
This is the **published version** of the bachelor thesis:

Juvero Jurado, Lucas; Toro Valdivia, M^a Carmen de, dir. Estudi, presentació de propostes i desplegament d'un sistema de monitoratge i control de satèl·lits per l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya. 2024. (Enginyeria Informàtica)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/290107>

under the terms of the  license

Estudi, presentació de propostes i desplegament d'un sistema de monitoratge i control de satèl·lits per l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya

Lucas Juvero Jurado

12 de febrer de 2024

Resum– Dins del marc de l'Estratègia NewSpace de Catalunya [1], l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya [2] gestiona actualment dues missions de nanosatèl·lits en òrbita baixa. L'objectiu principal d'aquest treball és el de fer una implementació d'un sistema de monitoratge per al C3SatP [3]: un conjunt d'ordinador a bord (OBC) i un sistema de gestió de dades a bord (OBDH) a mode de *In Orbit Demonstrator* (IOD) desenvolupat per l'IEEC. El C3SatP es troba dins el nanosatèl·lit Menut [4] com a càrrega útil secundària. Aquest treball també té com a objectiu fer una recerca de sistemes de monitoratge i control de satèl·lits per a les futures missions de l'IEEC. En aquest article exposarem com s'ha realitzat la implementació del sistema de monitoratge *ad hoc*, utilitzant InfluxDB [5], Grafana [6] i Python. També farem una demostració amb el programari YAMCS [7] i estudiarem la seva possible utilització en altres Missions de l'IEEC.

Paraules clau– MCS, Open Source, C3SatP, Menut, PhotSat, InfluxDB, Grafana, YAMCS, IEEC, GSOC, Satèl·lit

Abstract– Within the framework of the NewSpace Strategy of Catalonia [1], the Institute of Space Studies of Catalonia [2] currently manages two nanosatellite missions in low orbit. The main objective of this work is to implement a monitoring system for the C3SatP [3]: a computer set on board (OBC) and a data management system on board (OBDH) in the mode of *In Orbit Demonstrator* (IOD) developed by the IEEC. C3SatP is located within the Menut nanosatellite [4] as a secondary payload. This work also aims to research satellite monitoring and control systems for future IEEC missions. In this article we will explain how the implementation of the monitoring system *ad hoc* has been carried out, using InfluxDB [5], Grafana [6] and Python. We will also do a demonstration with YAMCS software [7] and study its possible use in other IEEC Missions.

Keywords– MCS, Open Source, C3SatP, Menut, PhotSat, InfluxDB, Grafana, YAMCS, IEEC, GSOC, Satellite

1 INTRODUCCIÓ

DINS el marc de l'Estratègia NewSpace de Catalunya, l'IEEC (Institut d'Estudis Espacials de Catalunya) gestiona actualment dues missions de nanosatèl·lits en òrbita baixa: l'Enxaneta (NORAD ID 47961)

- E-mail de contacte: lucasjuvero1@gmail.com
- Menció realitzada: Tecnologies de la Informació
- Treball tutoritzat per: Maria Carmen de Toro Valdivia (Enginyeria de la Informació i de les Comunicacions)
- Curs 2023/24

en òrbita des del 2021 i el Menut (NORAD ID 55010) des del 2023. A mitjà termini, es preveu que l'IEEC amplii la seva infraestructura espacial a través de missions dedicades a l'Observació de la Terra (GENEO-02) i a l'Astronomia (PhotSat) [8]. Per tant, les necessitats de tractament de dades provinents de satèl·lits per part de l'IEEC es veuran incrementades. Aquest tractament i monitoratge de les dades es duu a terme per un sistema de monitoratge i control (*Monitoring and Control System*, MCS) que és l'encarregat de processar, parametritzar i facilitar la funció d'observació de les dades de telemetria (TM) pels enginyers que hauran d'analitzar-les. També, aquest sistema permet la preparació de telecomandes i ofereix una interfície amb les diferents

estacions de comunicacions amb satèl·lit (TT&C).

En aquest projecte de final de grau, la informació que tractarem serà obtinguda d'un IOD (*In Orbit Demonstrator*), desenvolupat per l'IEEC anomenat C3SatP. Aquesta és una càrrega útil secundària embarcada al satèl·lit Menut. El Menut té el seu OBC propi que, com la resta del satèl·lit, pertany i és operat per Open Cosmos [9], l'operador de la missió. El C3SatP és un conjunt OBC i OBDH desenvolupat per l'IEEC que es troba a bord del Menut sense control del satèl·lit, la seva funció és de prova i demostració.

La resta d'aquest document s'estructura de la següent manera: en primer lloc, presentarem el context del treball. Més tard, parlarem dels objectius del treball. Després, descriurem la metodologia que hem utilitzat i situarem el nostre treball dins del marc de l'estat de l'art pel que fa a sistemes de monitoratge. Tractarem el sistema de monitoratge *ad hoc*, comentarem els requisits del C3SatP i farem un estudi de la solució pertinent per a la implementació. A continuació, parlarem de l'estructura general de la solució proposada i de com s'ha implementat el sistema de monitoratge *ad hoc*. Finalment, exposarem les conclusions a les quals hem arribat i les línies de treball futur.

2 CONTEXT DEL TREBALL

L'arquitectura d'una missió ve formada per dos segments principals: el segment espai (*Space segment*) i el segment terra (*Ground segment*).

L'*Space segment* és la part principal de les operacions espacials i abasta tant el disseny i construcció de la nau com el seu llançament a través d'un segment de llançament (el coet). No obstant això, l'èxit d'una missió espacial no sols depèn del segment espacial, sinó també del segment terrestre i les operacions dutes a terme per un equip d'experts utilitzant la infraestructura i processos del segment terrestre de la missió.

El *Ground segment* (veure Figura 1), que inclou estacions terrestres, infraestructura de xarxa, maquinari, programari i processos, juntament amb un equip dedicat, exerceix un paper crucial en l'execució de les operacions de la missió. Dins del *Ground segment* trobem diferents blocs que el formen, tal i com es mostra a la Figura 1. Nosaltres ens centrarem en l'estudi del bloc dels MCS (*Monitoring and Control System or Mission Control System*).

Dintre d'una missió espacial hi ha diferents parts de programari, que varien molt segons el seu propòsit. En aquest cas, nosaltres parlarem principalment de les que tenen relació directa amb la part principal del control de les missions. Abans d'entrar a comentar els MCS, hem de parlar dels elements fonamentals dels sistemes i el programari dins les missions, i per això primer introduïrem diferents conceptes.

