 } else {
19     perror("fork failed");
20     exit(1);
21 }
```

Questo meccanismo di comunicazione è unidirezionale (padre scrive e figlio legge), di conseguenza se volessimo gestire la comunicazione in entrambi i versi risulterebbe necessario creare una pipe gestita in maniera speculare ma in verso opposto di comunicazione.

4.3 Gestione Threads

Uno degli obiettivi di un Sistema Operativo è quello di implementare l'MTAO (Multiple Things at Once) e di coordinare queste molteplici operazioni eseguite in contemporanea. Fino ad ora avevamo infatti visto solo dei processi, la cui struttura era indipendente e "monolitica", ciascuno aveva a disposizione il proprio spazio d'indirizzamento (testo, dati, stack, ...) ma risulterebbe comodo al sistema operativo avere anche unità più dinamiche e schedulabili in base alle necessità.

Definizione e Motivazioni di Utilizzo Threads Flusso di controllo schedulabile, ossia che può essere mandato in esecuzione. Può essere visto come una "parte" di programma che ha vita propria e che può essere mandata in esecuzione. Motivazioni:

1. **Strutturazione:** Un programma può essere visto come composizione di tanti moduli indipendenti ma che agiscono sulle stesse risorse.
2. **Reattività:** Dei calcolatori potrebbero avere la necessità di essere molto reattivi, l'utilizzo dei threads potrebbe ad esempio aiutare nel caso di polling su dispositivi I/O, fornendo così un approccio alternativo a quello tradizionale delle interruzioni.
3. **Multicore:** La gestione a moduli separati permette un reale utilizzo delle risorse offerte da architetture multicore.
4. **Performance:** La gestione parallela consistente permette il raggiungimento di ottime performance rispetto ad una esecuzione esclusivamente basata sull'interleaving.

Ogni processo può essere dunque composto da più thread i quali ereditano i diritti del processo che li "possiede".

User/Kernel Thread Un punto da analizzare è quello sulla visibilità del kernel sui threads. Un **User Thread** risulterebbe invisibile alla schedulazione reale del kernel, verrebbe dunque del tutto gestito dal processo che lo possiede. Questo va ad intaccare il concetto di "modularità" proprio perchè sarà impossibile per il kernel schedulare l'esecuzione di quel thread, potrà a massimo infatti mandare in esecuzione il processo che lo contiene. Per queste motivazioni si preferiscono attualmente strategie basate sui **Kernel Threads**, creano un po' più di overhead ma sono del tutto visibili dal kernel che avrà modo di schedularli.

Stato	Dov'è il TCB	Dove sono i Registri del Thread
INIT	?	TCB
READY	Lista Ready	TCB
RUN	Lista Exec	Registri Processore
WAIT	TCB(wait)	TCB
END	?	TCB

Ogni thread avrà dunque uno **stack privato**, il codice e l'heap **condivisi**, mentre le variabili dipenderanno dal modo in cui vengono dichiarate (se thread local o meno).

4.3.1 Schedulazione e Potenziale Inconsistenza

Dato che abbiamo definito i threads come flussi schedulabili che hanno accesso allo stesso spazio d'indirizzamento è necessario definire "formalmente" cosa significhi la parola schedulazione.

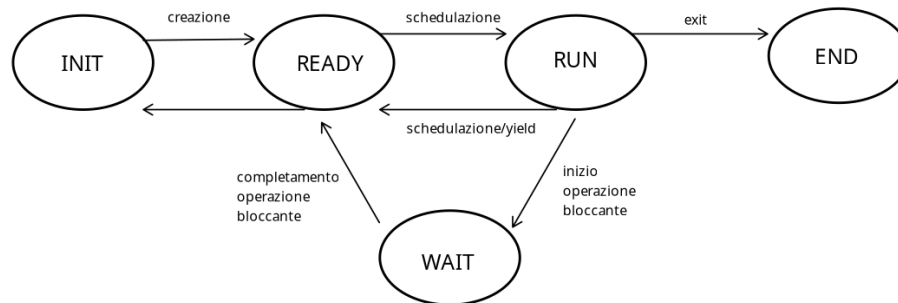


Figure 2: Automa della schedulazione.

Lo **schedulatore** non è un vero e proprio componente, ma più una reazione all'input rispetto allo stato in cui si trova un thread. E' quindi rappresentato meglio da una serie di routine da eseguire in specifici eventi che accadono. E' necessario dunque che il codice scritto sia adatto ad un contesto multithread, per fare in modo che sia corretto in ogni tipo di schedulazione. Risulta infatti impossibile prevedere in che ordine saranno schedulati i threads.

Thread Control Block (TCB) e Transizioni di Stato Le varie funzioni eseguibili provocheranno cambi di valori all'interno dei TCB, elenchiamo ad esempio alcune operazioni effettuate durante una `thrdCreate`:

1. Si crea il TCB del nuovo thread.
2. Si settano il program counter del thread e tutto il suo stato architetturale in modo tale che quest'ultimo possa eseguire il suo runnable⁵. In realtà il thread non esegue direttamente il runnable, ma una funzione wrapper detta **stub** che chiamerà il runnable, questo perchè è necessario coprire anche il caso in cui il runnable ritorni invece di effettuare una `thread_exit`. Senza questo passo in più il runnable ritornerebbe ad una qualsiasi posizione sul top dello stack. In questo modo invece il runnable ritornerà allo stub e questo eseguirà la `thread_exit`.
