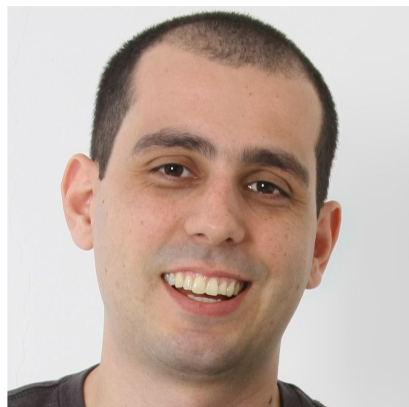

Introdução à Programação com Memória Persistente

Alexandro Baldassin (UNESP)
alexandro.baldassin@unesp.br

Emilio Francesquini (UFABC)
e.francesquini@ufabc.edu.br

Apresentação dos palestrantes

Alexandro Baldassin é professor associado no Departamento de Estatística, Matemática Aplicada e Computação (DEMAC) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro. Recebeu o título de Doutor em Ciência da Computação pelo IC-UNICAMP em 2009. Atua na pesquisa de métodos para sincronização para programas paralelos e mais recentemente na otimização de sistemas com memória persistente.



Emilio Francesquini é professor adjunto no Centro de Matemática, Computação e Cognição (CMCC) da Universidade Federal do ABC (UFABC). Recebeu o seu doutorado em Ciência da Computação em dupla titulação pela Universidade de São Paulo (USP) e pela Université de Grenoble-Alpes, França (2014). Desde 2015 investiga o uso de memória persistente e o seu impacto no desenvolvimento de sistemas computacionais.

Repositório com código

- Para este curso criamos um repositório onde colocamos os fontes além de uma imagem do docker já configurada para os testes.
 - Ela contudo apenas finge ter memória não volátil baseada em disco
- Repositório Git:
 - <https://github.com/baldas/pmdk-minicurso-erad21/>
 - `git clone git@github.com:baldas/pmdk-minicurso-erad21.git`
 - Caso deseje, a imagem pré-construída (porém sem os scripts e códigos) está em:
 - https://hub.docker.com/r/francesquini/erad_pmem
 - Nele você encontra scripts para construir e executar a sua própria imagem do Docker
 - O diretório `docker_home` já é mapeado automaticamente quando o Docker é executado o que torna o processo de desenvolvimento mais tranquilo (já que permite o uso do seu editor favorito, etc...)

Smoke test

```
$ git clone git@github.com:baldas/pmdk-minicurso-erad21.git
```

```
...
```

```
$ cd pmdk-minicurso-erad21/
```

```
$ ./run_image.sh Vai levar um tempinho na primeira execução...
```

```
...
```

```
erad@docker-pmem:~$ cd pmdk/pmkv/
```

```
erad@docker-pmem:pmkv$ make
```

```
...
```

```
erad@docker-pmem:~$ ./pmemkv
```

```
key: key1 value: value1
```

```
key: key3 value: value3
```

```
key: key2 value: value2
```

```
erad@docker-pmem:pmkv$
```

Conteúdo

- Motivação e importância
- Conceitos de persistência
- Desafios na programação
- Suporte do sistema operacional
- Intel PMDK

Parte 1 - Memória Persistente: O que é, onde vive e o que come?

O que é memória persistente?

- Também chamada de *storage class memory* ou *não-volátil*
 - Dados são mantidos mesmo em caso de falha de energia
- Alia atributos de dispositivos de armazenamento e memória
 - É **persistente**, como discos rígidos e SSDs
 - É **endereçável a byte**, como memória volátil (e.g., DRAM)
- Vantagens
 - Capacidade maior que DRAM
 - Velocidade maior que dispositivos baseados em blocos
- Mas por que apenas agora?
 - Novas tecnologias permitem um tempo de acesso direto próximo ao da DRAM
 - Disponível comercialmente!

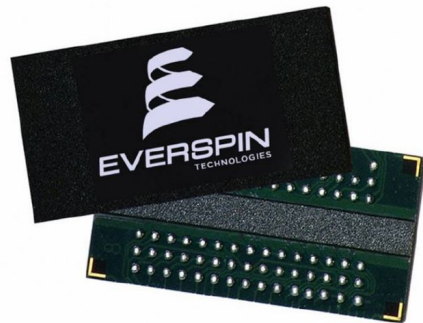
Um pouco de história...

- Tubo de raios catódicos (46) — Anos 40
- Core Memory (47) — Anos 50 e 60
- FE-RAM (52) — Desenvolveu-se no fim dos anos 80
- DRAM (68) SRAM (64) — Anos 70 até hoje
- PCM (69) — Apenas recentemente explorada
- FLASH (84) — Popularizou-se nos anos 90
- STT-RAM (96)— Início da exploração comercial nos anos 00
- 3D XPoint - (2019)

Ser volátil não é o padrão!

In the wild...

- Sandisk ULLtraDIMM SSDs - **Flash** (200-400GB)
- Everspin - **ST-RAM** (64MB)
- Viking ArxCis-NV - **DRAM + Bateria + Flash** (16GB)
- Netlist NVvault NVDIMM - **DRAM + Bateria + Flash** (8GB)



Intel Optane DC

Lançado em abril de 2019 pela Intel

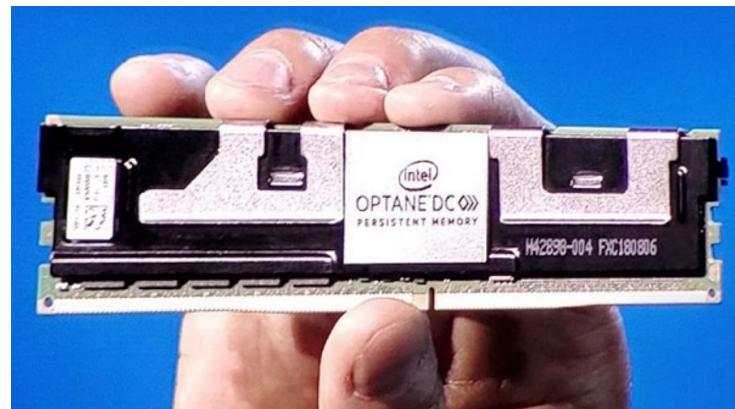


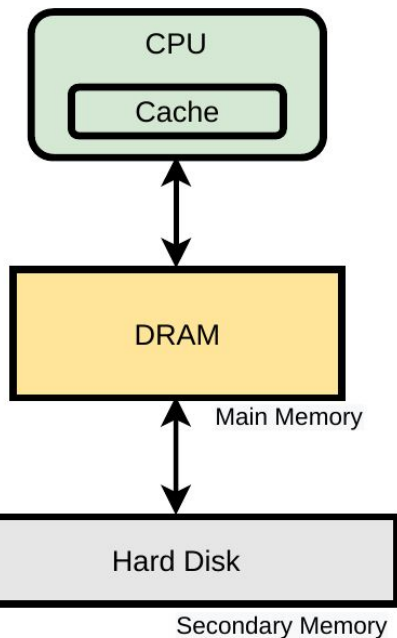
Table 12-1. Latencies for Accessing Intel® Optane™ DC Persistent Memory Modules

Latency	Intel® Optane™ DC Persistent Memory Module	DRAM
Idle sequential read latency	~170ns	~75ns
Idle random read latency	~320ns	~80ns

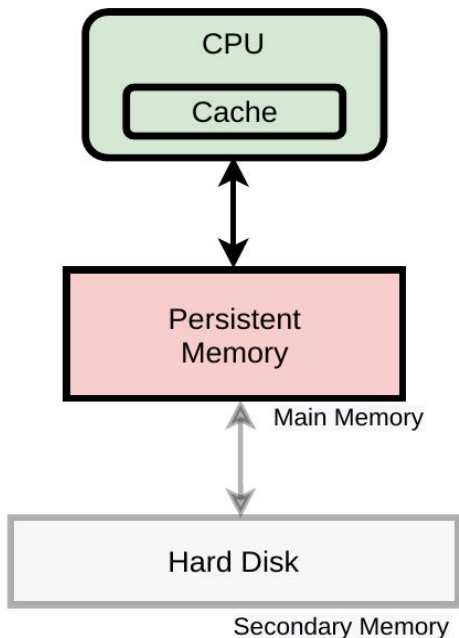
Table 12-2. Bandwidths per DIMM for Intel® Optane™ DC Persistent Memory Modules and DRAM

Per DIMM Bandwidths	Intel® Optane™ DC Persistent Memory Module	DRAM
Sequential read	~7.6 GB/s	~15 GB/s
Random read	~2.4 GB/s	~15 GB/s
Sequential write	~2.3 GB/s	~15 GB/s
Random write	~0.5 GB/s	~15 GB/s