Les dades sobre el satèl·lit que aquest transmet a la estació terrestre (*downlink*) s'anomenen paquets de telemetria (a vegades descrits com a punts de telemetria). Aquests contenen informació d'estats (com ON/OFF), dades numèriques (com temperatura, voltatge, etc) o dades binàries (sense estructura). El seu valor o significat s'ha de codificar en format binari.

Les telecommandes (TC) són les instruccions que permeten el control del satèl·lit des de terra (*uplink*). Cada telecomanda té un identificador i pot contenir diferents paràmetres

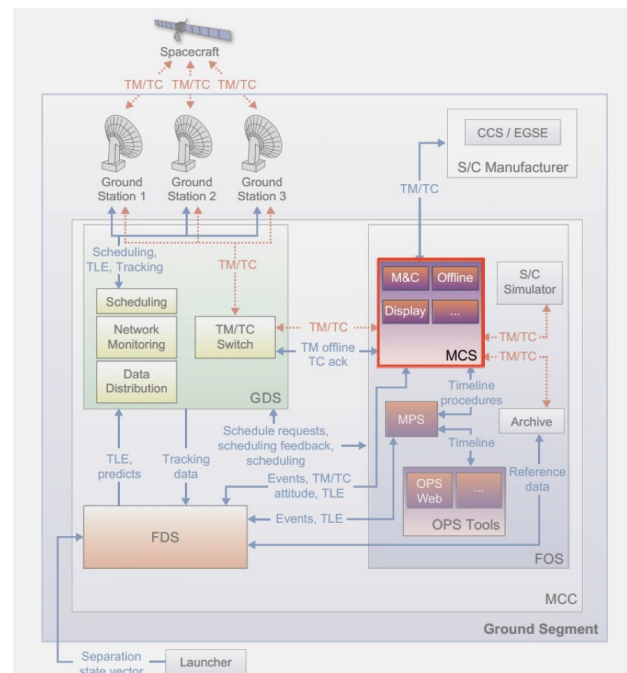


Fig. 1: Exemple générique d'un *Ground segment* [10].

de comandes que codifiquen el seu comportament. Les telecomandes poden activar, desactivar o modificar el funcionament de les diferents parts del satèl·lit així com canviar els valors de certs registres o transportar segments binaris de dades.

Les definicions dels paràmetres de telemetria, les telecomandes i les seves calibracions, límits i identificadors es troben emmagatzemats dins de la base de dades TM/TC. Tota aquesta informació, rellevant per a les comunicacions s'ha de trobar disponible dins del satèl·lit i dins del MCS. Només si el satèl·lit i el *Ground segment* tenen el mateix coneixement, es pot portar a terme una comunicació. Per tant, qualsevol canvi en el tractament de dades s'ha d'actualitzar tant al MCS com al satèl·lit.

Els MCS han de proporcionar als usuaris l'informació actualitzada i la capacitat de poder visualitzar-la, analitzar-la i modificar-la de forma eficaç i fiable. A mode de cas d'ús, revisarem el MCS que s'utilitza en el *German Space Operations Center* [11] (GSOC), el qual disposa d'unitat responsable del disseny, implementació, testeig i millora dels MCS. S'ha triat GSOC com a cas d'estudi perquè són referents en la divulgació de bones pràctiques en operacions espacials a Europa i per la seva llarga trajectòria.

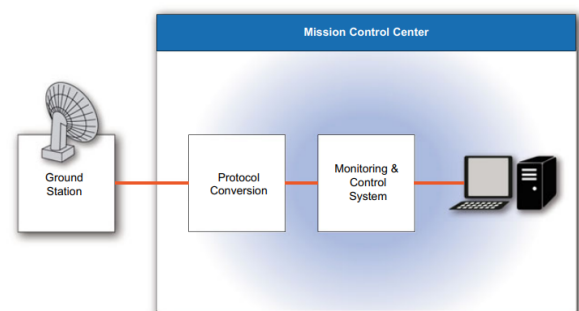


Fig. 2: Diagrama simplificat d'un centre de control de satèl·lits [10]

Dins dels elements importants a analitzar d'un MCS (que podem veure en la Figura 1), trobem el *Display System*, que normalment molts sistemes TM/TC ja porten integrat per poder visualitzar les dades del sistema. Donades la necessitat de flexibilitat i diversitat de les dades a processar/visualitzar els MCS dedicats a missions de satèl·lits més petits com els *Cubesats*, per regla general solen ser solucions MCS *ad hoc*, o adaptats a les necessitats específiques de la missió. La tasca principal d'aquest sistema es la de mostrar les dades i preparar-les de forma adequada per a que els enginyers les puguin visualitzar per tant, una eina especialitzada en visualització tendeix a ser una millor solució per complir els requeriments dels operadors. Cal tenir en compte que quan parlem de dades, no sempre ens referim a mesures o valors en concret, a vegades hi ha altre informació com events concrets, diferents alertes, límits, entre d'altres.

L'últim bloc a destacar és en el que es centra el nostre treball, i que forma part dels elements del MCS: el bloc d'*Offline Data*. Aquest bloc s'encarrega d'emmagatzemar, processar i visualitzar totes les dades que arriben al llarg de la connexió amb el satèl·lit i també és encarregat d'oferir suport d'emmagatzematge i monitoratge de totes les dades històriques de la missió. D'una banda, les que es generen en temps real mentre dura la connexió i, d'altra banda, les que s'acumulen entre contactes amb l'estació terrestre i que es descarreguen durant els mateixos.

A continuació, per posar en context on es situa el nostre treball dins de la missió Menut que hem introduït a la secció 1, veurem l'esquema de l'arquitectura del satèl·lit Menut propietat d'Open Cosmos.

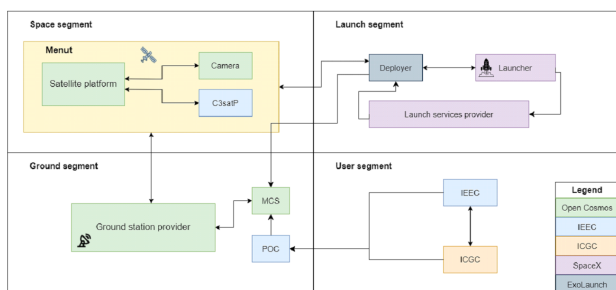


Fig. 3: Esquema de l'arquitectura de la missió GENE0-01 [12]

En l'esquema de la Figura 3 podem veure els diferents segments que hem explicat anteriorment de la missió Menut, l'*Space segment*, el *Ground segment*, i també altres: el segment de llançament (*Launch segment*) i segment d'usuari (*User segment*).