3. Si setta lo stato nel TCB a ready (schedulazione).
4. Si segnala a chi è in coda ready che l'esecuzione della create è finita.
5. Si ritorna.

⁵Runnable, in Java è la funzione eseguita da un thread, usato come sinonimo di "funzione del thread".

4.3.2 Yield/Interruzione di Thread

Definiamo i modi in cui i thread passano ad uno stato di WAIT grazie ad una deschedulazione.

1. **Yield:** Deschedulazione volontaria, gestita in modi diversi dal tipo di thread:
 - (a) **User Thread Yield:** Viene effettuata la deschedulazione volontaria seguendo questi passi:
 - i. Salvataggio **stato architetturale** nel TCB (nello specifico nell'area registri).
 - ii. Si effettua lo switch verso un nuovo thread, questo comporta un **passaggio** ad un **nuovo stack**, che tecnicamente corrisponde a **copiare** nei registri l'**area registri** contenuta nel TCB del thread che stiamo schedulando. Questa fase è definita come commutazione di contesto e comporta un costo in tempo per il calcolatore.
 - iii. Si effettua il return.
 - (b) **Kernel Thread Yield:** Viene effettuata la deschedulazione volontaria seguendo questi passi:
 - i. Si effettuano gli stessi passi di un User Level Thread tranne per il fatto che il return corrisponderà esattamente ad una modifica al program counter.
2. **Interrupt:** Assumiamo che un thread possa essere interrotto dall'I/O oppure da un timer, esistono due modalità di "risposta":
 - (a) **Modalità Semplice:** Si seguono questi step:
 - i. L'Interrupt Handler salva i registri nel Kernel Stack.
 - ii. Si effettua lo switch di thread.
 - iii. Dopo l'esecuzione si ripristinano i registri precedentemente pushati nel Kernel Stack.
 - (b) **Modalità Veloce:** Si seguono questi step:
 - i. L'Interrupt Handler salva i registri correnti nel relativo TCB del thread interrotto.
 - ii. L'Interrupt Handler carica i registri dal TCB del thread che vuole far partire.

In conclusione possiamo dunque affermare che la commutazione comporta un costo e che un approccio multithread è quello più adatto ad architetture multicore.

5 Sincronizzazioni

La gestione multithread del flusso di un programma complica la situazione, dato che risulta necessario garantire consistenza dei risultati qualsiasi sia la schedulazione dei thread in gioco. Elenchiamo dunque tutti i punti fondamentali della sincronizzazione e le problematiche che bisogna gestire:

1. **Race Condition:** Condizione nella quale l'output del programma risulta dipendente dalla velocità relativa e dai tempi dei threads. Questa è la classica condizione che causa inconsistenza in contesti multithread, dato che si otterranno risultati completamente diversi ciascuna esecuzione del programma, data la completa dipendenza dal tipo di schedulazione.
2. **Mutua Esclusione:** Definiamo delle sezioni critiche in cui solo un thread ha il permesso di operare. Spesso questo meccanismo è utilizzato durante operazioni su risorse condivise tra threads. Bisogna ricordare anche però che questa gestione causa un vero e proprio blocco delle esecuzioni in parallelo, di conseguenza risulta necessario operare in mutua esclusione solo su brevi operazioni necessarie.
3. **Lock:** Meccanismo che garantisce di operare in mutua esclusione. Le operazioni effettuate solitamente sono di lock/unlock.
4. **Correttezza:** Garanzia che l'esecuzione rimarrà consistente a prescindere dal tipo di schedulazione effettuata durante quella specifica esecuzione.
5. **Fairness:** Tutti i threads devono avere le stesse possibilità sull'utilizzo della CPU.
6. **Conclusione Programma:** Non devono esistere possibili condizioni di stallo e/o di starvation, condizione per cui non è presente un effettivo stallo ma un task non viene schedolato mai data una cattiva gestione delle priorità.

Analizziamo dunque tutti i tipi di **meccanismi di sincronizzazione** tra threads nelle pagine successive.

5.1 Spinlock

Meccanismo di attesa attiva sullo stato locked di un mutex. A differenza dei meccanismi che vedremo successivamente non cerca di deschedulare un thread per poi risvegliarlo successivamente, ma lo lascia attendere attivamente in modo tale che quando la risorsa sarà liberata quest'ultimo potrà accedervi. In specifici contesti questo approccio risulta più economico in termini di tempo dato che non comporta nessuna commutazione di contesto. Spesso questo è implementabile in maniera abbastanza semplice dato che diverse architetture offrono istruzioni specifiche che causano dei comportamenti corrispondenti ad una spinlock.

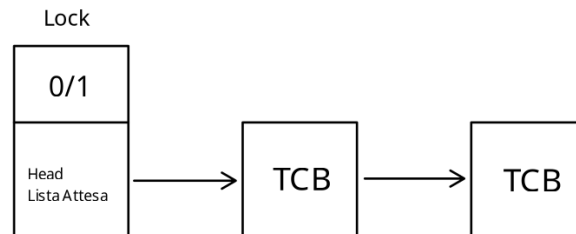
1	<code>EXCH r0, [r1, r2]</code>
---	--------------------------------

Semanticamente corrisponde a $MEM[r1 + r2] \rightleftharpoons r0$, settando dei valori di default di 0 chiuso ed 1 aperto se cicliamo su questa istruzione abbiamo implementato uno spinlock in ARM.