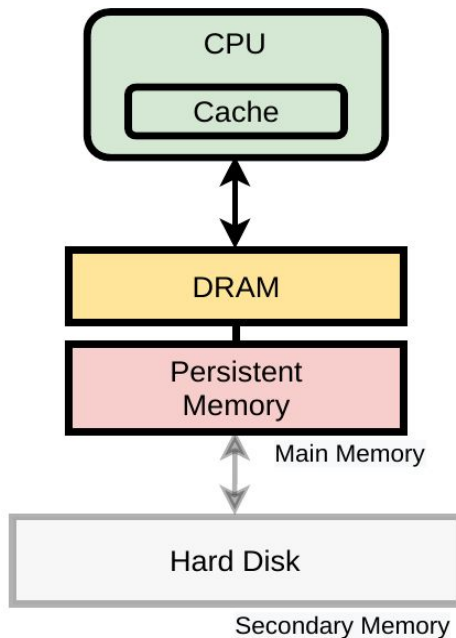
Papéis de PM na hierarquia de memória



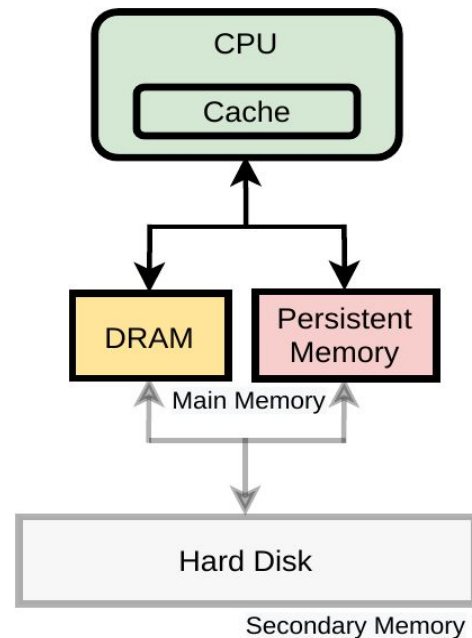
(a) Traditional Hierarchy



(b) Replacing DRAM

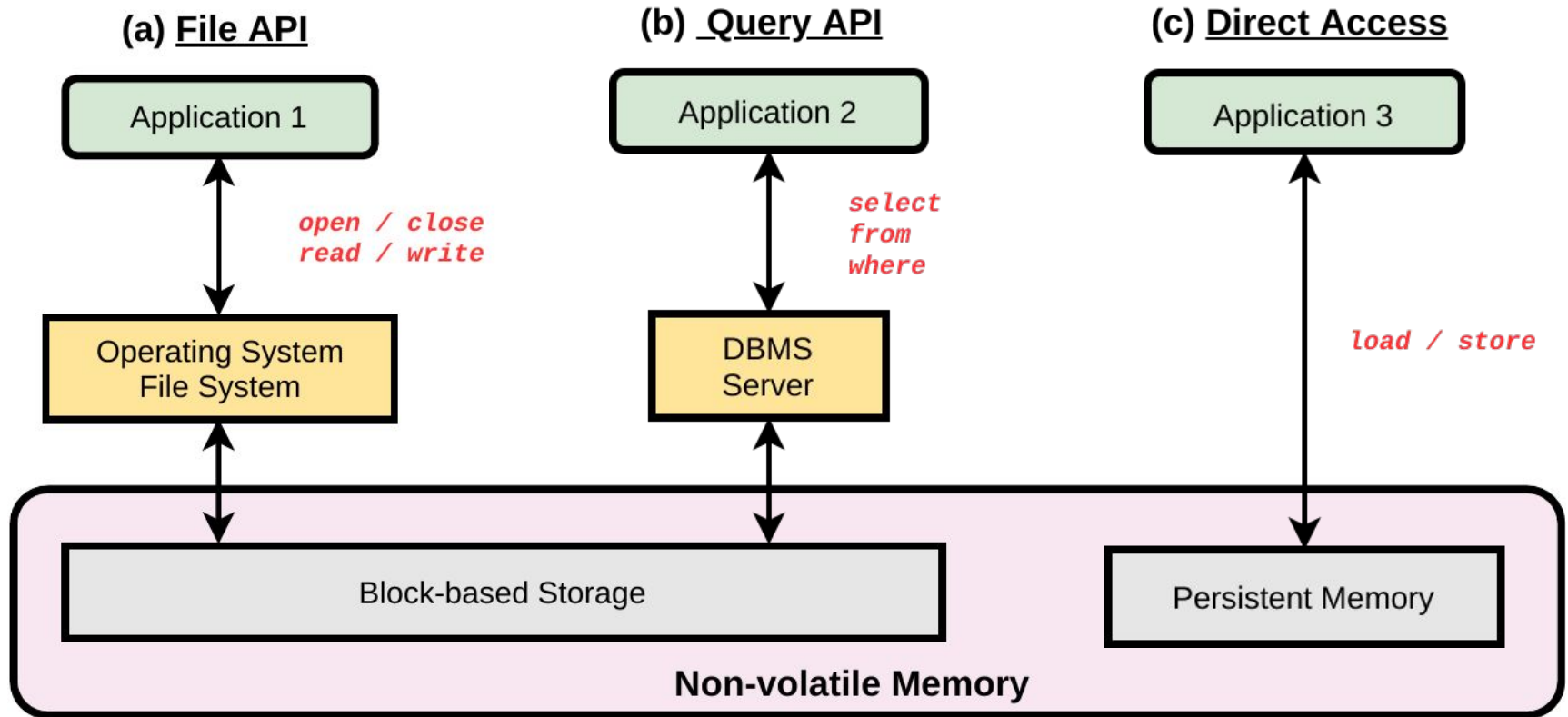


(c) DRAM as a cache



(d) DRAM and PM

Interfaces para programação



Desafios para programação com PM

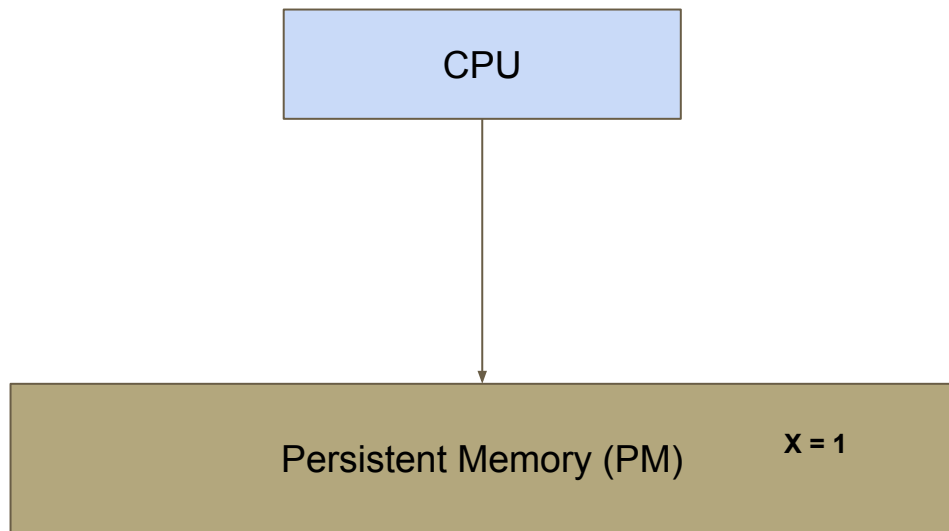
Assuma que queremos apenas escrever um valor de forma persistente na PM

$X = 1$

Desafios para programação com PM

Assuma que queremos apenas escrever um valor de forma persistente na PM

$X = 1$

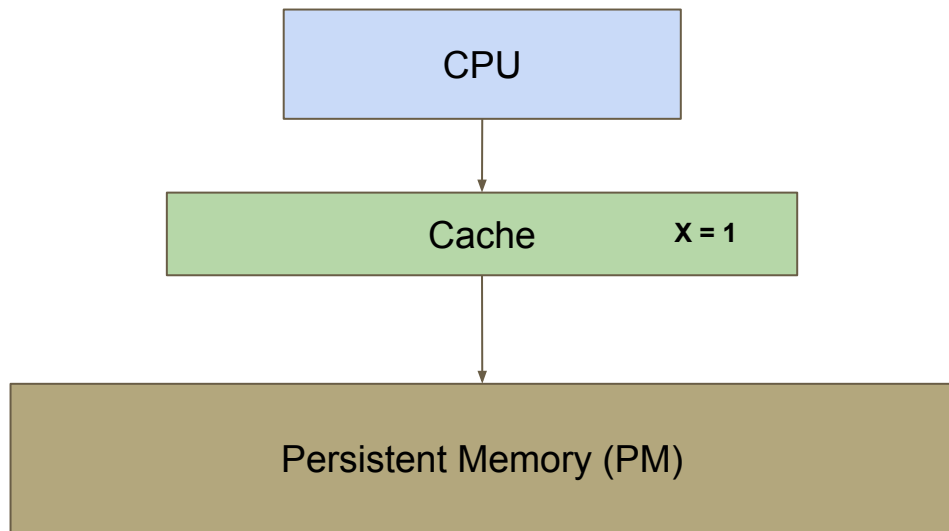


store X, 1

Desafios para programação com PM

Assuma que queremos apenas escrever um valor de forma persistente na PM

$X = 1$

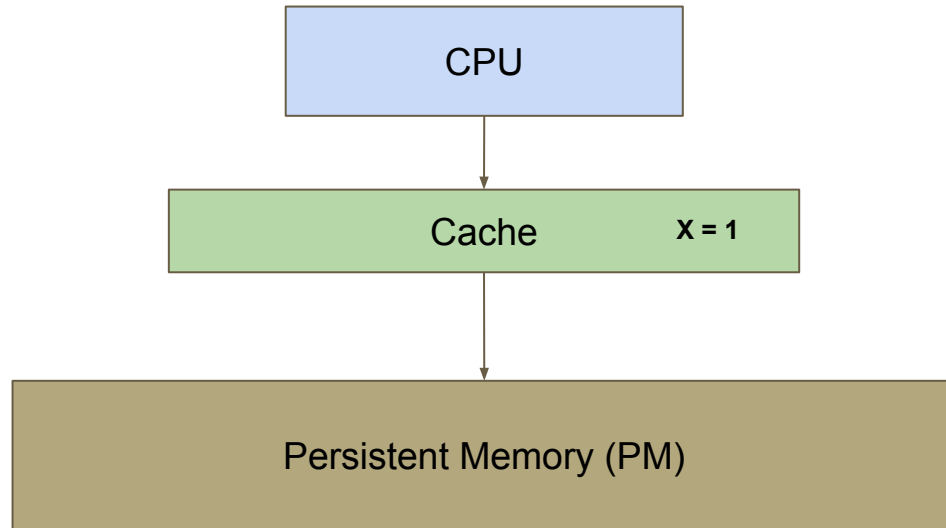


store X, 1

Desafios para programação com PM

Assuma que queremos apenas escrever um valor de forma persistente na PM

$X = 1$

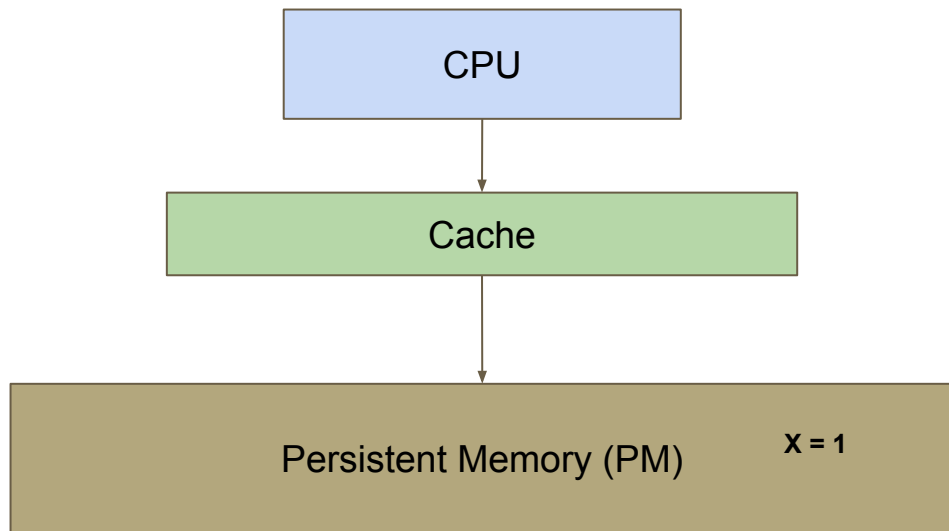


store X, 1
flush

Desafios para programação com PM

Assuma que queremos apenas escrever um valor de forma persistente na PM

$X = 1$



store X, 1
flush
memory fence

Desafios para programação com PM

- Adicionar instruções extras (e.g., flush e barreira) para cada store torna o programa lento
- Tentativa de otimizar o código pode torná-lo errado!

