



**Politecnico
di Torino**

Collegio di Ingegneria Energetica e Nucleare

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Energetica e Nucleare

Analisi di disponibilità per la conversione di un'unità di raffineria esistente in un impianto per la produzione di biocarburanti

Relatori:

Prof. Andrea Carpignano
Prof.ssa. Raffaella Gerboni
Ing. Stefano Piccoli
Ing. Luca Portè

Candidato:

Giuseppe Gurrisi

A.A. 2025/2026

INDICE

ABSTRACT	5
1 INTRODUZIONE	6
1.1 CONTESTO.....	6
1.2 LE BIORAFFINERIE: ASPETTI NORMATIVI E TECNOLOGICI.....	8
1.3 OBIETTIVI E STRUTTURA DELLA TESI.....	11
2 METODOLOGIA	14
2.1 GENERALITÀ SULL'ANALISI RAM.....	14
2.2 FLUSSO DI LAVORO.....	15
2.2.1 <i>Limiti di batteria e unità funzionali (UF)</i>	17
2.2.1 <i>Registro degli Asset (RA)</i>	17
2.2.2 <i>Acquisizione e fonti dei dati</i>	18
2.2.3 <i>Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)</i>	22
2.2.4 <i>Analisi di Manutenibilità</i>	23
2.2.5 <i>Analisi di disponibilità e metodologia Monte Carlo</i>	24
3 CASO STUDIO	28
3.1 DESCRIZIONE IMPIANTO E PROCESSO, DEFINIZIONE DELLE UNITÀ FUNZIONALI	28
3.1.1 <i>Unità di pretrattamento PTR 01 e raffinazione RAF 02</i>	31
3.1.2 <i>Unità trattamento acque acide TAA 03 e ammine TRA 04</i>	35
3.1.3 <i>Unità acqua di raffreddamento ARA 05</i>	37
3.1.4 <i>Unità serbatoi SER 06 e STC 07: logistica materie prime e prodotti</i>	38
3.2 FASE PROGETTUALE.....	39
4 REGISTRO DEGLI ASSET	41
4.1 IPOTESI.....	41
4.2 IL REGISTRO.....	44
4.3 DATABASE PARAMETRI R&M.....	50
5 FMEA.....	54
5.1 APPROCCIO ALL'ANALISI	54
5.2 L'ANALISI	55
5.2.1 <i>Casi notevoli</i>	61
5.2.1.1 <i>Unità di pretrattamento</i>	61
5.2.1.2 <i>Perdite esterne</i>	62
5.2.1.3 <i>Sensori TXE dei reattori</i>	63
5.3 RISULTATI DELL'ANALISI.....	65

6	ANALISI DI MANUTENIBILITA'	71
6.1	ATTIVITÀ PRELIMINARI, IPOTESI E ASSUNZIONI GENERALI	73
6.2	L'ANALISI	76
6.2.1	<i>Take Out of Service Time (TOST)</i>	77
6.2.2	<i>Bring Into Service Time (BIST)</i>	81
6.2.3	<i>Interventi di manutenzione preventiva</i>	83
6.3	RISULTATI DELL'ANALISI	85
7	ANALISI DI DISPONIBILITA' PRODUTTIVA	89
7.1	MODELLO, INPUT ED IPOTESI.....	91
7.2	RISULTATI DELL'ANALISI: CASO BASE	96
7.3	CASO STUDIO OTTIMIZZATO	100
7.4	COMPARAZIONE CON IMPIANTO TRADIZIONALE.....	107
7.4.1	<i>Premesse</i>	107
7.4.2	<i>Il confronto</i>	108
	CONCLUSIONI	113
	BIBLIOGRAFIA	115

ABSTRACT

Il presente lavoro di tesi concerne l'analisi RAM (Reliability, Availability, Maintainability) applicata ad un progetto di conversione impiantistica nel contesto della transizione energetica e dei settori "hard-to-abate" (difficili da abbattere). Il progetto in questione riguarda la trasformazione di un'unità di raffineria in unità di bioraffineria per la produzione di biocarburanti.

Vengono innanzitutto inquadrati il contesto energetico, normativo e tecnologico in cui si collocano le bioraffinerie e la metodologia impiegata per l'analisi.

Lo studio è quindi approfondito in tre capitoli distinti — Registro degli Asset, FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) e Analisi di Manutenibilità — che applicano e contestualizzano l'analisi alle specifiche operative e agli obiettivi richiesti dal caso oggetto di studio. Il Registro degli Asset ha definito la base dati degli elementi critici; la FMEA ha identificato modi di guasto, cause ed effetti principali; l'analisi di manutenibilità ha quantificato i tempi di riparazione necessari.

Questi input sono stati infine integrati in un modello dinamico di simulazione implementato sul software Maros, finalizzato a riprodurre il funzionamento dell'impianto lungo la sua vita utile prevista e a ricavare indicatori sulla disponibilità produttiva.

L'analisi RAM è stata eseguita per un progetto in fase di FEED (Front-End Engineering and Design). Nonostante un certo grado di incertezza nei dati di input, dovuto alla natura preliminare del progetto, lo studio conferma il suo valore strategico configurandosi quale strumento previsionale in grado di orientare le scelte, sia di architettura che di gestione, quando è ancora presente un ampio margine di intervento.

In conclusione, la tesi dimostra come l'analisi RAM costituisca uno strumento strategico per supportare la progettazione e garantire la sostenibilità operativa e industriale di impianti convertiti alla produzione di biocarburanti.

1 INTRODUZIONE

1.1 Contesto

Il settore energetico globale sta attraversando una profonda trasformazione guidata dalle necessità sempre più urgenti di ridurre l'uso di risorse non rinnovabili e abbattere le emissioni di gas a effetto serra. In risposta a tali necessità sono adottate a livello nazionale ed internazionale, non senza ostacoli e difficoltà, nuove politiche energetiche e climatiche. Tali politiche incentivano a ridefinire l'approvvigionamento da fonti energetiche rinnovabili, gestire i consumi di energia e ridurre gli scarti e inquinanti emessi per favorire il noto processo di "transizione energetica". I Paesi membri dell'Unione Europea guidano con maggior spinta l'adozione di queste politiche. Il loro obiettivo è molto ambizioso: conseguire la neutralità climatica entro il 2050 [1].

Nel settore della produzione di energia elettrica sono stati ottenuti sicuramente significativi progressi grazie, ad esempio, alla riduzione dei costi e all'elevato grado di maturità tecnologica raggiunto da soluzioni come il fotovoltaico e l'eolico. Rimangono, tuttavia, settori in cui la transizione risulta ancora complicata nel potersi realizzare (*hard-to-abate*). Il settore dei trasporti è tra questi e risulta tra i più difficili da trasformare a causa di importanti sfide di carattere ingegneristico. Esso, infatti, è caratterizzato da stringenti vincoli in termini di densità energetica, economicità, affidabilità operativa e sicurezza che lo relegano ancora all'impiego di carburanti liquidi di origine fossile. Riguardo ad esempio la densità energetica, i carburanti di origine fossile mostrano valori di 12,4–12,9 kWh/kg, ben due ordini di grandezza superiori a quelli delle batterie agli ioni di litio che a livello di sistema difficilmente superano gli 0,13–0,2 kWh/kg [2]. Questa importante differenza comporta, per la soluzione basata su accumulo elettrochimico, limitazioni rilevanti in termini di autonomia, massa trasportabile e flessibilità operativa. Anche dal punto di vista economico, considerando i costi complessivi, le soluzioni basate sui carburanti liquidi tradizionali risultano più convenienti. L'elettrificazione richiede, infatti, ulteriori investimenti nello sviluppo di tecnologie di accumulo ad alta densità energetica, la realizzazione di infrastrutture dedicate e la conversione/rottamazione delle flotte mezzi esistenti. Allo stato attuale una transizione integrale a sistemi a batterie è di fatto difficilmente realizzabile.

Anche l'utilizzo di vettori alternativi come l'idrogeno presenta sfide non trascurabili. Esso, innanzitutto, non è disponibile in natura e per essere "verde", cioè ricavato da fonti energetiche rinnovabili, richiede la costruzione di apposite infrastrutture non ancora mature in termini di affidabilità ed economicità. La resa produttiva della filiera "verde" è per di più estremamente bassa. Sotto il profilo della sicurezza e della gestione dei materiali, l'idrogeno introduce, inoltre, ulteriori

criticità. Date le ridotte dimensioni molecolari, esso diffonde nella struttura cristallina dei materiali causandone l'infragilimento e manifesta propensione a perdite per permeazione in stoccaggi a pressioni maggiori di quella atmosferica. L'idrogeno è anche estremamente infiammabile presentando un ampio intervallo di infiammabilità (5-75% in volume) e bassissime energie di innesco (0,02 mJ) [3]. Alla luce quindi delle limitazioni tecniche ed economiche delle soluzioni basate sull'accumulo elettrochimico o sull'idrogeno, emerge con forza il ruolo strategico dei biocarburanti quale soluzione affidabile ed economica per i settori *hard-to-abate*.

I biocarburanti avanzati, derivati da biomasse sostenibili, residui o rifiuti, offrono prestazioni energetiche comparabili a quelle dei carburanti tradizionali, garantendo riduzioni significative delle emissioni di CO₂ sull'intero ciclo di vita (LCA – Life Cycle Assessment). A seconda della filiera produttiva tali riduzioni possono superare il 60–80% rispetto ai carburanti fossili convenzionali [4]. I biocarburanti possono essere integrati, anche in miscela, nei sistemi di distribuzione e nei motori attualmente in esercizio permettendo sia di contenere i costi di transizione, sia di garantire la continuità operativa degli attuali asset esistenti. In UE la sostituzione dei carburanti tradizionali con quelli bio è spinta anche da uno strutturato e stringente quadro normativo in materia di emissioni e uso di combustibili che sollecitano indirettamente anche il settore della raffinazione. L'inasprimento degli standard ambientali induce, infatti, una contrazione della domanda di prodotti di origine fossile. Gli impianti di raffinazione tradizionale rischiano, di conseguenza, un'obsolescenza precoce e una perdita di valore non accettabile per gli operatori. La loro conversione totale o parziale in impianti per la produzione di biocarburanti rappresenta, dunque, per questi soggetti, una strategia industriale di particolare interesse. Essa consente, infatti, di valorizzare infrastrutture già esistenti, garantire i volumi produttivi e mitigare il rischio economico degli investimenti sia nel presente che nel futuro. La conversione delle raffinerie accelera il raggiungimento dei target di sostenibilità attraverso la riduzione delle emissioni e la valorizzazione degli scarti secondo i principi dell'economia circolare. Fattore sociale non trascurabile, infine, è il mantenimento di forze lavoro e competenze industriali altamente specializzate già presenti sul territorio.

La trasformazione di una raffineria tradizionale in bioraffineria comporta, tuttavia, importanti sfide ingegneristiche. A differenza delle raffinerie convenzionali, alimentate da una materia prima relativamente omogenea come il petrolio greggio, le bioraffinerie processano “ingredienti” anche piuttosto eterogenei tra di loro. Questi presentano quindi composizioni chimico-fisiche e livelli di impurità variabili e differenti, in grado di incidere sulle prestazioni delle unità di processo, sull'affidabilità delle apparecchiature e sulla gestione operativa complessiva. Tutto ciò, infine, va a riflettersi sulla capacità produttiva della bioraffineria. La produttività ha un ruolo sempre importante nel settore industriale, ma ancor di più in questa specifica applicazione considerando il contesto

economico del settore dei biocarburanti. Esso è infatti caratterizzato da volumi ancora limitati, margini spesso contenuti e in generale è fortemente influenzato dalla volatilità dei prezzi dei carburanti convenzionali e dai meccanismi di incentivazione. Fermi impianto non pianificati o riduzioni della disponibilità operativa possono incidere, pertanto, in modo significativo sulla redditività complessiva del progetto. Fattore determinante per il successo della riconversione è riuscire a garantire, quindi, elevati livelli di affidabilità e disponibilità. L'individuazione delle principali cause di indisponibilità già in fase di progetto, l'adozione di strategie manutentive adeguate a prevenire e mitigare interruzioni della produzione sono elementi imprescindibili per assicurare la sostenibilità tecnica ed economica dell'impianto.