5.2 Lock

Il lock è un oggetto condiviso tra i vari thread, ciascuno di essi può effettuare due operazioni:

1. **Lock/Acquire:** Si attende che il lock sia aperto e lo si acquisisce.
2. **Unlock/Release:** Si apre il lock e si sbloccano potenziali threads in attesa.



Il release dunque se dovesse trovare almeno un elemento nella lista allora non setterebbe il lock a 0 ma lascerebbe il controllo direttamente al prossimo thread.

Proprietà Garantite dai Lock Utilizzando questo meccanismo riusciamo a garantire queste proprietà:

1. **Safety:** Viene eseguita una sola attività concorrente alla volta.
2. **Liveness:** Se il lock è aperto l'acquire lo prende, mentre se chi ha il lock effettua la release allora chi è in attesa ha priorità.

Possiamo dunque considerare che le "parentesi" create da lock/unlock rendono quella sezione critica di codice come se fosse atomica. Vengono dunque effettuati questi **passi** nel caso in cui il **lock** risulta **chiuso**:

1. Si registra il TCB del corrente thread nella coda di attesa del lock.
2. Si deschedula il thread modificando lo stato del thread da EXEC a WAIT.
3. Quando il lock si libera verrà schedato il thread modificando lo stato da READY a EXEC.

Regole di Utilizzo dei Lock Per una corretta esecuzione in mutua esclusione vanno seguite queste regole:

1. Il lock è sempre aperto a tempo di dichiarazione.
2. Sempre effettuare l'acquire prima della sezione critica.
3. Sempre effettuare la release dopo la fase critica.
4. Non bisogna effettuare accessi a variabili protette fuori da una sezione compresa tra un acquire ed un release.

5.3 Condition Variables

Questo nuovo costrutto ci permette aggiungere un "layer" alla sincronizzazione vista con i lock. Sarà infatti necessario combinare queste variabili all'utilizzo dei lock per costruire un'attesa condizionale basata su operazioni di **wait** e **signal**, elenchiamo tutto in dettaglio:

1. **Wait:** Il thread che la esegue rilascia il lock e si mette in attesa e in ascolto su una condition variable.
2. **Signal:** Il thread che la esegue notifica uno tra tutti i thread in attesa ed ascolto sulla condition variable.
3. **Broadcast:** Il thread che la esegue notifica tutti i thread in attesa ed ascolto sulla condition variable.

Potenziati Signal a Vuoto Dato che l'operazione di signal non richiede una specifica condizione per essere eseguita, allora non è garantito che l'operazione non venga eseguita inutilmente, a differenza dei semafori⁶.

Test per Wait effettuata con un While Risulta necessario porre l'operazione di wait in un while e non testando semplicemente con un if per queste motivazioni:

1. Il meccanismo di wait/signal può causare degli wakeup non attesi, la guardia del while riuscirebbe dunque a porre di nuovo in attesa il thread.
2. La semantica introdotta permetterebbe ad un altro thread concorrente l'acquisizione della risorsa. Per mantenere consistenza si preferisce quindi ritestare la condizione della wait.

Semantica Mesa/Hoare Esistono due semantiche diverse per la gestione delle condition variable:

1. **Mesa:** Assumendo di avere un numero k di threads in attesa e in ascolto su una specifica condition variable $cnd1$. Quando un thread $k + 1$ eseguirà ad esempio una signal, in questa semantica tutti i thread in attesa competono sull'acquisizione del lock. Questo comporta una semantica più semplice, il che la rende la più utilizzata. Nello specifico il thread che viene segnalato non va in stato di EXEC ma in READY, e da lì in poi dovrà competere ed essere effettivamente schedulato.
2. **Hoare:** La signal passa il lock a chi è stato segnalato, di conseguenza l'ordine di esecuzione diventa indipendente al tipo di schedulazione. Questo comporta una gestione più complessa. Il lock dopo il passaggio al thread segnalato andrebbe anche ritornato al thread "segnalante", questo solo per rendere minimamente l'idea della complessità generata da questa semantica.

⁶Subsubcapitolo successivo.

Punti Fondamentali Condition Variables Elenchiamo i punti fondamentali cercando di riassumere in funzionamento delle condition variables:

1. Le **operazioni** su **condition variable** vanno sempre effettuate in **fasi safe** dopo l'acquisizione del lock.
2. Le condition variables **non hanno uno stato interno**, di conseguenza non ho informazioni su se dei thread stiano facendo o meno attesa su una variabile di condizione.
3. La **wait** permette il **release atomico del lock**.
4. Un **thread oggetto** di una **signal non passa** necessariamente ad **uno stato di esecuzione**. Dopo una signal il suo campo riferito allo **stato** nel suo TCB passa a **READY**, da lì in poi il tutto dipenderà dallo schedatore (semantica Mesa).
5. L'operazione di wait va sempre fatta in un loop, sia in semantica Mesa sia in Hoare.

5.4 Semafori

Ulteriore meccanismo di sincronizzazione, nello specifico definiremo i **semafori contatori**⁷, ossia oggetti che oltre alla sincronizzazione riescono anche a conservare uno stato interno a differenza delle condition variables. Descriviamo la composizione di un semaforo:

1. **Contatore Intero**: Valore intero $N > 0$. Inizializzato al numero di wait effettuabili da parte di processi prima di essere bloccati, dunque nello specifico N corrisponde al numero di risorse condivise disponibili.
