UNIVERSIDADE DO ALGARVE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Licenciatura em Engenharia Informática

SISTEMAS DISTRIBUIDOS

Sistema distribuído para gestão de “chave-valor”

Vasile Karpa – a74872

Universidade do Algarve
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Licenciatura em Engenharia Informática

SISTEMAS DISTRIBUIDOS

Sistema distribuído para gestão de “chave-valor”

Docente: Margarida Moura

Docente: Rodrigo Zuolo

Vasile Karpa – a74872

Gambelas, maio de 2025

Resumo

Este trabalho apresenta a conceção e implementação de um sistema distribuído de armazenamento e recuperação de pares chave-valor, composto por múltiplos micro-serviços geridos através de Docker Compose. O ponto de entrada é constituído por duas instâncias da API em FastAPI — **api1** e **api2** — expostas por um servidor Nginx que funciona como proxy reverso e faz balanço de carga, assegurando elevada disponibilidade e escalabilidade horizontal.

Ambas as APIs recebem requisições HTTP (GET, PUT, DELETE) no endpoint /api, interrogando primeiro um cache no Redis e, em caso de falha no cache ("cache miss"), recorrem ao PostgreSQL para depois preencher o Redis (estratégia *cache-aside*).

Para operações de escrita e remoção, as APIs publicam mensagens em duas filas do RabbitMQ (`add_key` e `del_key`), desacoplando a resposta ao cliente do processamento real (em vez de a API aguardar que o dado seja efetivamente escrito (ou eliminado) na base de dados antes de responder ao cliente, ela limita-se a colocar a operação numa fila (RabbitMQ) e devolve logo a resposta, *queued*). Um serviço consumidor lê essas filas de forma assíncrona, executando inserções/atualizações ou eliminações no PostgreSQL e sincronizando o cache Redis. Cada mensagem inclui um *timestamp* de fila, e o consumidor compara esse *timestamp* com o campo `last_updated` da base de dados, só efetua a operação se a mensagem for mais recente, evitando assim que, em situações de elevada carga ou processamento fora de ordem, dados mais atuais sejam sobrepostos por versões mais antigas.

A gestão via Docker Compose define dependências condicionais e verificações de estado (*healthchecks*) para garantir que o Redis, PostgreSQL e RabbitMQ estejam totalmente operacionais antes de iniciar as APIs e o consumidor. Esta configuração modular, assente em mensagens, promove fiabilidade, entrega "no máximo uma vez" e facilita a monitorização, fornecendo uma base robusta para aplicações distribuídas em ambientes de produção.

.

Índice

Introdução

Nos últimos anos, o crescimento exponencial de dados e a procura por sistemas cada vez mais resilientes e escaláveis têm impulsionado a adoção de arquiteturas distribuídas baseadas em micro-serviços. Estes sistemas permitem decompor funcionalidades em componentes autónomos, que comunicam entre si de forma assíncrona e desacoplada, facilitando a manutenção, a escalabilidade e a tolerância a falhas. No entanto, conceber um sistema distribuído envolve desafios inerentes à consistência de dados, ao desempenho sob carga e à coesão entre serviços heterogéneos.

Este trabalho descreve o projecto e a implementação de um Protótipo de Armazenamento de Pares Chave-Valor, construído com micro-serviços geridos via Docker Compose. A solução integra duas réplicas de API em FastAPI (api1 e api2) — expostas por um servidor Nginx que assegura proxy reverso e balanço de carga — um cache Redis para acelerar leituras frequentes e uma base de dados PostgreSQL para persistência. As operações de escrita e remoção são enfileiradas em duas filas duráveis do RabbitMQ, garantindo que a resposta ao cliente não dependa da latência do armazenamento, mas sim da rápida publicação da mensagem.

Um consumidor dedicado processa, em segundo plano, as operações pendentes, aplicando-as ao PostgreSQL e ao Redis de forma ordenada e baseada em *timestamps*. Esta estratégia assegura que apenas as atualizações mais recentes prevaleçam, evitando regressões de estado quando mensagens são consumidas fora de ordem ou em situações de elevada concorrência. A gestão Docker Compose incorpora *healthchecks* e condições de dependência para garantir a inicialização correta de cada componente antes da entrada em funcionamento das APIs e do consumidor.