1.2 Le bioraffinerie: aspetti normativi e tecnologici

Una bioraffineria è l'evoluzione tecnica sostenibile di una raffineria tradizionale per la produzione di carburanti e non solo. In sostituzione del petrolio greggio, risorsa fossile esauribile costituita principalmente da un mix di idrocarburi, questi impianti impiegano altre sostanze per la realizzazione dei prodotti finali. Le bioraffinerie, infatti, fanno uso di biomassa ricavabile da oli vegetali esausti, grassi animali, scarti agricoli e, più in generale, rifiuti organici. Potendo trattare una serie di materie prime che sono scarti di altri processi (antropici, agricoli, industriali...), le bioraffinerie si qualificano quindi come un importante tassello per lo sviluppo di un'economia basata sulla circolarità. L'economia circolare si basa, infatti, su modelli di produzione e consumo che mirano a riqualificare il più possibile ogni prodotto estendendone la vita utile: diminuisce così la domanda di nuovi beni e risorse. L'Unione Europea che, come precedentemente detto, mira ad obiettivi ambiziosi in termini di riduzione dei consumi, emissioni e di produzione di energia da fonti fossili non rinnovabili (obiettivi Fit for 55) ha costruito quindi nel tempo un quadro normativo che favorisce la diffusione delle bioraffinerie. Tra le direttive emanate dalla Commissione Europea si distinguono in particolare:

- **Direttiva RED III.** Fissa i target di penetrazione delle fonti rinnovabili nei consumi energetici e dell'impiego di biocarburanti. Tali target, quota percentuale sui consumi finali, sono stati incrementati ad ogni aggiornamento fino ai valori del 42,5% di copertura da rinnovabili sui consumi finali e del 5,5% per i biocarburanti entro il 2030. Sui biocarburanti, in particolare, la RED III impone quote via via crescenti di impiego di SAF dal 2% del 2025 fino al 70% del 2070 e adozione di altri biocarburanti nel settore del trasporto navale. [5]
- **FQD (Fuel Quality Directive).** Impone riduzioni sulle emissioni sull'intero ciclo di vita dei carburanti. Spinge dunque il mercato, fornitori e produttori su tutti, allo sviluppo, produzione

e messa in commercio di combustibili meno carbon-intensive grazie a quote crescenti di biocarburanti in miscela. [6]

- **Regole DLUC/ILUC (Direct/Indirect Land Use Change).** Per mitigare il rischio che le succitate direttive e gli incentivi normativi promuovano la conversione indiscriminata di terreni agricoli o fenomeni di deforestazione, queste regole pongono vincoli stringenti sull'uso di colture alimentari a fini energetici. Tale approccio favorisce lo sviluppo delle bioraffinerie di nuova generazione, orientando la ricerca verso biocarburanti avanzati prodotti da materie prime non in concorrenza con la filiera alimentare. [7]

Sempre la Commissione Europea ha indicato come strada preferibile per l'implementazione di bioraffinerie la riconversione di raffinerie tradizionali già esistenti piuttosto che la costruzione ad hoc di tali impianti. La riconversione infatti offre vantaggi tecnici, legali ed economici in termini di:

- **Integrazione logistica.** Tutte le reti energetiche, di trasporto e stoccaggio e dei servizi all'impianto, agli input e ai prodotti sono già esistenti e collaudate
- **Mitigazione del rischio tecnologico.** Partendo da un impianto in esercizio si può operare una riconversione modulare e progressiva nel tempo. Attraverso le diverse fasi della riconversione si possono così valutare per misura diretta volumi produttivi, costi, ricavi... ed è più facile intervenire qualora qualcuna di queste non dovesse raggiungere i target previsti e prefissati
- **Riduzione dei costi capitali.** Molti edifici, utilities, macchinari e strumenti per il processo di bioraffinazione possono essere gli stessi di quelli che operavano la raffinazione tradizionale
- **Iter autorizzativi.** L'area è già autorizzata all'uso industriale, le valutazioni di impatto ambientale (VIA), compatibilità territoriale e ambientale sono già state ottenute per l'impianto nella sua vecchia configurazione. La modifica in bioraffineria non richiede particolari studi aggiuntivi o l'imposizione di ulteriori vincoli, pertanto, le varie autorizzazioni e attestazioni possono essere ottenute in tempi più brevi.

Ciò non toglie che anche per la riconversione vi siano sfide da affrontare e superare. Tra tutte spicca sicuramente la riprogettazione, seppur parziale, ma anche le competenze della forza lavoro devono essere adattate tramite la formazione degli addetti già impiegati o l'assunzione di nuovi tecnici e ingegneri specializzati alla conduzione di questo nuovo tipo di impianti.

Definito brevemente il contesto industriale, economico e normativo, si vuole richiamare nuovamente l'attenzione sulle diverse tipologie di biomassa trattabile in input da cui è possibile ricavare diversi prodotti finali (bio-Diesel, biocarburanti per l'aviazione...). La strategia di riconversione dell'asset esistente è guidata, in prima istanza, dalla definizione dell'output produttivo,

stabilito a sua volta in funzione del contesto di mercato e della specifica domanda di biocarburanti. Fissato il target dei prodotti finali, la scelta delle materie prime ne deriva come conseguenza diretta principale. Non tutte le biomasse, infatti, sono compatibili alla realizzazione di qualunque tipologia di biocarburante o altro tipo di prodotto. Il legame input-output è inoltre mediato da fattori logistici e tecnologici quali riuscire a garantire che le materie prime selezionate siano facilmente reperibili e trasportabili verso il sito operativo con costi sostenibili e forniture certe. In questo scenario, la tecnologia di processo funge da elemento congiungente e rende possibile che le materie prime recuperate siano trasformabili nei biocarburanti desiderati. Ad oggi i processi più adottati, che definiscono l'architettura dell'impianto e ne determinano i suoi punti di forza e di debolezza sono i seguenti:

- **Processi biochimici.** Impianti comparabili a realtà industriali di distillazione o fermentazione dove si scompone la biomassa dapprima in zuccheri semplici e la fermentazione di questi porta alla creazione dei prodotti. Trattano materie prime come colture zuccherine (bietola), amidacee (mais) o biomasse lignocellulose provenienti principalmente da scarti agricoli. Queste bioraffinerie presentano ampie vasche di raccolta della biomassa che viene trattata con vapori o acidi per poterne estrarre la cellulosa segregata dalla lignina. Quindi in appositi reattori appositi enzimi elaborano le lunghe catene di cellulosa “tagliandole” in più corte di zuccheri come il glucosio. Tramite una serie di serbatoi contenenti lievito si dà il via alla fermentazione, cuore del processo di formazione, nei cosiddetti treni di fermentazione, trasformando gli zuccheri in alcol. L'alcol è in seguito distillato in apposite colonne di separazione termica ottenendo così etanolo, uno dei principali prodotti per le bioraffinerie che impiegano processi biochimici.
- **Processi termochimici.** Vengono realizzati da impianti che più si avvicinano, per forma e processo, ai tradizionali petrolchimici. Utilizzano materie prime quali le biomasse secche, residui legnosi da attività di silvicoltura e anche la frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU). Il pretrattamento della materia prima è più semplice e si basa su attività di rimozione dei contaminanti, quindi sminuzzamento meccanico ed essiccazione importante per la miglior resa energetica del reattore. Il gassificatore è il nucleo reattivo dell'impianto che opera la trasformazione della materia solida in ingresso in gas attraverso una combustione controllata e parziale (con poco ossigeno). Viene eseguita più una cottura ad alta temperatura in maniera tale che il calore rompa le molecole della biomassa liberando i gas che attraverso ulteriori reazioni, filtraggi e pulizie si trasformano in syngas. Prodotti principali ottenibili sono il bio-metanolo, l'idrogeno (verde) e combustibili sintetici noti come e-fuels.

- **Processi chimico/catalitici basati sull'idroprocessamento (hydroprocessing).** Le bioraffinerie che impiegano questi processi si assomigliano in forma e processi ancora di più alle raffinerie tradizionali. Le materie prime trattabili sono più eterogenee come oli vegetali non alimentari o alimentari esausti e grassi animali residui. Tali impianti presentano dunque unità di pretrattamento che devono essere altamente flessibili nel poter trattare sostanze diverse. Il processo di raffinazione vero e proprio coinvolge reattori ad alta pressione dove la biomassa che viene elaborata reagisce con idrogeno (hydroprocessing) in presenza di appositi catalizzatori metallici. In uscita si ottengono biocarburanti quali il Diesel HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) e il SAF (Sustainable Aviation Fuel) con prestazioni ambientali ed energetiche pari o superiori a quelli dei tradizionali carburanti [8].

Quest'ultima tipologia di bioraffineria, allo stato attuale dell'arte, sta assumendo preminenza assoluta su tutte le altre e al mondo si contano almeno 20 impianti di questa tipologia [9]. Ciò grazie a diversi punti di forza riguardo la tecnologia in sé e la qualità dei prodotti in particolare in termini di:

- **Prestazioni ambientali superiori.** Oltre alla riduzione di CO₂ emessa, l'uso di questi carburanti si riflette anche nell'assenza totale di zolfo e aromatici, un numero di cetano considerevolmente maggiore che garantiscono una combustione con minori emissioni di NO_x e particolato (PM) [8] [10].
- **Eccellenti Proprietà a Freddo.** È possibile modulare il punto di congelamento del biocarburante (HVO) in fase di isomerizzazione. Grazie a questo il biocarburante risulta ideale per l'impiego in climi rigidi e come componente base per il SAF (Sustainable Aviation Fuel – Carburante per aviazione sostenibile), che deve mantenere ottime prestazioni alle basse temperature tipiche dell'alta quota [11].
- **Qualità del Prodotto (Drop-in Fuel).** A differenza del biodiesel tradizionale, il processo produce idrocarburi paraffinici puri (HVO). Questi sono chimicamente analoghi al diesel fossile, consentendone l'utilizzo nei motori esistenti al 100% senza necessità di modifiche meccaniche o miscele limitate [12].

1.3 Obiettivi e struttura della tesi

Il presente lavoro di tesi si pone come obiettivo la valutazione della disponibilità produttiva di un'unità di raffinazione tradizionale realmente esistente che verrà riconvertita in impianto per la produzione di biocarburanti.

Se dal punto di vista meramente industriale l'analisi di disponibilità produttiva può essere ritenuta interessante valutando la continuità produttiva e quindi permettendo di verificare la sostenibilità economica del progetto, altrettanto rilevanti possono essere i risultati scientifici. Sebbene la bioraffinazione rilevi gran parte dell'architettura impiantistica e delle logiche di processo dalla raffinazione petrolifera tradizionale, essa introduce paradigmi tecnologici distintivi. Si tratta di soluzioni che solo recentemente hanno completato il salto dalla fase di studio e validazione in laboratorio alla piena applicazione industriale.

La tesi è stata dunque strutturata nei seguenti capitoli:

- **Capitolo 2, Metodologia:** vengono definiti tutti i concetti teorici generali che sono stati attivamente impiegati e opportunamente declinati per la realizzazione dell'analisi sul caso studio in tutte le sue fasi.
- **Capitolo 3, Caso Studio:** è introdotta la fase progettuale nella quale è stata realizzata l'analisi, con tutti i limiti e i risultati richiesti. Fornisce inoltre un quadro di alto livello circa l'impianto analizzato con un approfondimento sul processo produttivo citando i componenti principali.
- **Capitolo 4, Registro degli Asset:** viene spiegato come sono stati identificati, raccolti e caratterizzati tutti gli elementi costituenti la bioraffineria che sono di interesse per lo studio condotto.
- **Capitolo 5, FMEA:** viene illustrata la valutazione qualitativa a più livelli degli effetti di guasto e riparazione sui componenti individuati nel Registro degli Asset. Sono discussi in maniera più approfondita alcuni casi dove l'analisi FMEA ha richiesto attenzioni particolari. Fornisce i primi input all'analisi di disponibilità finale. Sono infine ricavati una serie di risultati preliminari e svolte alcune considerazioni su di essi.
- **Capitolo 6, Analisi di Manutenibilità:** sono esposte le attività di manutenzione svolte per il caso studio e ricavati e valutati ulteriori risultati preliminari che integrano quelli della FMEA per la realizzazione dell'analisi di disponibilità.
- **Capitolo 7, Analisi di Disponibilità:** vengono innanzitutto presentati i risultati ottenuti per mezzo di un modello stocastico opportunamente realizzato facendo anche riferimento e confronto con quelli preliminari dei due capitoli precedenti. Sono quindi proposte ed implementate azioni per ridurre l'impatto delle assunzioni conservative e modifiche all'architettura impiantistica atte a migliorare il risultato della disponibilità ottenuto. Il capitolo si conclude, infine, con un confronto comparativo tra le prestazioni della bioraffineria e quelle di una raffineria tradizionale. Sono così messe in luce le criticità intrinseche della nuova

tecnologia delineando le sfide ingegneristiche necessarie per allinearne l'affidabilità agli standard consolidati del settore Oil & Gas.

Attraverso questo lavoro di tesi, viene dunque esposta l'esperienza maturata nel contesto del tirocinio applicata direttamente ad un caso studio molto importante e complesso. L'approccio multidisciplinare adottato non mira solo a fornire una stima numerica della disponibilità, ma si può proporre come uno strumento decisionale critico. Il lavoro si propone dunque come studio per ottimizzare la transizione verso sistemi sostenibili, bilanciando l'innovazione tecnologica con la necessaria robustezza e continuità operativa

2 METODOLOGIA

2.1 Generalità sull'analisi RAM

L'analisi RAM (Reliability, Availability, Maintainability) rappresenta un approccio metodologico strutturato volto alla valutazione e al miglioramento delle prestazioni di sistemi, impianti e apparecchiature industriali lungo l'intero ciclo di vita. Si fonda sull'integrazione di tre aspetti fortemente correlati tra di loro:

- Reliability (affidabilità): *“la probabilità che un componente o un sistema svolga una funzione richiesta correttamente e continuamente in determinate condizioni, entro un determinato ambito, durante un determinato periodo di tempo o tempo di missione, considerando anche il contesto ambientale”* [13]
- Availability (disponibilità): *“la probabilità che un componente o un sistema stia svolgendo la sua funzione in un certo momento, in condizioni operative e ambientali ben definite, indipendentemente dal verificarsi di un guasto in passato.”* [13]
- Maintainability (manutenibilità): *“la probabilità che un elemento guasto venga ripristinato all'efficienza operativa entro un dato periodo di tempo quando l'azione di riparazione viene eseguita in conformità con le procedure prescritte”* [13]

L'analisi consente di ottenere valutazioni e risultati innanzitutto di natura qualitativa giustificati e ulteriormente approfonditi da riferimenti quantitativi. Per prima cosa, infatti, vengono individuati tutti gli elementi critici intesi non soltanto come componenti fisici dell'oggetto a cui l'analisi è applicata, ma anche come guasti, attività manutentive e di gestione che influiscono sulle performance produttive e/o di sicurezza. Il loro impatto sulle performance viene dunque quantificato da importanti indicatori operativi, generali o specifici per oggetto/attività, che traducono in numeri questi aspetti. Esempi di questi indicatori possono essere il livello di disponibilità, il profilo di produzione/perdite lungo il ciclo di vita... Questi ultimi sono ottenuti grazie all'utilizzo di modelli di natura deterministica o stocastica, a seconda della complessità richiesta e della qualità e quantità dei dati disponibili. Con un quadro così completo possono essere infine formulati suggerimenti su azioni migliorative da intraprendere in termini progettuali, gestionali e di ottimizzazione della manutenzione del sistema nel corso della sua vita operativa. È importante dunque rimarcare che, sebbene la modellizzazione concretizzi i risultati, essa non sostituisce l'analisi qualitativa. È invece il suo

complemento e si alimenta delle evidenze emerse in essa ricavate tipicamente nelle fasi preliminari dell'analisi.

