

plain]

plain]



Testbed

Treball de Fi de Grau
presentat a l'Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona
de la Universitat Politècnica de Catalunya
per
Joel Otero Masplà xdd

En compliment parcial
dels requisits per a l'obtenció del
GRAU EN ENGINYERIA DE TECNOLOGIES I SERVEIS DE TELECOMUNICACIÓ

Director/a: Olga León
Ponent: *{Nom del ponent (si s'escau)}*

Barcelona, Maig de 2025

Resum

Cada exemplar del Treball de Fi de Grau (TFG) ha de contenir un Resum, que és un breu extracte del TFG. En termes d'estil, el Resum hauria de ser una versió reduïda del projecte: una introducció concisa, un compendi dels resultats i les principals conclusions o arguments presentats en el projecte. El Resum no ha de superar les 150 paraules i cal que estigui traduït al català, castellà i anglès.

Resumen

Cada ejemplar del Trabajo de Fin de Grado (TFG) debe incluir un Resumen que es un breve extracto del TFG. En cuanto al estilo, el Resumen debería ser una versión reducida del proyecto: una introducción breve, un resumen de los resultados principales y las conclusiones o argumentos principales presentados en el proyecto. El Resumen no debe exceder las 150 palabras y debe estar traducido al catalán, castellano e inglés.

Summary

Each copy of the Bachelor's Thesis (TFG) must include a Summary, which is a concise abstract of the TFG. In terms of style, the Summary should be a condensed version of the project: a brief introduction, a summary of the main results, and the conclusions or key arguments presented in the project. The Summary should not exceed 150 words and must be translated to catalan, spanish and english.

*Podeu incloure una pàgina de Dedicatòries just abans de la pàgina
d'Agraïments, però no és un requisit.*

Agraïments

És apropiat, però no obligatori, declarar l'extensió de l'ajuda aportada per persones de l'*staff*, companys/companyes d'estudis, tècnics/ques o altres en la col·lecció de dades, disseny i construcció del prototip, l'anàlisi de dades, l'execució dels experiments i la preparació del projecte (incloent l'ajuda editorial). A més a més, és apropiat reconèixer la supervisió i la direcció donada pel tutor/a.

Historial de revisió i aprovació

Revisió	Data	Autor(s)	Descripció
1.0	dd/mm/yyyy	AME	Creació del document
1.1	dd/mm/yyyy	AME, JPV	Correcció d'errors
2.0	dd/mm/yyyy	AME, MLO	Versió revisada
4.0	dd/mm/yyyy	AME	Versió final

LLISTA DE DISTRIBUCIÓ DEL DOCUMENT

Rol	Cognom(s) i Nom
[Estudiant]	
[Director del projecte]	
[Director 2 (si aplica)]	

Escrit per:		Revisat i aprovat per:	
Data	dd/mm/yyyy	Data	dd/mm/yyyy
Nom	Xxxxxxx Yyyyyyy	Nom	Xxxxxxx Yyyyyyy
Rol	Autor del projecte	Rol	Director del projecte

Índex

Resum	2
Agraïments	4
Historial de revisió i aprovació	5
Índex	6
Índex de figures	7
Índex de taules	8
Sigles i acrònims	9
1 Introducció	10
1.1 Objectius del treball	10
1.2 Requisits i especificacions	11
1.3 Mètodes i procediments	11
1.4 Pla de treball	12
2 Estat de l'art	13
2.1 Internet of Medical Things (IoMT)	13
2.2 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)	14
2.3 Altres protocols en l'entorn IoMT	16
2.4 Eines per a la simulació i anàlisi de trànsit en entorns IoMT	17
2.4.1 Mosquitto	17
2.4.2 Docker	18
2.4.3 Nmap	18
2.4.4 TCPDump	18
3 Metodologia / desenvolupament del projecte	19
3.1 Introducció d'expressions matemàtiques	19
3.1.1 Matemàtiques en línia i aïllades	19
3.1.2 Numeració i agrupació d'equacions	20
3.1.3 Introducció de matrius	20
3.2 Taules	20
3.3 Diagrames	21
3.4 Gràfiques	21
3.5 Llistats de codi	23
3.6 Unitats	24

4	Resultats	25
4.1	Experiments i proves	25
4.2	Visualització de les dades	25
4.3	Limitacions	25
5	Anàlisi de sostenibilitat i implicacions ètiques	26
6	Conclusions i Línies Futures	27
6.1	Conclusions	27
6.2	Línies Futures	27
	Bibliografia	28
A	Un apèndix	30

Índex de figures

1.1	Diagrama de Gantt del projecte	12
2.1	Protocol MQTT en un entorn IoMT. Imatge extreta de [13] i adaptada amb intel·ligència artificial.	16
3.1	Diagrames creats usant les ordres del paquet <i>TikZ</i>	22
3.2	Exemple de gràfica complexa dibuixada amb ajut del paquet <i>pgfplots</i> . . .	23

Índex de taules

3.1	Taula d'exemple	21
-----	---------------------------	----

Sigles i acrònims

[

Introducció

Una Introducció que estableix clarament la justificació de la tesi que inclogui:

1. Objectius del treball.
2. Requisits i especificacions.
3. Mètodes i procediments, citant si aquest treball és una continuació d'un altre projecte o utilitza aplicacions, algorismes, programari o maquinari desenvolupat anteriorment per altres autors.
4. Pla de treball amb tasques, fites i un diagrama de Gantt.
5. Descripció de les desviacions del pla inicial i incidències que poden haver ocorregut.

Els capítols mínims que aquest document de TFE hauria de tenir es descriuen a continuació; no obstant això, poden tenir noms diferents i es poden afegir més capítols.

1.1 Objectius del treball

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

1.2 Requisites i especificacions

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

1.3 Mètodes i procediments

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus,

egestas vel, odio.