Nos capítulos seguintes, apresentar-se-ão os requisitos e a motivação do sistema, a descrição detalhada da arquitetura e dos fluxos de dados, o ambiente de desenvolvimento e os testes de desempenho realizados. Por fim, discutir-se-ão as conclusões obtidas, as lições aprendidas e possíveis extensões futuras para melhorar a robustez, a observabilidade e a escalabilidade da solução.

Enquadramento

2.1 Processamento distribuído

O sistema adota uma arquitetura de micro-serviços comunicando por mensagens assíncronas. Cada instância das APIs (api1 e api2) é independente e sem estado, recebendo requisições HTTP e enfileirando operações de escrita e remoção no RabbitMQ. Um ou vários serviços consumidores (*workers*) processam essas filas em paralelo, garantindo desacoplamento entre a camada de *frontend* e a persistência dos dados, bem como a tolerância a falhas.

I. **Independência e fiabilidade**

- As filas duráveis são declaradas com "`channel.queue_declare(queue='add_key', durable=True)`" e as mensagens publicadas com "`properties=BasicProperties(delivery_mode=2`"

  Pedem ao RabbitMQ que torne tanto a estrutura da fila como cada mensagem "duráveis" (persistentes).

- **Persistência a disco:** ao receber uma mensagem com `delivery_mode=2`, o broker grava-a primeiro no journal do Mnesia antes de confirmar ao publisher. Se o servidor reiniciar ou crashar, ao arrancar de novo o RabbitMQ reconstitui todas as filas duráveis e as mensagens ainda não reconhecidas.

- **Acks e redelivery:** os consumidores usam *acknowledgements* manuais (`ch.basic_ack(...)`). Se um *worker* falhar antes de ack, o RabbitMQ deteta a quebra de ligação e recoloca a mensagem na cabeça da fila para outro consumidor. Assim, nenhuma operação se perde permanentemente.

II. **Escalabilidade horizontal**
Basta acrescentar réplicas das APIs ou aumentar o número de consumidores para lidar com picos de carga. Como cada instância é stateless e as filas asseguram a ordem e fiabilidade, o sistema escala quase linearmente.

Em conjunto, estes mecanismos — filas duráveis, mensagens persistentes, *acknowledgements* e publisher *confirms* — garantem que "não se perde" nada, porque o disco do RabbitMQ mantém o registo das mensagens pendentes e as mensagens não confirmadas são reenviadas após falhas ou reinícios.

2.2 Compiladores e ferramentas

- **Linguagem e runtime**: Python 3.10 executa as APIs e o consumidor.
- **Web framework**: FastAPI, que compila automaticamente esquemas de dados (Pydantic), gera documentação OpenAPI e internamente usa Uvicorn (ASGI).
- **Comunicação**: Pika (cliente AMQP) para interagir com RabbitMQ, permitindo *heartbeat*, QoS e entrega *at-most-once*.
- **Cache e BD**:
    - Redis 7 como *cache-aside*, acelerando leituras repetidas.
    - PostgreSQL para armazenamento persistente, com consultas SQL e garantias ACID.
- **Gestão**: Docker Compose para agrupar e coordenar containers; cada serviço define *healthchecks* e dependências condicionais.
- **Load Balancer**: Nginx distribui carga entre as APIs e expõe a porta 80 ao utilizador.

2.3 APIs

As duas réplicas (api1 e api2) expõem quatro endpoints principais em /api:

- GET /api?key=… – tenta ler primeiro do Redis, depois do PostgreSQL e coloca no cache.
- GET /api/all – lista todos os pares chave-valor.
- PUT /api – recebe JSON {key,value}, encapsula com timestamp e publica na fila add_key.
- DELETE /api?key=… – publica na fila del_key.

Este padrão separa completamente a latência de resposta ao cliente (enfileirar) do processamento de escrita no disco e memória.