2. **Operazione di Wait - (P)**: Mostriamo la logica seguita in pseudocodice:

```
1  P(N):
2      if (N > 0):
3          N = N - 1
4          lascia il processo in run
5      else:
6          metti il processo in lista attesa
7
```

3. **Operazione di Signal - (V)**: Mostriamo anch'essa in pseudocodice:

```
1  V(N):
2      N = N + 1
3      if (almeno un processo in lista attesa):
4          sblocca il primo processo in lista attesa
5
```

Bisogna immaginare che il **contatore** N corrisponda al numero di **risorse condivise libere** a tempo di esecuzione di una wait oppure una sleep. In questo modo riusciamo a giustificare il perchè si effettuino dei **decrementi** durante delle **Wait (P)** e degli **incrementi** durante delle **Signal (V)**.

⁷Questo perchè se la variabile fosse binaria allora staremmo rappresentando veri e propri mutex.

5.5 Esempi di Implementazioni Lock/Unlock

Fino ad ora abbiamo assunto di avere a disposizione delle funzioni che permettessero di bloccare e sbloccare i mutex. Mostriamo e commentiamo delle specifiche implementazioni di queste operazioni:

Lock/Unlock in Uniprocessor Mostriamo l'implementazione delle funzioni lock/unlock su processori monorete:

```
1  // 01: Lock implementata
2  lock Acquire(){
3      disabilita interruzioni
4      if(chiuso){
5          listaAttesa.add(myTCB)
6          sospendi e riabilita interruzioni
7      } else {
8          chiudo il lock
9      }
10     abilita interruzioni
11 }
12
13 // 02: Unlock implementata
14 lock Release(){
15     disabilita interruzioni
16     if(esiste TCB in listaAttesa){
17         TCB = rimuovi da listaAttesa
18         TCB.stato = READY
19     }
20     else {
21         apro il lock
22     }
23     abilita interruzioni
24 }
```

Multiprocessor, Istruzioni Speciali e Implementazione Spinlock Per permettere istruzioni di load e store esclusive l'ARM rende disponibile due specifiche istruzioni

LDREX, *STREX* che rispettivamente leggono e bloccano, caricano e sbloccano.

Oltre a questo, per garantire una base all'implementazione delle lock in Multiprocessor è necessario prima definire l'implementazione delle Spinlock:

```
1  spinlock Acquire(){
2      while(test_and_set(value) == BUSY) {}
3  }
4
5  spinlock Release(){
6      value = FREE;
7      memory_barrier(); //istruzione speciale che permette il "commit"
                           delle modifiche sulla memoria
8  }
```

Lock/Unlock in Multiprocessor Mostriamo l'implementazione delle funzioni lock/unlock su processori multicore:

```
1  // 01: Lock implementata
2  lock Acquire(){
3      disabilita interruzioni
4      spinlock Acquire(&spl)
5      if(value == BUSY){
6          TCB -> listaAttesa
7          invocazione schedulatore
8      } else {
9          value = BUSY
10         spinlock Release(&spl)
11     }
12     abilita interruzioni
13 }
14
15 // 02: Unlock implementata
16 lock Release(){
17     disabilita interruzioni
18     spinlock Acquire(&spl)
19     if(!wait.empty()){
20         TCB = remove(listaAttesa)
21         schedulatore(TCB -> READY)
22     } else {
23         value = FREE
24     }
25     abilita interruzioni
26 }
```

Notiamo come sia stato necessario basarsi sull'implementazione delle spinlock per la creazione dei lock. Il corpo del lock e dell'unlock dunque è reso "atomico" grazie all'utilizzo di spinlock. Allo stesso modo, anche nelle implementazioni delle operazioni P e V dei semafori, verranno invocati dei acquire/release su spinlock.

Implementazione Semafori Mostriamo l'implementazione delle funzioni P/V su processori multicore:

```
1  // 01: P(sem) implementata
2  P(sem){
3      disabilita interruzioni
4      spinlock Acquire(&spl)
5      if(sem.value == 0){
6          TCB -> lista attesa semaforo
7          sospendi(&spl)
8      } else {
9          sem.value--
10         spinlock Release(&spl)
11     }
12     abilita interruzioni
13 }
14
15 // 02: V(sem) implementata
16 V(sem){
17     disabilita interruzioni
18     spinlock Acquire(&spl)
19     if(lista di attesa non vuota){
20         TCB <- remove(lista di attesa)
21         schedulatore(TCB -> READY)
22     } else {
23         sem.value++
24     }
25     spinlock Release(&spl)
26     abilita interruzioni
27 }
```

5.5.1 Monitor e Sincronizzazioni Multi Object

Dei **monitor** sono oggetti che offrono funzioni che operano di **default** in mutua esclusione. Ne è un esempio il Java, che fornisce molti oggetti che di default dispongono metodi detti **synchronized**, ossia operanti in mutua esclusione, astruendo dall'utilizzo manuale di costrutti come i mutex.

Sincronizzazioni Multi Object Possiamo definire formalmente quali siano le caratteristiche e i problemi dell'orchestrazione della programmazione concorrente.

1. **Stallo e Correttezza:** Bisogna sempre verificare tutte le possibili schedulazioni di un programma, garantendone la correttezza. In ogni caso, in occorrenza di stalli, si assumono politiche di gestione e cura di stalli.
2. **Performance:** Abbiamo avuto modo di analizzare tutte le complicazioni causate dalla computazione parallela, risulterebbe molto più semplice operare solo in interleaving. Ma una gestione concorrente consistente può portare grandi benefici alle performance del programma.