Dal punto di vista normativo esistono diversi riferimenti internazionali consolidati che forniscono metodologie e terminologia utili per condurre studi di affidabilità e manutenibilità. A titolo esemplificativo si possono citare alcuni standard sviluppati dagli organismi internazionali di settore e da enti di normalizzazione come:

- **IEC 60300:** definisce i principi generali del dependability management [14];
- **IEC 61703:** fornisce le espressioni matematiche e i modelli di calcolo per la valutazione dell'affidabilità, della disponibilità e della manutenibilità [15];
- **IEC 60812:** contiene ulteriori indicazioni metodologiche relative all'analisi dei modi di guasto e dei loro effetti (FMEA/FMECA) [16];
- **ISO 14224:** standard internazionale relativo alla raccolta e allo scambio di dati di affidabilità e manutenzione per le apparecchiature utilizzate nell'upstream Oil & Gas [17].

Sebbene tali standard costituiscano un ottimo riferimento, è opportuno tuttavia non essere troppo categorici ritenendoli l'unica strada percorribile. Nel presente lavoro, infatti, l'analisi RAM condotta mantiene l'indirizzo generale degli standard, ma questo è stato opportunamente declinato al tipo di impianto, alle procedure e specifiche proprie del progetto e all'esperienza e competenza dell'analista. L'approccio, le ipotesi assunte, i dati di input, la tipologia di modello sviluppato e i risultati ricercati per il caso della bioraffineria oggetto di studio sono esposti con maggior dettaglio nel paragrafo a seguire (teoria e metodologia) e nei capitoli successivi (analisi pratica e risultati).

Un'ultima importante caratteristica dell'analisi RAM risiede nella flessibilità di applicazione in tutte le fasi del ciclo di vita di un impianto. Essa può agire quindi come un processo iterativo, fornendo output determinanti per orientare le scelte strategiche in ogni stadio progettuale: dalla selezione del concept alla realizzazione dell'impianto.

2.2 Flusso di lavoro

L'analisi RAM condotta ha avuto come obiettivo finale la determinazione della disponibilità produttiva dell'impianto di bioraffineria che sostituirà l'unità di raffinazione tradizionale. La disponibilità produttiva assume particolare rilevanza nei settori Oil & Gas nei quali elevati livelli di indisponibilità si traducono in significative perdite economiche. La capacità predittiva e comparativa dell'analisi RAM è in grado di supportare i processi decisionali nell'ambito delle analisi costi-

benefici, consentendo di individuare il miglior compromesso tra investimento iniziale, affidabilità del sistema ed efficienza produttiva. Dai risultati dell'analisi possono infatti essere ricavate e dedotte importanti informazioni quali:

- Profilo di produzione dell'impianto sull'intero ciclo di vita, utile per il confronto tra produzione effettiva e produzione attesa in fase di progetto;
- Scomposizione dell'indisponibilità totale del sistema, evidenziando il contributo dei singoli sistemi, sottosistemi e componenti;
- Previsione della frequenza e durata dei fermi impianto e dei guasti delle apparecchiature;
- Identificazione dei colli di bottiglia del processo produttivo.

Tali evidenze permettono di valutare in modo oggettivo architetture d'impianto e politiche gestionali differenti, fornendo una base quantitativa solida per l'ottimizzazione di prestazioni e della disponibilità produttiva e quindi della sostenibilità economica della bioraffineria. L'approccio adottato per l'esecuzione dell'analisi RAM ha seguito lo schema qui oltre:

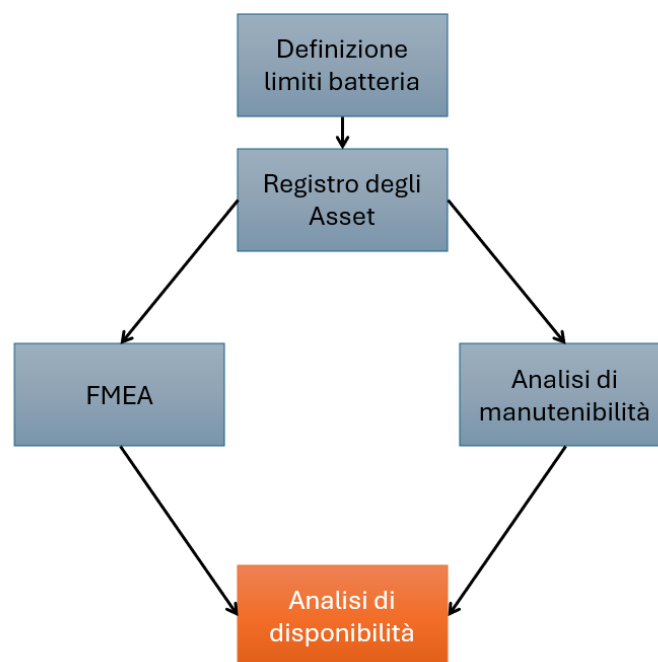


Figura 2-1 – Schema del flusso di lavoro adottato per lo studio RAM.

I risultati ottenuti dall'analisi di disponibilità si sono prestatì poi ad interessanti commenti in termini di ottimizzazione e opportunità di miglioramento, nonché per un confronto con quelli di un impianto tradizionale. Nei sottoparagrafi a seguire vengono quindi dettagliate brevemente tutte le fasi di studio dell'intero flusso di lavoro riportate in figura 2-1.

2.2.1 Limiti di batteria e unità funzionali (UF)

La fase iniziale dello studio si è focalizzata sulla definizione accurata del perimetro del sistema oggetto di analisi e di ciò che è in esso contenuto. Tale attività è stata articolata in due distinti passaggi: la determinazione dei limiti di batteria e la scomposizione del sistema in unità funzionali.

Il limite di batteria delimita il perimetro fisico e funzionale entro il quale vengono considerate le apparecchiature e le funzioni rilevanti ai fini dell'analisi, individuando in modo univoco i confini del sistema rispetto agli elementi esterni.

Le unità funzionali, invece, sono sottosistemi di ciò che ricade, totalmente o in parte, dentro i limiti di batteria distinti in base alla funzione svolta all'interno del processo indipendentemente dalla loro configurazione fisica. Un'unità è normalmente costituita da più componenti fisici (pompe, valvole, strumenti e sistemi di controllo...) che, sebbene non direttamente interconnessi tra di loro, cooperano per garantire una specifica funzione di processo. Esempi di funzioni di processo possono essere il trasporto di un fluido, la compressione, il trattamento o la sicurezza dell'impianto. La scomposizione del sistema-impianto in unità funzionali modifica l'approccio di studio: la visione non è più di carattere globale, ma è strutturata e organizzata secondo precise regole. Tale scomposizione facilita la valutazione del contributo di ogni singola funzione e unità operativa alle prestazioni complessive dell'intero asset.

Questo approccio di studio è stato fondamentale per la realizzazione delle fasi successive dell'analisi RAM mitigando il rischio di includere componenti o intere sezioni dell'impianto irrilevanti all'analisi o, viceversa, di trascurare quelle la cui criticità risulta determinante per la continuità produttiva. Definiti i limiti di batteria e strutturato il sistema in unità funzionali, è stato possibile procedere all'identificazione sistematica degli elementi manutenibili e alla loro organizzazione in un Registro degli Asset, uno strumento operativo fondamentale per la raccolta, la gestione e l'utilizzo delle informazioni necessarie allo sviluppo dei successivi step dell'analisi RAM realizzata.

2.2.1 Registro degli Asset (RA)

Il Registro degli Asset (RA) è l'elenco strutturato degli elementi manutenibili ritenuti rilevanti per l'analisi RAM. Esso costituisce la base operativa dello studio, permettendo l'identificazione univoca di elementi il cui guasto impatta sulla produzione, sulla sicurezza o sui costi operativi. Attraverso il RA sono stati organizzati sistematicamente i dati necessari per la modellazione di affidabilità, disponibilità e manutenibilità.

Avendo precedentemente definito sia i limiti di batteria del sistema che la sua scomposizione in unità funzionali, il Registro è stato costruito secondo una logica top-down. Tale logica prevede che sia organizzata una gerarchia a piramide di tutti gli elementi collegando ognuno di essi a quello di ordine superiore secondo un rapporto di parentela padre-figlio. Ciò ha permesso l'inclusione di tutti gli elementi effettivamente rilevanti evitando omissioni e inclusioni inopportune. È importante, dunque, in analogia a quanto fatto per l'intero impianto, stabilire i confini di ogni oggetto individuabile nella bioraffineria. Essi devono essere definiti in modo chiaro, univoco e coerente, possibilmente secondo criteri stabiliti dalle norme tecniche di settore come la norma internazionale ISO 14224.

Per ottimizzare l'efficacia dello studio, si è proceduto a una selezione mirata basata sulla rilevanza dei componenti ai fini RAM. Per ciascun elemento sono stati raccolti anche alcuni attributi tecnici e operativi il tutto coerente con il livello di dettaglio richiesto dalla fase progettuale e dall'obiettivo finale dello studio. Nel contesto della fase progettuale del caso studio, di cui meglio si parlerà in 3.1, il Registro degli Asset deve presentare un elevato livello di dettaglio, atto a descrivere in modo strutturato i cosiddetti "elementi manutenibili". Con tale termine si intendono le unità minime dotate di autonomia operativa e gestionale, sulle quali è possibile pianificare interventi e monitorare parametri di affidabilità. Questa granularità è fondamentale per supportare lo studio RAM, poiché permette di associare tassi di guasto e tempi di ripristino specifici a ogni componente critico del sistema. È importante sottolineare, infine, che sebbene l'identificazione univoca degli elementi manutenibili guidi fortemente la scomposizione del sistema essa non è l'unico suo determinante. Deve essere tenuta in considerazione, infatti, la conformità con cui i dati che caratterizzano gli aspetti affidabilità e manutenibilità sono recuperabili. Nel paragrafo a seguire sono dunque identificati quali sono i dati che devono essere acquisiti e quali le opportune fonti individuate.

2.2.2 Acquisizione e fonti dei dati

Per l'esecuzione dell'analisi di disponibilità produttiva, è necessario definire un set rigoroso di dati di input da agganciare a tutti gli elementi individuati nel Registro degli Asset che verranno analizzati nelle fasi successive dello studio. Sono stati pertanto identificati i seguenti fabbisogni informativi:

- **Parametri che caratterizzano i guasti:** necessari per modellare la frequenza con cui si verificano;

- **Parametri che caratterizzano la riparazione:** necessari per modellare la durata dei periodi per il recupero degli elementi che subiscono un guasto.

Tali parametri caratterizzano, in particolare, tutti i modi di guasto funzionali (Functional Failure Mode – FFM) di ognuno degli elementi del registro.

Per “modo di guasto”, gli standard tecnici internazionali intendono il “*modo in cui un elemento cessa di eseguire una funzione richiesta*” [13]. Il concetto risponde all’esigenza di classificare i malfunzionamenti in relazione al successo della missione, alla sicurezza delle persone e all’integrità delle apparecchiature. Per ciascun oggetto è stata così innanzitutto definita la funzione richiesta, ovvero identificato quale compito deve svolgere nel sistema impianto. È stato poi identificato il meccanismo attraverso il quale tale funzione può venire meno, includendo anche le manifestazioni osservabili del guasto e i suoi effetti sul sistema. Una data apparecchiatura, infatti, può guastarsi in molteplici modi e pertanto è necessario individuare solo ed esclusivamente i modi di guasto rilevanti dal punto di vista funzionale, che impattano sul compito che nel sistema-impianto questa apparecchiatura svolge. La selezione e il livello di dettaglio con cui vengono individuati i modi di guasto sono stati quindi coerenti con la tipologia di elemento, gli obiettivi dell’analisi nonché la fase di progetto. La definizione dei modi di guasto deve pertanto fornire un livello di dettaglio adeguato a distinguere tra differenti conseguenze di guasto e a consentire l’individuazione delle strategie manutentive più appropriate. In generale sono classificabili secondo comportamenti tipici quali: mancato avviamento, guasto durante il funzionamento, mancato arresto quando richiesto, funzionamento intempestivo e prestazioni degradate o insufficienti. Oltre a questa categorizzazione i modi di guasto possono essere classificati anche in base alla criticità del guasto che può presentarsi come:

- **Critico (Critical):** il componente smette di funzionare.
- **Degradato (Degraded):** il componente funziona con prestazioni significativamente ridotte.
- **Incipiente (Incipient):** il componente funziona, ma con leggero calo delle prestazioni.
- **Problemi minori di servizio (Minor in service problem):** il componente ha un qualche problema/guasto, ma ciò non incide sulle sue prestazioni.

E lo stesso modo di guasto può essere presente anche in più classi di criticità come, ad esempio, l’Abnormal Instrument Reading (lettura anomala dello strumento) o il Parameter Deviation (deviazione di parametro).

Definiti i modi di guasto, si è data loro caratterizzazione quantitativa in relazione al set di parametri precedentemente citati attraverso due variabili fondamentali:

- **Tasso di guasto λ** : esprime la propensione di un componente a guastarsi nell'unità di tempo.
- **Tempo medio di riparazione (MRT – Mean Repair Time)**: rappresenta il tempo netto necessario per l'effettiva attività di riparazione fisica del componente a seguito di uno specifico guasto.

L'acquisizione dei valori di λ e MRT è stata quindi una delle attività più complesse svolte potendo impattare significativamente sui risultati dell'analisi RAM. In generale, è possibile individuare tre principali categorie di fonti da cui ricavare i suddetti parametri per ogni modo di guasto degli elementi inclusi precedentemente nel RA:

- Banche dati commerciali;
- Dati di manutenzione interni all'azienda, derivanti dall'esperienza operativa su impianti esistenti;
- Dati forniti dai fornitori, relativi a specifiche apparecchiature o componenti.

Nelle prime fasi di progetto, come quella nella quale è stata sviluppata l'analisi RAM di questo lavoro di tesi, è tipico che i dati di affidabilità e manutenibilità interni siano assenti visto che l'impianto deve essere ancora realizzato e messo in esercizio. Eccezioni, sebbene piuttosto rare, possono verificarsi nel caso di soggetti che abbiano già sviluppato e operato per un lungo periodo impianti della stessa tipologia. Dato però che la tecnologia impiantistica delle bioraffinerie inizia a diffondersi solo di recente, i dati derivanti dall'esperienza operativa diretta non garantiscono ancora un'opportuna significatività statistica. Non essendo ancora formalizzati i contratti di fornitura delle apparecchiature con i costruttori, le schede tecniche degli specifici elementi non erano pertanto disponibili da cui poter ricavare λ e MRT.