El *Launch segment* conté el proveïdor de serveis de llançament, el llançador i, com en moltes altres missions de *CubeSats* (satèl·lits de dimensions petites), el desplegador.

El segment d'usuari està format pels clients que reben el producte. En el cas concret d'aquesta missió, el client estaria format pel IEEC amb la col·laboració de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) [13]. El producte consisteix en les imatges adquirides pel Menut i les dades generades pel C3SatP.

Un cop introduïda tota l'informació necessària, ens centrarem a ubicar el nostre treball. Com podem veure a l'esquema disponible a la Figura 3, a l'IEEC pertany el *Payload*

Operation Centre (POC) i part del *User segment*. Dins del mòdul del POC, trobem el sistema de processat i monitoratge que hem implementat en aquest Treball de Fi de Grau, per a la càrrega útil secundària C3SatP.

3 OBJECTIUS DEL TREBALL

L'objectiu principal del projecte és el d'analitzar les necessitats pel que fa al tractament de dades satel·litals actuals i futures de l'IEEC i, en funció d'aquesta anàlisi determinar una solució MCS que les gestioni.

En una primera fase, es van analitzar els components i capacitats d'un sistema MCS, d'ús habitual en la indústria. Després, es va dur a terme un anàlisi de requisits per a la càrrega útil C3SatP. Tot seguit, es va analitzar la disponibilitat d'un sistema que respongués a aquestes necessitats. Aquest anàlisi va incloure la realització d'una demostració d'una solució *Open Source*, el YAMCS.

En una segona fase, es va procedir al disseny, implementació i desplegament d'una solució desenvolupada *ad hoc* per al C3SatP. Aquesta fase va formar la part principal d'aquest treball de fi de Grau, ja que en ella es va reflectir tot l'estudi fet al llarg del treball i coneixements adquirits al llarg de la carrera. Aquesta implementació va suposar un llarg procés de desenvolupament multidisciplinar que tocava tractament de dades, bases de dades, programació, desplegament d'aplicacions en contenidors, treballar en un servidor remot, entre d'altres. Amb la finalització d'aquesta fase, es va proporcionar una documentació d'ús i manteniment a l'equip encarregat d'analitzar les dades.

4 METODOLOGIA

En aquest projecte de fi de grau s'han utilitzat dues metodologies diferents una per la part pràctica de desenvolupament i una altra per la part més teòrica:

- La part teòrica consisteix a fer la recerca de la teoria que tingui rellevància per la realització del treball. Aquesta part s'ha realitzat en paral·lel, primerament, fent recerca general de la documentació relacionada amb el projecte i a continuació identificant els conceptes teòrics més específics necessaris per desenvolupar aquest treball.
- La part pràctica es va centrar en tot el desenvolupament que contenia codi o tractament amb programaris. En aquesta es va seguir una metodologia de cicle de vida del programari en espiral amb iteracions curtes d'una setmana, tenint en compte a l'equip del C3SatP com si fossin clients per veure com reben les propostes i canvis a realitzar.

5 ESTAT DE L'ART

Les operacions dels satèl·lits requereixen una eina que tingui la capacitat de processar la telemetria i d'enviar telecomandes, és a dir, un MCS. Hi ha casos, en els que les diferents parts que corresponen a un MCS són delegades a diferents empreses que es poden encarregar de fer un programari específic per a cada part, com a l'exemple del GSOC i el seu esquema d'un MCS que veiem a la Figura 4.

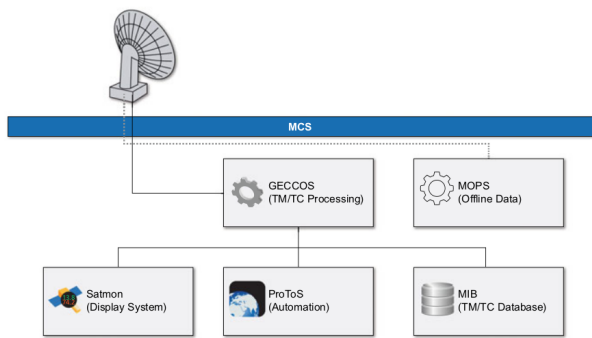


Fig. 4: Il·lustració d'un MCS al GSOC [10]

A l'esquema disponible a la Figura 4 veiem dins del MCS d'exemple, GSOC, les diferents parts que hem introduït a la secció 2, com el *TM/TC Processing*, el *Display System*, el *TM/TC Database* i l'*Offline Data*. També podem veure com cadascun d'aquests blocs està implementat per aplicacions de programari diferents. A continuació podrem veure les interfícies d'usuari de cada un d'aquests programaris i quina és la seva aplicació.

El GECCOS [14], es l'encarregat del *TM/TC Processing* que gestiona l'emmagatzematge de dades, la comunicació amb l'estació de terra, realitza càlculs de validació i sobre *limit checks* dels valors dels paràmetres, verifica i valida les dades de telecomandes i les de telemetria de forma interactiva.

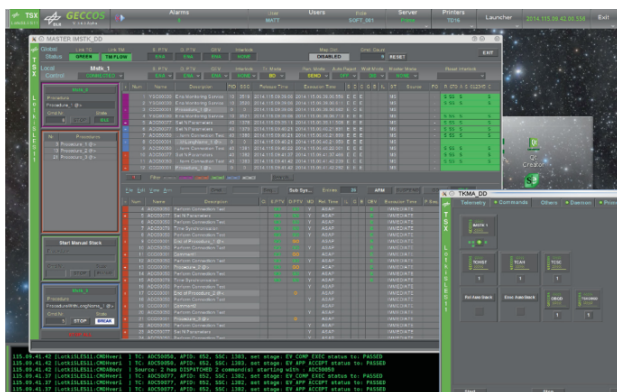


Fig. 5: Interfície d'usuari del GECCOS

En la Figura 5, podem veure la interfície d'usuari del GECCOS, on s'hi observa la interfície de preparació de telecomandes, el seu historial, i altres seccions per al control de les comunicacions. Tant aquesta interfície com aquest programari el trobem explicat en detall a la referència del GECCOS [14].