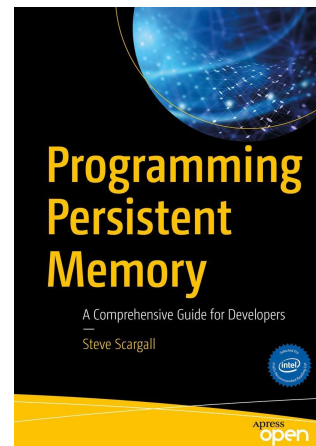
```
X = 1  
Y = 1  
  
store X, 1  
flush X  
fence  
  
store Y, 1  
flush Y  
fence
```



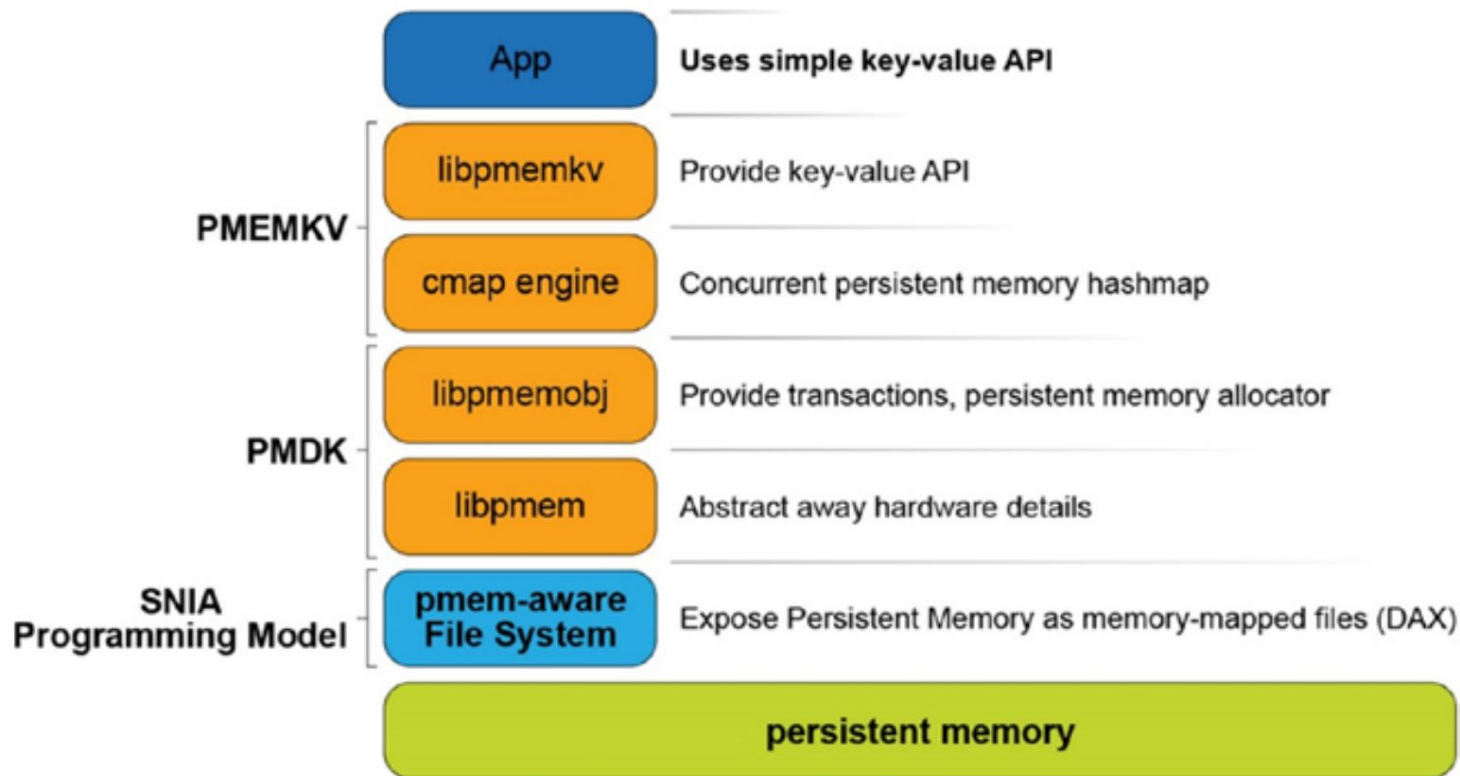
```
X = 1  
Y = 1  
  
store X, 1  
store Y, 1  
  
flush X  
flush Y  
fence
```

Objetivo e estrutura do mini-curso

- Mostrar como programar para sistemas com PM utilizando bibliotecas disponíveis
 - HP: Atlas (obsoleta) - <https://github.com/HewlettPackard/Atlas>
 - famus: failure-atomic msync() - <https://web.eecs.umich.edu/~tpkelly/famus/>
 - Intel: **PMDK (Persistent Memory Development Kit)** - <https://pmem.io/pmdk/>
- Seguiremos o Intel PMDK (livro disponível gratuitamente)
 - <https://pmem.io/book/>
 - Código fonte do livro:
 - <https://github.com/Apress/programming-persistent-memory>
 - Código PMDK:
 - <https://github.com/pmem/pmdk/>



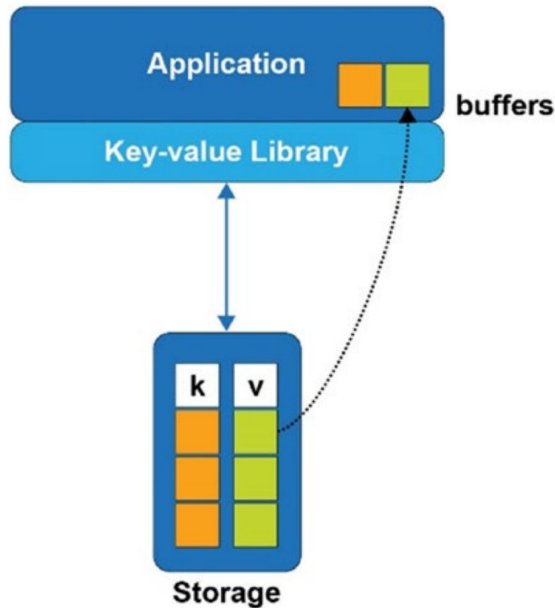
Software stack com o PMDK



Parte 2 - Arquitetura de Sistemas com Memória Persistente

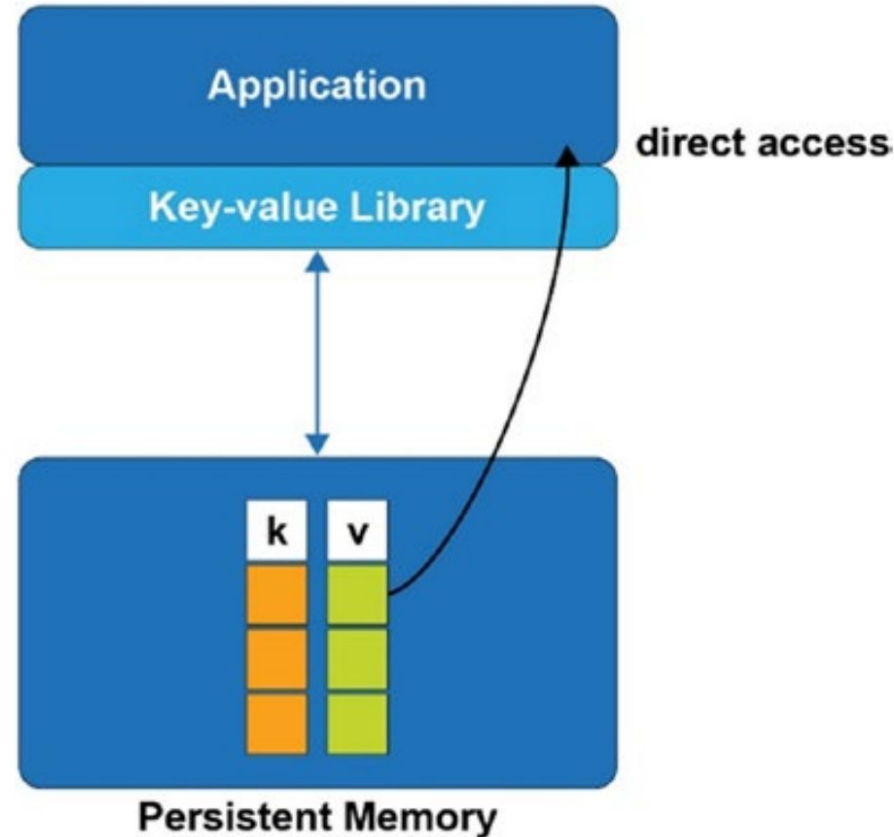
Exemplo 1: `pmemkv` - Persistent In-Memory Key-Value Store

- Diversas linguagens de programação tem bibliotecas que oferecem sistemas de armazenamento chave-valor
 - Tipicamente utilizadas com funções `get(chave)` e `put(chave, valor)`