Per tali motivi si è fatto riferimento, dunque, a banche dati commerciali di affidabilità che, in casi analoghi, rappresentano spesso l'unica fonte strutturata di dati disponibile. Questi database raccolgono informazioni provenienti da un elevato numero di applicazioni, disponendo così di campioni statistici con una buona caratterizzazione di λ e MRT per diverse tipologie di apparecchiature. Tale punto di forza però presenta anche un limite. Tali realtà, in confronto alla bioraffineria per la quale è stata condotta l'analisi, possono infatti essere caratterizzate da differenti regimi di esercizio, strategie manutentive, livelli di qualità costruttiva e tecnologica, età e condizioni ambientali a contorno. La rappresentatività dei dati forniti da esse rispetto allo specifico impianto può risultare, pertanto, anche in parte limitata.

Per l'analisi condotta è stato quindi fatto uso delle seguenti banche dati di settore:

- **AIChE (American Institute of Chemical Engineers):** database focalizzato sulla sicurezza dei processi chimici [18];
- **UK HSE (United Kingdom Health and Safety Executive):** database di guasti basati su incidenti reali e ispezioni nel Regno Unito [19];
- **IOGP (International Association of Oil & Gas Producers):** database per macchine rotanti complesse, frequenze di rilascio, guasti alle condotte e probabilità di innesco [20];
- **NPRD (Nonelectronic Parts Reliability Data):** database sui tassi di guasto per componenti meccanici ed elettromeccanici [21];
- **OREDA (Offshore and Onshore Reliability Data):** database sui tassi di guasto e tempi di riparazione, in base ai modi di guasto (Failure Modes) e alla loro severità, per apparecchiature complesse [22].

Tra tutti questi OREDA è stata la banca dati più impiegata per il recupero dei parametri R&M (Reliability and Maintainability) degli elementi dell'impianto. Gli altri database sono stati utilizzati solo per specifici elementi, in numero limitato, quando la consistenza dei dati statistici di OREDA non era sufficiente. Quanto approfondito successivamente circa i dati recuperati, dunque, sarà riferito al database OREDA sebbene approcci e metodologie analoghe siano stati impiegati per l'individuazione ed estrazione dei parametri R&M dagli altri database.

I valori di λ e MRT sono stati quindi opportunamente raccolti nel cosiddetto “registro dei parametri R&M”. Da questo registro, i dati sono stati elaborati secondo due percorsi distinti:

- L'MRT è stato richiamato nell'analisi di manutenibilità integrandolo con le componenti logistiche e gestionali per ricavare l'MTTR (Mean Time To Repair), ovvero il tempo medio totale di indisponibilità per completare l'intervento correttivo e ripristinare la funzione.
- Il tasso di guasto è stato invece utilizzato per derivare immediatamente il Tempo medio a guasto (MTTF - Mean Time To Failure) per ogni modo di guasto di ogni elemento con funzionamento continuo. È calcolato come l'inverso del tasso di guasto.

L'andamento del tasso di guasto λ durante l'intero ciclo di vita di un'apparecchiatura è descritto dal modello “a vasca da bagno” (bathtub curve), nella quale sono distinguibili tre fasi principali: fase iniziale, fase di vita utile e fase di fine vita. In linea anche con i dati riportati da OREDA per il tasso di guasto per il quale:

- *“Non vengono normalmente eseguiti test statistici formali per verificare l'ipotesi di tasso di guasto costante” [22]*

- *“Poiché si assume che i dati provengano dalla parte 'inferiore' della curva a vasca (bath-tub curve), le stime del tasso di guasto presentate rappresentano quindi una sorta di minimo rispetto all'intero ciclo di vita dell'apparecchiatura.” [22]*

Si è ritenuto accettabile considerare la sola fase di vita utile, caratterizzata da λ costante, supponendo che adeguati test pre-operativi e opportune strategie di manutenzione e addestramento del personale siano effettuate ed implementate. Tali interventi hanno l'effetto di contrastare i fenomeni di degradazione, impedendo al componente di deviare verso la fase di fine vita durante il periodo di analisi considerato. Ciò si è riflettuto sul valore di MTTF calcolato partendo da λ .

Analogo a MTTF, ma caratterizzante i modi di guasto su richiesta, tipici di apparecchiature o funzioni che vengono attivate solo in determinate condizioni è stata determinata anche la Probabilità di guasto a domanda (FPPD - Failure Probability Per Demand). Per la FPPD, in assenza di informazioni specifiche fornite dalla banca dati OREDA, si è proceduto ad una stima, secondo le linee guida del progetto della bioraffineria, a partire dal numero di guasti osservati per ciascun failure mode considerato e dal numero stimato di richieste. Quest'ultimo valore può essere valutato considerando la frequenza dei test funzionali, il tempo medio intercorrente tra le manutenzioni (MTBM - Mean Time Between Maintenance) delle apparecchiature correlate e il numero atteso di fermate di impianto sia per manutenzione correttiva dovuta a guasto che preventiva.

Tutti i parametri fin qui descritti sono quindi il set di informazioni necessario per la completa caratterizzazione RAM della bioraffineria oggetto di studio e sono stati raccolti in un importante documento noto come “Database dei parametri R&M”.

2.2.3 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

La Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) è una metodologia sistematica per identificare i modi di guasto di un sistema, le loro cause e gli effetti sulle funzioni degli elementi analizzati. L'obiettivo è stato descrivere qualitativamente l'impatto dei guasti sulle prestazioni, sulla sicurezza e sull'operatività del sistema evidenziando le criticità più rilevanti per la disponibilità produttiva.

L'analisi è stata sviluppata successivamente alla fase di raccolta e organizzazione dei dati tecnici, integrando gli oggetti riportati nel Registro degli Asset e i modi di guasto del Database dei Parametri R&M. In questo contesto, lo studio FMEA funge da elemento di raccordo riordinando sistematicamente la mappatura della bioraffineria (confini, funzioni e relazioni gerarchiche) e identificando gli effetti dei singoli Modi di Guasto. Tali evidenze qualitative sono fondamentali per

alimentare con rigore il successivo modello di simulazione, trasformando le criticità individuate in parametri necessari per la stima quantitativa della disponibilità produttiva.

Il livello di dettaglio raggiunto per la FMEA è dipeso dalla fase del ciclo di vita dell'impianto oggetto di studio, descritta più approfonditamente nel paragrafo 4.1 e coerentemente con quanto fatto precedentemente per Registro degli Asset e definizione dei modi di guasto. La FMEA realizzata si è basata sulle informazioni progettuali, dati storici di impianti analoghi, standard di settore e assunzioni ingegneristiche motivate, e ponendo particolare attenzione ai modi di guasto funzionali principali e ai loro effetti macroscopici. I risultati della FMEA, uniti ai parametri caratterizzanti guasto e riparazioni, costituiscono il patrimonio informativo per le analisi di disponibilità successive. Per mantenere il successivo modello di disponibilità realizzato gestibile e rappresentativo, sono stati modellati solo gli elementi e i loro modi di guasto che possono effettivamente influire sulla capacità.

Oltre all'analisi degli effetti, la FMEA rappresenta il primo stadio proattivo di mitigazione: possono essere infatti suggerite alternative progettuali, strategie manutentive preliminari o ridondanze funzionali da valutare nelle fasi successive, contribuendo così al miglioramento del progetto fin dalle prime fasi.

2.2.4 Analisi di Manutenibilità

Dalla definizione data in 2.1, il termine manutenibilità indica la capacità di un elemento, operante in determinate condizioni di utilizzo, di essere mantenuto o ripristinato in uno stato tale da poter svolgere la funzione richiesta, qualora vengano eseguite attività di manutenzione secondo procedure, risorse e condizioni prestabilite. In poche parole, è l'attitudine di un oggetto a essere riparato in modo efficace.

L'analisi di manutenibilità (AM) è stata dunque realizzata, parallelamente alla FMEA, per individuare e valutare l'insieme delle attività e delle condizioni necessarie affinché un intervento manutentivo possa essere correttamente eseguito. Tali attività non coincidono solamente con l'azione pratica della riparazione del guasto valutata del MRT, ma includono ulteriori operazioni preliminari e successive che possono risultare anche più onerose in termini di tempo rispetto alla riparazione vera e propria. L'obiettivo principale dell'analisi è stata la stima del tempo di fermata complessivo che dipende fortemente da fattori quali la configurazione dell'impianto, la sua ubicazione, vincoli di sicurezza, accordi contrattuali e da altri aspetti organizzativi.

Esistono due macro-tipologie di manutenzione che, in un impianto complesso come la bioraffineria esaminata, possono essere riscontrate:

- **Correttiva:** Viene eseguita solamente quando il guasto si è manifestato e l'elemento interessato non può più operare correttamente. Impatti sulla disponibilità dell'impianto sono molto plausibili.
- **Preventiva:** Realizzata prima che si manifesti il guasto con lo scopo di minimizzare il più possibile gli impatti sulla disponibilità. In base alla logica di prevenzione adottata si possono classificare diverse tipologie tra cui:
 - **Programmata:** eseguita a intervalli di tempo regolari (es. ogni mese), indipendentemente dallo stato effettivo dell'asset o in base proprio all'effettivo utilizzo (ore di funzionamento, chilometri percorsi o cicli produttivi...);
 - **On condition:** effettuata solo quando i monitoraggi indicano un calo delle prestazioni o un'usura imminente. La sua evoluzione è quella predittiva che adopera sensori, AI e analisi dei dati storici per prevedere il momento esatto del guasto e agire poco prima;
 - **Opportunistica:** realizzata durante altri fermi impianto non programmati, ottimizzando i tempi morti per sistemare altri componenti.

Nel caso studio analizzato sono stati individuati in particolare interventi di manutenzione correttiva a seguito di guasto e interventi di manutenzione preventiva programmata. Da indicazioni di progetto è emerso che durante i fermi impianto più significativi, dipendenti da particolari interventi su specifici elementi, l'attività di manutenzione è estesa a tutti i componenti della bioraffineria per ottimizzare i tempi (opportunistica). La durata dei fuori servizio dipende dalla complessità dell'azione correttiva richiesta influenzata a sua volta anche dalla tipologia di guasto a cui un elemento va incontro.

Nell'ambito delle bioraffinerie, asset di grande rilievo economico e critici per la sicurezza, si adottano prevalentemente strategie di manutenzione preventiva. L'analisi di manutenibilità permette di integrare quindi le specifiche fornite dai costruttori relative alle attività programmate, qualora disponibili. È opportuno evidenziare che la corretta esecuzione della manutenzione preventiva 'standard' è ciò che consente, dal punto di vista probabilistico, di mantenere i tassi di guasto stabili sui valori medi di progetto. In quest'ottica, l'analisi di manutenibilità contribuisce a ottimizzare la fattibilità di tali strategie, assicurando che i tempi di downtime previsti per le attività preventive siano compatibili con i target di disponibilità richiesti.

2.2.5 Analisi di disponibilità e metodologia Monte Carlo

L'analisi di disponibilità è la tecnica quantitativa finalizzata alla valutazione delle prestazioni complessive della bioraffineria. Essa consente di raggiungere diversi obiettivi, tra i quali la

massimizzazione della produzione, il miglioramento dell'efficienza del sistema, la riduzione dei tempi di fermo e la garanzia del corretto funzionamento dei sistemi di sicurezza.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi si condensa in questo ultimo passaggio valutando la disponibilità produttiva dell'impianto nella sua definizione stessa, ovvero come "misura del grado con cui un componente o un sistema si trova in uno stato operativo e utilizzabile nel momento in cui è richiesto".

L'analisi di disponibilità condotta è basata su tutti i risultati delle precedenti fasi di studio RAM, che forniscono le informazioni fondamentali per la modellazione del comportamento reale del sistema. In particolare:

- L'identificazione degli elementi critici dal punto di vista produttivo, la loro gerarchizzazione e gli effetti attesi provengono dalla FMEA e ancor prima dal Registro degli Asset;
- La stima delle frequenze di guasto del sistema deriva dai dati R&M raccolti in apposito database realizzato dopo il Registro degli Asset;
- La capacità del sistema di essere ripristinato, i tempi necessari al ripristino, i tempi fermo impianto programmati legati alle attività di manutenzione preventiva infine provengono dall'analisi di manutenibilità.

Le prestazioni del sistema sono state espresse in termini di *Production Availability (PA)*, corrispondente al rapporto tra la produzione stimata dell'impianto e la massima produzione teoricamente raggiungibile qualora l'impianto operasse in modo continuo, senza guasti/fermi:

$$PA = \frac{\text{Produzione Attesa}}{\text{Produzione Massima Ottenibile}} [\%] \quad (2.1)$$

Questa è stata riferita a un determinato periodo pari alla vita utile attesa dall'impianto, 20 anni, e rappresenta, di fatto, la produzione media attesa del sistema rispetto al suo potenziale massimo.

La realizzazione pratica dell'analisi di disponibilità dipende dal modello su cui la si vuole elaborare. Ne esistono diversi tra i quali:

- **Modelli logico-analitici: Reliability Block Diagram (RBD) e Fault Tree Analysis (FTA).** Si basano sulla logica booleana e analizzano le combinazioni di guasti che portano all'indisponibilità del sistema in un dato istante. Hanno approccio opposto con l'RBD orientato al successo, determinando direttamente la disponibilità e la FTA al fallimento, determinando l'indisponibilità.

- **Modelli dinamici/stocastici (catene di Markov).** Rappresentano il sistema come un insieme di stati (es. Stato 0: "OK", Stato 1: "un componente rotto"). Le transizioni tra stati sono regolate da tassi costanti λ per i guasti, μ per le riparazioni.
- **Modelli di simulazione (Simulazione Monte Carlo).** A differenza dei metodi analitici che risolvono equazioni matematiche per fornire un risultato "esatto" (valore medio), questo approccio simula al computer migliaia di possibili "storie di vita" dell'impianto, con guasti e riparazioni, facendo una valutazione statistica della disponibilità ottenuta nelle diverse vite simulate.