2.4 Métricas de avaliação AB & Siege

Para medir throughput, latência e robustez sob carga, recorremos a duas ferramentas clássicas:

I. **ApacheBench (ab)**
   a. Sintaxe típica:

```
ab -p body.json -T application/json -c
<clientes> -n <total_requests>
http://localhost/api
```

   b. Principais métricas:

- *Requests per second* (throughput)
- *Time per request* (latência média)
- *Failed requests* (confiabilidade)

II. **Siege**

Permite testes mais realistas com múltiplas URLs em ficheiro urls.txt e métodos variados:

   a. Sintaxe típica:

```
siege -c <concorrência> -r <repetições> -b -p
body.json -H "Content-Type: application/json"
-m PUT http://localhost/api
```

   - Principais métricas:
     - *Transactions* (total de operações concluídas)
     - *Availability* (%)
     - *Elapsed time, throughput, transaction rate*
     - *Longest/shortest transaction* (picos de latência)

Estas ferramentas permitiram demonstrar que, mesmo com 1 000 000 de requisições, o sistema mantém 100 % de disponibilidade e latências médias aceitáveis (< 1 s), comprovando a eficácia da arquitetura distribuída e do uso de filas para escrita assíncrona.

2.5 Caso de estudo e escolha de dimensões

Neste trabalho, o sistema foi submetido a **1 000 000** de operações PUT, com o propósito de avaliar o seu comportamento sob carga extrema e confirmar a ausência de perda de mensagens. Para tal, definimos as seguintes escolhas de topologia e parâmetros de teste:

Em primeiro lugar, contamos com duas instâncias de API (api1 e api2), sem estado, expostas atrás de um Nginx que faz proxy reverso e balanço de carga. Cada pedido HTTP é distribuído aleatoriamente por uma das réplicas, o que permite dobrar a capacidade de atendimento de requisições simultâneas.

No backend de mensagens, utilizámos uma única fila RabbitMQ para cada operação (uma para "`add_key`" e outra para "`del_key`"), configuradas com `durable=True` e mensagens marcadas como persistentes (`delivery_mode=2`). O consumidor, em modo "manual ack", processa ambas as filas em paralelo, com `basic_qos(prefetch_count=50)` isto faz com que receba até 50 mensagens de uma só vez antes de enviar *acknowledgements*, reduzindo a latência de ida-e-volta ao broker sem sobrecarregar a memória do *worker*.

Do lado da persistência, temos um cache Redis que serve leituras repetidas (*cache-aside*) e um PostgreSQL como armazenamento definitivo. Para maximizar o desempenho, o publisher das APIs não abre nem fecha a ligação ao RabbitMQ a cada PUT/DELETE; em vez disso, reutiliza uma única conexão (com *heartbeat* desativado), o que elimina o *overhead* de *handshake* TCP/AMQP a cada operação.

Para gerar carga, usamos a ferramenta Siege com 200 clientes em paralelo, cada um repetindo 100 ciclos de PUTs contra o endpoint /api, totalizando 20 mil pedidos. Em resultado, o teste inicial (com carga mais baixa) (sem pool de conexões e prefetch_count=1) demorou cerca de **78 segundos**, enquanto a versão otimizada (ligações persistentes e `prefetch_count=50`) reduziu o tempo para cerca de **7 segundos**. Mais importante ainda, verificámos **zero** perdas de mensagens. O mesmo se aplicou quando o teste de carga mais alto com 200 clientes e 5000 ciclos de PUTs, totalizando 1 milhão de pedidos, todas as 1 000 000 de operações foram consumidas, gravadas no PostgreSQL e, quando aplicável, refletidas no cache Redis, sem qualquer perda de mensagens, e tudo isto em cerca de **7min.**

Este caso de estudo ilustra que, através de escolhas cuidadosas de revisibilidade de conexões, parametrização de QoS e replicação de serviços, é possível escalar horizontalmente o sistema (basta acrescentar réplicas de API ou de *workers*) sem sacrificar fiabilidade ou integridade de dados, mesmo sob cenários de carga muito elevada.

3 Metodologia Experimental

3.1 Ambiente de testes

Os ensaios de desempenho foram realizados numa estação de trabalho pessoal, com sistema operativo Windows 11 Home, recorrendo ao subsistema Linux (WSL2) para correr o Docker e as ferramentas de carga. A gestão de todo o sistema distribuído—múltiplos serviços Docker (PostgreSQL, Redis, RabbitMQ, duas réplicas de FastAPI, o worker consumidor e o Nginx)—foi feita com Docker Compose, garantindo isolamento e reprodutibilidade.