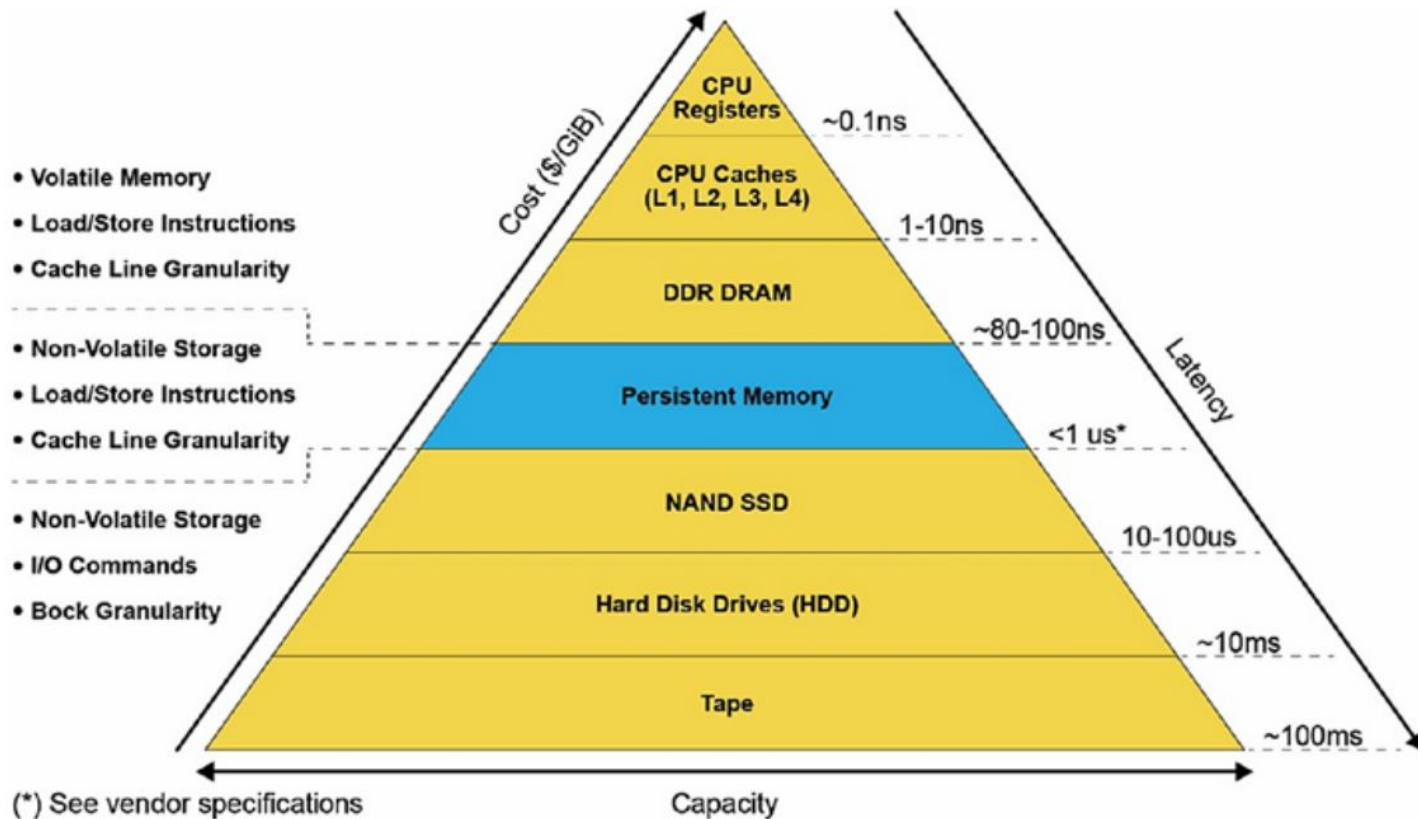


Exemplo 1: `pmemkv` - Persistent In-Memory Key-Value Store

- Ao contrário de soluções tradicionais, com `pmemkv` não é necessário fazer uma cópia e alocação de buffers temporários em memória
- Acessos (leitura e escrita) diretos se traduzem em melhor desempenho*
- Endereçamento por bytes e não por blocos traz uma vantagem de desempenho adicional
 - Ex. `pmemkv` vs. arquivos mapeados em memória



Exemplo 1: `pmemkv` - Persistent In-Memory Key-Value Store



pmemkv - Show me the code!

Arquitetura de memória persistente

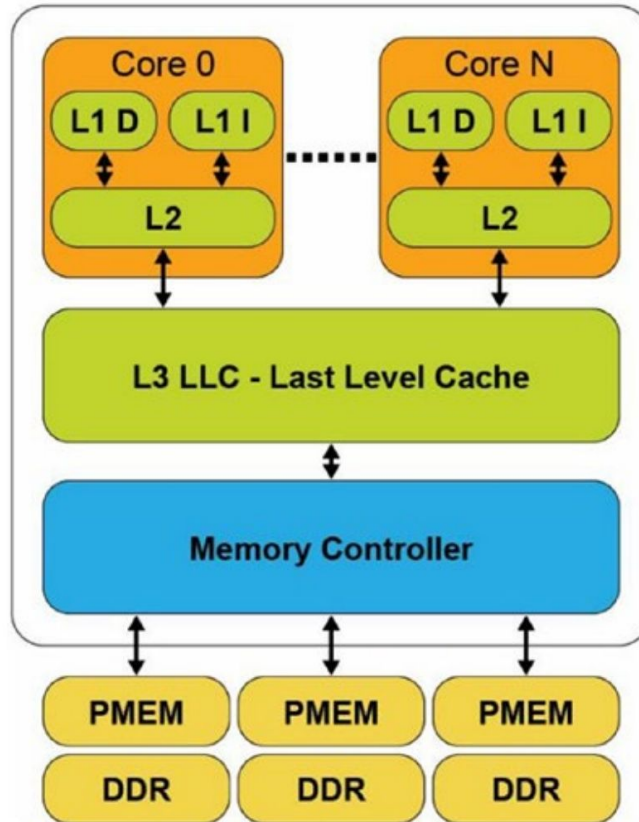
Resumo do que falamos até agora:

- Desempenho > SSDs, HDs, ... < DRAM, SRAM
- Durabilidade > FLASH < DRAM
- Capacidade > DRAM < HD ou fitas
- Atualização de dados in-place
 - Byte addressable
- Pode ser usado com DMA ou RDMA
- Persistente
- Após verificações iniciais, todas os acessos podem ser feitos sem interferência do kernel, sistema de arquivos, etc...

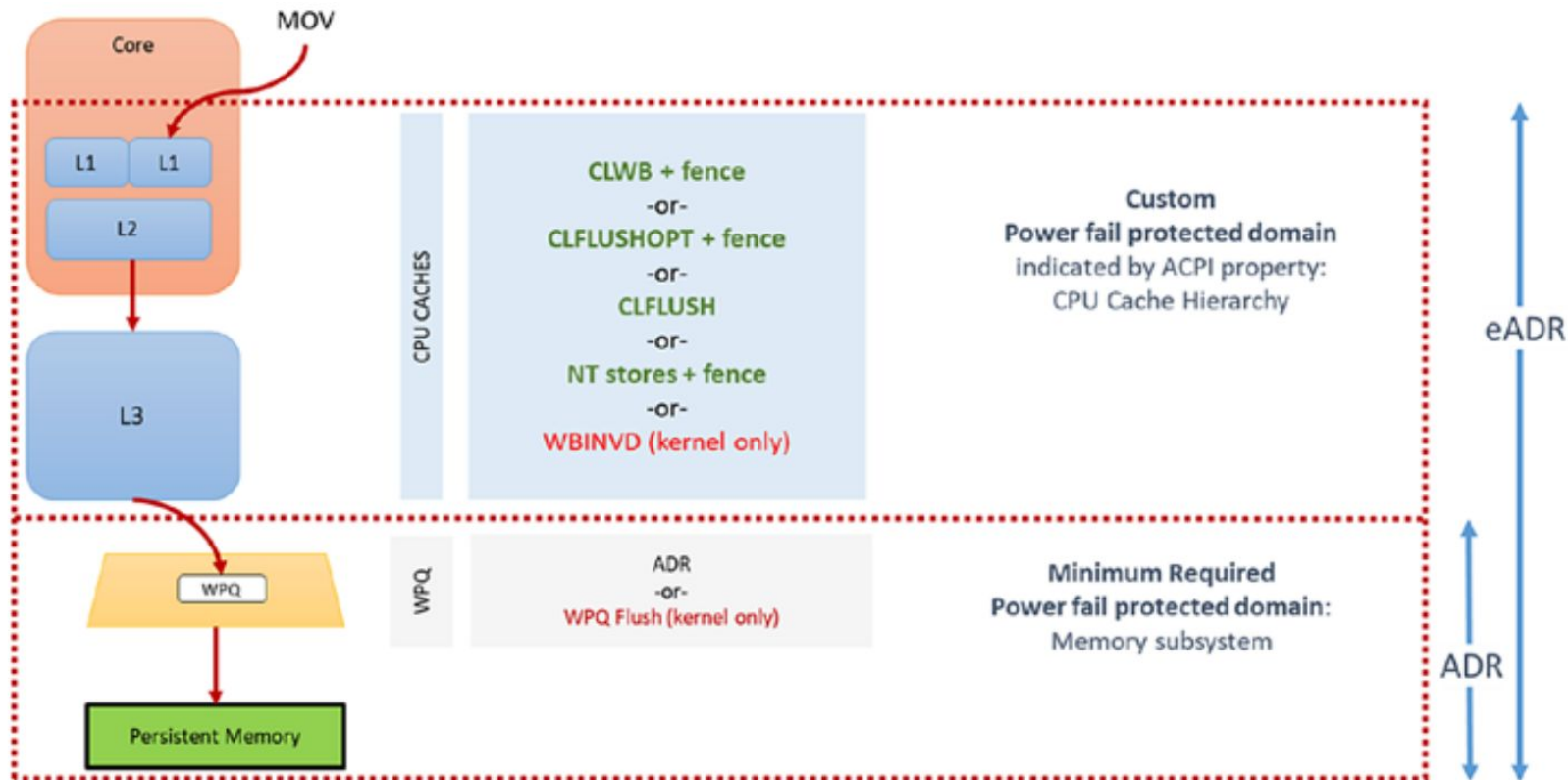
Suporte atual das plataformas

- Atualmente há, de fato, apenas suporte da Intel
 - Espera-se que bibliotecas como PMDK possam servir como uma camada de isolamento das idiossincrasias de cada plataforma conforme elas forem sendo apresentadas
- Esse suporte exige, contudo, ou o uso de uma biblioteca ou o emprego de barreiras de memória, cache flushing, logging, etc...
 - Logging usado para garantir a atomicidade
 - Cache flushing cuidadoso garante que escritas foram retiradas das caches e enviadas para a memória persistente
 - Barreiras de memória (como `SFENCE` no x86) evitam o reordenamento de escritas
- Esses passos, contudo, são muito propensos a falhas e é por esta razão que nos concentraremos aqui em usar o PMDK