El SATMON [15], que és un programari de visualització de telemetria per a monitorar satèl·lits, desenvolupat per Heavens Above GmbH. Amb una arquitectura client-servidor, permet accedir a telemetria en temps real i dades arxivades. Ofereix diverses formes de visualització, incloent-hi llistes, gràfics interactius i diagrames de flux. Integra autenticació d'usuaris, connexions xifrades i eines d'administració. És utilitzat en totes les missions de satèl·lits de GSOC per a monitoratge en temps real i anàlisi de telemetria.

En la Figura 6, veiem la interfície d'usuari del SATMON, en ella podem veure diferents finestres en les quals es troben

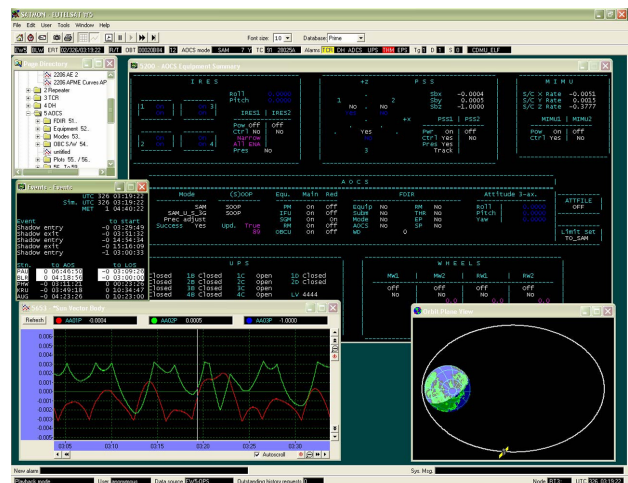


Fig. 6: Interfície d'usuari del SATMON

diverses eines de monitoratge. Aquestes són: un visualitzador de dades alfanumèriques, les gràfiques dels paràmetres en el temps, les visualitzacions de les òrbites, els diferents procediments i un arbre amb el sistema de fitxers.

ProToS [16] és un paquet d'aplicacions multimissió desenvolupat internament a GSOC per a recolzar la creació, execució i gestió de Procediments de Control de Vol (FCP) basats en programari per enginyers d'operacions de satèl·lits. Utilitza procediments d'alt nivell que encapsulen telecomandes individuals i verificacions de telemetria per a augmentar l'eficiència i robustesa de les operacions en escenaris altament complexos. ProToS s'integra amb els sistemes de control de missió GECCOS i SCOS-2000 [17], serveix com la seva interfície de comandament per als seus procediments d'alt nivell, automatitza l'execució dels procediments de vol i dirigeix el seu flux de control basat en la TM entrant.

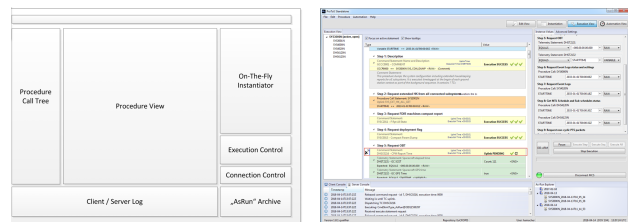


Fig. 7: Interfície d'usuari del PROTOs

En la Figura 7 observem la interfície d'usuari del ProToS. Veiem, per una banda, a l'esquerra, un esquema del panell de visualització on estan definides les diferents finestres de l'aplicació. Trobem al centre la vista dels procediments, a sota la finestra de registres client/servidor, a la columna de la dreta l'instanciador, les finestres de control d'execució i connexió i per últim l'explorador *AsRun* que permet visualitzar un històric de les dades.

MOPS (*Mission Operations Processing System*) és el Sistema de Processament d'Operacions de Missió de GSOC. Aquest programari processa arxius de bolcat de telemetria d'estacions terrestres en arxius llegibles per humans que contenen valors de telemetria de paràmetres a bord. Aquesta informació és essencial per a les operacions a terra de les naus espacials. El programari MOPS s'utilitza per a totes les missions de GSOC en òrbita terrestre baixa (LEO).

Consta d'una part general de multimissió i una part específica de la missió que conté la configuració per a la mateixa. Cada missió té la seva pròpia especificació de producte. La configuració específica de la missió es desenvolupa per a cada nova missió d'acord amb l'especificació del producte.

El conjunt de sistemes mencionats anteriorment proporcionen solucions a les diferents aplicacions d'interès dins un centre de control d'una envergadura important, tal i com és el GSOC. Existeixen també solucions basades en programari *Open Source*, especialment dissenyats per projectes de petita envergadura. En aquest treball vam provar el programari *Yet Another Mission Control System* (YAMCS). Aquest, és un programari de control de missió de codi obert desenvolupat per Space Applications Services [18]. Està dissenyat per a ser flexible i escalable, reduint els costos de desenvolupament i oferint integració amb núvols i desplegaments distribuïts. Ofereix una API HTTP extensa i una aplicació web per a operacions, a més de solucions d'escriptori. Permet la replicació de dades entre instàncies i l'ús de tercers com OpenMCT o Grafana per a visualització.

Per avaluar-lo, vam realitzar una petita demostració d'ús del programari. Aquest programari tracta un nivell més centrat en *TM/TTC processing*. Aquesta eina ha destacat per la seva capacitat integral per a gestionar operacions complexes i monitorar diversos subsistemes de manera coordinada. YAMCS ha demostrat ser una eina versàtil i que pot enfortir la capacitat de monitoratge i gestió, millorant l'eficiència operativa de manera notable.

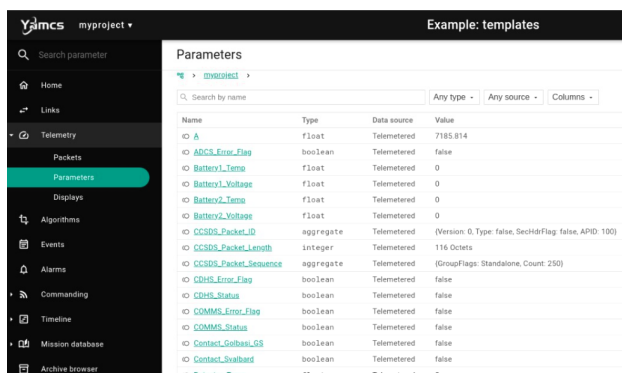


Fig. 8: Interfície d'usuari del YAMCS

A la Figura 8 podem veure la captura dels paràmetres de telemetria rebuda en una simulació d'exemple. En aquest cas, hem utilitzat un fitxer de Python que simulava ser un satèl·lit que envia dades de telemetria i la nostra aplicació les rep. En la Figura també podem veure al panell esquerre una sèrie de pestanyes on es pot observar que nosaltres ens trobem al panell de Paràmetres i n'hi ha d'altres com *Events*, *Commanding*, *Timeline*, *Mission Database*.