1.4 Pla de treball

Normalment les figures i taules es col·loquen en els entorns `\figure` i `\table`, que poden flotar lliurement en el document. Pots identificar cada flotant amb un `\label`

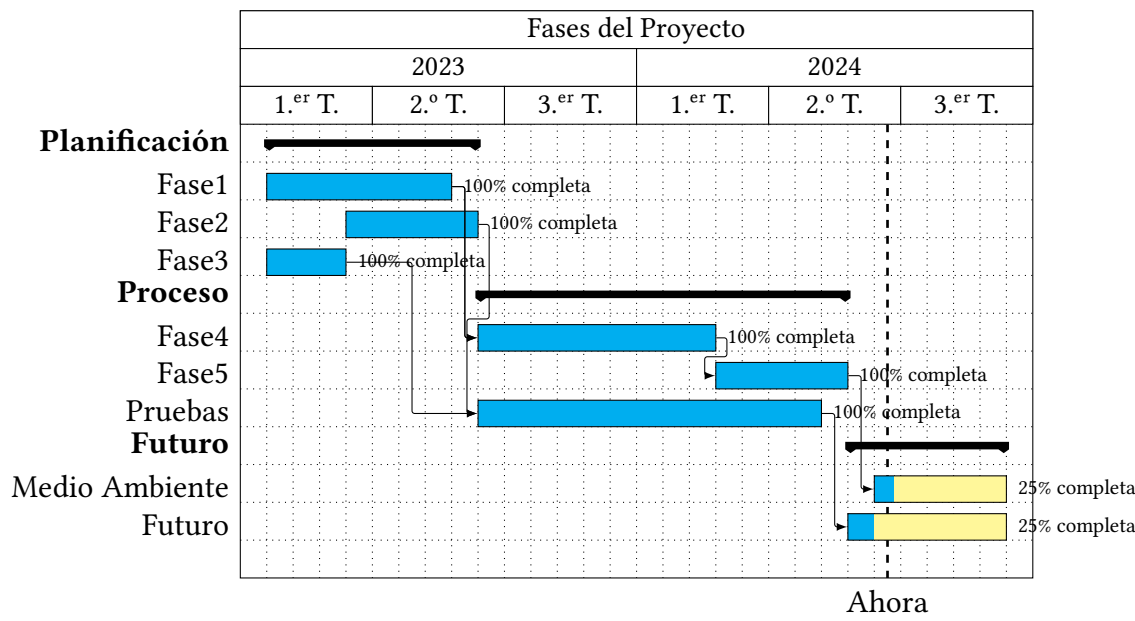


Figura 1.1: Diagrama de Gantt del projecte. Per a més informació, llegiu el manual [18] de Skala.

Estat de l'art de la tecnologia utilitzada o aplicada en aquest TFG

El capítol «Estat de l'Art de la Tecnologia» ofereix una visió detallada dels avenços actuals relacionats amb el tema del vostre treball. Hauria de descriure les teories, models, algorismes clau o desenvolupaments de programari i maquinari, recolzats per articles revisats per experts i altres recursos com ara llibres, patents, informes tècnics, etcètera. Aquest capítol estableix el context i ajuda els lectors a entendre el panorama existent en el camp. En conseqüència, les **cites a referències bibliogràfiques rellevants** són una part important del contingut.

Aquest capítol no només ha de resumir la recerca existent, sinó que també ha de fer-ne una **avaluació crítica**. Això implica destacar les llacunes o limitacions en la tecnologia actual per preparar el terreny per a les tasques que el TFG abordarà. Al final del capítol els lectors haurien de tenir una comprensió clara del que ja se sap sobre el tema, del que encara queda per aprendre i de com el TFG contribueix a aquesta «conversa acadèmica» en curs.

2.1 Internet of Medical Things (IoMT)

L'Internet of Medical Things (IoMT) representa una evolució natural dins l'ecosistema de l'Internet de les Coses (IoT), aplicat específicament al sector sanitari. Aquest concepte engloba una xarxa de dispositius mèdics connectats que recopilen, processen i transmeten dades clíniques en temps real amb l'objectiu de millorar l'atenció mèdica, optimitzar la gestió hospitalària i afavorir el monitoratge remot dels pacients. Entre els dispositius més habituals dins l'IoMT trobem monitors cardíacs, pulsòmetres, inhaladors intel·ligents, implants connectats, sistemes de dosificació automatitzada de medicació, etc.

El creixement de l'IoMT ha estat exponencial els darrers anys, impulsat per l'avenç tecnològic, la miniaturització de sensors, la proliferació de la connectivitat sense ls i la necessitat d'una atenció sanitària més eficient i personalitzada. Cada vegada els hospitals estan adoptant més aquestes tecnologies i s'espera que aquesta tendència es mantingui

en creixement en els pròxims anys.

Tanmateix, aquesta mateixa expansió comporta un augment significatiu de la superfície d'exposició a ciberatacs. A més a més, s'espera que a mesura que avança la seva adopció, aquests dispositius siguin més determinants en les tasques mèdiques, la qual cosa pot implicar una major criticitat en cas de ciberatac.

A diferència dels sistemes informàtics convencionals, els dispositius IoMT sovint operen en entorns amb recursos computacionals limitats (processador, memòria, energia), i moltes vegades han estat dissenyats amb una orientació funcional, no pas de seguretat. Això els fa especialment vulnerables a atacants que poden aprofitar de configuracions per defecte, manca d'actualitzacions, credencials febles o vulnerabilitats en els protocols de comunicació. A més, la connexió d'aquests dispositius mitjançant xarxes Wi-Fi o altres canals sense fils exposa el sistema a atacs com l'escolta (sniffing), suplantació de dispositius (spoofing), atacs de denegació de servei (DoS) entre altres.