3. **Definizioni:** Necessario menzionare anche questi aspetti:

- (a) **Tipi di Risorse:** Riutilizzabilità di una risorsa.
 - i. **Prentable:** Il Sistema Operativo potrebbe chiedermi indietro la risorsa.
 - ii. **Imprentable:** Il Sistema Operativo non può chiedermi indietro la risorsa.
- (b) **Deadlock:** Condizione di stallo.
- (c) **Starvation:** Non propriamente una condizione di stallo ma di cattiva gestione di priorità nella schedulazione che causa l'esecuzione poco frequente di uno specifico thread.

5.6 Schema Lettore/Scrittore

Immaginiamo di voler impostare uno schema di lettori e scrittori che rispettivamente leggano e scrivano riferendosi allo stesso buffer. Possiamo impostare questo schema in **tre** modi diversi:

1. Approccio **default** in **mutua esclusione**:

```
1 // --- Processo Lettore
2 while(true){
3     start Read() //lock del mutex
4     // corpo
5     end Read() //unlock del mutex
6 }
7
8 // --- Processo Scrittore
9 while(true){
10    start Write() //lock del mutex
11    // aggiorna i dati scrivendo
12    end Write() //unlock del mutex
13 }
14
```

Questo metodo applicato a questo schema non ha molto senso dato che vogliamo che gli scrittori siano in mutua esclusione ma non i lettori. Vanno quindi gestiti questi ultimi in un modo specifico.

2. Approccio **Active/Waiting** Readers/Writers: Utilizziamo 1 mutex e 2 condition variables (*ReadGo*, *WriteGo*), che rispettivamente sospendono la lettura e la scrittura.

```
1      // --- Funzioni dedicate alla Read
2      start Read(){
3          mutex.acquire()
4          waitingReaders++
5          while(activeWriters > 0){ //PUNTO FONDAMENTALE
6              readGo.wait(&mutex)
7          }
8          waitingReaders--
9          activeReaders++
10         mutex.release()
11     }
12
13     done Read(){
14         mutex.acquire()
15         activeReaders--
16         if(activeReaders == 0 && waitingWriters > 0)
17             writeGo.signal()
18         mutex.release()
19     }
20
21     // --- Funzioni dedicate alla Write
22     start Write(){
23         mutex.acquire()
24         waitingWriters++
25         while(activeReaders > 0 || activeWriters > 0){
26             waitGo.wait(&mutex)
27         }
28         waitingWriters--
29         activeWriters++
30         mutex.release()
31     }
32
33     done Write(){
34         mutex.acquire()
35         activeWriters--
36         if(waitingReaders > 0){
37             readGo.broadcast()
38         } else {
39             readGo.signal()
40         }
41         mutex.release()
42     }
43
44
```

Questa implementazione presenta un problema di **potenziale starvation** sui lettori. Perché? Nella guardia del while dello *start Read* se non è presente nessuno scrittore attivo allora si effettua lo start della read. Il problema è che **nulla vieta** ad uno scrittore di **variare** il **numero** di **scrittori** attivi nel momento in cui un lettore dovrebbe entrare in esecuzione. Di conseguenza verrebbe rieffettuato il controllo che **causerebbe** nuovamente una **sleep** del thread **lettore**.

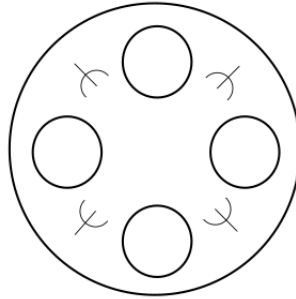
3. Approccio **Fair** con **Ordinamento**: In questo approccio si sceglie di imporre un ordinamento in modo tale da far attendere che le operazioni di lettura siano finite prima di iniziare una nuova di scrittura. Nello specifico utilizzeremo 2 mutex (*ordering*, *mutex*) e 2 condition variables (*readGo*, *writeGo*). Mostriamo l'implementazione:

```
1      // --- Funzioni dedicate alla Read
2      Start Read(){
3          ordering.acquire()
4          mutex.acquire()
5          while(activeWriters > 0)
6              go.wait(&mutex)
7          activeReaders++
8          ordering.release()
9          mutex.release()
10     }
11
12     Done Read(){
13         mutex.acquire()
14         activeReaders--
15         if(activeReaders == 0)
16             go.signal()
17         mutex.release()
18     }
19
20     // --- Funzioni dedicate alla Write
21     Start Write(){
22         ordering.acquire()
23         mutex.acquire()
24         while(activeReaders > 0 || activeWriters > 0)
25             go.wait(&mutex) //PUNTO FONDAMENTALE
26         activeWriters++
27         ordering.release()
28         mutex.release()
29     }
30
31     Done Write(){
32         mutex.acquire()
33         activeWriters--
34         go.signal()
35         mutex.release()
36     }
37
38
```

Nel punto evidenziato come importante nel corpo del while nella start write notiamo che lo scrittore va in sleep lasciando solo *mutex* e non *ordering*. Questo causerà un attesa che porrà appunto ordine fino al rilascio di *ordering* da parte dello scrittore.

5.7 Problema dei Filosofi a Cena e Condizioni di Stallo

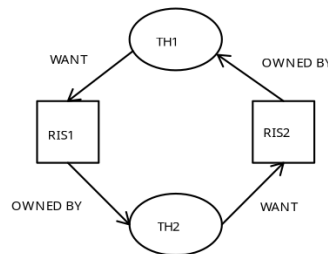
Il problema dei filosofi a cena si basa su un numero k di filosofi i quali hanno bisogno di 2 forchette per mangiare. Se ognuno acquisisse una forchetta (ad esempio quella sulla sinistra) allora all'acquisizione della forchetta destra si creerebbe uno stallo, questo perchè la forchetta sarebbe già stata presa dal filosofo accanto.