6 SISTEMA DE MONITORATGE

Per tal d'escollir la solució de Sistema de Monitoratge per a la càrrega útil C3SatP s'ha hagut de considerar tant els seus requisits operacionals com la forma en la que es gestionen les operacions del Menut a un nivell més global.

En primer lloc, es va fer una anàlisi de les necessitats que havia de cobrir el sistema de processat i monitoratge

a programar. A continuació, vam fer un estudi de la solució quant a aplicacions similars al sistema de monitoratge a implementar. El següent pas va ser definir l'estructura del projecte amb un diagrama de forma que es pogués veure quina estructura tindria la seva posterior implementació. Després va començar el gruix del projecte, la implementació, que tractava de: preparar la base de dades, preparar el visualitzador i programar tot el codi del projecte. Aquesta última part va ser la que va portar més temps a causa de la falta d'experiència tractant amb cada una de les diferents parts, això va fer que hi hagués molts petits problemes que a poc a poc havia d'anar resolent per avançar. A continuació detallarem cada una de les parts de la implementació.

6.1 Requisits del C3SatP

L'arquitectura del C3SatP feia més fàcil enviar les instruccions per a cada execució via *script* a l'operador del satèl·lit i, posteriorment a la seva execució, rebre un paquet de dades. L'equip del C3SatP no està present a la sala de control mentre es realitzen les operacions a bord sinó que és l'operador del satèl·lit que el gestiona en temps real.

Les necessitats principals són en la gestió i anàlisi de les dades rebudes. Per tant, el sistema de monitoratge i control ha de comptar amb una eina de visualització similar al mòdul d'*Offline Data Analysis* anteriorment estudiat. Aquestes dades estan estructurades en diferents fitxers amb contingut i freqüència d'escriptura diferent. Les dades que volíem analitzar, en primer lloc, van ser les de l'*on-board computer* o OBC del C3SatP, aquestes dades estaven definides a la documentació de l'equip del C3SatP, on tenien la descripció de cada camp i un exemple d'una línia de telemetria del fitxer CSV. A la Figura 9 veiem una imatge d'una línia de telemetria.

La longitud dels fitxers que arribava no era fixa, ja que, ens arribava un fitxer cada cop que s'executaven *scripts* al C3SatP i depenia del temps que havia estat l'OBC funcionant i guardant dades dels diferents sensors. Aquesta variació en la longitud dels fitxers és degut al fet que l'OBC emmagatzema dades de telemetria cada segon. D'altra banda, el format de dades de telemetria, requereix un processat perquè aquestes dades es puguin analitzar.

L'equip del C3satP tenia implementat un *script* que feia diferents gràfiques de les dades per visualitzar els diferents arxius de telemetria que tenien fins a la data. Es tractava d'un codi de Python i JS que donava format a les dades i les traduïa a diferents gràfiques on es podien visualitzar. El problema d'aquest petit sistema de monitoratge és que no complia totes les necessitats quant a personalització, visualització i emmagatzematge de les dades. Tot i així, aquest sistema de visualització simple va servir per a identificar necessitats de l'usuari final.

Finalment, es va arribar a la conclusió que la solució més adient era implementar una solució *ad hoc* que es pogués adaptar fàcilment als canvis de la missió del C3SatP, ja que es tractava d'unes necessitats totalment enfocades a l'anàlisi i emmagatzematge de dades.

6.2 Estudi de la solució *ad hoc*

Dintre del sistema de monitoratge *ad hoc*, abans de decidir quina base de dades i quin visualitzador utilitzàvem, vam

```
1696513483 ,
R, 2, 1696416890, 133, 142, 4817, 3272, 014, 01, 0375, 014, 013, 5250
, 0875, 018, 018, 5188, 1, 0719, 000, 000, 1, 0848, 164, 3F8, 1, 1801, 0
23, 04E, 1, 2504, 000, 000, 1, 1199, 063, 129, 1, 1801, 000, 000, 1, 330
5, 000, 000, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00, 00
, 00, 00, 00, 00, 00, F7, 0, 0
```

Fig. 9: Exemple d'una línia de dades de telemetria.

fer un estudi de les diferents opcions *Open Source* que hi havia.

A l'hora d'escollir llenguatge de programació, vam decidir utilitzar Python per motius diferents. En primer lloc, és un llenguatge que disposa d'una gran quantitat de biblioteques especialitzades per al processament d'arxius CSV. També té moltes biblioteques robustes de bases de dades. A més a més, té una gran comunitat activa que facilita la cerca de solucions a problemes en el desenvolupament. Finalment, Python és un llenguatge molt accessible i tenint en compte el futur manteniment del projecte, pot facilitar que persones poc experimentades en programació, puguin entendre i mantenir el codi de forma eficient.

Per la part del sistema de monitoratge *ad hoc*, en primer lloc, s'havia de fer una recerca sobre bases de dades, visualitzadors i decidir quin llenguatge de programació utilitzaríem per fer el processat.

6.2.1 Bases de Dades

Les dades són una entitat dinàmica, la forma en què s'emmagatzemen varia molt. També és la raó per la qual diferents empreses dissenyen els seus propis tipus de bases de dades que compleixen amb les seves necessitats.

Encara que existeixen diversos tipus de bases de dades, nosaltres ens vam centrar a comparar la utilització de les bases de dades relacionals i les bases de dades no relacionals.

Les bases de dades relacionals tenen una jerarquia més rígida i estructurada d'emmagatzemar dades. Un sistema relacional de gestió de bases de dades (RDBMS) executa consultes SQL per recuperar, afegir, eliminar i modificar dades.

Aquestes bases de dades són ben enteses i estan àmpliament sostingudes, la qual cosa pot ser un avantatge important degut a la quantitat d'informació de suport que hi ha.

Les bases de dades NoSQL, també conegudes com a "no SQL" o "no només SQL", emmagatzemen dades en un format diferent de les taules relacionals. Aquestes bases de dades són més flexibles i s'ajusten més a entorns de treball on les dades no són clares i definitives des del començament del projecte, ja que, com que no tenen una estructura de dades definida es poden fer modificacions sense que repercu-teixi a totes les dades antigues.