Un dels aspectes més crítics del risc en entorns IoMT és la naturalesa de les dades que gestionen. Les dades mèdiques són altament sensibles i personals. Un accés no autoritzat pot vulnerar drets fonamentals com la privacitat i tenir conseqüències legals greus per a les institucions sanitàries. En aquest context, la ciberseguretat en l'àmbit IoMT no es pot considerar un afegit posterior al desplegament dels sistemes, sinó un requisit fonamental des de la fase de disseny. Això, és especialment rellevant en entorns on les conseqüències d'un atac poden tenir un impacte directe sobre la salut i la seguretat física dels pacients.

Finalment, és important destacar que la protecció dels sistemes IoMT també ha de ser escalable i adaptable. L'amenaça no és estàtica, i els vectors d'atac evolucionen constantment. Davant d'aquesta realitat, la recerca en ciberseguretat per a l'IoMT s'està orientant cada cop més cap a solucions dinàmiques, com ara sistemes intel·ligents basats en aprenentatge automàtic que permetin detectar patrons anòmals de comportament i actuar de forma proactiva. En aquest sentit, la generació de datasets reals que simulin tant trànsit legítim com maliciós en entorns IoMT esdevé una peça clau per entrenar i validar aquestes solucions emergents. [4]

2.2 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

El Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) és un protocol de missatgeria lleuger dissenyat per a la comunicació entre dispositius amb recursos limitats en xarxes poc fiables o amb amplada de banda reduïda. Aquest protocol s'ha convertit en un estàndard de facto en moltes aplicacions IoT, inclòs l'àmbit de l'Internet of Medical Things (IoMT), per la seva eficàcia, simplicitat i facilitat de desplegament.

Desenvolupat originalment per IBM l'any 1999, MQTT segueix un model de comunicació publish/subscribe, que afavoreix la desconexió temporal dels nodes i la minimització de l'ús de la xarxa, dos requisits habituals en xarxes IoT.

En una arquitectura MQTT, el component central és el broker, un servidor que actua com a intermediari entre els dispositius que publiquen dades (publishers) i els que les reben

(subscribers). Els dispositius no es comuniquen directament entre ells, sinó que ho fan a través del broker, que rep els missatges publicats en un tema determinat (tòpic) i els redirigeix als clients que s'han subscrit a aquest tema. Aquesta arquitectura desacoblada simplifica el disseny de sistemes escalables i resilients. A l'àmbit IoMT, aquesta estructura és especialment útil per gestionar sensors mèdics que generen dades de manera periòdica, com ara nivells de glucosa, senyals d'electrocardiograma (ECG), o mesures de tensió arterial. Aquests sensors poden publicar lectures de manera eficient al broker MQTT, i altres components del sistema (com bases de dades, aplicacions clíniques o sistemes d'alerta) poden consumir aquesta informació segons les seves necessitats.

El protocol MQTT opera habitualment sobre TCP/IP, utilitzant el port 1883 per a connexions no segures i el port 8883 quan es fa servir TLS (Transport Layer Security) per protegir la transmissió. Entre les característiques tècniques més destacades d'MQTT, podem ressaltar:

- **Qualitat del servei (QoS):** MQTT ofereix tres nivells de abilitat en el lliurament de missatges, cosa que permet ajustar el comportament segons els requisits de l'aplicació.
- **Sessions persistents:** Un missatge es pot marcar com a retained perquè quedi emmagatzemat al broker i sigui enviat automàticament als nous subscriptors del topic. Això permet garantir que les dades més recents estiguin disponibles en tot moment, encara que el dispositiu que les va enviar originalment ja no estigui actiu.
- **Protocol lleuger:** Amb una capçalera mínima de només 2 bytes, MQTT genera molt poca sobrecàrrega, cosa que el fa extremadament eficient per dispositius amb CPU limitada, poca memòria RAM o connexions de xarxa inestables o intermitents.
- **Model desacoblat (publish/subscribe):** Els clients no necessiten conèixer ni l'adreça ni l'estat dels altres dispositius. Això facilita l'escalabilitat i la flexibilitat del sistema, ja que els rols de publicador i subscriptor poden canviar dinàmicament.
- **Jerarquia de temes (topics):** Els topics MQTT segueixen una estructura jeràrquica cosa que permet l'ús de comodins ("+", "#"), fet que proporciona una gran flexibilitat, però també pot ser explotat maliciosament si no es controla adequadament.

Malgrat aquests avantatges, el protocol MQTT no està pensat amb la seguretat com a objectiu principal, cosa que el fa vulnerable en entorns crítics com l'IoMT si no s'hi afegeixen mecanismes de protecció. Les principals limitacions de seguretat inclouen:

- **El broker com a punt crític:** El broker MQTT és un únic punt de fallada. Si és compromès o queda saturat, tota la infraestructura de comunicació es veu afectada.
- **Flooding i sobrecàrrega:** Un ús malintencionat del QoS i grans volums de dades, poden causar sobrecàrregues en el broker i saturar el sistema.
- **Control d'accés deficient:** En moltes implementacions, si no es configuren polítiques d'ACL (Access Control List), qualsevol client pot publicar o subscriure's a

qualsevol tema.

- **Manca d'autenticació forta:** MQTT deneix només un sistema bàsic d'autenticació mitjançant username i password, sense mecanismes d'autenticació mútua ni suport nadiu per a protocols d'identitat moderna (com OAuth 2.0). Si el canal de comunicació no es protegeix amb TLS/SSL, tant les dades com les credencials es transmeten en text pla.
- **Lack of message integrity:** Si no s'utilitza TLS, tampoc hi ha garanties que els missatges no hagin estat modificats durant el trànsit.