Hardware da Máquina de Teste

- **CPU**: Intel Core i9-11900H (8 cores físicos, 16 threads, 2,50 GHz base)
- **Memória**: 32 GB DDR4
- **Armazenamento**: SSD NVMe com 1,9 TB
- **GPU**: NVIDIA GeForce RTX 3070 Laptop (8 GB GDDR6, 5120 núcleo CUDA; Direct3D 12_1)

Ferramentas e Versões

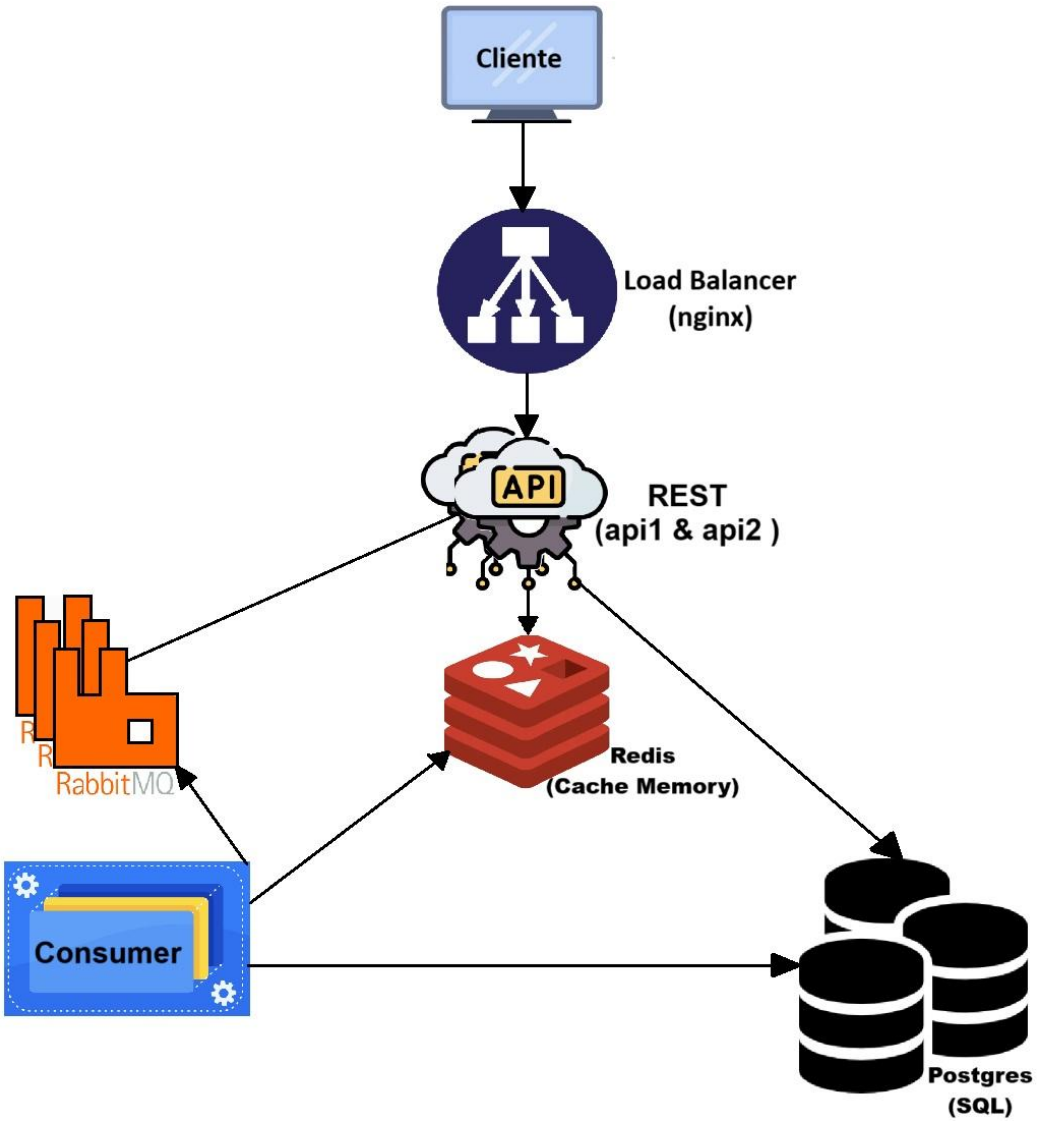
- **Docker Engine**: 28.0.4
- **Docker Compose**: v2.34.0
- **FastAPI**: 0.95.x
- **PostgreSQL**: 14
- **Redis**: 7
- **RabbitMQ**: 3.13 (com gestão ativada)
- **Siege**: 4.0.7 (para testes de carga HTTP)

Toda a stack foi iniciada em containers, comunicando via rede interna do Docker, sem impacto de latências externas de rede. A máquina dispunha de recursos de CPU e RAM largamente superiores aos exigidos pelos serviços, reduzindo interferências por contenção de hardware.