Quant a la funcionalitat de les bases de dades no relacionals, en lloc de taules, les bases de dades NoSQL estan orientades a documents i són més aviat com carpetes de fitxers.

Fent una observació dels avantatges i desavantatges de cada una d'aquestes estructures, el nostre projecte s'ajustava més a una base de dades no relacional. Com que el C3SatP tindria un flux de dades que variaria al llarg del temps, feia falta una base de dades flexible i escalable. Per

Aspecte	MongoDB	Cassandra	InfluxDB
Tipus de Base de Dades	Documents	Columnes	Sèries Temporals
Model de Dades	BSON	Columnes	Sèries Temporals
Escalabilitat	Vertical i Horitzontal	Horitzontal	Horitzontal
Consistència	Diferents nivells	Ajustable	Configurable
Ús	Web, Mòbil, Anàlisi	Xarxes Socials, IoT	Monitoratge, IoT
Consulta/Indexació	Complexes, Índexs	CQL, Índexs	Llenguatge específic

TAULA 1: COMPARATIVA ENTRE MONGODB, CASSANDRA I INFLUXDB.

aquest motiu ens vam centrar a buscar bases de dades no relacionals que tinguessin aplicacions semblants al C3SatP.

Buscant diferents tipus de bases de dades no-relacionals vam veure tres bases de dades potencials.

La primera, MongoDB [19], és una base de dades NoSQL orientada a documents que utilitza un format d'emmagatzematge de documents BSON, similar a JSON, per a emmagatzemar dades. MongoDB és altament escalable i pot distribuir dades horitzontalment a través de múltiples servidors, la qual cosa ho fa adequat per a una àmplia varietat de casos d'ús, inclosos aplicacions web, mòbils i anàlisis de dades.

Cassandra [20], d'altra banda, és una base de dades NoSQL distribuïda i altament escalable, dissenyada específicament per a manejar grans volums de dades en múltiples nodes. Fa servir un model de dades basat en columnes, on les dades s'emmagatzemen en files que poden contenir un nombre variable de columnes. És àmpliament usada en aplicacions que requereixen escalabilitat horitzontal i tolerància a fallades, com a xarxes socials, sistemes de missatgeria i anàlisi de big data.

InfluxDB és una base de dades NoSQL especialment dissenyada per a emmagatzemar i consultar dades de sèries temporals. Està optimitzada per a manejar grans volums de dades de sèries temporals, com a dades de sensors, mètriques de rendiment i registres d'esdeveniments. És comunament usat en aplicacions de monitoratge d'infraestructura, anàlisi de rendiment i anàlisi de dades IoT.

En la taula 1, podem veure una comparativa dels diferents aspectes que defineixen cada una de les bases de dades. Ens vam fixar en els apartats de Model de Dades i d'Ús, per veure que InfluxDB era la més adient per desenvolupar el nostre treball, ja que es tractava d'un processament de dades definides per sèries temporals i l'aplicació que volíem donar-li era la de monitoritzar-les. És per això que finalment ens vam decidir en utilitzar InfluxDB.

6.2.2 Visualitzadors

Les dades són cada dia més importants. Per a qualsevol organització, pots entendre la importància de les dades i prendre decisions crucials. Per la mateixa raó, la visualització de dades està captant l'atenció de la gent. Les eines de visualització o visualitzadors són eines que suporten una varietat d'estils visuals, són simples i fàcils d'usar, i són capaços de manejar un gran volum de dades. Una eina de visualització de dades és un programari que s'usa per visualitzar dades.

Una de les eines més utilitzada en projectes per visualitzar dades temporals és Grafana.

Grafana és un programari de codi obert que permet consultar, visualitzar, alertar i explorar les mètriques extretes d'una base de dades. Grafana proporciona eines per convertir les dades de la base de dades de sèries temporals (com

l'InfluxDB) en gràfiques i visualitzacions clares i intuïtives. El marc de treball d'aquesta eina també permet connectar altres fonts de dades com bases de dades NoSQL/SQL, eines d'etiquetatge com Jira o ServiceNow, i eines CI/CD com GitLab.

6.3 Estructura del projecte

El projecte havia de ser estructurat de forma que complís tots els requisits i que pogués adaptar-se al flux de dades del C3SatP. En una primera reunió amb l'equip del C3SatP vam definir quin seria el flux de dades de telemetria i quina seria l'estructura general que el projecte hauria de tenir. A la Figura 10 es mostra aquesta primera estructura:

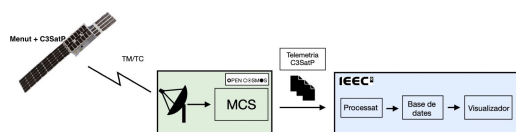


Fig. 10: Estructura general del flux de dades del C3SatP.

Podem veure en la Figura 10 de forma general com anava a ser el flux de les dades de telemetria. En primer lloc, la *Ground station*, propietat d'Open Cosmos, seria la que es comunicés amb el Menut per descarregar la Telemetria. Utilitzarien el seu propi MCS per processar les dades del Menut i ens enviarien les dades del payload (C3SatP) al IEEC. Un cop l'IEEC rep les dades de telemetria, faria falta processar-les, emmagatzemar-les en una base de dades i finalment visualitzar-les.

Més tard, amb aquest flux de tractament de dades definit, començaríem la implementació del sistema de monitoratge *ad hoc*.

6.4 Implementació del sistema de monitoratge *ad hoc*

Per realitzar la implementació del sistema de monitoratge vam decidir utilitzar InfluxDB i Grafana. Dintre de l'arquitectura de l'InfluxDB trobem els *Buckets*, que són els elements emprats com a contenidors o carpetes a on es guarden les dades. Cada *Bucket* té un nom únic i es fa servir per localitzar les dades emmagatzemades des d'altres aplicacions com el Grafana.

En el cas del nostre projecte, nosaltres fem servir Grafana amb l'InfluxDB per extreure les dades dels diferents Buckets i crear els diferents panells de visualització personalitzats com es pot veure a la Figura 11.

A la Figura 12, on es mostra l'estructura de l'InfluxDB, hi ha la columna de Bucket, que indica el contenidor seleccionat per l'usuari. Aquest contenidor és creat a partir d'un dels arxius de dades d'una execució al satèl·lit. La columna “_measurement” que indica el tipus de dada que seleccionem i la columna “_field” on es veu el llistat de camps que estan dins de la mètrica seleccionada. Dins de cadascun d'aquests camps es troben els valors d'aquestes dades, que podem veure a la imatge 11, al segon panell, el que posa “Current (mA)” com estan els mateixos camps que a l'última columna de l'InfluxDB.