Donada la seva extensió en entorns IoT i les seves característiques adaptades a dispositius amb recursos limitats, MQTT s'ha triat com a protocol principal per a la simulació de trànsit en aquest treball. El seu ús permet generar escenaris tant de comunicació legítima com maliciosa, en els quals es poden observar comportaments anòmals mitjançant eines d'anàlisi i detecció. Això facilita la creació de datasets realistes per a l'entrenament d'IDS basats en IA.

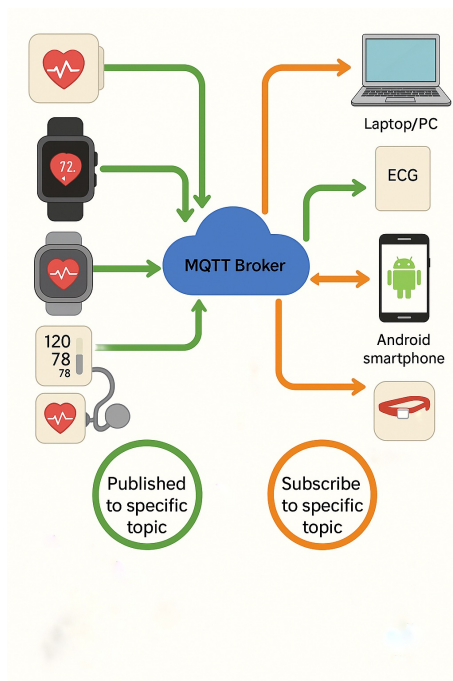


Figura 2.1: Protocol MQTT en un entorn IoMT. Imatge extreta de [13] i adaptada amb intel·ligència artificial.

2.3 Altres protocols en l'entorn IoMT

Pel que fa a altres protocols, tot i que MQTT és el protocol principal emprat en aquest treball, també es considera l'ús del protocol Constrained Application Protocol (CoAP) com a alternativa o complement en la generació de trànsit. CoAP és un protocol pensat específicament per a dispositius amb recursos limitats en xarxes IoT. Funciona sobre UDP,

cosa que li proporciona una latència molt baixa i un comportament lleuger, tot i que això també comporta certes limitacions pel que fa a la fiabilitat de la transmissió.

CoAP segueix un model client-servidor similar a HTTP però optimitzat per a entorns embeguts. Utilitza mètodes com GET, POST, PUT i DELETE, i permet observar recursos mitjançant un sistema d'actualitzacions automàtiques (observe). A diferència de MQTT, que és orientat a un model (publish/subscribe), CoAP és més adequat per a interaccions puntuals o consulta de recursos puntuals. En aquest treball, l'ús de CoAP es contempla per generar variabilitat en els escenaris de comunicació i per comparar comportaments de trànsit entre protocols amb estructures diferents. Això pot enriquir el dataset resultant i millorar la capacitat de generalització del sistema d'IA per a la detecció d'intrusions.

En l'entorn mèdic, també són utilitzats altres protocols d'aplicació com HTTP/HTTPS o bé Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP). Pel que fa a protocols de capa física, també es fa servir Bluetooth Low Energy (BLE), Near Field Communication (NFC) o bé dades cel·lulars com NB-IoT que no seran usats en aquest treball.

2.4 Eines per a la simulació i anàlisi de trànsit en entorns IoMT

Per a la realització d'aquest treball s'han emprat diverses eines de codi obert, escollides pel seu suport ampliat en entorns de xarxa, la seva flexibilitat i la possibilitat d'automatitzar proves i captures de trànsit en entorns simulats. Algunes d'aquestes eines tenen un enfocament general i són àmpliament utilitzades en proves de penetració en xarxes IP tradicionals, mentre que d'altres presenten característiques específiques que les fan especialment adequades per a entorns IoT o IoMT. A continuació es descriuen les principals fetes servir en aquest projecte:

2.4.1 Mosquitto

Mosquitto és una de les implementacions més conegudes del protocol MQTT. Es tracta d'un broker MQTT lleuger, de codi obert i altament configurable i compatible amb les especificacions MQTT 3.1 i 5.0 que permet la configuració de les funcionalitats bàsiques del protocol com definir tòpics, limitacions en l'ús de recursos, ACLs i encriptat TLS. També permet desplegar clients MQTT mitjançant mosquitto-clients i poder realitzar el procés de subscriure's a un tòpic en un broker concret (mosquitto-sub) on publicar missatges en aquest tòpic (mosquitto-pub). Adicionalment, disposa de les configuracions bàsiques de MQTT com els paràmetres de QoS, retain o presistance. [8]

En l'entorn acadèmic, la seva simplicitat fa que sigui una excel·lent opció per a desplegar laboratoris d'IoMT.

2.4.2 Docker

Docker és una plataforma de virtualització lleugera basada en contenidors que permet desplegar entorns complexos de manera ràpida, reproduïble i aïllada. Els seus principals avantatges són: [1]

- **Escalabilitat i control:** És possible desplegar ràpidament desenes de dispositius virtuals, amb configuracions personalitzades, IPs xes i comportaments diferenciats.
- **Ús d'orquestradors:** Gràcies a Docker Compose, es poden definir tots els serveis i la seva configuració en un sol fitxer YAML, cosa que permetent la reproducció exacta de l'escenari en qualsevol màquina o entorn.
- **Monitoratge de xarxa simplificat:** Docker permet definir xarxes virtuals internes, facilitant la simulació d'una infraestructura complexa.