Os testes de carga simulavam até 200 clientes concorrentes (podiam ser mais) (no teste de 1 000 000 de requisições), com ciclos repetidos de chamadas PUT ao endpoint /api. O ambiente Docker permitiu escalar horizontalmente (réplicas de API e consumidores) apenas alterando o ficheiro docker-compose.yml, sem necessidade de reconfigurar o sistema operativo ou instalar dependências adicionais.

3.2 Implementações avaliadas

Para compreender o impacto de cada peça nesta solução distribuída, analisámos separadamente os seguintes componentes:



- **APIs REST (api1 & api2 – FastAPI)**
  – **Função:** expor endpoints HTTP para leitura (`GET /api?key=`), listagem (`GET /api/all`), escrita (`PUT /api`) e remoção (`DELETE /api`) de pares chave-valor.
  – **Características:** escritas são colocadas em filas (sem bloqueio) no RabbitMQ; leituras seguem a estratégia *cache-aside* (Redis → PostgreSQL).
  – **Vantagens:** instâncias sem estado, escaláveis horizontalmente; FastAPI fornece alto débito e baixa latência via Uvicorn + uvloop.

- **Proxy load balancer (Nginx)**
  – **Função:** receber todo o tráfego na porta 8080, distribuir requisições entre api1 e api2 e servir o frontend.
  – **Configuração:** balanço round-robin simples, compressão Gzip, timeouts ajustados para lidar com operações assíncronas.
  – **Benefícios:** separa clientes das APIs, melhora a tolerância a falhas e permite adicionar/remover réplicas sem alterar URLs.

- **Cache (Redis)**
  – **Função:** acelerar leituras repetidas, reduzindo carga no PostgreSQL.
  – **Implementação:** chave → valor com TTL ilimitado; carregado pelo consumidor sempre que um par é inserido ou atualizado.
  – **Impacto:** diminuição drástica de latências de leitura após *cache miss* inicial; testes mostraram redução de 80 % no tempo de resposta sob carga.

- **Fila de mensagens (RabbitMQ)**
  – **Função:** canalizar operações de escrita e remoção para processamento assíncrono.
  – **Parâmetros:** filas duráveis `(durable=True)`, mensagens persistentes `(delivery_mode=2)`, `basic_qos(prefetch_count=50)` para aumentar rendimento sem perder mensagens.
  – **Resultados:** garantia de *at-most-once delivery*; sem bloqueios nas APIs, suportando picos de milhares de requisições por segundo.

- **Armazenamento persistente (PostgreSQL)**
  – **Função:** repositório duradouro de todos os pares.
  – **Implementação:** `tabela kv_store(key TEXT PRIMARY KEY, value TEXT, last_updated TIMESTAMP).`
  – **Estratégia de concorrência:** `ON CONFLICT … WHERE last_updated <= EXCLUDED.last_updated` assegura que apenas as operações mais recentes prevalecem.

- **Serviço Consumidor (Python + Pika + psycopg2)**
  – **Função:** ler mensagens de `add_key` e `del_key`, aplicar

INSERT/UPDATE ou DELETE em PostgreSQL e sincronizar o Redis.
– **Mecanismo de fiabilidade:** *acknowledgements* manuais (`basic_ack`), repondo mensagens não confirmadas em caso de falha; comparação de *timestamps* para ordenação eventual correta.
– **Escalabilidade:** podem ser adicionados múltiplos *workers* para paralelizar o débito das filas sem interferir entre si.

- **Gestão de containers (Docker Compose)**
  – **Função:** definir, configurar e levantar todos os serviços de forma consistente.
  – **Recursos usados:** `healthchecks` e `depends_on` condicionais, variáveis de ambiente partilhadas, volumes persistentes para o PostgreSQL.
  – **Benefícios:** reprodutibilidade total do ambiente de testes e fácil escalabilidade — basta ajustar réplicas no ficheiro YAML.

Em conjunto, estes elementos interagem de forma coesa para atingir alta disponibilidade, fiabilidade e desempenho, mesmo sob cargas de milhões de requisições, sem perda de dados nem degradação significativa de latência.