Questo esempio ci permette di elencare tutte le condizioni necessarie affinché si crei uno stallo:

1. **Risorse limitate:** Una quantità infinita di risorse fornirebbe infatti la garanzia sull'assenza di stalli.
2. **No Preemption:** Risorse assegnate non possono essere riassegnate.
3. **Wait While Holding:** Nessuno lascia la propria risorsa, anche se è in fase di stallo.
4. **Attesa Circolare.**

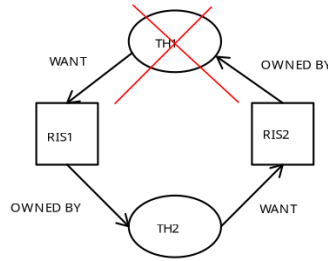
Grafi di Holt Possiamo rappresentare in questo modo la gestione di thread e risorse, individuando gli stalli con i cicli nel grafo:



5.7.1 Prevenzione e Cura degli Stalli

Esistono delle politiche di prevenzione o di cura in caso occorressero degli stalli:

1. **Detect and Fix - Politica di Cura Stallo:** Si analizza il Grafo di Holt e si interrompono i cicli effettuando kill dei thread scelti come vittime: Altrimenti posso eseguire politiche di **rollback** che grazie al salvataggio costante di uno stato di backup permette il ripristino nel caso in cui un'operazione dovesse comportare una transizione a stato di stallo. Questa pratica comporta però dei costi in termini di mantenimento stato di backup.



2. **Metodi di Prevenzione:** Esistono vari metodi che permettono la prevenzione di stalli, ad esempio:

- (a) Aumentare le risorse disponibili.
- (b) Acquisire le risorse in un ordine imposto, ad esempio grazie ad una rigida enumerazione dei lock.
- (c) Eliminare il Wait While Holding, un thread non potrà dunque holdare la risorsa durante uno stato non esecutivo.
- (d) Acquisizione preventiva di tutte le risorse necessarie all'avvio dell'esecuzione del thread, altrimenti non si starta.

5.8 Algoritmo del Banchiere

Descriviamo questo algoritmo che si pone l'obiettivo di riconoscere l'esistenza di almeno una schedulazione che attraversi solo stati safe, ossia stati deadlock free. Per presentarlo abbiamo prima la necessità di definire le ipotesi su cui si basa:

Ipotesi dell'Algoritmo del Banchiere Per la sua esecuzione si assumono validate queste condizioni:

- 1. Si conosce il numero massimo di risorse richieste da un thread.
- 2. Allocazione dinamica effettuata su richiesta (on-demand).
- 3. Le richieste possono essere soddisfatte se esiste un ordinamento delle attività concorrenti dei thread/processi che sia deadlock free.

Definizione di Stato Safe Per qualunque sequenza di richieste di risorse tutte le attività concorrenti devono poter terminare. In maniera informale possiamo dire che ogni stato deve avere a disposizione abbastanza risorse da far terminare almeno un thread in modo tale da causare il rilascio delle risorse che mantiene. In questo modo, riconoscendo tanti stati safe consecutivi si identifica un path (traiettoria) che assicura l'esistenza di almeno una sequenza di stati safe che porta alla terminazione. In questo modo viene effettuata un over-approssimazione sugli stati unsafe, saltando ogni stato unsafe anche se di transizione.

Complicazioni e Costi La descrizione della traiettoria data sopra può aiutarci nel capire come per **ogni** stato safe esisterà un tentativo di ricerca di traiettoria safe. In questo modo si riesce a capire la complessità causata da questo tipo di algoritmo che cerca di identificare ogni potenziale traiettoria sicura.

5.8.1 Esempio d'Istanza e Rappresentazioni

Mostriamo un esempio di transizioni tra stati:

1. Tabella iniziale, seconda riga abbiamo la quantità di ciascun tipo di risorsa e le successive righe contengono la quantità di risorse divise per tipologia necessaria a ciascun thread per terminare:

	R1	R2	R3
	4	2	2
th1	2	2	2
th2	3	1	1
th3	4	0	2

2. *th3* richiede le risorse per terminare, e assumiamo che la parte di tabella inferiore non sia più riferita alle risorse necessarie ma quelle assegnate:

	R1	R2	R3
	0	2	0
th1	0	0	0
th2	0	0	0
th3	4	0	2

Quindi *th2* riesce a terminare.

3. Lo stato successivo sarà dunque:

	R1	R2	R3
	4	2	2
th1	0	0	0
th2	0	0	0

E continuando in questo modo sarà possibile identificare o meno una traiettoria che porta alla conclusione di tutti i threads.

5.8.2 Pseudocodice dell'Algoritmo del Banchiere

Mostriamo una possibile implementazione dell'Algoritmo del Banchiere:

```
1  while(esiste un thread non marcato){
2      if(esiste un altro thrd-i tale che esigenza_i <= d){
3          marco thread-i
4          rimetto nella disponibilita le risorse assegnate al thrd-i
5      } else {
6          stato non safe //blocco, NON si assegna la risorsa al thrd-i
7      }
8      stato safe
9      procedi
10 }
```

5.9 Scheduling

Fino ad ora abbiamo solo menzionato come lo scheduling venisse gestito da una serie di transizione di stati in base agli eventi accaduti. In questo capitolo elencheremo delle definizioni e successivamente delle vere e proprie politiche di scheduling.