2.4.3 Nmap

Nmap (Network Mapper) és una eina de “network reconnaissance” i auditoria de xarxes molt utilitzada en l'àmbit del pentesting. Permet identificar dispositius connectats a una xarxa, descobrir serveis oberts, detectar sistemes operatius i obtenir informació sobre les possibles vulnerabilitats de cada node mitjançant scripts NSE personalitzats. [16]

2.4.4 TCPDump

TCPDump és una eina de línia de comandes per a la captura i anàlisi de paquets a nivell de xarxa. Es tracta d'una eina fonamental en entorns de recerca i pentesting, ja que permet registrar amb precisió tot el trànsit que circula per una interfície de xarxa en temps real. [2]

TCPDump permet capturar trànsit benigne i maliciós entre dispositius de la xarxa i crear arxius de captura amb extensió pcap. És una eina similar a Wireshark, però més lleugera, utilitzada a través de terminal i amb capacitat de ser feta servir en automatitzacions.

Metodologia / desenvolupament del projecte

En aquest capítol es detallarà la metodologia emprada en la realització del treball. Té com a objectiu oferir un compte detallat de les aproximacions i tècniques utilitzades, assegurant la replicabilitat i el rigor acadèmic. No només cobrirà els mètodes de recerca i tècniques de mesurament emprats, sinó que també aprofundirà en les especificitats del desenvolupament de programari i maquinari. Tant si el projecte implica anàlisi qualitativa, mesuraments quantitius, modelatge computacional com prototipatge físic, aquest capítol hauria d'elucidar com contribueix cada component als objectius generals.

A més de descriure els mètodes en si mateixos, el capítol també proporcionarà justificacions per què es van escollir mètodes particulars enfront d'altres. Per exemple, podria explicar la tria d'un llenguatge de programació específic, prova estadística o configuració experimental. El capítol també abordarà les limitacions de la metodologia i com aquestes s'han mitigat o tingut en compte. Els lectors haurien de sortir amb una comprensió clara de com s'ha dut a terme el desenvolupament del projecte, per què s'han escollit determinades opcions i com aquests mètodes serveixen per complir els objectius establerts inicialment.

3.1 Introducció d'expressions matemàtiques

L^AT_EX és una eina inestimable per a la composició tipogràfica de contingut matemàtic. En aquesta secció mostrem les comandes i entorns L^AT_EX essencials per a l'escriptura matemàtica. Per a més informació consulteu el capítol 3 de [15].

3.1.1 Matemàtiques en línia i aïllades

Per a expressions en línia, utilitzeu \dots o $\left(\dots \right)$. Escriviu entre $\left[\dots \right]$ les expressions que s'han de mostrar en una línia apart.

El polinomi $p(x) = 3x^2 + 2x - 1$ té arrels $x_1 = -1$ i $x_2 = \frac{1}{3}$.

Sigui la funció de xarxa:

$$H(s) = \frac{2\zeta\omega_0 s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$

El polinomi $p(x) = 3x^2 + 2x - 1$ té arrels $x_1 = -1$ i $x_2 = \frac{1}{3}$.

Sigui la funció de xarxa:

$$H(s) = \frac{2\zeta\omega_0 s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$

3.1.2 Numeració i agrupació d'equacions

Els entorns `equation`, `gather`, `align` i altres numeren automàticament les equacions. Si definiu una etiqueta dins de l'equació podreu fer referència a ella dins del text usant `\ref{etiqueta}`. Podeu suprimir la numeració amb `\nonumber`.

```
\begin{equation}
  a + b = c \quad \text{\label{eq:formula}}
\end{equation}
Xxxx xxx \ref{eq:formula}.
```

$$a + b = c \quad (3.1)$$

Xxxx xxx 3.1.

```
\begin{gather}
  c = a + b \\
  d + e = f \quad \text{\nonumber}
\end{gather}
```

$$c = a + b \quad (3.2)$$

$$d + e = f$$

```
\begin{align}
  c &= a + b \quad \text{\nonumber} \\
  d + e &= f
\end{align}
```

$$\begin{aligned} c &= a + b \\ d + e &= f \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.1.3 Introducció de matrius

```
$A = \begin{pmatrix}
  a & b \\
  c & d
\end{pmatrix}$
```

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

3.2 Taules

El paquet `booktabs` ([5]) s'utilitza sovint per crear taules amb un espaiat millor i línies horitzontals més llegibles, i el paquet `array` es pot utilitzar per definir nous tipus de

columna. A continuació es mostra un exemple de taula que utilitza aquests paquets i l'entorn tabular (consulteu el codi \LaTeX del document per a saber com s'ha creat.):

Taula 3.1: *Taula d'exemple*

Element	Quantitat	Descripció
Mango	5	Una fruita taronja
Plàtan	2	Una fruita groga
Cirera	20	Una fruita petita, rodona i vermella

En aquest exemple (consulteu el codi font \LaTeX):

- `\toprule`, `\midrule`, i `\bottomrule` del paquet `booktabs` creen línies horitzontals que tenen un espaiat per defecte millor que l'estàndard de \LaTeX `\hline`.
- La definició `>\raggedright\arraybackslashp{3cm}` del paquet `array` s'utilitza per crear un nou tipus de columna per a la descripció, on el text està alineat a l'esquerra i la columna té una amplada fixa de 3 cm.

Compileu aquest codi amb \LaTeX per produir la taula 3.1. La taula hauria de semblar bonica i llegible.

3.3 Diagrames

El paquet *TikZ* ([20]) permet dibuixar tot tipus de diagrames i gràfics. Val la pena consultar el seu manual d'ús per tal de conèixer el seu funcionament i poder-ne treure tot el suc possible. Cal no deixar-se intimidar per la seva longitud (1300+ pàgines) ja que la majoria d'espai l'ocupen nombrosos exemples que il·lustren les possibilitats del llenguatge.

Per si això fos poc, també hi ha disponibles una sèrie de biblioteques addicionals que permeten d'augmentar encara més les funcionalitats del *TikZ* amb l'addició d'ordres per facilitar el dibuix de tot tipus d'objectes, des de xarxes de Petri fins a circuits electrònics, passant per coses tan diverses com calendaris, diagrames d'estats o figures de papiroflèxia.

