



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Edició col·laborativa

Document:

Memòria

Autor/Autora:

Nom Cognom Cognom

Director/a - Codirector/a:

Nom Cognom Cognom

Titulació:

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Convocatòria:

Primavera 2026

TREBALL DE FI D'ESTUDIS

Abstract

Aquest treball compara dos enfocaments de la sincronització de documents en l'edició col·laborativa en temps real, la transformació operacional i els tipus de dades replicades sense conflictes, i els avalua en un prototip d'editor web. Els resultats mostren que els tipus de dades replicades sense conflictes permeten un servidor més senzill i una latència menor quan treballen molts usuaris alhora.

This thesis compares two approaches to synchronising documents in real-time collaborative editing, operational transformation and conflict-free replicated data types, and evaluates them in a prototype web editor. The results show that conflict-free replicated data types allow a simpler server and a lower latency when many users work at the same time.

Declaració d'ús d'eines d'intel·ligència artificial generativa

En aquest treball no s'ha fet servir cap eina d'intel·ligència artificial generativa.

Si se n'ha fet servir alguna, cal indicar quina eina i quina versió, amb quina finalitat, en quines parts del treball i com s'ha revisat el resultat, i declarar que l'autor o l'autora assumeix la responsabilitat del contingut del treball.

Índex

Introducció	1
1 Edició col·laborativa de documents	2
1.1 Requisits del sistema	3
2 Enfocaments de sincronització	4
2.1 Transformació operacional	4
2.1.1 Funció de transformació	4
2.2 Tipus de dades replicats lliures de conflictes	4
3 Disseny i implementació	6
3.1 Emmagatzematge de l'historial	6
4 Avaluació	7
4.1 Discussió dels resultats	8
Conclusions	9

Llista de figures

Figura 1.4.1	Envolupament típic de l'escriptura col·laborativa d'un document	2
Figura 1.4.2	Nombre de modificacions per dia de la setmana i hora en les sessions analitzades	8

Llista de taules

Taula 4.1	Idències mitjana i mida de les dades emmagatzemades segons el nombre d'usuaris	7
-----------	--	---

Llista d'abreviatures

CRDT	Tipus de dades replicades sense conflictes (<i>conflict-free replicated data type</i>)
OT	Transformació operacional (<i>operational transformation</i>)
TFE	Treball de fi d'estudis

Introducció

Avui dia, els documents de text rarament són obra d'un sol autor. Els estudiants redacten els treballs de curs en parella, els desenvolupadors mantenen conjuntament la documentació tècnica i els equips de recerca enllesteixen els articles a l'últim moment des de diversos llocs alhora. Perquè aquesta mena d'escriptura funcioni, l'editor ha de garantir que tots els participants vegin el mateix text i que no es perdi cap modificació.

L'objectiu d'aquest treball és comparar els dos enfocaments principals per a la sincronització de documents en l'edició col·laborativa en temps real, la transformació operacional i els tipus de dades replicats lliures de conflictes, i validar-los en un prototip d'editor web. El primer capítol delimita els requisits d'un sistema d'aquest tipus, el segon descriu tots dos enfocaments, el tercer el disseny del prototip i el quart els resultats de les mesures.

Capítol 1

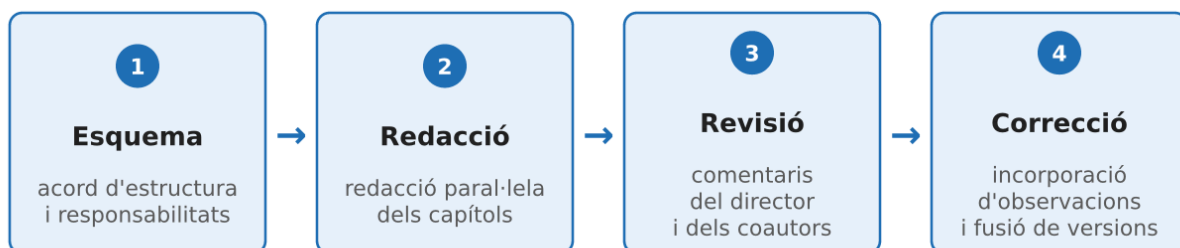
Edició col·laborativa de documents

Per edició col·laborativa entenem la situació en què diversos usuaris modifiquen el mateix document i els seus canvis es propaguen mútuament sense fusió manual. Segons la rapidesa amb què es propaguen els canvis, distingim tres modes de treball bàsics:

- **edició asíncrona**, en què els autors s'intercanvien versions completes del document i no les fusionen fins més tard;
- **edició amb bloquejos**, en què només un autor alhora pot modificar una part determinada del document;
- **edició en temps real**, en què cada canvi es reflecteix immediatament als altres usuaris.

Aquest treball s'ocupa exclusivament de l'últim mode. És el més còmode per als usuaris, però és el que imposa més exigències al disseny del sistema, ja que els canvis sorgeixen simultàniament en molts llocs i arriben en un ordre diferent.