Hierarquia de memória



Persistence Domains / Power-Fail Protection Domains

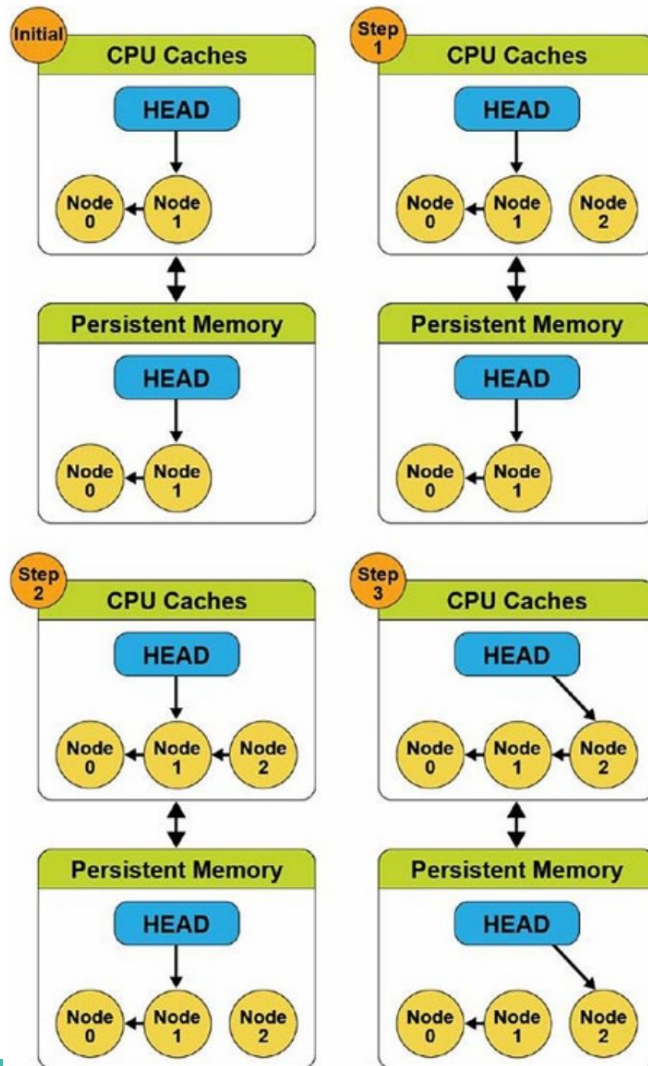


Instruções x86

- **CLFLUSH** - Faz o flush e invalida uma linha de cache. Comportamento serializado.
- **CLFLUSHOPT** - O mesmo que **CLFLUSH** mas não serializa (o que permite um certo nível de concorrência). Exige o uso de uma barreira após uma sequência.
- **CLWB** - Comportamento semelhante ao **CLFLUSHOPT**, contudo não invalida (obrigatoriamente) a linha da cache. Exige uso de uma barreira.
- **NT Stores** - Ignoram as caches e escrevem diretamente na PM. Exigem uso de barreira.
- **SFENCE** - Barreira de escrita. Garante que todas as operações que apareceram antes da barreira (*program order*) têm seus efeitos globalmente visíveis antes de efeitos de qualquer outra instrução de store após a barreira.
- **WBINVD** - (kernel mode) Faz o flush de todas as linhas de todas as caches e as invalida.

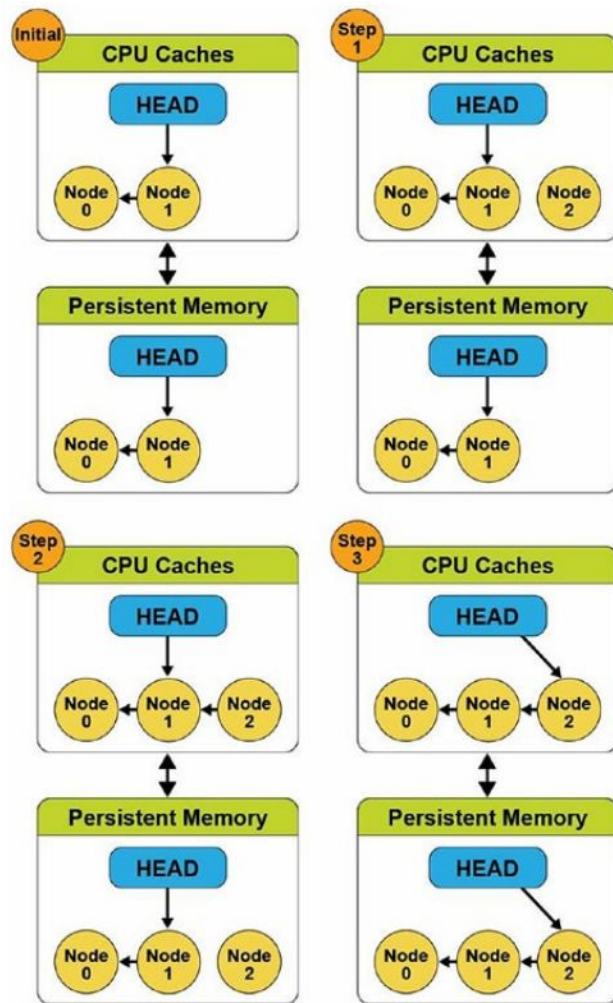
A necessidade de flushes e barreiras

```
1. no2 = criaNo();  
2. no2->prox = no1;  
3. head = no2;
```



A necessidade de flushes e barreiras

1. `no2 = criaNo();`
2.
 - a. `no2->prox = no1;`
 - b. `sfence();`
3. `head = no2;`



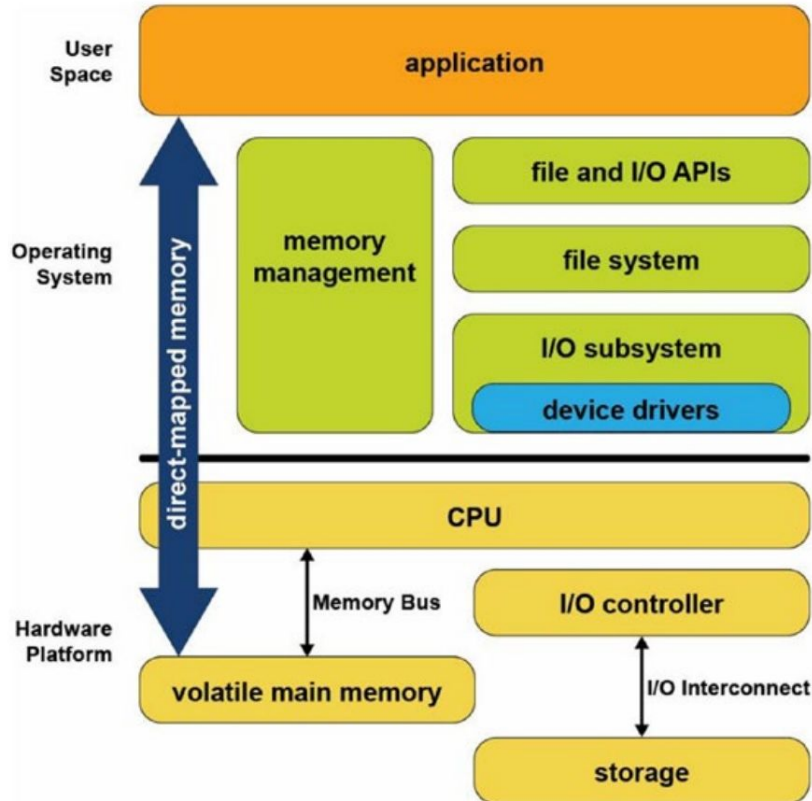
Visibilidade e persistência

- Visibilidade nem sempre é o mesmo que persistência
 - Mudanças em uma área de memória persistente são, frequentemente, visíveis antes de serem persistentes
- A persistência é alcançada através de flushes, barreiras ou o bom e velho `msync()`

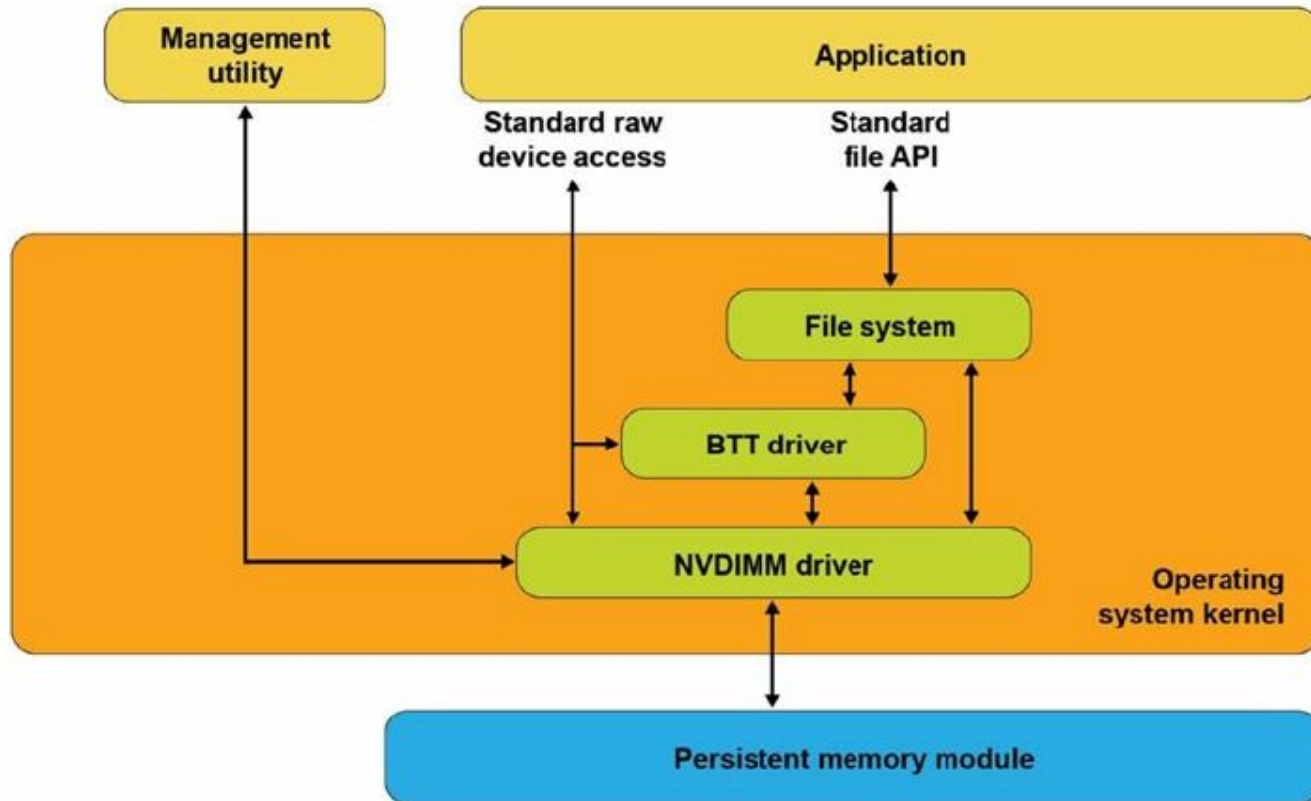
```
open() // Open a file on a FS
...
mmap() // Memory map the file
...
strcpy() // Execute a store op
... // Data is globally visible
msync() // Data is now persistent
```