La figura 3.1 mostra alguns exemples de diagrames creats amb el paquet *TikZ*.

3.4 Gràfiques

Òbviament podeu crear les vostres gràfiques usant un programa informàtic adient, exportant el resultat a algun format gràfic (preferiblement vectorial com ara PDF per no perdre qualitat) i inserint les imatges resultants al document \LaTeX en la forma habitual. Aquesta via, però, té l'inconvenient que dificulta aconseguir la coherència i cohesió

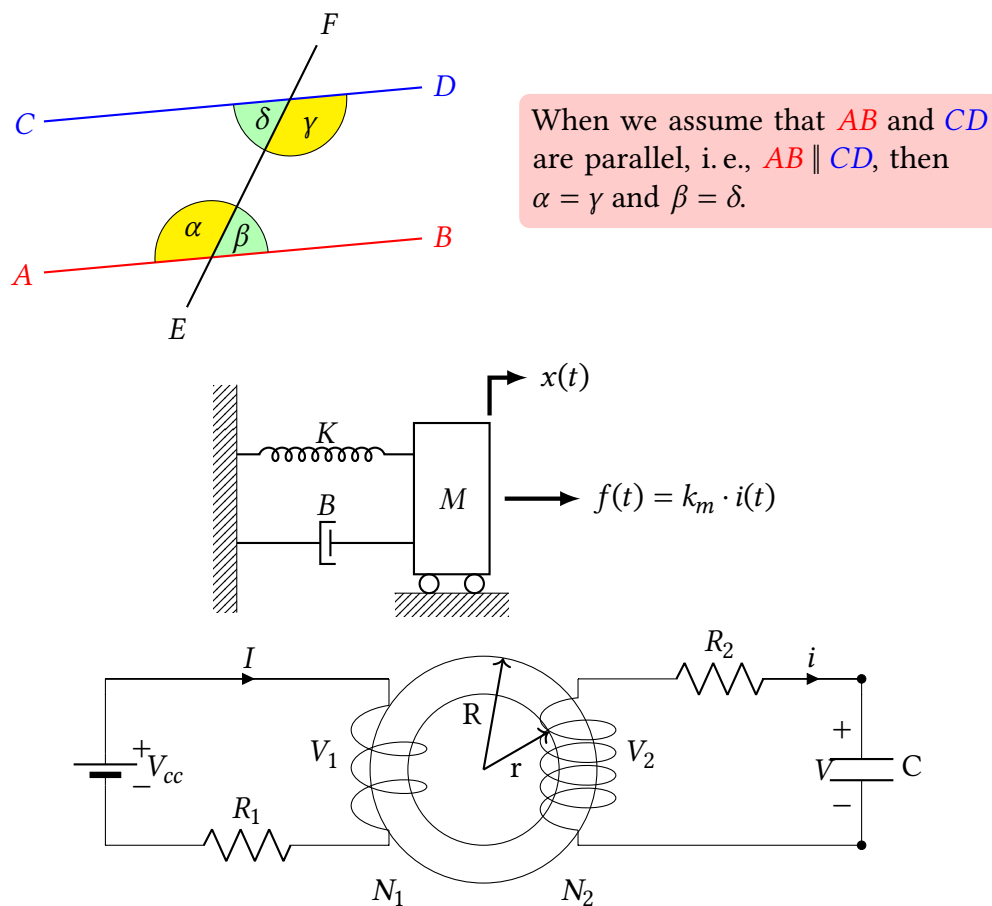


Figura 3.1: Diagrames creats usant les ordres del paquet TikZ

tipogràfica entre el text del document i el de les imatges. Com a conseqüència, la qualitat del document se'n ressent.

Per tant, si es vol aconseguir la màxima coherència tipogràfica entre el text i les gràfiques, és preferible que sigui el propi \LaTeX qui s'encarregui de generar les gràfiques (amb les dades que li proporcionem) ja que en aquest cas usarà les mateixes fonts arreu del document.

A tal efecte al llarg dels anys s'han desenvolupat múltiples paquets i tècniques per aconseguir aquest objectiu. El que aquí us proposem és usar el paquet «**pgfplots**», que utilitza internament el paquet *TikZ* per generar una sèrie de *macros* addicional que faciliten el dibuix de gràfiques. La figura 3.2 mostra un exemple del que es pot arribar a fer amb aquest paquet, però recomanem fermament que consulteu el manual d'instruccions ([6]) on s'il·lustren molts més exemples.