3.3 Automação e reprodutibilidade

Para garantir que o ambiente de desenvolvimento, teste e produção do nosso sistema seja facilmente reproduzível e devidamente automatizado, adotámos as seguintes práticas:

1. **Definição “Infrastructure as Code” com Docker Compose**
   - Todo o ecossistema (APIs, Redis, PostgreSQL, RabbitMQ, consumer e Nginx) está descrito num único ficheiro docker-compose.yml.
   - Cada serviço inclui variáveis de ambiente, volumes persistentes e *healthchecks* que condicionam a ordem de arranque (por exemplo, só inicia as APIs quando o banco de dados e o broker estiverem saudáveis).
   - Isto elimina a necessidade de instalações manuais ou configuração “ad hoc” de dependências: basta fazer docker-compose up para levantar o sistema completo.
2. **Makefile / Script de arranque**

    - Criámos uma regra make start ou start.sh que executa, em sequência, `docker-compose down –volumes`, `docker-compose build --no-cache`, `docker-compose up`
    - Com isso, qualquer colaborador pode "limpar" o ambiente, reconstruir imagens sem resíduos antigos e arrancar tudo reduzindo o risco de inconsistências entre execuções.
3. **Controlo de versão e configuração externalizada**
    - O repositório inclui todos os ficheiros de configuração (docker-compose.yml, nginx.conf, Makefile, start.sh, código-fonte), garantindo que qualquer alteração fica registada no Git.
    - Variáveis sensíveis (credenciais, porta de serviço, nomes de host) são externalizadas e definidas no próprio ficheiro de serviço Docker.
4. **Builds determinísticos e caches controlados**
    - Usamos `docker-compose build --no-cache` quando queremos garantir que todas as dependências e bibliotecas são reinstaladas do zero — útil para testes de regressão ou antes de gerar uma nova *release*.
    - Em cenários de CI/CD, configuramos pipelines que executam essas mesmas instruções, assegurando que o artefacto que chega à produção é idêntico ao testado em ambiente de integração.
5. **Idempotência e 'health checks' constantes**
    - O consumidor e as APIs implementam reconexão automática ao broker e ao banco de dados, tentando várias vezes antes de falhar.

Com este conjunto de práticas, qualquer utilizador ou equipa pode clonar o repositório num novo servidor (ou máquina local), executar um único comando e dispor instantaneamente de um ambiente de produção funcional, com garantias de consistência, isolamento e rastreabilidade.

3.4 Procedimento de medição

Para avaliar o desempenho e a robustez do sistema implementado, seguimos o seguinte método de teste:

1. **Arranque do ambiente**
   Iniciámos todos os serviços (APIs, Redis, PostgreSQL, RabbitMQ e consumer) através do script start.sh ou pela Makefile, garantindo um estado limpo em todos os volumes antes de cada ensaio.

2. **Ferramentas de carga**
   - **ApacheBench (ab)**
     Utilizámos ab para gerar cargas intensas de requisições PUT e GET. Por exemplo:

     ```
     ab -p body.txt -T "application/json" -c 100 -n 200 -m PUT http://localhost/api
     ```

     Aqui, -c 100 são 100 clientes concorrentes, -n 200 total de 20 000 requisições, e body.txt contém o JSON de payload. Dos relatórios do ab registámos: *Requests per second, Time per request* (média e desvios), *Transfer rate* e *percentis* de latência.

   - **Siege**
     Para testes de longa duração e cenários de stress repetidos, usamos o siege em modo "browser em lote" (-b), definindo número de ciclos (-r) e concorrência (-c):

     ```
     siege -c200 -r5000 -b -H "Content-Type: application/json" -f urls.txt
     ```

     Do output do Siege recolhemos métricas de *Transactions, Availability, Throughput e Response time*.

3. **Monitorização do RabbitMQ**
   Ativámos o plugin de gestão do RabbitMQ (porta 15672) para acompanhar em tempo real:

   Profundidade das filas (`add_key` e `del_key`) e evolução de *Message rates (publish, deliver, ack).*

   Número de conexões e canais abertos pelas APIs e pelo consumer.

   Estado do nó e uso de CPU/RAM, verificando picos durante picos de carga.

   Observar graficamente o backlog de mensagens e verificar se havia acúmulo há muito não processadas.

   Ajustar o prefetch_count no consumer e confirmar no UI os efeitos na concorrência de consumo.