Per l'analisi condotta sulla bioraffineria oggetto di studio si è adoperato un modello di simulazione basato sulla metodologia Monte Carlo.

La metodologia Monte Carlo è una classe di metodi computazionali fondati su procedimenti probabilistici come l'estrazione o il campionamento di numeri. Esso consente la trattazione di problemi che richiedono calcoli complessi permettendo la simulazione di processi che evolvono in base ad eventi casuali, non prevedibili in modo deterministico. Le grandezze incerte del sistema vengono rappresentate come variabili aleatorie, caratterizzate da opportune distribuzioni di probabilità. Nell'analisi di disponibilità queste variabili possono essere dei tempi di guasto, tempi di riparazione, stati del sistema, e così via. La simulazione con metodologia Monte Carlo permette la generazione di numerosi scenari possibili del sistema, noti anche come *storie* o *traiettorie*, ciascuno dei quali rappresenta una possibile evoluzione del suo comportamento. La procedura generale prevede che l'analista esegua:

- La definizione del modello del sistema;
- L'individuazione delle variabili aleatorie rilevanti;
- L'assegnazione delle relative distribuzioni di probabilità.

Il modello costruito è stato quindi simulato tramite un software apposito. Nel corso di ciascun ciclo di simulazione (storia):

- Vengono generati i tempi di guasto dei componenti;
- Viene verificato lo stato del sistema attraverso un modello a blocchi;
- In caso di guasto di sistema, viene simulato il processo di riparazione;
- Viene tracciata l'evoluzione temporale dello stato di disponibilità.

L'analisi statistica dei risultati ottenuti permette di stimare grandezze di interesse quali valori medi, varianze, probabilità di superamento di soglie critiche e intervalli di confidenza. In questa

applicazione tali grandezze sono riferite in particolare al valore della disponibilità dell'impianto. È importante non limitarsi ad una singola simulazione, ma eseguirne molte quando si analizza il comportamento di un sistema complesso come una bioraffineria. Ogni simulazione darà un risultato diverso, indipendente dai precedenti. Aumentando il numero di simulazioni la media dei risultati ottenuti convergerà al valore atteso della variabile analizzata, l'accuratezza delle stime migliorerà e l'incertezza statistica si ridurrà

La scelta della metodologia Monte Carlo è dettata dal fatto che risulta l'approccio che meglio descrive il comportamento della bioraffineria considerando i processi stocastici di guasto e riparazione. A differenza delle precedentemente citate tecniche di Fault Tree Analysis (FTA) o Reliability Block Diagrams (RBD), che hanno natura prevalentemente statica, la simulazione Monte Carlo è in grado di descrivere l'evoluzione dinamica del sistema. Le prime, infatti, individuano l'indisponibilità identificando per via logica le combinazioni di guasti che portano al fermo in una condizione operativa predeterminata. Con la Monte Carlo possono essere colti aspetti dinamici fondamentali per una bioraffineria, quali:

- Fenomeni di accumulo e svuotamento (buffering) che possono "coprire" i guasti e le relative riparazioni se queste sono sufficientemente rapide, evitando che un fermo locale si traduca immediatamente in una perdita di produzione finale.
- Interdipendenze temporali capaci di tenere conto della fisica e della dinamica del sistema lungo l'intero orizzonte temporale.

Sebbene poi anche le catene di Markov avrebbero la potenzialità di caratterizzare la dinamica del sistema, richiedono però di descrivere a priori tutti gli stati degradati possibili del sistema, caratterizzandone le transizioni. Attività di fatto praticamente impossibile quando si ha a che fare con un impianto come una bioraffineria estremamente complesso e con numerosi componenti e dunque modi di guasto. Nel presente studio, pertanto, il metodo Monte Carlo è stato applicato utilizzando il software commerciale Maros, che consente di rappresentare in modo dinamico il comportamento dell'impianto sotto differenti condizioni operative e vincoli.

Definito dunque il quadro metodologico è possibile addentrarsi nel caso studio partendo da una panoramica generale riguardo l'impianto e i processi da esso svolti contestualizzando anche la fase progettuale in cui tale studio è stato realizzato.

3 CASO STUDIO

In questo capitolo viene presentata la bioraffineria alla quale è stato applicato lo studio RAM per la valutazione delle performance produttive finale. Lo scopo è dare una panoramica generale sull'impianto e sui processi per comprendere correttamente gli step di analisi e i risultati presentati nei successivi capitoli. Nel primo paragrafo viene dunque fornita una descrizione generale della bioraffineria, vengono illustrati il principio di funzionamento del processo tecnologico, le principali sezioni impiantistiche, le materie prime elaborate e i prodotti finali ottenuti. Tale inquadramento è stata comunque una parte essenziale dell'attività di analisi RAM consentendo, come verrà illustrato, di individuare le unità funzionali rilevanti ai fini dell'analisi stessa. Un approfondimento dedicato è fornito nei sottoparagrafi a seguire per meglio evidenziarne i processi, la complessità e gli elementi più importanti.

Esposto il quadro impiantistico e di processo generale, è fornita nel secondo paragrafo di questo capitolo una panoramica sulla fase progettuale in cui tale studio è stato realizzato. Vengono quindi esposti i limiti nella fruibilità e nel dettaglio dei dati recuperabili nonché i risultati attesi. Ciò serve ad evidenziare, sin da subito, come lo studio sia stato impostato con un approccio coerente con il grado di maturità ingegneristica disponibile, facendo ricorso alle informazioni di progetto al momento accessibili e ad assunzioni esplicite laddove necessario. In questo quadro, i risultati finali attesi non sono valore certi e definitivi, ma delle robuste valutazioni utili a identificare i principali fattori di criticità e a supportare le successive fasi di sviluppo del progetto.

3.1 Descrizione impianto e processo, definizione delle unità funzionali

Il caso oggetto di studio in questa tesi concerne la valutazione della disponibilità produttiva di un'unità di raffineria tradizionale riconvertita in impianto bioraffineria. Nell'impianto di raffineria tradizionale, dunque, costituito da più unità di raffinazione, una di queste verrà dismessa per far posto alla bioraffineria. Trattandosi di una riconversione vi è il vantaggio che buona parte delle apparecchiature, l'architettura generale e i collegamenti ai servizi (forniture di corrente elettrica, acqua...) sono già disponibili e verranno prevalentemente mantenute. Ad essere montati ex novo sono pertanto componenti che erano ormai arrivati a fine utile quando operavano nell'unità tradizionale, oppure quelli con tecnologia specifica di bioraffinazione delle materie prime organiche. L'operazione di conversione vedrà, pertanto, l'adattamento (revamping) della vecchia sezione di raffinazione in unità di bioraffinazione basata sulla tecnologia di hydroprocessing. L' hydroprocessing sfrutta la

reazione tra materia prima ed idrogeno, ad alte pressioni e temperature, in presenza di catalizzatori per produrre biocarburanti. Stessa sorte è prevista per le unità ancillari e i sistemi di utilities asserviti alla nuova unità di raffinazione. Questi si occuperanno del trattamento di sostanze di scarto e/o necessarie al funzionamento della bioraffineria. Sempre tra le unità ancillari, subirà un adattamento anche l'unità dedicata al raffreddamento dell'impianto. Completamente nuove, invece, saranno due sezioni necessarie per il pretrattamento delle materie prime in ingresso e per il trattamento dei gas acidi generati dai processi di alcune delle unità ancillari. Infine, i serbatoi per la gestione delle materie prime, prodotti intermedi, finali e di scarto, insieme alle pompe e tutti gli oggetti che consentono la logistica delle sostanze sono in parte recuperate dall'unità in dismissione e in parte integrate nuove. A sovrintendere tutte le operazioni della bioraffineria vi sono poi i sistemi di regolazione, controllo e sicurezza. Vi è innanzitutto un sistema di controllo distribuito (DCS – Distributed Control System) il cui compito principale è gestire l'operatività normale. È "distribuito" perché il controllo non è in un unico computer, ma in vari processori sparsi per l'impianto, collegati a una sala controllo centrale. Si occupa di monitorare e controllare tutte le variabili di processo come pressioni, temperature, portate... Un buon DCS riduce l'usura delle apparecchiature ed evita "transitori" bruschi che potrebbero causare guasti meccanici. Indipendente e complementare al DCS è il sistema di sicurezza (noto spesso come SIS, Safety Instrumented System). Nel caso in cui il DCS fallisce o si presentano guasti/anomalie di processo che possono degenerare in danni esso interviene. Esegue pertanto le sequenze di arresto d'emergenza, isolando sezioni dell'impianto e indirizzando i fluidi di processo verso destinazioni sicure (es: torcia).

Così configurata la bioraffineria elaborerà diverse materie prime ed in particolare: grassi di origine animale (tallow), oli vegetali e oli da cucina esausti (UCO/RUCO – Used Cooking Oil/Repurpose Used Cooking Oil). La produzione attesa, partendo da queste materie prime, è orientata principalmente su due prodotti particolari che sono il SAF e il Diesel HVO. Il SAF, in realtà, non è immediatamente ottenuto come prodotto finale dell'impianto di bioraffineria. Esso, infatti, si ottiene a seguito di miscelazione di kerosene fossile con un carburante, noto già con il termine di bio-jet fuel, realizzato dall'impianto bio. Questo giustifica ancor di più perché la riconversione è interessante e perché non riguarda tutte le unità di produzione di carburante tradizionale: per biocarburanti come il SAF serve, infatti, una frazione di altri carburanti fossili. Realizzare quindi l'impianto all'interno dello stabilimento tradizionale elimina la complicazione tecnico-logistica del trasporto del carburante fossile necessario.

Definito anche lo scopo dell'impianto, è possibile compiere il primo passo dello studio RAM: l'individuazione del limite di batteria e la caratterizzazione in unità funzionali. Per la bioraffineria in questione, dallo studio della documentazione progettuale, si sono ritenute all'interno del limite di batteria le seguenti unità funzionali di cui si riportano brevemente gli scopi:

- **Unità di pretrattamento (PTR), UF 01.** Depura le materie prime biologiche rimuovendo contaminanti solidi, metalli e fosforo che agirebbero come veleni per i catalizzatori delle fasi successive. Unità di nuova realizzazione.
- **Unità di raffinazione (RAF), UF 02.** Realizza la conversione della materia prima omogenizzata dall'unità di pretrattamento nei prodotti finali. Ottenuta da revamping vecchia unità.
- **Unità di trattamento acque acide (TAA), UF 03.** Rimuove per mezzo di *stripping* i gas acidi disciolti (acido solfidrico e ammoniaca) dalle acque di processo, rendendole idonee al riutilizzo o allo scarico. Ottenuta da revamping vecchia unità.
- **Unità di trattamento e rigenerazione ammine (TRA), UF 04.** Provvede al lavaggio dei gas acidi generati dai processi e alla successiva rigenerazione dell'ammina utilizzata come solvente assorbente. Ottenuta da revamping vecchia unità.
- **Unità dell'acqua di raffreddamento (ARA), UF 05.** Assicura il controllo termico dell'intero impianto, fornendo acqua refrigerata agli scambiatori di calore per dissipare il calore in eccesso. Ottenuta da revamping vecchia unità.
- **Unità dei serbatoi (SER), UF 06.** Svolge la funzione di "polmone" logistico dell'impianto, garantendo lo stoccaggio strategico delle cariche in ingresso, dei prodotti intermedi e di quelli finiti. Ottenuta riutilizzando i serbatoi della vecchia unità di raffinazione tradizionale in dismissione, integrando nuovi serbatoi legati all'attività dell'unità di pretrattamento.
- **Unità di scarico, trasferimento e carico materie prime/prodotti intermedi e finali, prodotti di scarto (STC), UF 07.** Gestisce primariamente la logistica di ricezione delle biomasse e la spedizione dei biocarburanti tramite autocisterne e oleodotti. Si occupa similmente anche dei prodotti intermedi e di scarto trasferendoli tra le varie unità. L'unità è realizzata riutilizzando pompe e compressori della vecchia unità di raffinazione tradizionale in dismissione, integrando anche nuovi componenti

All'interno di ogni unità sono presenti i relativi sistemi di regolazione, controllo e sicurezza. Si è deciso invece di escludere dall'analisi l'unità di trattamento dei gas acidi, precedentemente menzionata. Sebbene appartenga alle unità di futura nuova costruzione la si è ritenuta immediatamente per architettura e funzionamento non impattante sulle performance produttive della bioraffineria. La bioraffineria opera, al netto di periodi di fermo programmati o dovuti a guasto, in regime marcia continuativa (24/7) alla portata nominale di progetto. È in realtà previsto un leggero sovradesign del 10% sul valore nominale di portata sia per l'unità di pretrattamento che per quella di raffinazione. L'analisi RAM condotta è stata riferita però solamente al regime nominale continuativo nel tempo, considerando però anche i transitori di accensione e arresto dovuti a fermi per guasto o

manutenzione preventiva. Regimi parziali o di altra natura non sono stati considerati. Il flusso produttivo della bioraffineria può essere schematizzato dalla figura a seguire:

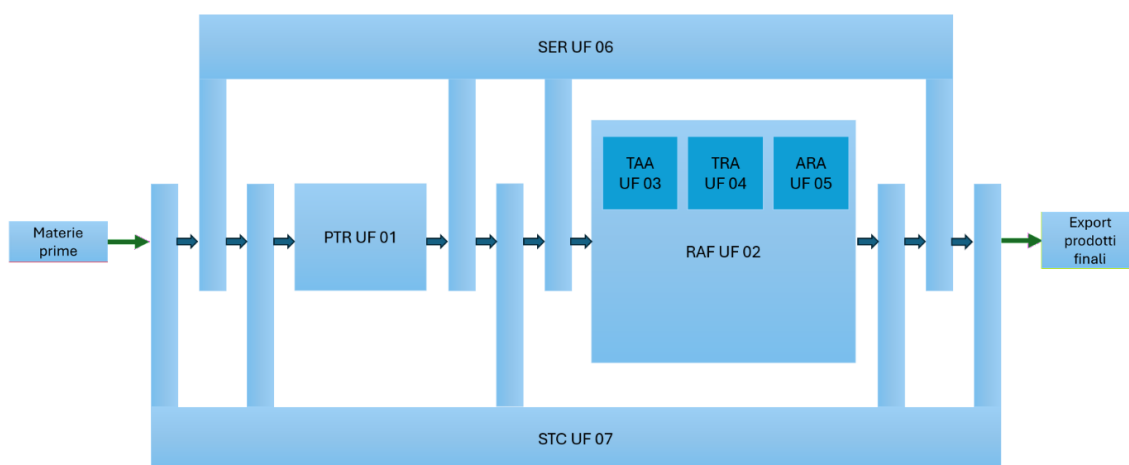


Figura 3-1 - Schema a blocchi raffigurante il flusso produttivo della bioraffineria e le Unità Funzionali.