Definizioni Elenchiamo delle definizioni utilizzate nella gestione dello scheduling:

1. **Task/Job:** Attività da completare.
2. **Latency/Response Time:** Velocità del tempo di risposta, importante in schemi che danno priorità all'interattività, nello specifico:
 - (a) **Latency:** Tempo che intercorre dall'inizio alla fine di un task.
 - (b) **Response Time:** Tempo che intercorre dall'istante iniziale a quando ottengo l'esito del task.
3. **Throughput:** Esecuzione di più task in contemporanea in un quanto di tempo.
4. **Predictability:** Vincolo di rispettare tempi in casi specifici, come contesti realtime.
5. **Overhead:** Quanto tempo impiego in più a causa della gestione della schedulazione, ossia azioni come:
 - (a) Cambiare stato.
 - (b) Aggiungere in coda.
 - (c) Effettuare commutazioni di contesto.
6. **Fairness:** Quanto risulta equa la performance ottenuta per ciascun user.
7. **Workload:** Set di task per sistema da dover completare. Spesso questo viene utilizzato in contesti che non danno importanza ad un alta interattività ma alle performance (contesti di number crunching).

8. **Pre-Emptive Scheduler:** Permette il prerilascio di risorse già assegnate ad un task, se una priorità di task già in esecuzione dovesse risultare più bassa di un task in entrata allora scheduler ha il permesso di riassegnare la risorsa contesa.
9. **Scheduling Algorithms:** Algoritmi che ricevono in input i dettagli del contesto e producono in output il modo in cui gestire la schedulazione.

5.9.1 Politiche di Schedulazione

Esistono vari modi per gestire la schedulazione di task:

1. **FIFO:** Workload composto di task che vengono schedulati in base all'ordine in cui arrivano, seguono quindi un ordine settato da una coda, per questo è detta **politica FIFO**.

Caratteristiche Questa politica non valuta il tempo di completamento dei task. Di conseguenza i task più brevi se entrassero dopo task più lunghi dovrebbero aspettare tutta l'esecuzione di questi, dando poca importanza quindi all'interattività.

2. **Shortest Job First (SJF):** Viene data priorità ai task più brevi.
 - (a) **Non Pre-Emptive:** Lista ordinata sui tempi di completamento dei **READY**. Non prendiamo in considerazione dunque i thread in stato di **EXEC**.
 - (b) **Pre-Emptive:** Oltre alla lista ordinata sui **READY**, in questa versione di (SJF) se un nuovo task ha un tempo di completamento inferiore al corrente task in stato di **EXEC** allora il task in esecuzione viene sostituito dal task in entrata.

Caratteristiche Analizziamo pro e contro di questa politica di scheduling:

- (a) **Pro:** Buona response time media, ottimale nell'essere responsive.
- (b) **Contro:** Si presentano una serie di contro:
 - i. Overhead causato dalle frequenti operazioni di schedulazione come le commutazioni.
 - ii. Potenziali lunghe posticipazioni in condizioni specifiche come un task lungo seguito da task lunghi quasi quanto il primo.
 - iii. A priori dovremmo conoscere il tempo d'esecuzione di un thread/processo.
 - iv. Varianza alta nel tempo di risposta.
- (c) **Round Robin:** Politica basata sulla **divisione** in **quanti di tempo** di task e l'esecuzione di questi risulterà indipendente dalla durata dei task a cui appartengono.

Scelta Durata Quanto di Tempo La scelta della durata di un quanto di tempo sarà influenzata da vari elementi:

- i. Un quanto di tempo corto causerebbe un comportamento simile ad una (SJF) mentre uno lungo risulterebbe simile ad una FIFO.
- ii. Il quanto di tempo sarà gestito anche in base al tipo di computazione, alte prestazioni richiederebbero un ampio quanto, mentre alta interattività richiederebbe un breve quanto.

5.9.2 Multi Level Feedback Queue

Per rendere la **schedulazione** il più **fair** possibile è necessario che ogni tipologia di job nel workload (CPU Bounded o I/O Bounded) abbia la stessa possibilità di essere schedulato. Una normale applicazione di una politica di Round Robin potrebbe infatti causare una schedulazione non fair nei confronti dei processi I/O Bounded.

Obiettivi Questo approccio si basa su un insieme di code caratterizzate da priorità diverse. Questo meccanismo vuole garantire:

1. Migliorare i tempi di risposta.
2. Bassa overhead.
3. Diminuzione di casi di starvation.
4. Possibilità di caratterizzare un task con un livello di priorità alta/bassa.
5. Essere il più fair possibile su task caratterizzati dallo stesso livello di priorità.

Caratteristiche Questo meccanismo si basa su questi elementi fondamentali:

1. Struttura di code, ciascuna con priorità diversa.
2. Priorità più alte hanno quanti di tempo più brevi.
3. Scheduler estrae task da eseguire sempre dalla coda con almeno un elemento e di priorità più alta disponibile.
4. Meccanismo di feedback che dia la possibilità di spostare un task da una coda ad un'altra in base a specifici indici.
5. Uno schema di **posizionamento** di task nelle code:
 - (a) Task in entrata vengono **posizionati** sempre a **priorità più alta**.