D'altra banda, l'edició en temps real no només canvia la tècnica, sinó també el desenvolupament de tota la col·laboració. El procés típic d'escriptura col·laborativa, tal com el van descriure els usuaris entrevistats, es recull a la Figura 1.1.



els passos 2 a 4 es repeteixen mentre la revisió aporti observacions substancials

Figura 1.1: Desenvolupament típic de l'escriptura col·laborativa d'un document

1.1 Requisites del sistema

A partir d'entrevistes amb usuaris d'editors existents i de la bibliografia especialitzada, hem derivat quatre requisits que ha de complir un sistema d'edició col·laborativa:

1. convergència, és a dir, un cop lliurats tots els canvis, totes les còpies del document tenen el mateix contingut;
2. preservació de la intenció, és a dir, el resultat d'una modificació correspon al que l'autor veia en el moment de fer-la;
3. capacitat de resposta, és a dir, una modificació local es reflecteix immediatament sense esperar el servidor;
4. robustesa, és a dir, una interrupció breu de la connexió no comporta la pèrdua del text a mig escriure.

Els dos primers requisits fan referència a la correcció i els dos restants, a la usabilitat. A la pràctica es constata que precisament la combinació de resposta immediata i convergència garantida és la part més difícil de tot el disseny.

Capítol 2

Enfocaments de sincronització

Els sistemes d'edició col·laborativa en temps real apliquen primer cada canvi localment i només després el difonen als altres participants. Es diferencien sobretot en la manera com resolen la situació en què dos canvis sorgeixen simultàniament i cada participant els rep en un ordre diferent.

2.1 Transformació operacional

La transformació operacional parteix del treball d'Ellis i Gibbs [1], que van ser els primers a descriure com cal ajustar una operació concurrent perquè es pugui executar fins i tot després d'una altra operació que el seu autor desconeixia. Cada modificació es registra com una operació d'inserció o d'esborrament en una posició determinada del text.

Si, per exemple, un usuari insereix una paraula al principi d'un paràgraf i un altre n'esborra simultàniament una al final, la posició de l'esborrament s'ha de desplaçar tants caràcters com tingui la paraula inserida. Aquest desplaçament el calcula la funció de transformació.

2.1.1 Funció de transformació

La funció de transformació rep un parell d'operacions concurrents i en retorna les versions ajustades. Perquè totes les còpies del document convergeixin, la funció ha de complir les anomenades propietats de transformació, el compliment de les quals és difícil de demostrar per a operacions generals. Per això, la majoria dels sistemes desplegats es basen en un servidor central que determina un ordre únic de les operacions.

2.2 Tipus de dades replicats lliures de conflictes

El segon enfocament el constitueixen els tipus de dades replicats lliures de conflictes, designats conjuntament amb la sigla CRDT [2]. En lloc d'ajustar les operacions a posteriori, opta per una representació del document en què les operacions concurrents commuten i el seu ordre no influeix en el resultat.

Un tipus de dades replicat és lliure de conflictes si dues rèpliques qualssevol que han rebut el mateix conjunt d'actualitzacions tenen el mateix estat, independentment de l'ordre en què se'ls han lliurat.

Cada caràcter del document rep un identificador únic que es manté invariable durant tota l'existència del caràcter. Així, la posició d'inserció no es determina mitjançant un número, sinó mitjançant una referència a l'identificador del caràcter veí, de manera que les modificacions concurrents en altres parts del text no la poden desplaçar.

Capítol 3

Disseny i implementació

El prototip de l'editor consta d'un client web, un servidor de sincronització i una base de dades en què el servidor desa contínuament l'estat dels documents. Tant el client com el servidor estan escrits de manera que es pugui substituir la capa de sincronització i comparar tots dos enfocaments descrits sobre la mateixa interfície d'usuari.

El client manté una rèplica local del document i converteix cada modificació de l'usuari en una operació sobre el tipus de dades replicat. Les operacions s'envien al servidor per lots, per no saturar la xarxa durant una escriptura ràpida. El llistat següent mostra el processament simplificat d'un lot entrant al servidor:

```
def processar_lot(document, lot):  
    for operacio in lot.operacions:  
        if operacio.id in document.aplicades:  
            continue  
        document.aplicar(operacio)  
        document.aplicades.add(operacio.id)  
    difondre_als_altres(document.id, lot)
```

Com que les operacions commuten, el servidor no necessita ordenar ni transformar els lots. N'hi ha prou que garanteixi que cap operació no s'executi dues vegades i que cada lot arribi a tots els clients connectats.

3.1 Emmagatzematge de l'historial

El servidor no desa només el text resultant, sinó tot el registre d'operacions. A partir del registre es pot restaurar qualsevol versió anterior del document i reconstruir l'estat de la rèplica d'un client que ha estat desconnectat durant molt de temps. Aquest enfocament correspon a una arquitectura basada en un registre immutable d'esdeveniments, tal com la descriu Kleppmann [3]. Perquè el registre no creixi indefinidament, el servidor el compacta a intervals regulars en instantànies.