La figura 3-1 illustra il percorso di conversione della materia prima in prodotto finale, procedendo sequenzialmente da sinistra verso destra. Le unità di pretrattamento e raffinazione sono disposte in serie e quest'ultima interagisce con quelle di trattamento acque acide (TAA), trattamento e rigenerazione ammine (TRA) e raffreddamento acqua (ARA) in assenza delle quali non potrebbe operare. Queste unità si presentano come blocchi operativi spazialmente concentrati. Viceversa, le unità dei serbatoi e di logistica delle materie prime, prodotti e scarti, invece, hanno un'architettura distribuita come suggerito graficamente dalle ramificazioni verticali. Le UF 06 e 07, infatti, svolgono una funzione ben definita in accordo al criterio che definisce cos'è un'unità funzionale, ma sono fisicamente ripartite. Ciò è importante, in quanto garantisce la continuità e l'integrazione dei flussi tra le diverse fasi di processo, necessarie alla corretta operatività della bioraffineria.

Nei sottoparagrafi a seguire è fornita, per le unità funzionali all'interno del limite di batteria, una descrizione più approfondita citando le apparecchiature di principale importanza. L'obiettivo è fornire una migliore comprensione delle ipotesi assunte e dei risultati ottenuti nelle varie fasi dell'analisi RAM.

3.1.1 Unità di pretrattameto PTR 01 e raffinazione RAF 02

Le unità di pretrattamento (PTR 01) e raffinazione (RAF 02) elaborano le materie organiche in ingresso quali oli esausti alimentari, oli vegetali e grassi animali, per la realizzazione dei biocarburanti SAF e HVO Diesel.

La PTR 01 ha il compito di pretrattare queste materie prime piuttosto eterogenee tra loro affinché possano essere confluite in un'unica carica omogenea verso l'unità di raffinazione. Per gestire le diverse tipologie di materia prima, la PTR 01 è organizzata in tre treni paralleli. Questi treni, indipendenti tra di loro, sono specificamente dedicati ad un solo tipo di materia prima ed elaborano quantità medesime di portata pari, dunque, ad un terzo di quella complessiva dell'unità sia in operatività nominale che in caso di sovrapproduzione.

Si riporta qui di seguito lo schema dell'unità:

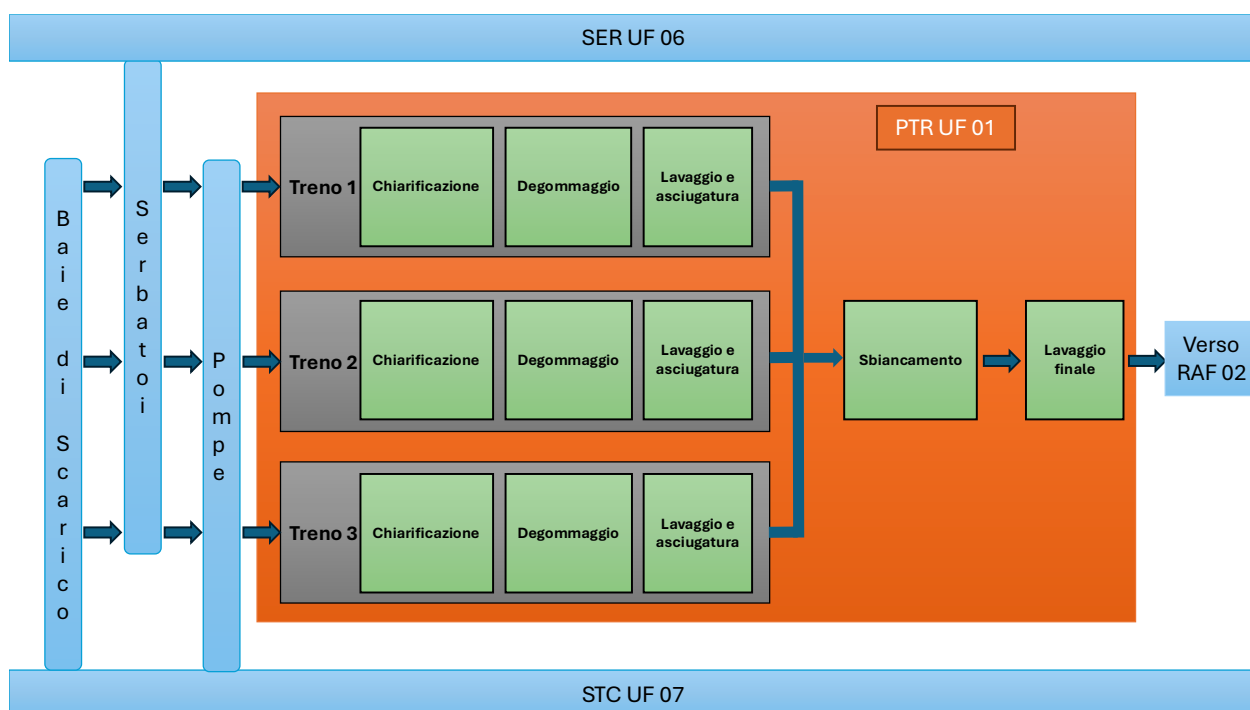


Figura 3-2 - Schema a blocchi di dettaglio del flusso produttivo dell'Unità di Pretrattamento (PTR).

Come mostrato dalla figura 3-2, in ogni treno è possibile individuare una specifica sezione che svolge dei determinati processi:

- **Sezione di chiarificazione.** Vengono rimosse le particelle solide di maggiori dimensioni per ridurre manutenzioni e fermi a valle. Gli oli vengono riscaldati, miscelati con acqua e sottoposti ad agitazione; poi una centrifuga separa la fase pesante, contenente gli inquinanti, da quella leggera che prosegue i pretrattamenti.
- **Sezione di degommaggio.** Mira ad eliminare impurità tramite trattamenti chimici. Sono dunque aggiunti acidi e basi al flusso di olio, si effettua agitazione e una prima centrifugazione. Dopo questo primo trattamento viene introdotta soda caustica per rimuovere acqua e gomme e si procede ad un secondo processo di centrifugazione.

- **Sezione di lavaggio e asciugatura.** Rimozione delle impurità residue mediante miscelazione con acqua e acido citrico, seguita da agitazione e centrifugazione che separa la fase pesante da quella oleosa. Si completa con un'essiccazione mirata e lo stoccaggio della carica trattata.

Omogenizzate dai processi subiti nelle sezioni dei rispettivi treni, le cariche confluiscono in un'unica linea diventando un unico flusso per gli ultimi pretrattamenti. Il primo stadio di questa fase prevede l'attacco chimico dei contaminanti. L'olio grezzo viene miscelato con acido citrico e una piccola quantità di silice per rendere i contaminanti più captabili dagli adsorbenti modificandone la struttura. Contemporaneamente si esegue un'essiccazione della corrente per ridurre l'umidità residua e ottimizzare le condizioni di adsorbimento. La carica essiccata viene quindi trattata con adsorbenti ad alta porosità, quali terre sbiancanti e carbone attivo, che intrappolano i contaminanti residui. Per preservare l'integrità dell'olio e massimizzare l'efficacia dell'adsorbimento i processi avvengono in condizioni di vuoto spinto e a temperatura controllata. Il pretrattamento è infine concluso con un lavaggio finale dell'effluente per rimuovere eventuali residui sopravvissuti e/o introdotti in tutti i processi e garantire la qualità della carica in ingresso all'unità di raffinazione.

La carica pretrattata, chiamata ora anche olio, è inviata quindi all'unità di raffinazione basata sulla tecnologia hydroprocessing che realizza i processi idrodeossigenazione, idroisomerizzazione e idrocracking [23]. All'interno dell'unità sono state riscontrate tre macrosezioni di raffinazione, denominate A, B e C, intervallate da sezioni di condizionamento, come mostrato dalla figura a seguire:

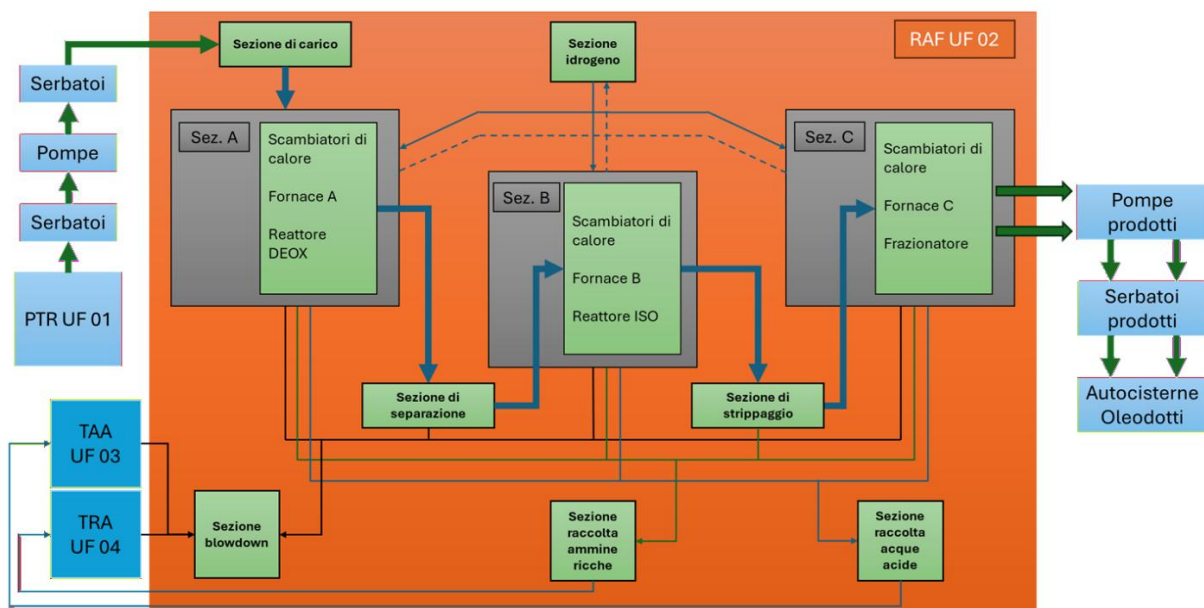


Figura 3-3 - Schema a blocchi di dettaglio del flusso produttivo dell'Unità di Raffinazione (RAF).

Osservando la figura 3-3, la prima sezione incontrata dall'olio è quella di carico, dove esso viene inizialmente preriscaldato in degli scambiatori di calore e additivato con DMDs (dimetildisolfuro) per proteggere i catalizzatori del reattore di idrodeossigenazione. La carica giunge dunque nella sezione A di reazione: qui subisce un ultimo preriscaldamento prima di entrare nel reattore grazie ad una fornace. Nel reattore di idrodeossigenazione l'effluente incontra una corrente di idrogeno che ha i seguenti compiti:

- **Rimuovere l'ossigeno** legandosi agli atomi presenti nella carica ed eliminandolo come acqua, monossido e diossido di carbonio;
- **Saturare doppi/tripli legami** delle catene molecolari dell'effluente trasformandoli in paraffine lineari;
- **Controllare la temperatura del reattore**

A causa della forte esotermicità della reazione, infatti, per evitare danneggiamenti ai catalizzatori, viene iniettato idrogeno tra i letti del reattore con portata regolata tramite valvole e grazie ai segnali di temperatura provenienti da numerosi sensori-trasmettitori disposti sul reattore. Uscendo dal reattore l'effluente è purificato tramite separatori in serie prima di essere inviato alla sezione di reazione B, in cui viene nuovamente riscaldato tramite scambiatori e una seconda fornace e introdotto nel reattore di idroisomerizzazione. In questo reattore, dove sono presenti catalizzatori di materiali nobili, giunge nuovamente un flusso di idrogeno che ha il compito di modificare la struttura delle paraffine lineari in isoparaffine a ramificazione multipla. Questo riarrangiamento strutturale è essenziale per conferire ai prodotti come il SAF le proprietà a freddo necessarie per l'impiego operativo quale una temperatura di congelamento inferiore ai -40 °C [24]. Sebbene non sia quello principale, in questo reattore inizia anche il processo di idrocracking che si completa nel frazionatore della sezione C. La carica isomerizzata in uscita dal reattore subisce diverse fasi di raffreddamento e separazione prima che la fase liquida sia inviata ad una colonna di strippaggio. Nella colonna viene realizzata la rimozione di gas leggeri e corrosivi per mezzo di vapore a media pressione, prodotto sfruttando il calore delle fornaci delle sezioni A e B, man mano che l'effluente dalla testa di essa scende verso il fondo. Dal fondo dello stripper il prodotto è inviato alla sezione C al fondo del frazionatore; qui viene riscaldato da una corrente di ricircolo che riceve calore in una terza fornace. L'effluente è dunque separato in più frazioni a diverse altezze della colonna, ottenendo diesel, cherosene e nafta. Il cherosene è sottoposto a un ulteriore strippaggio dedicato prima di essere immagazzinato come SAF. La nafta, invece, viene stabilizzata in un'apposita sezione con colonna. La frazione gassosa incondensabile (contenente propano e costituita dal GPL grezzo) è inviata a un lavaggio specifico per rimuovere H_2S e CO_2 . I prodotti finali confluiscono in serbatoi di grande

capacità per lo stoccaggio e il successivo invio agli utenti. Eventuali prodotti fuori specifica, ovvero con proprietà non idonee alla vendita, vengono stoccati separatamente per essere rielaborati.