 - (b) Task che si **sospendono** (come per yield o I/O) **restano** al loro **livello** oppure **crescono**.
 - (c) Task che **esauriscono** il loro quanto di tempo passano al **livello sottostante**.

Esempio di Gestione a Code di Priorità - Windows Windows posiziona i propri task in 32 code di schedulazione suddivise in **system** e **user**:

1. Viene data la priorità ai task lato system.
2. Ai task in entrata di tipo user viene dato un livello pari ad 8:
 - (a) Se questo appartiene ad operazione di I/O allora viene incrementata la priorità in base al tipo di I/O.
 - (b) Se riattivata da una wait (operazione di sync) allora:

da Background $\mapsto +1$ da Foreground $\mapsto +2$ se usa tutto il quanto $\mapsto -1$

Inversione di Priorità Potrebbe risultare utile menzionare questa condizione per cui un task appartenente ad una coda di priorità alta si metta in attesa di un task contenuto in una coda a priorità minore.

Riepilogo Caratteristiche Politiche di Schedulazione Piccolo riepilogo delle caratteristiche delle politiche descritte sopra:

1. **FIFO**: Gestione semplice a coda:
 - (a) Task di lunghezza variabile porta task brevi ad attendere task lunghi.
 - (b) Task di lunghezza costante è un'ottima politica di scheduling.
2. **Shortest Job First**: Gestione a coda ordinata per tempo di esecuzione:
 - (a) Ottima per la media di tempo di risposta.
 - (b) Pessima per varianza di tempo di risposta.
 - (c) Risulta necessario conoscere il tempo d'esecuzione di un task.
3. **Round Robin**: Gestione "migliore" o più nello specifico gestione che ci permette di definire in maniera personalizzata i quanti di tempo. Abbiamo però visto come risulti necessario utilizzare sistemi di code di priorità per rendere la politica fair.

5.9.3 Schedulazione Multi-Processor

Descriviamo le politiche di schedulazione su architetture Multi-Processor:

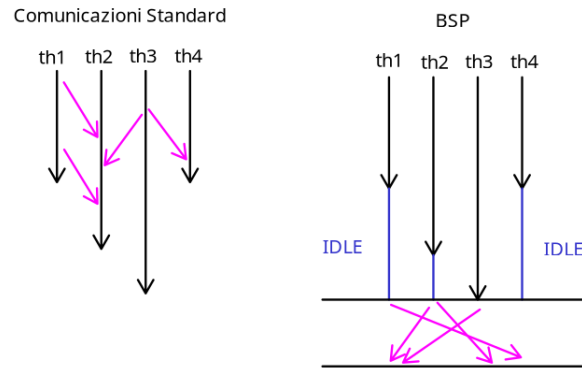
Scheduling Oblivious I thread che compongono i processi in questa politica vengono assegnati a core indipendentemente dal processo a cui appartengono. In questo modo lo scheduler non è a conoscenza della disponibilità di core diversi, semplicemente **schedula thread** su **core** in **maniera arbitraria**. Dunque thread dello stesso processo potrebbero essere schedulati su core diversi e questo potrebbe causare una gestione pesante dei dati tra le varie cache dei core, ma resta lo schema più semplice. Questo tipo di scheduling presenta diversi punti di debolezza:

1. Produce delay in caso di utilizzi di BSP e Producer/Consumer.
2. Produce delay in casi di path critici.
3. Produce I/O delay su alcuni threads.

Affinity Scheduling Ogni core ha la propria MCQ, e di conseguenza si riposizionano i threads nella lista pronti da dove sono stati estratti più recentemente. I processori in idle possono fare **stealing** di task di altri core per bilanciare il workload tra i core. L'obiettivo è quello di bilanciare il workload mantenendo più affinità di cache possibile.

Pattern di Programmazione Multithread Nella programmazione multithread riconosciamo dei pattern di utilizzo:

1. **(BSP) - Bulk Synchronous Parallel:** Normalmente i thread comunicano durante il loro corso d'esecuzione. In questo pattern invece si crea una barriera che imposta un **momento di comunicazione sincronizzato**. Lo schema BSP si compone dunque



di due fasi: In generale quindi questo pattern crea la necessità di dover gestire i tempi di idle, magari deschedulando questi thread.

- (a) **Fase Superstep:** I thread sono in esecuzione fino al loro completamento, tutti i thread che non sono quelli con il maggior tempo di completamento passano ad uno stato di idle in attesa del completamento del più lungo.
 - (b) **Fase Comunicazione:** Tutti i thread comunicano tra loro in maniera sincrona.
2. **Pipeline - Produttore/Consumatore:** La pipeline si basa su entità consecutive, ciascuna basa il proprio input sull'output di quello precedente, come nel processore pipeline appunto che si basava su fasi come *FETCH*, *DECODE*, *EXEC*. Dunque il pattern si basa sui producer che pushano dati in un buffer ed i producer estraggono dati dal buffer.

Gang/Space Scheduling Descriviamo questi tipi due tipi di scheduling:

1. **Gang Scheduling:** Si tenta di schedare tutti i thread appartenenti ad un processo, altrimenti non lo si manda in esecuzione.
2. **Space Scheduling:** Si schedano diversi task di processi a diversi core.

Problema del Cammino Minimo Ogni nodo rappresenta un thread e un arco una dipendenza. Il cammino critico corrisponde al **cammino più lungo** in termini di tempo dalla radice alla foglia.