L'esquema de l'estructura de la implementació del sistema de monitoratge amb InfluxDB i Grafana es veu repre-

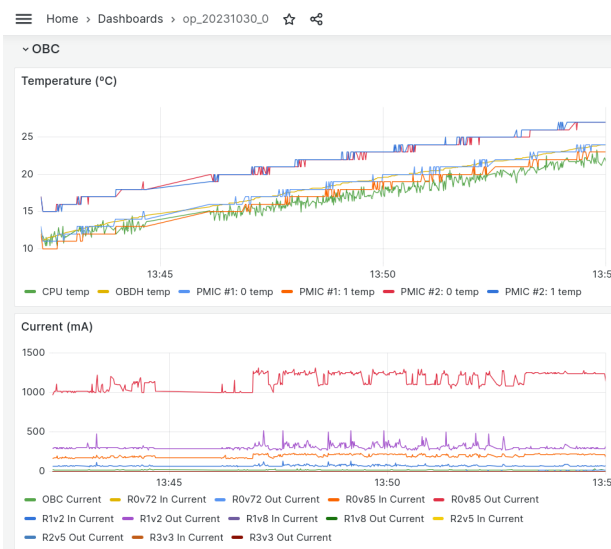


Fig. 11: Visualització al Grafana

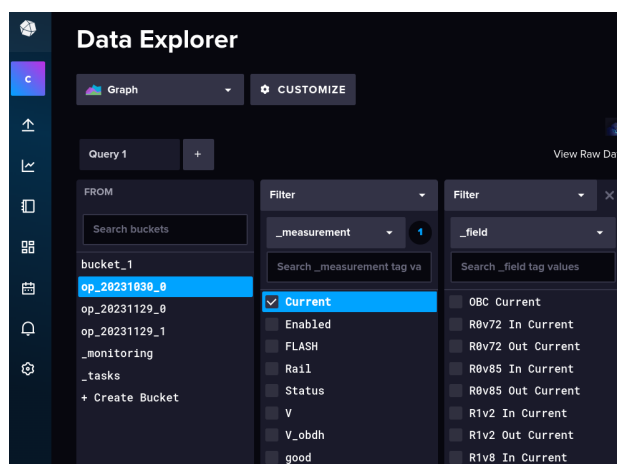


Fig. 12: Panell de visualització de dades a l'InfluxDB.

sentat en la Figura 13. InfluxDB va facilitar la recopilació i emmagatzematge eficient de les dades de la telemetria, garantint un accés ràpid i de confiança a la informació. Grafana, d'altra banda, va exercir un paper crucial en proporcionar una interfície gràfica intuïtiva per a la visualització de les dades, permetent la creació de panells personalitzats i gràfics dinàmics de manera senzilla. Aquesta combinació va oferir una perspectiva detallada i fàcil d'interpretar del rendiment del sistema de monitoratge que vam implementar.

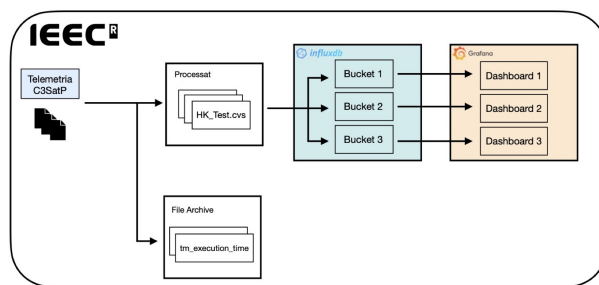


Fig. 13: Diagrama del MCS *ad hoc*

En el diagrama de la Figura 13, es pot observar el flux

de les dades des de la seva inserció fins a la seva visualització. A l'entrada de dades trobem les dades de telemetria del C3SatP, que són les dades descarregades del satèl·lit que es reben des d'OpenCosmos. Al penjar el paquet de dades rebut a un directori designat al servidor de dades, es fa primerament una còpia de les dades d'entrada a un directori concret, el "File Archive", que actua com un repositori històric a on s'emmagatzema tota la telemetria rebuda al llarg de la missió. Les dades també s'envien al bloc de processat on es fan diferents passos: se li dona el format necessari a la telemetria, es crea un Bucket a la base de dades, es crea un Dashboard al Grafana per a cada bloc de dades i finalment, es puja la telemetria formatada al Bucket creat dins la base de dades. A continuació, des del Grafana, dins el Dashboard creat, es fan les crides a la base de dades per poder extreure la informació dels diferents paràmetres i així crear els diferents panells de visualització on es poden veure per separat els diferents tipus de dades (temperatura, voltatge, etc.) aconseguint així visualitzar la telemetria de l'execució de la forma que es buscava. Aquest flux de treball s'ha automatitzat mitjançant un codi de processat i control de dades.

Per acabar aquest projecte, vam pujar la versió funcional a un servidor dins l'IEEC. Vam recrear l'entorn Docker amb tres contenidors, un pel codi de processament i control de dades, un altre per la base de dades i finalment un per la visualització. D'altra banda, vam donar accés al servidor a l'equip del C3SatP i vam configurar els permisos d'accés. Finalment, vam fer una documentació d'ús on s'explicava com utilitzar l'eina de forma local (dins les instal·lacions on és el servidor) i de forma remota, afegint tota la informació de credencials necessàries per a cada eina.

7 ALTRES MISSIONS (PHOTSAT)

En aquesta secció parlarem de la missió futura de l'IEEC dedicada a aplicacions d'astronomia, PhotSat, i tractarem les possibles solucions dels sistemes de monitoratge i control en altres missions de l'IEEC.

El Photosat [8] serà el primer satèl·lit científic desenvolupat íntegrament (des de la fase de disseny fins a la d'operacions) per l'IEEC que es posarà en marxa el 2025-2026. La missió té com a objectiu estudiar el cel complet durant 2-3 anys, obtenint corbes de llum fotomètriques mitjançant el seu equipament a bord, el qual l'IEEC necessitarà controlar.

Després de fer l'avaluació del YAMCS a l'estudi de l'art dels MCS, vam extreure és que es tractava d'una eina focalitzada en *TM/TC processing*. Aquesta eina tot i no resultar adient per a l'implementació del sistema de monitoratge *ad hoc* que hem realitzat en aquest treball de fi de grau, pot ser una solució interessant de cara a la futura missió del PhotSat, en la que l'IEEC és probable que necessiti processar telemetria de la plataforma del satèl·lit i preparar comandes per a la càrrega útil científica.