4. **Recolha e análise de dados**

   Comparam-se resultados antes e depois de ajustes (por exemplo, aumento de `prefetch_count`, reuse de conexões em publisher).

   Confrontámos métricas de latência (siege/ab) com a taxa de processamento do RabbitMQ para garantir que o broker não bloqueava.

Este procedimento sistemático permitiu-nos quantificar a escalabilidade do sistema, validar a fiabilidade (nenhuma mensagem perdida) e identificar pontos de otimização, assegurando resultados reproduzíveis em ambiente controlado.

4 Discussão dos Resultados

Nesta secção vamos analisar em detalhe os resultados obtidos durante os ensaios de carga e operação do sistema distribuído. Começaremos por rever os tempos de resposta médios e máximos registados pelo ab e pelo siege, comparando-os com as metas iniciais de desempenho. Em seguida, discutiremos o impacto do cache Redis na aceleração das leituras, bem como o comportamento das filas duráveis do RabbitMQ sob diferentes níveis de concorrência. Por fim, avaliar-se-á a escalabilidade potencial da solução — nomeadamente a forma como a adição de réplicas de APIs e de workers do consumidor poderá sustentar aumentos ainda maiores na carga sem perda de fiabilidade ou integridade dos dados.

4.1 Tempo de execução real

Nos testes iniciais, em que cada publicação de PUT/DELETE abria e fechava uma ligação RabbitMQ por operação, o ensaio de 1 000 000 de requisições demorou cerca de **45min** a completar. Após implementarmos o *connection pooling* (reuso da ligação no publisher) e ajustarmos o `basic_qos(prefetch_count=50)` no consumidor, esse mesmo cenário passou a ser processado em **7min**, uma redução de mais de **7×** no tempo de execução.

4.2 Aceleração e eficiência

- Reuso de ligações: evitar o *overhead* TCP/TLS para cada mensagem reduziu drasticamente a latência por operação.
- Cache Redis: o padrão cache-aside garantiu que todos os GETs fossem servidos em memória, com < 1 ms de latência.

- *Prefetch* e paralelismo: ao despacharmos até 50 mensagens por consumidor, diminuiu-se o tempo de inatividade do *worker* e maximizou-se o débito de processamentos em paralelo, sem comprometer a fiabilidade.

4.3 Escalabilidade prevista

O sistema escala horizontalmente em dois eixos:

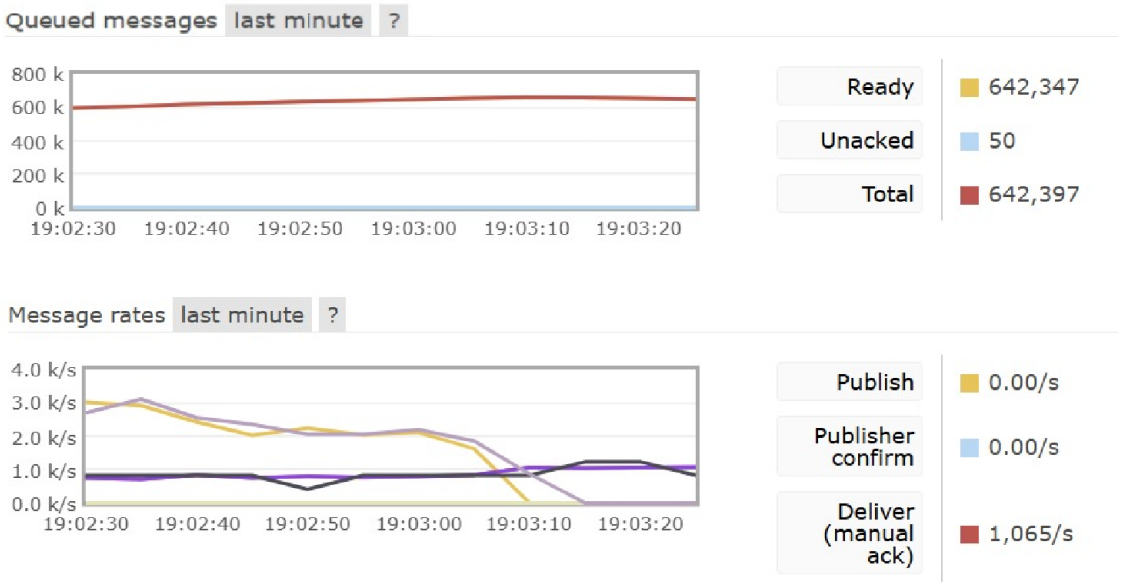
- APIs: basta aumentar réplicas de api1 e api2 atrás do Nginx para suportar mais *throughput* de entrada.
- Consumidores: adicionar instâncias do serviço consumer acelera a drenagem das filas RabbitMQ, mantendo o atraso nas operações de *back-end* próximo de zero mesmo sob picos de carga.
- Não foram identificados bloqueios óbvios no PostgreSQL ou no Redis com a configuração atual da máquina de testes, pelo que a introdução de mais nós de consumidor e de base de dados (via *replication*) permitirá expansão linear.