Capítol 4

Avaluació

Hem comparat el prototip amb una implementació de referència de la transformació operacional sobre un conjunt d'enregistraments de sessions d'edició reals. Per a cada sessió hem mesurat la latència, és a dir, el temps entre una modificació a l'equip de l'autor i la seva visualització als dels altres participants, i hem calculat la latència mitjana de la sessió segons (4.1):

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i^{\text{lliurament}} - t_i^{\text{modificació}}) \quad (4.1)$$

on n és el nombre d'operacions de la sessió. Els valors mesurats per a diferents nombres d'usuaris que treballen simultàniament es resumeixen a la Taula 4.1.

Taula 4.1: Latència mitjana i mida de les dades emmagatzemades segons el nombre d'usuaris

Usuaris	Latència OT (ms)	Latència CRDT (ms)	Dades (kB)
2	38	35	12
5	52	41	19
10	87	48	31
20	164	63	58

A mesura que augmenta el nombre d'usuaris, la latència de la transformació operacional creix molt més de pressa, ja que el servidor ha de transformar cada operació respecte de totes les operacions concurrents. El preu de la latència més baixa dels CRDT és un volum més gran de dades emmagatzemades, perquè cada caràcter porta el seu identificador. La distribució temporal de les modificacions, en què es basa la prova de càrrega, es mostra a la Figura 4.1.

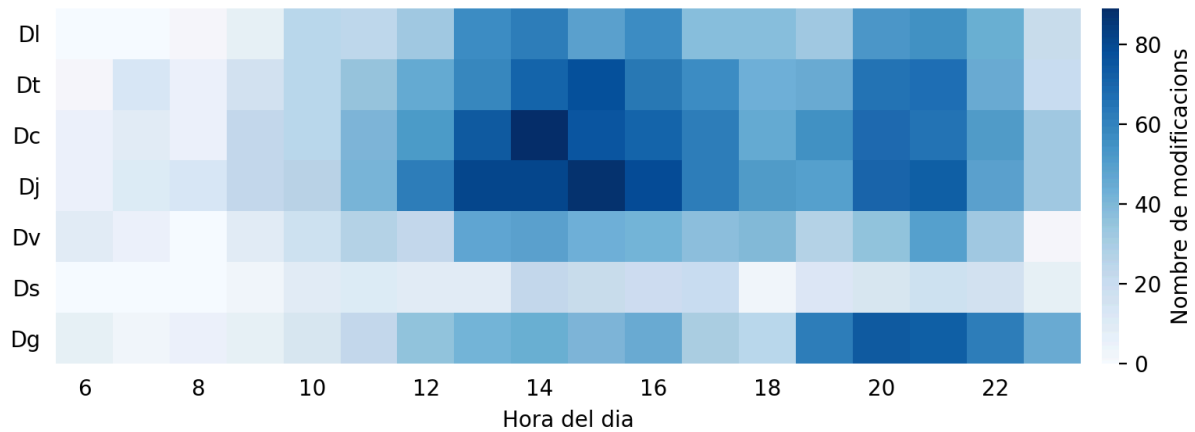


Figura 4.1: Nombre de modificacions per dia de la setmana i hora en les sessions analitzades

4.1 Discussió dels resultats

Els resultats confirmen que, per a equips petits, tots dos enfocaments són equivalents i que el factor decisiu és més aviat la senzillesa de la implementació. Amb un nombre més gran d'usuaris simultanis, els CRDT presenten un clar avantatge tant en latència com en robustesa davant les interrupcions de la connexió. Les entrevistes complementàries amb usuaris, dutes a terme segons els principis de la recerca qualitativa [4], van mostrar que els usuaris no perceben una diferència de latència inferior a cent mil·lisegons, però consideren un problema greu la pèrdua del text a mig escriure després d'una interrupció de la connexió.

Conclusions

Aquest treball ha comparat la transformació operacional i els tipus de dades replicats lliures de conflictes com a dos enfocaments per a la sincronització de documents en l'edició col·laborativa en temps real. Mitjançant un prototip d'editor web hem mostrat que els CRDT permeten un servidor més senzill, sense ordenació central de les operacions, i ofereixen una latència més baixa quan el nombre d'usuaris és més gran.

El principal desavantatge dels CRDT continua sent el volum més gran de dades emmagatzemades. Per això, el pas següent serà comprovar com influeix la compactació periòdica del registre en instantànies en la mida de les dades i com es comporta el prototip en un funcionament prolongat amb desenes de milers de documents.

Bibliografia

1. ELLIS, Clarence A.; GIBBS, Simon J. Concurrency control in groupware systems. dins: *Proceedings of the 1989 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. New York: ACM, 1989, pp. 399-407. Available from doi: 10.1145/67544.66963.
2. SHAPIRO, Marc; PREGUIÇA, Nuno; BAQUERO, Carlos; ZAWIRSKI, Marek. Conflict-free replicated data types. dins: *Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems*. Berlin: Springer, 2011, vol. 6976, pp. 386-400. Lecture Notes in Computer Science. Available from doi: 10.1007/978-3-642-24550-3_29.
3. KLEPPMANN, Martin. *Designing data-intensive applications*. Sebastopol: O'Reilly Media, 2017. isbn 978-1-4493-7332-0.
4. HENDL, Jan. *Kvalitativní výzkum: základní metody a aplikace*. Praha: Portál, 2005.