Parte 3 - Suporte do Sistema Operacional

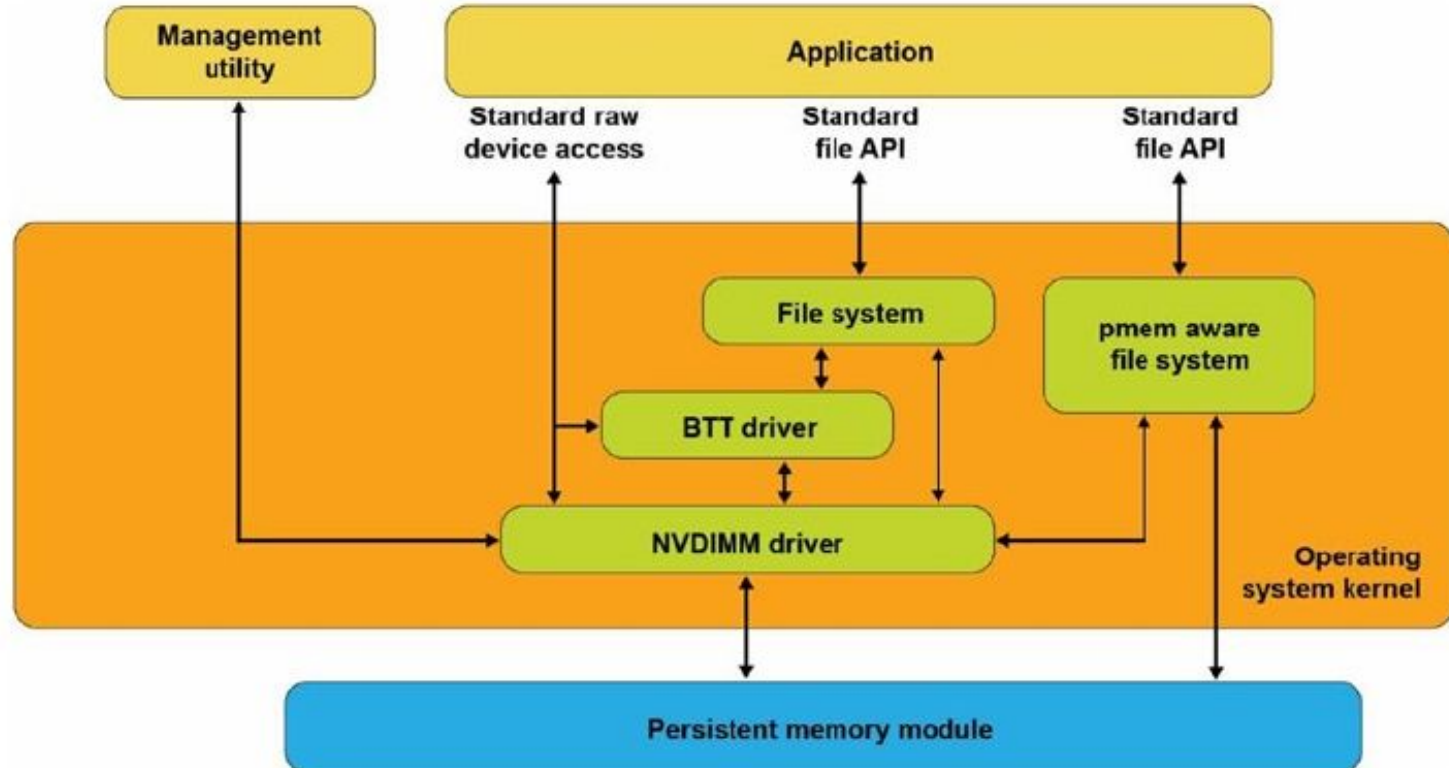
Suporte dos Sistemas Operacionais



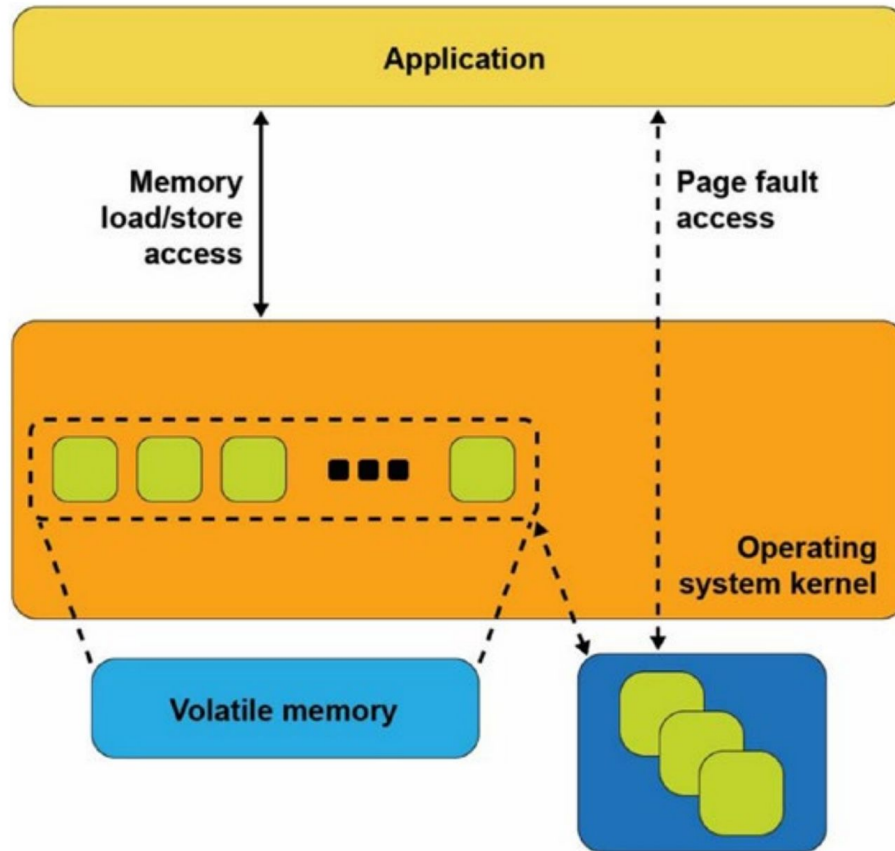
Memória Persistente como Dispositivos de Bloco



Sistemas de arquivo preparados para memória persistente



Arquivos mapeados em memória



Exemplo de código usando mmap

Problemas

- Ainda usam interfaces tradicionais de arquivos ou...
- ...quando mapeados em memória ainda fazem a transferências dos dados da memória persistente para a RAM e da RAM para a memória persistente

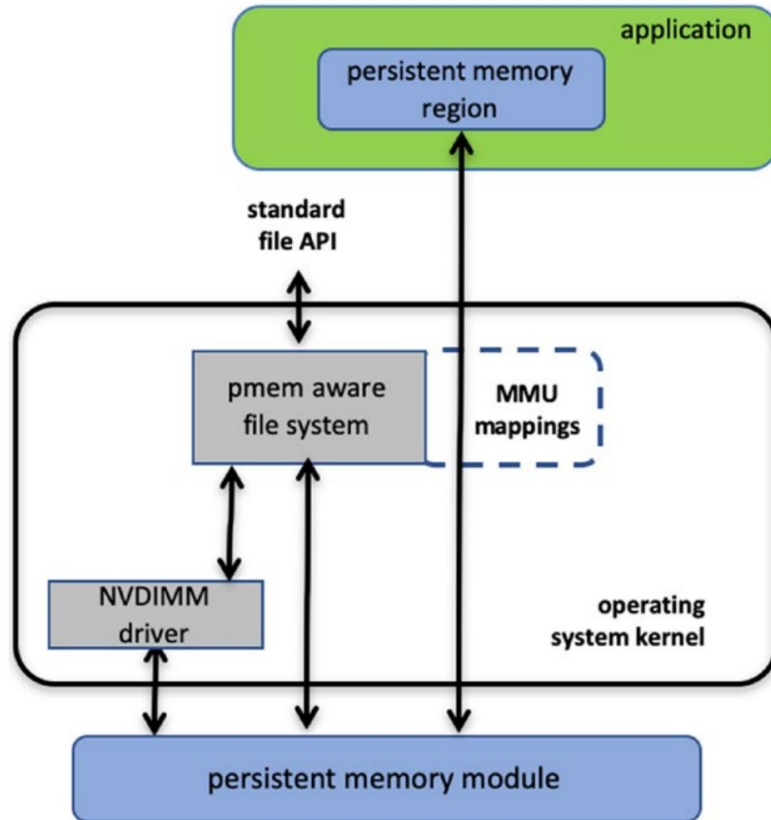
Queremos trabalhar, efetivamente, com:

- Loads e stores
- Acesso direto à PM, sem caching de páginas feitos pelo SO

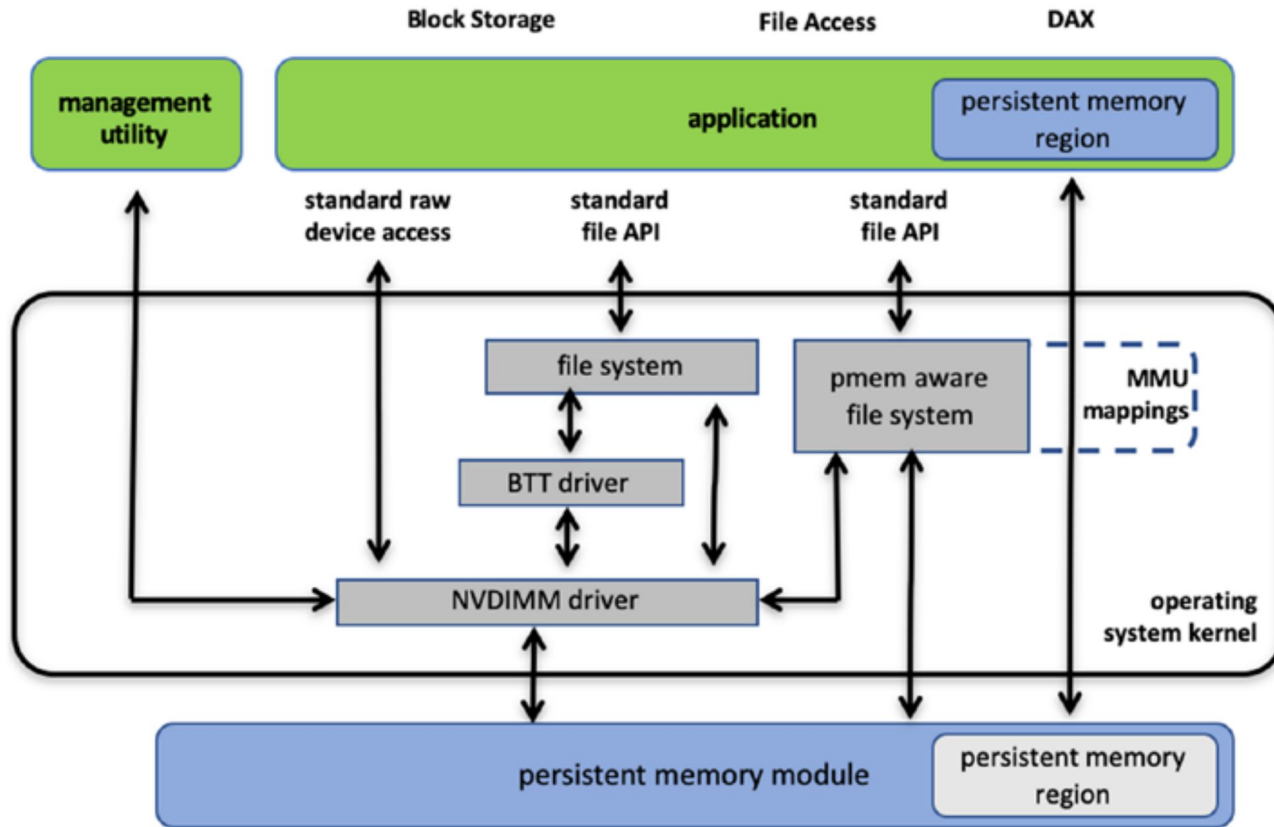
DAX

- DAX -> Direct Access
 - NTFS no Windows
 - XFS e ext4 no Linux
- Evita o buffering em RAM
- Mapeia as páginas diretamente para o dispositivo de PM
- No Linux, dispositivos aparecem como um device em `/dev/pmemXX`
- Mapear os dispositivos de PM como arquivos tem várias vantagens:
 - Aproveitar os controles de acesso já presentes no FS
 - Ferramentas de backup funcionam como antes
 - É possível usar todas as ferramentas que já estavam disponíveis (e eventualmente adaptar códigos já existentes) para usar PM de maneira relativamente direta.

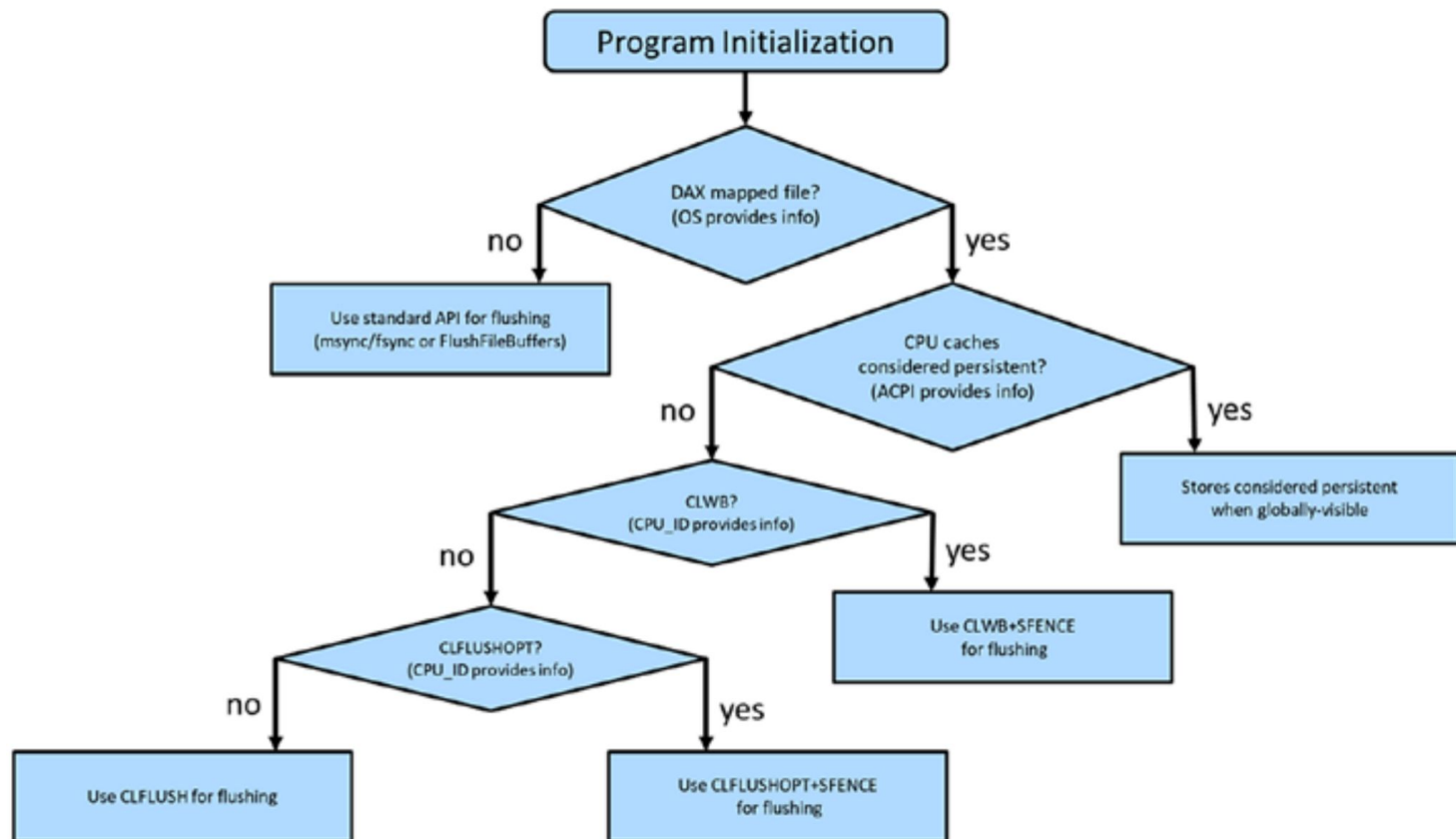
DAX + Memory mapped files



Visão geral



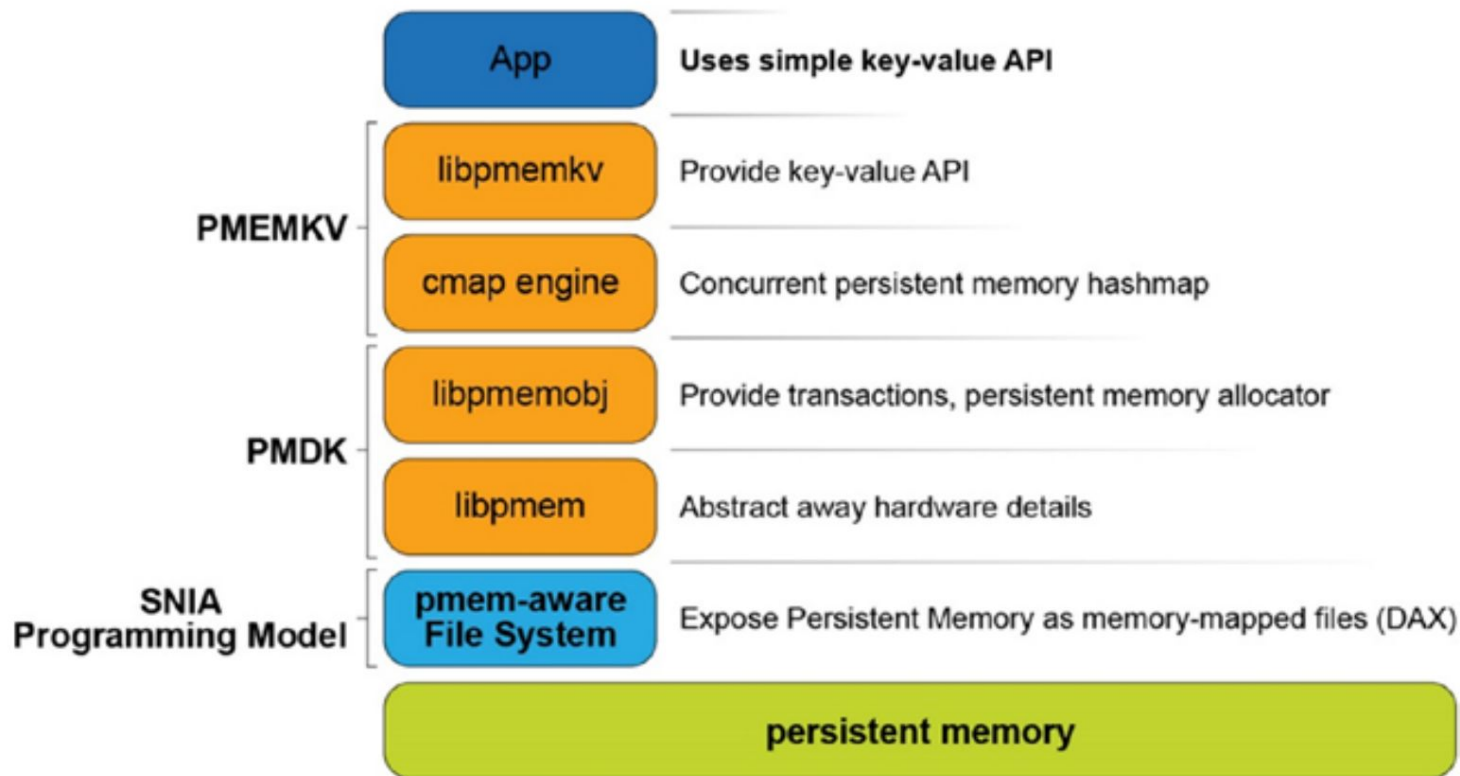
Resumo da ópera



Parte 4 - Libpmemobj

Interface transacional e para alocação dinâmica de memória

Recapitulando: PMDK stack



libpmemobj

- Permite utilizar arquivos mapeados em memória como um *object store*
 - DAX é utilizado para acesso direto
- Principais conceitos
 - *Memory pool*
 - Ponteiros persistentes
 - Objeto raiz
 - Transações
 - Alocação de memória persistente

Memory Pool

- É a abstração utilizada pela `libpmemobj` para trabalhar com memória persistente
 - Usa o esquema de arquivo mapeado + DAX mencionado anteriormente
- Duas formas de criar:
 - Utilitário `pmempool`
 - Ex: `pmempool create --layout my_layout --size 20M obj exemplo.obj`
 - Programação (API)
 - `PMEMObjpool *pmemobj_create(const char *path, const char *layout, size_t poolsize, mode_t mode);`