8 CONCLUSIONS

Els objectius d'aquest projecte de fi de grau eren, en primer lloc, fer una anàlisi de les necessitats de tractament de dades satel·litals actuals i futures de l'IEEC. Com a part principal, implementar una solució de processat i monitoratge *ad hoc*

per a la missió C3SatP.

Un cop finalitzat el treball, podem afirmar que els objectius han estat complerts amb èxit. La implementació del sistema de monitoratge ha resultat en una eina útil per a l'equip del C3SatP i ha estat un procés didàctic molt enriquidor i interessant, en el que he pogut consolidar coneixements adquirits al llarg de la carrera, com per exemple, programació, bases de dades i sistemes distribuïts. A més a més, he adquirit nous coneixements sobre temes com Docker, servidors, missions espacials, entre altres.

Per finalitzar, considero que molts dels coneixements aquests em seran útils en el meu futur laboral i aplicables en diferents camps. Ha estat un projecte no només didàctic sinó que també ha aportat una eina útil per a l'equip del C3SatP. Per això concloc, que a part d'aconseguir els objectius plantejats, vull expressar la meua satisfacció, ja que el meu treball no s'ha quedat en un projecte escrit. Com estudiant em sento molt realitzat d'haver contribuït amb aquest recurs que s'utilitzarà en un futur.

9 LÍNIES FUTURES

Per parlar de la continuïtat del projecte, els següents passos a fer consistirien a optimitzar el codi del projecte. Per una banda, seria necessari optimitzar la part de rendiment, el codi és funcional, però podria ser més eficient. D'altra banda, reestructurar part del codi, afegint pre i post condicions a totes les funcions, *loggeant* tot el codi de forma adequada i afegint comentaris pertinents per donar informació sobre totes les variables i funcions. També és recomanable seguir treballant en la documentació i el manteniment del codi, del servidor, de la base de dades i del projecte en general. Finalment, afegir capes de seguretat dins del servidor per poder-la fer una eina molt més robusta.

Per acabar, es recomana que l'IEEC segueixi explorant solucions MCS per a la seva missió futura Photosat i dugui a terme una simulació de desplegament juntament amb l'equip de disseny de missió.

AGRAÏMENTS

Voldria agrair, en primer lloc, a l'IEEC per donar-me l'oportunitat i la confiança per realitzar aquest projecte amb ells. A l'Helena Carré per ser una excel·lent mentora de la qual he pogut aprendre molt i ha sigut un gran suport al llarg del treball. A l'equip del C3SatP per les facilitats que m'han donat per treballar amb ells. A la Maria Carmen de Toro per l'ajuda que m'ha ofert al llarg de tot el procés i per ser una tutora amb la qual he pogut comptar en tot moment. Finalment, a la meua parella, la Mireia, i també als meus amics i família, que han estat tots un gran suport al llarg de la carrera i de la vida.

REFERÈNCIES

- [1] Generalitat de Catalunya. Departament de Polítiques Digitals i Administració Pública, amb la col·laboració de Grup de treball per a la definició de l'Estratègia NewSpace de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat i Departament d'Empresa i Coneixement. (2022). Estratègia NewSpace de Catalunya.

- [2] Institut d'Estudis Espacials de Catalunya: <https://www.ieec.cat/ieec/>
- [3] Sierra, C. (2019): Design and integration of a multipurpose on board computer for nanosatellites with SDR communications.
- [4] Menut: <https://www.ieec.cat/es/menu-t-ya-opera-desde-el-espacio-para-contribuir-a-mejorar-la-gestion-del-territorio-y-combatir-los-efectos-de-la-crisis-climatica/>
- [5] InfluxDB: <https://www.influxdata.com/products/influxdb-overview/>
- [6] Grafana: <https://grafana.com/grafana/>
- [7] YAMCS: <https://yamcs.org/about>
- [8] PhotSat: <https://www.ieec.cat/es/el-ieec-recibe-financiacion-del-plan-complementario-de-astrofisica-y-fisica-de-altas-energias-para-desarrollar-el-satelite-photosat/>
- [9] Open Cosmos: <https://www.open-cosmos.com/about>
- [10] Sellmaier, F. (2022). Spacecraft Operations (2nd ed.). Springer Aerospace Technology.
- [11] German Space Operations Center (GSOC): <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/projects-and-missions/iss/the-german-space-operations-center>
- [12] Pascual, A. (2024). Study of the perspectives on the use of CubeSats for Earth Observation Applications
- [13] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya: <https://www.icgc.cat/L-ICGC>
- [14] Stangl, C., Lotko, B., Geyer, M. P., Oswald, M., & Braun, A. (2014). GECCOS – the new Monitoring and Control System at DLR-GSOC for Space Operations, based on SCOS-2000. German Space Operations Center (GSOC), German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling / Munich, Germany.
- [15] Peat, C., & Hofmann, H. SATMON – A Generic User Interface For Satellite Control. Heavens-Above GmbH, 81375 Munich, Germany; DLR Oberpfaffenhofen, 82230 Wessling, Germany.
- [16] Hamacher, P., & Beck, T. (2018). ProToS: Automation of Flight Control Procedures for the European Data Relay System. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., German Aerospace Center, Münchener Straße 20, 82234 Weßling, Germany.
- [17] SCOS-2000: https://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet115/chapter8/_bullet15.pdf
- [18] Space Applications: <https://www.spaceapplications.com/>
- [19] MongoDB: <https://www.mongodb.com/es>
- [20] Apache Cassandra: https://cassandra.apache.org/_/index.html
- [21] Nejad, B. (2022). Introduction to Satellite Ground Segment Systems Engineering.
- [22] NASA. (2022). State-of-the-Art Small Spacecraft Technology Small Spacecraft Systems. Virtual Institute Ames Research Center, Moffett Field, California. (NASA Technical Paper No. 2022–0018058)
- [23] The Aerospace Corporation. (2016). Ground Segment Systems Engineering Handbook (Technical Operating Report TOR-2016-01797).
- [24] ECSS Secretariat. (2008). Space Engineering: Ground Systems and Operations - Monitoring and Control Data Definition. ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands.
- [25] Wajid, A., & al: Comparison between SQL and NoSQL Databases and Their Relationship with Big Data Analytics. Asian Journal of Computer Science and Information Technology · October 2019. DOI: 10.9734/AJRCOS/2019/v4i230108