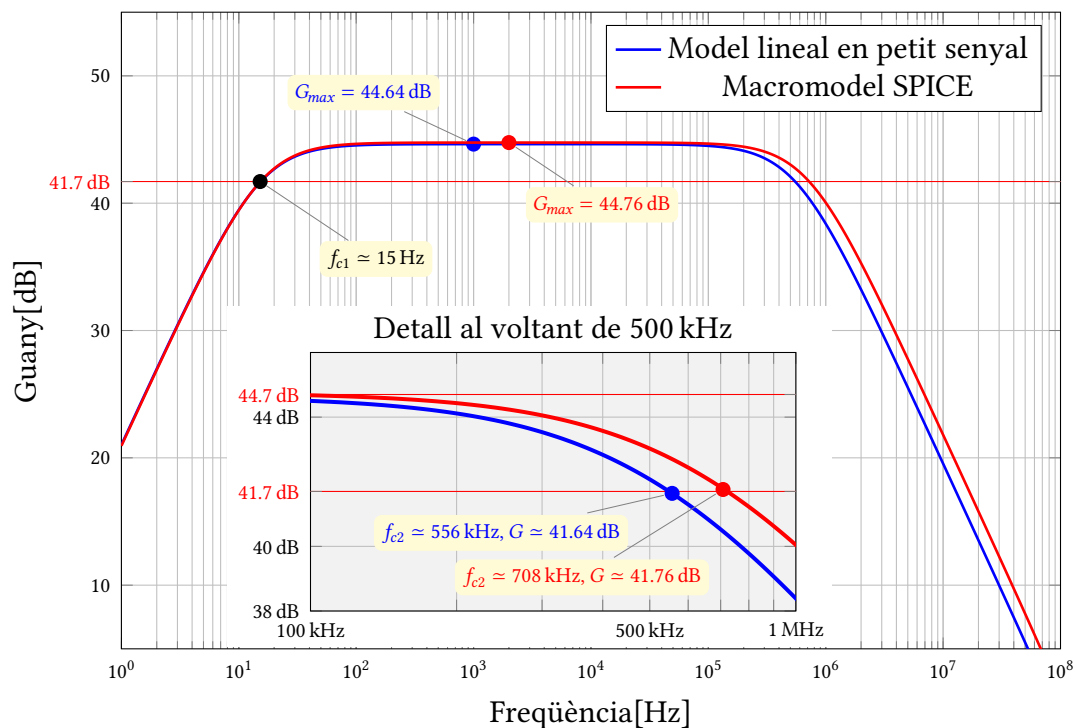


Figura 3.2: Exemple de gràfica complexa dibuixada amb ajut del paquet pgfplots

3.5 Llistats de codi

L'entorn `tcblistings` del paquet `tcolorbox` ([19]) insereix els llistats de codi generats pels paquets `listings` o `minted` dins d'una `tcolorbox`, amb la qual cosa s'aconsegueixen uns llistats molt ben presentats i altament configurables.

Com a exemple d'això, a continuació es mostra el llistat d'un programa en llenguatge Python que implementa l'algorisme del «sedàs d'Eratòstenes» per calcular els nombres primers menors d'un cert nombre donat. Observeu que el paquet «listings» és capaç d'interpretar i ressaltar automàticament la sintaxi del llenguatge.

Exemple de Python: Sedàs d'Eratòstenes

```

1 def sieve_of_eratosthenes(limit):
2     primes = []
3     sieve = [True] * (limit + 1)
4     for num in range(2, limit + 1):
5         if sieve[num]:
6             primes.append(num)
7             for multiple in range(num*num, limit + 1, num):
8                 sieve[multiple] = False
9     return primes
10

```

```

11 # Example usage:
12 if __name__ == "__main__":
13     limit = 30
14     print(f"The prime numbers up to {limit} are:
15           {sieve_of_eratosthenes(limit)}")

```

3.6 Unitats

Una de les coses que sovint es menysté a l'hora d'escriure és la correcta representació de valors i unitats, que és essencial en textos científics i tècnics. El paquet `siunitx` de \LaTeX s'ajusta al sistema internacional d'unitats (SI) i amb ell els usuaris poden assegurar-se que els nombres i unitats són presentats amb la notació, espaiat i font adequats, tot respectant les diferents convencions internacionals.

A continuació presentem alguns exemples d'ús, però per una presentació exhaustiva de les possibilitats del paquet caldrà que consulteu la seva documentació ([21]).

- **Composició tipogràfica d'unitats senzilles:** Per compondre una unitat utilitzant `siunitx`, podeu fer servir la comanda `\si{}`. Per exemple, per compondre "metres per segon," escriuríeu: `\si{\meter\per\second}` que resultaria en «m s⁻¹» amb l'espaiament correcte entre ells.
- **Combinació de Nombre i Unitat:** Si voleu incloure un valor amb una unitat, useu la comanda `\SI{}`. Per exemple, per expressar "10 kilo-ohm" escriuríeu: `\SI{10}{\kohm}`, que resulta en 10 kΩ. Aquesta comanda assegura que el nombre i la unitat estan adequadament espaiats.
- **Unitats complexes:** Per unitats més complexes, `siunitx` permet combinar unitats de diverses maneres. Per exemple, per compondre «gigawatts per metre quadrat per estereoradian» podeu usar:

```
\si{\giga\watt\per\square\meter\per\steradian}
```

i el paquet treu «GW m⁻² sr⁻¹» tenint cura de tota la formatació adequada i la font.

`siunitx` és molt flexible i pot manejar una àmplia gamma d'unitats i opcions de formatatge de nombres, incloent nombres complexos amb unitats, l'alineació en taules, l'arrodoniment de nombres, i l'establiment d'opcions globals per a la consistència a través d'un document.

Resultats

Aquest capítol ha d'incloure l'anàlisi de les vostres dades i els resultats obtinguts. A més, incloeu-hi taules, figures i citacions pertinents per donar suport als vostres resultats i interpretacions. Aquí teniu una llista suggerida de temes a tractar:

4.1 Experiments i proves

Descriviu els experiments realitzats per provar el rendiment del vostre projecte. Expliqueu com heu recopilat i processat les dades.

4.2 Visualització de les dades

Creeu representacions visuals dels resultats (per exemple, gràfics de dispersió, diagrames de barres). Interpreteu les visualitzacions i relacioneu-les amb les preguntes de recerca.

4.3 Limitacions

Reconeixeu qualsevol limitació en les dades o l'anàlisi. Expliqueu com aquestes limitacions podrien haver afectat els resultats.

Anàlisi de sostenibilitat i implicacions ètiques

Des del curs 2023-24, la normativa de TFG de l'ETSETB demana la inclusió d'un informe de sostenibilitat a la memòria del treball. Aquesta anàlisi consisteix en una valoració dels impactes ambientals, socials i econòmics, i les possibles implicacions ètiques que ha comportat la realització del TFG. En el cas que el TFG plantegi un producte/servei/sistema/edifici/etc., que podria arribar a implementar-se, l'anàlisi també ha de realitzar-se sobre els impactes que tindria la proposta en la seva execució durant les diferents etapes del seu cicle de vida.