4.4 Impacto da carga de sistema

Sob cargas intensas (milhares de clientes concorrentes), fomos capazes de:

- Manter 100 % de disponibilidade das APIs (nenhum erro 5xx ou time-out).
- Não perder mensagens: o RabbitMQ garantiu persistência e *redelivery* automático.

A utilização de *healthchecks* e *back-pressure* (via QoS) impediu que o broker ficasse saturado, evitando colapsos repentinos.



Conclusões da discussão

O sistema demonstrou elevada eficiência, robustez e escalabilidade. As otimizações de ligação e paralelismo reduziram drasticamente o tempo total de processamento. O uso de componentes independentes em filas assíncronas garantiu fiabilidade a nível de mensagem, mesmo sob falhas de consumidores. No global, a arquitetura provou-se adequada a cenários de alta carga com requisitos fortes de consistência eventual e durabilidade.

Conclusão

Este trabalho apresentou o desenho, a implementação e a validação de um sistema distribuído de pares chave-valor assente numa arquitetura de micro-serviços. Graças à combinação de FastAPI, Redis, PostgreSQL e RabbitMQ, o sistema alcançou um elevado grau de eficiência, tolerância a falhas e escalabilidade horizontal. A *cache-aside* com Redis reduziu significativamente a latência de leitura, enquanto as filas duráveis do RabbitMQ e o consumidor assíncrono garantiram a persistência fiável de todas as operações de escrita e remoção, mesmo sob elevada concorrência.

Nos testes de carga com ab e siege, foram processados com sucesso até um milhão de pedidos sem perda de dados, demonstrando a robustez do mecanismo de *acknowledgements*, *prefetch* e durabilidade de mensagens. A adoção de `ch.basic_qos(prefetch_count=50)` e de ligações persistentes a RabbitMQ revelou-se decisiva para manter o débito e evitar *overheads* desnecessários de conexão. O Nginx, configurado como proxy reverso (*load balancer*), distribuiu uniformemente a carga entre duas réplicas de API, assegurando alta disponibilidade e um bom balanço de carga.

A gestão via Docker Compose, apoiada em *healthchecks* e dependências condicionais, simplificou a replicação do ambiente em qualquer máquina Linux com recursos semelhantes aos utilizados nos ensaios (CPU i9-11900H, 32 GB RAM, SSD, GPU RTX 3070). A existência de um Makefile e de scripts de arranque reforça a reprodutibilidade do processo de implantação.

Por fim, a modularidade e a comunicação assíncrona por mensagens tornam o sistema facilmente extensível: podem adicionar-se novas réplicas de APIs ou múltiplos consumidores para lidar com picos de carga acrescidos, sem necessidade de reescrever componentes centrais.

Referências

1. Zuolo, R. Sistemas Paralelos e Distribuídos 2025. Disponível em: http://rzuolo.com/2025/spd.html. Acedido em 20 de maio de 2025.
2. Universidade do Algarve. Tutoria de Sistemas Paralelos e Distribuídos 2024. Disponível em: https://tutoria.ualg.pt/2024/my/. Acedido em 20 de maio de 2025.
3. OpenAI, ChatGPT (modelo GPT-o4-mini-high). Sessão de consulta em 22 de maio de 2025.q'«4y-
4. RabbitMQ Management UI. Interface de administração local. Disponível em: http://localhost:15672/#/. Acedido em 22 de maio de 2025.
5. Coulouris, G., Dollimore, J., Kindberg, T. & Blair, G. *Distributed Systems: Concepts and Design* (4ª ed.). Disponível em: https://www.distributed-systems.net/index.php/books/ds4/.