Ponteiros persistentes

- Uma vez criado, como o memory pool é acessado?
- Ponteiros “convencionais” não são usados
 - Quando aberto, o memory pool pode ser mapeado para endereços virtuais diferentes (ASLR - *Address Space Layout Randomization*)
- PMDK utiliza os chamados *fat pointers*

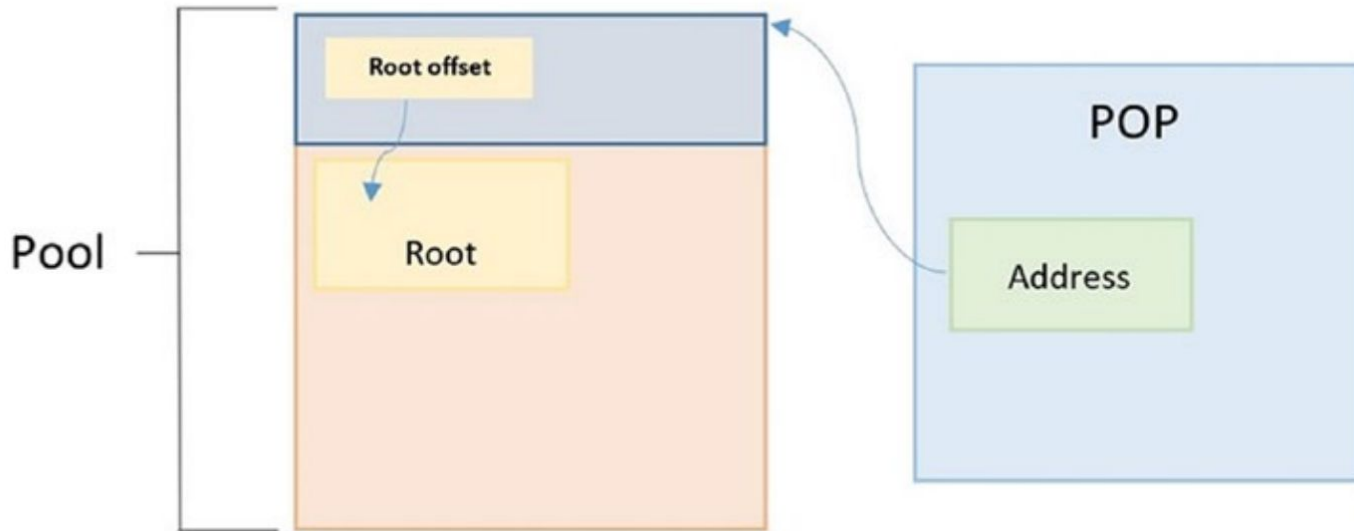
```
typedef struct pmemoid {  
    uint64_t pool_uuid_lo;  
    uint64_t off;  
} PMEMoid;
```

- Um *fat pointer* precisa ser transformado em um ponteiro regular para que seja dereferenciado
 - Cálculo: `(void *)((uint64_t)pool + oid.off)` // pool é o endereço virtual base
 - Há uma chamada na API do PMDK para fazer a conversão:
 - `void *pmemobj_direct(PMEMoid oid);`

Objeto raiz

- Vimos até agora
 - Como criar/abrir memory pools
 - O tipo de ponteiro utilizado para representar um objeto no pool
- Mas como encontrar um objeto particular dentro do pool?
 - Todo pool contém um *objeto raiz* através do qual todos os objetos dentro do pool podem ser acessados
- Objeto raiz
 - Funciona como um ponto de entrada para acesso ao memory pool
 - Acessado através da chamada `pmemobj_root`
 - `PMEMoid pmemobj_root(PMEMobjpool *pop, size_t size);`

Pool Object Pointer (POP) e o Objeto raiz



Passos

1. Abrir (ou criar) memory pool (retorna o POP) -
2. Acessar objeto raiz (retorna ponteiro persistente) -
3. Transformar em ponteiro regular antes de dereferenciar -

```
pmemobj_open(...)  
pmemobj_root(...)  
pmemobj_direct(...)
```

Exemplo: persistir uma string

- Nesse exemplo simples, o único objeto (raiz) da memory pool armazena uma string
- A string deve ser escrita e persistida
- Definição do objeto:

```
#define MAX_BUF_LEN 10
struct my_root {
    char buf[MAX_BUF_LEN];
};
```

- Passos iniciais:

```
1) PMEMobjpool *pop = pmemobj_open(argv[1], LAYOUT_NAME);

2) PMEMoid root = pmemobj_root(pop, sizeof(struct my_root));
3) struct my_root *rootp = pmemobj_direct(root);
```

Exemplo: primeira versão

- Código para persistir a string:

```
char buf[MAX_BUF_LEN] = {"Exemplo1"};  
  
memcpy(rootp->buf, buf, strlen(buf));
```

- Funciona?

Exemplo: segunda versão

- Código para persistir a string:

```
char buf[MAX_BUF_LEN] = {"Exemplo1"};  
  
memcpy(rootp->buf, buf, strlen(buf));  
pmemobj_persist(pop, rootp->buf, strlen(buf));
```

- Funciona?

Exemplo: terceira versão

- As versões anteriores não são *failure atomic*
 - Se alguma falha acontecer durante a cópia, só algumas partes da string podem ter sido persistidas
- PMDK fornece transações para garantir essa propriedade

```
TX_BEGIN(pop) {  
  
    pmemobj_tx_add_range(root, 0, strlen(buf));  
    memcpy(rootp->buf, buf, strlen(buf));  
  
} TX_END
```

Uso de macros

- Usar as chamadas diretas fornecidas pelo `libpmemobj` é propenso a erros
 - Não oferece checagem de tipo
- Para remediar o problema, uma série de macros é disponibilizada
- Passos
 - Declarar layout

```
POBJ_LAYOUT_BEGIN(string store);
POBJ_LAYOUT_ROOT(string store, struct my_root);
POBJ_LAYOUT_END(string_store);
```
 - Usar macros para declarar ponteiro e acessar membros da estrutura

```
TOID(struct my_root) root;
if (D_RO(root)->buf[0] != 0)
    D_RW(root)->buf[0] = 0;
```


Exemplo: quarta versão (usando macros)

```
POBJ_LAYOUT_BEGIN(string_example);
POBJ_LAYOUT_ROOT(string_store, struct my_root);
POBJ_LAYOUT_END(string_example);

#define MAX_BUF_LEN 10
struct my_root {
    char buf[MAX_BUF_LEN];
};

TOID(struct my_root) root = POBJ_ROOT(pop, struct my_root);

...

TX_BEGIN(pop) {

    TX_MEMCPY(D_RW(root)->buf, buf, strlen(buf)+ 1);

} TX_END
```

Alocação de memória persistente

- Memória é alocada no contexto de algum *memory pool* já aberto
- Problema com alocação
 - Interface convencional para alocação:
 - `x = persistent_malloc(100);`
 - Quando a memória persistente sendo alocada deve ser marcada como alocada?
 - O que acontece se a memória for alocada, mas antes da atribuição acontecer uma falha?
 - E se primeiro usarmos a memória e depois informar ao alocador para torná-la persistente?
- A alocação de memória persistente precisa de uma interface diferente
 - A modificação do ponteiro destino e a alocação deve ser feita de forma atômica

Métodos para alocação

- Usar métodos atômicos

```
int pmemobj_alloc(PMEMobjpool *pop, PMEMoid *oidp, size_t size, uint64_t type_num,  
pmemobj_constr constructor, void *arg);
```

```
POBJ_NEW(PMEMobjpool *pop, TOID *oidp, TYPE, pmemobj_constr constructor,  
void *arg);
```

- Usar transações

```
PMEMoid pmemobj_tx_alloc(size_t size, uint64_t type_num);
```

```
TX_ALLOC(TYPE, size_t size);
```

```
TX_BEGIN(pop) {  
    ...  
    = TX_ALLOC(...);  
} TX_END
```

Exemplo: string dinâmica

- Primeiro passo é estruturar o layout do pool

```
POBJ_LAYOUT_BEGIN(string_dynamic);  
POBJ_LAYOUT_ROOT(string_dynamic, struct my_root);  
POBJ_LAYOUT_TOID(string_dynamic, char);  
POBJ_LAYOUT_END(string_dynamic);
```

- ... e declarar os respectivos objetos

```
struct my_root {  
    TOID(char) my_string;  
};
```

Exemplo: string dinâmica com interface atômica

```
static int string_constructor(PMEMobjpool *pop, void *ptr, void *arg)
{
    int size = strlen(arg)+1;

    memcpy(ptr, arg, size);
    pmemobj_persist(pop, ptr, size);

    return 0;
}

static int string_new(PMEMobjpool *pop, TOID(char) *str, char *buf)
{
    return POBJ_ALLOC(pop, str, char, strlen(buf)+1, string_constructor,
buf);
}

...

string_new(pop, &D_RW(root)->my_string, buf)
```

Exemplo: string dinâmica com transações

```
TX_BEGIN(pop) {  
  
    // alloc & copy  
    TOID(char) string = TX_ALLOC(char, strlen(buf)+1);  
    memcpy(D_RW(string), buf, strlen(buf)+1);  
  
    // snapshot before changing  
    TX_ADD(root);  
  
    D_RW(root)->my_string = string;  
  
} TX_END
```

Exemplo completo: queue

Código fornecido com o PMDK

```
POBJ_LAYOUT_BEGIN(queue);
POBJ_LAYOUT_ROOT(queue, struct root);
POBJ_LAYOUT_TOID(queue, struct entry);
POBJ_LAYOUT_TOID(queue, struct queue);
POBJ_LAYOUT_END(queue);

struct entry { /* queue entry that contains arbitrary data */
    size_t len; /* length of the data buffer */
    char data[];
};

struct queue { /* array-based queue container */
    size_t front; /* position of the first entry */
    size_t back; /* position of the last entry */

    size_t capacity; /* size of the entries array */
    TOID(struct entry) entries[];
};

struct root {
    TOID(struct queue) queue;
};
```

Finalizando libpmemobj

- Há bindings do `libpmemobj` para C++ e Javascript
- C++, em particular, usa metaprogramação para facilitar a escrita de aplicações persistentes
 - Também é fornecida uma versão persistente da STL
- Links:
 - C++:
 - <https://github.com/pmem/libpmemobj-cpp>
 - Javascript:
 - <https://github.com/pmem/libpmemobj-js>

Obrigado!!!

Se interessou pelo assunto e quer fazer pesquisa na área?

Nos contacte!

Alexandro Baldassin - `alexandro.baldassin@unesp.br`

Emilio Francesquini - `e.francesquini@ufabc.edu.br`