A supporto delle sezioni di trattamento dell'olio per la realizzazione sono presenti inoltre:

- **Sezione dell'idrogeno.** Genera l'idrogeno necessario ai processi di idrodeossigenazione, idroisomerizzazione e idrocracking, riciclando anche correnti interne. L'idrogeno è distribuito agli elementi e apparecchiature che lo impiegano tramite un compressore multistadio non ridondato.
- **Sezione di raccolta acque acide.** Si occupa del recupero e stoccaggio preliminare delle correnti e drenaggi di acqua acida provenienti dalle sezioni di produzione.
- **Sezione di raccolta ammine ricche.** È deputata al recupero e stoccaggio preliminare delle correnti e drenaggi di ammina ricca provenienti dalle sezioni di produzione.
- **Sezione di blowdown.** Si occupa di ricevere gli scarichi provenienti dalla raffinazione, ma anche dalle unità funzionali TAA 03 e TRA 04, e assicurarne la combustione in zona sicura e nel rispetto dei limiti di irraggiamento consentiti. Questa sezione è dotata di due sistemi di torcia, uno per scarichi idrocarburici e uno per scarichi acidi.

In uscita a destra sono rappresentati in figura 3-3 i flussi dei biocarburanti prodotti diretti verso gli appositi serbatoi di stoccaggio prima dell'esportazione finale tramite autocisterne o oleodotto.

3.1.2 Unità trattamento acque acide TAA 03 e ammine TRA 04

Le unità si articolano dal punto di vista impiantistico e di processo con importanti somiglianze (figure 3-4 e 3-5 in coda al sottoparagrafo). Entrambe, infatti, perseguono la rimozione di sostanze indesiderate, quali solfuri o idrocarburi, trascinate dalle correnti tramite una sequenza di processi distinti in due fasi:

- **Pretrattamento.** In entrambe le unità funzionali è realizzato in un apposito serbatoio che raccoglie rispettivamente i flussi di acqua acida e ammina ricca provenienti principalmente dall'unità di raffinazione. Il compito di tali serbatoi è:
 - **Ricezione e accumulo.** Con lo scopo di compensare fluttuazioni di portata dovute alle fasi di processo della bioraffineria e garantire il funzionamento continuo delle unità due unità di trattamento.
 - **Separazioni preliminari dei trascinamenti gassosi/idrocarburici.** I gas sono separati nella parte superiore e inviati a torcia attraverso un processo noto come

degasaggio. I residui idrocarburici sono invece rimossi tramite filtri e paratie mobili in una operazione parallela al degasaggio chiamata disoleazione.

- **Trattamento.** I flussi pretrattati entrano in ciascuno in una colonna di trattamento dove sono soggetti al contatto con vapore che risale dal basso di essa. È proprio il contatto con il vapore, unito al calore all'interno di questi ambienti, che favorisce la rimozione delle sostanze indesiderate. Nel caso del trattamento delle ammine, per ottimizzare il processo, può essere iniettata anche della soda caustica.

Dalle colonne vengono quindi estratti tre diversi flussi:

- **Flussi di testa.** Vapori acidi/gassosi desorbiti, raffreddati e inviati alle unità di trattamento. La frazione che condensa è reintegrata come riflusso all'interno della colonna
- **Flussi laterali (ricircoli).** Flussi bifasi, alimentano termicamente la colonna grazie a calore fornito da vapore a bassa pressione in uno scambiatore di calore
- **Flussi del fondo.** Correnti depurate (acqua e ammina povera) inizialmente raffreddate in uno scambiatore di calore dove possono cedere potenza termica al flusso in ingresso alla colonna. Sono quindi ulteriormente raffreddate per essere stoccate o reintegrate nelle altre unità funzionali, raffinazione su tutte

Per le ammine è prevista anche la filtrazione meccanica per rimuovere prodotti di degradazione, melme e particolato corrosivo prima del reintegro in RAF.

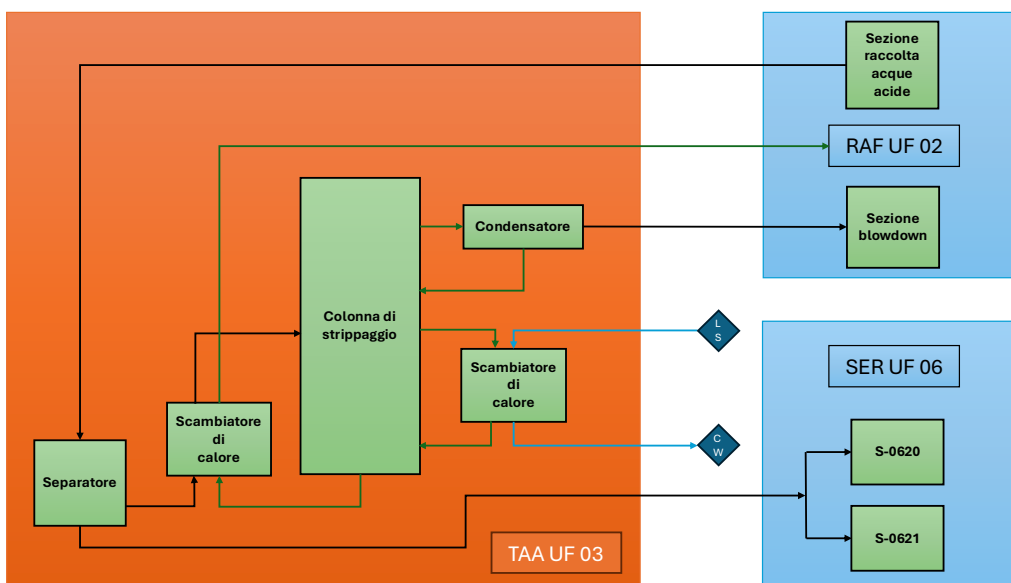


Figura 3-4 - Schema a blocchi di dettaglio dell'Unità di Trattamento Acque Acide (TAA).

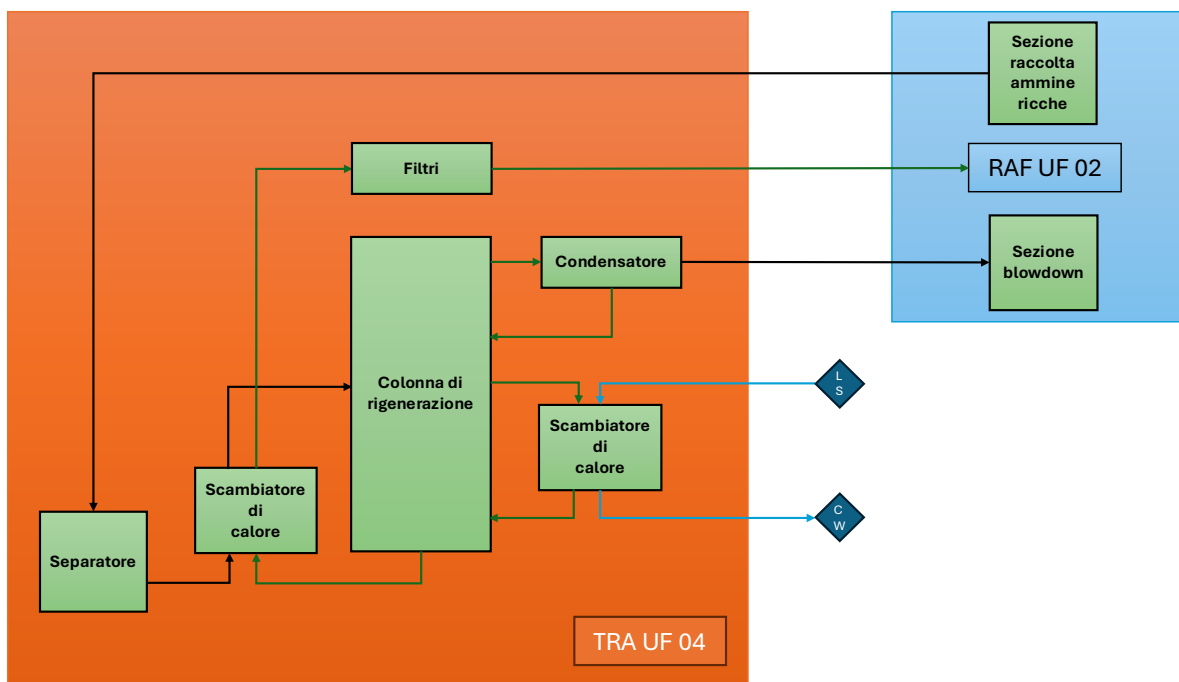


Figura 3-5 - Schema a blocchi di dettaglio dell'Unità di Trattamento e Rigenerazione Ammine (TRA).

3.1.3 Unità acqua di raffreddamento ARA 05

Questa unità fornisce acqua refrigerata principalmente alle diverse sezioni della RAF, ma anche alle TAA e TRA. È costituita da 4 celle di raffreddamento dotate di ventilatori. La fornitura di acqua è garantita tramite 4 pompe uguali in configurazione 4x33%, ovvero 3 di servizio e una di riserva. L'acqua raffreddata è prelevata da una vasca che garantisce un'autonomia di 10 minuti in caso di interruzione del reintegro. Sono presenti anche:

- **Filtri gruppo a monte:** pre-filtrano l'acqua proveniente dall'impianto a protezione dell'unità di raffreddamento rimuovendo le impurità
- **Filtri gruppo laterale:** filtrano costantemente una frazione della portata d'acqua dal circuito di raffreddamento per la rimozione di solidi sospesi. La portata viene poi reintegrata.

Vengono inoltre iniettati additivi specifici per mantenere le caratteristiche dell'acqua entro i parametri di progetto per prevenire corrosione, incrostazioni e proliferazioni biologiche. Salinità e purezza sono gestite tramite uno scarico verso la fogna oleosa, regolato in base alle analisi chimiche dell'acqua circolante.

3.1.4 Unità serbatoi SER 06 e STC 07: logistica materie prime e prodotti

L'unità funzionale dei serbatoi SER 06 è il polmone operativo dell'impianto che garantisce la continuità dei processi gestendo i flussi delle materie prime in ingresso, dei prodotti semilavorati nella catena di raffinazione e trattamento, dei prodotti finali poi trasferiti e venduti. Nel dettaglio, al netto del numero di serbatoi per lo stesso scopo, sono presenti:

- **Parco serbatoi carica PTR:** sono dedicati alla raccolta delle materie prime in ingresso alla raffineria. Ulteriormente distinti tra di loro in base alla tipologia di biomassa che deve essere elaborata dall'unità di pretrattamento.
- **Parco serbatoi intermedio PTR-RAF:** le diverse cariche opportunamente trattate sono ora un'unica sostanza omogenea accumulata in un solo serbatoio. Qui sono presenti anche dei serbatoi per la raccolta degli scarti di produzione generati durante il pretrattamento che dovranno essere opportunamente smaltiti. In ingresso alla raffinazione sono presenti ulteriori serbatoi polmone.
- **Parco serbatoi prodotti RAF:** raccolgono i diversi prodotti dell'unità di raffinazione pronti per essere venduti. In caso di fermo impianto garantiscono il flusso verso i destinatari dei biocarburanti. In questo settore sono presenti pure i serbatoi per la raccolta degli scarti dei processi di raffinazione e delle unità TAA e TRA per lo smaltimento al di fuori dei confini d'impianto.
- **Parco serbatoi fuori specifica:** raccolgono prodotti semilavorati o finiti che non hanno ancora raggiunto le specifiche finali di produzione e devono dunque essere riprocessati.

La logistica delle materie prime, dei prodotti intermedi e finali tra un'unità e l'altra dell'impianto, tra i serbatoi e anche in ingresso e in uscita dalla bioraffineria è garantita dall'unità funzionale STC 07 scomponibile in tre distinte sezioni:

- **Ingresso:** comprende le infrastrutture dei terminal stradali e ferroviari e gli elementi deputati allo scarico delle materie prime. I terminal sono divisi in base al tipo di materia prima e non è possibile intercambiarli.
- **Intermedi:** comprendono tutti gli elementi che movimentano le cariche tra i serbatoi a monte e valle della PTR e della RAF e a valle della TAA e della TRA (tipicamente pompe e compressori come elemento principale oltre che valvole e sensori).
- **Uscita:** sono inclusi tutti gli elementi ed infrastrutture necessarie al carico su mezzi stradali o invio tramite oleodotto dei prodotti della bioraffineria.

3.2 Fase progettuale

Esposto il quadro impiantistico e di processo generale, si vuole dunque approfondire il contesto in cui è stato svolto lo studio. L'analisi, infatti, è stata realizzata in una particolare fase di progettazione, preliminare, nota con il nome di FEED (Front End Engineering and Design). In tale paragrafo si vuole dunque approfondire i motivi per cui l'analisi RAM è stata realizzata in questa specifica fase, i vantaggi e i limiti. Ciò permetterà di comprendere più chiaramente i risultati conseguiti, nonché le scelte metodologiche e le assunzioni adottate presentati nei capitoli successivi legati alle varie fasi dell'analisi. Si riporta a seguire uno schema logico della successione delle varie fasi di progetto:



Figura 3-6 - Schema delle fasi di progetto dalla scelta del concept fino all'esercizio dell'impianto.

La FEED segue la fase di scelta del concept, dove vengono prima confrontate diverse alternative progettuali ed eletta poi quella che sembra più promettente, ed è uno stadio chiave per garantire la futura eseguibilità tecnica e sostenibilità economica dell'impianto. In tale contesto, l'analisi RAM assume un ruolo centrale, in quanto consente di verificare che la configurazione selezionata tra le alternative scartate soddisfi gli obiettivi ricercati in termini di disponibilità produttiva da parte. I PFD (Process Flow Diagram – Diagramma di flusso di processo) sviluppati nella fase precedente, sono ulteriormente dettagliati e integrati anche con unità ed elementi che nella fase precedente sono stati esclusi. Il livello di dettaglio che viene raggiunto in questa fase conduce alla realizzazione dei P&ID (Piping and Instrumentation Diagram - Diagramma delle tubazioni e della strumentazione), che sono stati la base progettuale di riferimento per l'analisi RAM. In essi sono stati riscontrati i dettagli di valvole, tubazioni e relative caratteristiche (classi, diametri, fluido che le attraversa...), strumenti di misura, loop di controllo e sistemi di sicurezza. Ulteriori documenti di input redatti e resi disponibili dal committente in questa fase sono la descrizione processo, le liste apparecchiature, i bilanci di materia ed energia, le matrici causa ed effetto (CEM), e le filosofie O&M (Operation and Maintenance). Le valutazioni sui ritardi logistici delle varie operazioni restano invece di natura preliminare o assenti.