A la plataforma ATENEA trobareu un document separat amb les instruccions detallades de què ha de contenir i com cal confeccionar l'informe de sostenibilitat.

IMPORTANT: Noteu que l'antic capítol de «Pressupost del projecte» ara queda integrat en l'anàlisi de sostenibilitat, concretament en les cel·les «Econòmic/-Desenvolupament del TFG» i «Econòmic/Execució del projecte».

Conclusions i Línies Futures

6.1 Conclusions

- Resumiu els resultats principals del vostre treball.
- Discutiu el grau d'assoliment en relació amb els objectius marcats a l'inici del treball.
- Destaqueu les contribucions del vostre treball al camp d'estudi.

6.2 Línies Futures

- Identifiqueu àrees per a futures investigacions o desenvolupament basades en el vostre treball.
- Discutiu possibles vies per ampliar o millorar el projecte.
- Considereu les preguntes que han quedat sense resposta i les oportunitats per a futures exploracions.

Bibliografia

El sistema *biblatex* simplifica la gestió de la bibliografia en treballs científics, proporcionant automatització i personalització en el format de les citacions. Això permet a l'autor del document enfocar-se en el contingut sense haver de preocupar-se per l'estil de les referències, estalviant temps i reduint errors.

La base de dades de referències bibliogràfiques és al fitxer «TFG.bib» i és allà on heu d'afegir les vostres referències. Consulteu el manual del *biblatex*, secció «Database Guide», per conèixer els tipus de referències i camps disponibles.

Podeu modificar (o suprimir) aquesta nota editant la macro `\defbibnote` al fitxer «TFG.tex».

-
- [1] Newtowk Chuck. *Docker Tutorials - NetworkChuck*. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=eGz9DSaIeY&list=PLIhvC56v63IJlnU4k60d0oFIrsbXEivQo&index=2> (cons. 09-05-2025).
 - [2] TCPDump Developers. *TCPDump: Manual and Documentation*. 2023. URL: <https://www.tcpdump.org/> (cons. 08-05-2025).
 - [3] Albert Einstein. «Zur Elektrodynamik bewegter Körper». A: *Annalen der Physik* 322.10 (1905), pàg. 891 - 921.
 - [4] Alexandria University Elsevier BV on behalf of Faculty of Engineering. *The internet of things healthcare monitoring system based on MQTT protocol*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016823000881> (cons. 08-05-2025).
 - [5] Simon Fear. *booktabs Publication quality tables in L^AT_EX*. 2020. URL: <http://mirrors.ctan.org/macros/latex/contrib/booktabs/booktabs.pdf> (cons. 01-11-2023).
 - [6] Christian Feuersänger. *Manual for Package PGFPLOTS*. URL: <http://mirrors.ctan.org/graphics/pgf/contrib/pgfplots/doc/pgfplots.pdf> (cons. 03-11-2023).
 - [7] Richard P. Feynman, Robert B. Leighton i Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics*. Vol. I-III. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1963. ISBN: 978-0201021165.
 - [8] Eclipse Foundation. *Mosquitto MQTT Broker Documentation*. 2024. URL: <https://mosquitto.org/documentation/> (cons. 08-05-2025).

- [9] Philip Kime, Moritz Wemheuer i Philipp Lehman. *The biblatex Package*. URL: <https://ctan.org/pkg/biblatex> (cons. 06-11-2023).
- [10] Donald Knuth. *Knuth: Computers and Typesetting*. URL: <https://www-cs-faculty.stanford.edu/~knuth/abcde.html>.
- [11] Donald E. Knuth. *The T_EXbook*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1986. ISBN: 0-201-13448-9.
- [12] Leslie Lamport. *L^AT_EX: A Document Preparation System, 2nd Edition*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1994. ISBN: 0-201-52983-1.
- [13] Jo mateix. *MQTT a IoMT*. Figura adaptada i modificada amb IA. 2024. URL: https://www.researchgate.net/figure/MQTT-protocol-operation-in-AAL-system_fig1_339906098.
- [14] Frank Mittelbach i Ulrike Fischer. *The L^AT_EX Companion*. 3a ed. 2 vol. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- [15] Tobias Oetiker et al. *The Not So Short Introduction to L^AT_EX*. URL: <https://tobi.oetiker.ch/lshort/lshort.pdf> (cons. 31-10-2023).
- [16] Nmap Project. *Nmap Reference Guide*. 2024. URL: <https://nmap.org/book/man.html#man-description/> (cons. 08-05-2025).
- [17] Claude E. Shannon. «A Mathematical Theory of Communication». A: *The Bell System Technical Journal* 27.3 (1948), pàg. 379 - 423. DOI: [10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x).
- [18] Wolfgang Skala. *Drawing Gantt Charts in L^AT_EX with TikZ*. URL: <http://osl.ugr.es/CTAN/graphics/pgf/contrib/pgfgantt/pgfgantt.pdf>.
- [19] Thomas F. Sturm. *The tcolorbox package*. URL: <http://mirrors.ctan.org/macros/latex/contrib/tcolorbox/tcolorbox.pdf> (cons. 05-11-2023).
- [20] Till Tantau. *The TikZ and PGF Packages*. URL: <http://mirrors.ctan.org/graphics/pgf/base/doc/pgfmanual.pdf> (cons. 02-11-2023).
- [21] Joseph Wright. *siunitx – A comprehensive (SI) units package*. URL: <https://ctan.org/pkg/siunitx> (cons. 08-11-2023).

Un apèndix

Es poden incloure apèndixs al TFG però no és obligatori.