L'intera analisi RAM svolta in questa fase di FEED è stata principalmente limitata alla sola Operatività Normale e quindi eventuali unità o apparecchiature che operano nelle fasi di accensione,

spegnimento o emergenza, sono state escluse. È un limite questo abbastanza ampio per l'analisi, ma non ancora completo di tutto ciò che effettivamente costituisce l'impianto e incide sulle sue prestazioni produttive. Ciò è chiaramente fatto in ottica di non appesantire ulteriormente l'analisi RAM ottimizzando i tempi della realizzazione stessa per poter arrivare il più velocemente possibile, con buona consistenza dei dati e dei risultati ottenuti, alla fase di costruzione e messa in esercizio dell'impianto.

L'analisi di disponibilità produttiva realizzata consente già in FEED di identificare le principali fonti di indisponibilità. Da queste, un eventuale cliente dello studio può quindi valutare ed implementare miglioramenti nella fase successiva di costruzione o, qualora necessario, in una fase di riprogettazione preliminare. La FEED è infatti l'ultima fase in cui eventuali modifiche al design e alla configurazione operativa dell'impianto, magari suggerite proprio dall'analisi RAM, possono essere compiute con costi, in termini economici e di tempo, relativamente contenuti rispetto alle fasi successive.

Conclusa questa ampia panoramica sull'impianto, i processi e la fase progettuale del caso studio, dal prossimo capitolo in poi si approfondiscono gli step più operativi dell'analisi condotta per la valutazione della disponibilità produttiva della bioraffineria.

4 REGISTRO DEGLI ASSET

Il presente capitolo descrive il processo di individuazione e censimento di tutti gli elementi costituenti la bioraffineria che sono stati ritenuti rilevanti per l'esecuzione dell'analisi RAM volta alla determinazione finale della disponibilità produttiva. Viene innanzitutto mostrato un esempio di P&ID dal quale è stato possibile individuare gli elementi. Quindi sono introdotti e spiegati i criteri e le ipotesi applicate per realizzare un corretto censimento evitando l'omissione di elementi importanti piuttosto che l'inclusione di altri che appesantirebbero inutilmente lo studio. Viene quindi mostrato un piccolo estratto del registro e dettagliate le informazioni riportate per ogni elemento censito nel registro. Il capitolo si conclude, dunque, descrivendo un importante documento che è stato creato, il database R&M che, allegato al Registro degli Asset, è di primaria importanza per l'efficace realizzazione dell'analisi FMEA esposta nel capitolo successivo.

4.1 Ipotesi

La redazione dell'Registro degli Asset, l'elenco strutturato di tutti i componenti manutenibili, ha preso forma partendo dalla lettura dei documenti, in particolar modo dei P&ID, noti anche come schemi di marcia dell'impianto. Si riporta di seguito l'esempio di un P&ID esaminato:

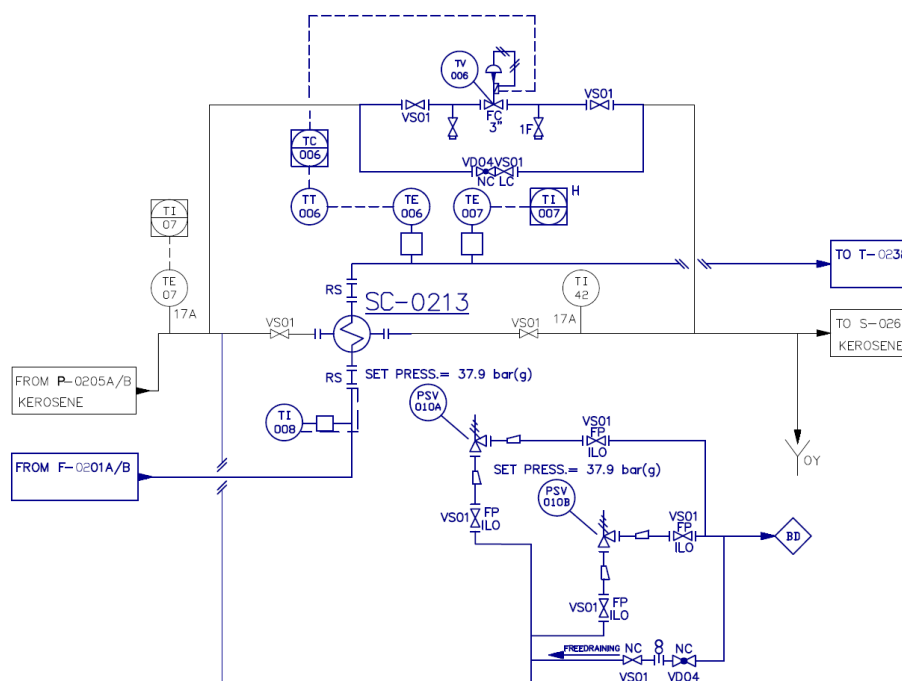


Figura 4-1 - Esempio di P&ID della bioraffineria del caso studio appartenente alla sezione di carico della materia prima dell'Unità di Raffineria.

La figura 4-1 mostra in particolare uno scambiatore di calore nella sezione di carico dell'unità di raffinazione ricevente l'effluente dall'unità di pretrattamento. Esso è preriscaldato in direzione del reattore di idrodeossigenazione (sezione A) per mezzo di una corrente di kerosene proveniente dal frazionatore e diretta verso lo stoccaggio. Una serie di sensori e trasmettitori (i TE e i TT) inviano i segnali della temperatura misurata a delle logiche di controllo (le TC) che, in base alla deviazione rispetto ad un valore di riferimento, comandano il grado di apertura delle valvole (TV). Valvole e sensori/trasmettitori costituiscono così un cosiddetto "loop di controllo": un sistema automatizzato progettato per mantenere una variabile di processo (la temperatura nello specifico) ad un valore desiderato correggendo autonomamente eventuali perturbazioni. Per ragioni di sicurezza del processo sono installate pure delle PSV in configurazione ridondata con indicato il valore di pressione che porta alla loro apertura.

Sono stati in particolare esaminati N° 135 P&ID così suddivisi per unità funzionale:

- N° 62 per l'unità di raffinazione (RAF 02)
- N° 9 per l'unità di trattamento e rigenerazione ammine (TRA 03)
- N° 5 per l'unità di trattamento acqua acida (TAA 04)
- N°1 per l'unità dell'acqua di raffreddamento (ARA 05)
- N°58 complessivi per le unità dei serbatoi (SER 06) e lo scarico/trasferimento/carico materie prime e prodotti (STC 07)

A questi si sono aggiunti N° 40 PFD appartenenti all'unità di pretrattamento in quanto il suo stato di progettazione, al momento dell'analisi RAM, risultava arretrato rispetto al resto dell'impianto. Rispetto ai P&ID come quello della figura 4-1, che normalmente sono dedicati ad una specifica apparecchiatura principale (nel caso della figura lo scambiatore di calore), i PFD spesso rappresentano intere sezioni di impianto con più componenti principali. Per questo motivo, essendo tavole tecniche di più alto livello, il grado di dettaglio di questi ultimi è significativamente inferiore. Nel capitolo della FMEA si vedrà meglio come ciò ha comportato l'assunzione di alcune ipotesi in linea con quanto adottato per tutte le altre unità funzionali dove erano disponibili i P&ID, ma tenendo conto del grado di dettaglio ridotto.

Dato l'elevato numero di tavole di progetto e di elementi in essi rappresentati, considerata la fase progettuale di FEED, si è scelto di adottare un approccio selettivo nel censimento del Registro degli Asset. Invece della trasposizione di ogni componente rappresentato nella documentazione di progetto della bioraffineria, l'inventario è stato focalizzato esclusivamente sugli oggetti che, in caso di guasto o indisponibilità per manutenzione, generino un effettivo impatto negativo sull' operativa

dell'impianto. Tale strategia permette di snellire il processo di analisi senza compromettere il rigore metodologico o la solidità dei risultati finali, ma mettendo anzi più in risalto gli elementi effettivamente critici. A seguire dunque è riportata una tabella, non completamente esaustiva, delle tipologie di elementi che si è deciso di escludere dal Registro degli Asset:

Esclusi dal Registro degli Asset
Elementi utilizzati per solo usi emergenziali
Elementi utilizzati per solo usi manutentivi
Trasmittitori di sola indicazione/allarme (non aventi funzioni di controllo processo, ESD o PSD)
Elementi normalmente non funzionanti (NNF)
Elementi con elevata affidabilità intrinseca
Tubazioni, flange e altri oggetti ad essi simili
Valvole manuali
Valvole autoattuate
PSV con ridondanza
Trasmittitori con ridondanza 2oo3
Dispositivi di telecomunicazione

Tabella 4-1 – Elenco riassuntivo degli elementi esclusi dal Registro degli Asset.

La prima motivazione di esclusione degli oggetti si è basata sulla condizione operativa per il quale lo studio è stato condotto: regime nominale continuativo. Sono stati pertanto esclusi tutti quegli oggetti che, sebbene appartenenti fisicamente alle unità funzionali all'interno del limite di batteria, non partecipano alla fase di produzione in regime nominale. Appartengono a questa categoria gli elementi destinati esclusivamente a scopi emergenziali o manutentivi, la cui attivazione è circoscritta a regimi di funzionamento transitori o straordinari, estranei alla normale produzione. Coerentemente alla premessa di considerare quegli elementi che “generino un effettivo impatto negativo”, sono stati omessi tutti gli elementi che per loro costruzione/tipologia, o configurazione d'installazione, hanno elevata affidabilità intrinseca tali da potersi ritenere “esenti da guasto”. Questi sono normalmente elementi meccanici semplici e “statici”, cioè privi di organi mobili, o che, una volta installati, non debbono essere usati frequentemente o ancora dotati di ridondanza. Esempi di questi elementi sono le tubazioni, le flange, le valvole manuali e autoattuate, le valvole PSV (pressure safety valve) se ridondate. Questa scelta di esclusione si è basata su una consolidata prassi ingegneristica, ma rafforzata anche dalla consultazione di database di settore dove si è riscontrato che questi oggetti hanno valori molto bassi del tasso di guasto. Per le stesse ragioni anche piccoli elementi/apparecchiature elettriche o per le telecomunicazioni non sono state riportate nel registro.

Tutto ciò che è strettamente legato al processo di produzione, al suo controllo e regolazione, e non rientrante nei criteri di esclusione precedentemente menzionati è stato invece incluso. Si riporta anche per questi elementi una tabella riepilogativa, non esaustiva:

Inclusi nel Registro degli Asset
Macchine rotanti
Scambiatori di calore, reattori
Serbatoi di stoccaggio
Motori elettrici, a combustione interna e turbine
Filtri principali
Strumentazione e valvole impiegate nel controllo di processo
PSV senza ridondanza
Macchine elettriche (trasformatori, generatori...)

Tabella 4-2 – Elenco riassuntivo degli elementi manutenibili inclusi nel Registro degli Asset.

Le macchine rotanti come pompe e compressori sono il "cuore pulsante" della bioraffineria e il loro guasto determinerebbe l'arresto dei flussi di materia o l'impossibilità di raggiungere le condizioni di pressione operative necessarie. Sebbene elementi statici e senza parti mobili, gli scambiatori di calore, i reattori e i serbatoi sono i nodi centrali delle trasformazioni fisiche (scambiatori) e chimiche (reattori) oltre che svolgere la funzione di polmone dell'impianto (serbatoi). Strumentazioni e valvole di controllo sono indispensabili per mantenere i parametri (temperatura, portata, livello) entro i limiti di esercizio nominale e, in una bioraffineria, sono costantemente in funzionamento e regolazione. Sebbene operino in emergenza, un malfunzionamento di una PSV senza ridondanza può comportare il fermo dell'intera linea per motivi di sicurezza e dunque impatti sulla produzione. In sintesi, quelli riportati nella tabella 4-2 sono tutti elementi selezionati appositamente per la loro criticità per il processo per i quali è stato essenziale procedere approfondendo lo studio RAM esposto nei capitoli successivi.

Conclusa l'esposizione delle ipotesi e dei criteri adottati per la compilazione del registro degli Asset, viene dunque presentato un estratto di esso nel prossimo paragrafo descrivendo anche tutte le informazioni riportate.

4.2 Il Registro

Sulla base dei criteri sopra menzionati viene di seguito riportato un estratto del Registro degli Asset realizzato in cui sono riportati gli anche elementi inclusi dal P&ID di figura 4-1:

Functional Location	Functional Location Description	Superior Functional Location	Item Type	Instrument Function	Operating Status	Fluid Code	Type of service	By-Pass	Fail Position	Vol. (m ³)	Size (inches)	Oper. pressure (barg)	Oper. temp. (°C)	Duty (kW)	Flow Rate (m ³ /h)	Main Ref. Eng. Document
SC0215	Unit 02 - Heat Exchanger SC-0213 feedstock-kerosene	02	SC		NO	P	H	N								P&ID05842
02TV006	Unit 02 - Temperature Valve 006 regulating kerosene flow bypassing SC-0215	SC0215	TV	CT	NO	P	H	Y	FC		3"					P&ID05842
02TT006	Unit 02 - Temperature Transmitter 006 acting on TV-006	SC0215	TT	CT	NO	P	H	N								P&ID05842
02PV008B	Unit 02 - Pressure Valve 008B regulating blowdown flow to blowdown section	S0238	PV	CT	NO	P	H	Y	FC		2"				86,6	P&ID05843
P0201A	Unit 02 - Section A feed pump P-0201 A	02	P		D	P	H	N				143				P&ID05843
P0201B	Unit 02 - Section A feed pump P-0201 B, spare unit	02	P		S	P	H	N				143			86,6	P&ID05843
02FT018	Unit 02 - Flow Transmitter 018 acting on FV 018 A/B	P0201	FT	CT	NO	P	H	N								P&ID05843

Figura 4-2 – Estratto del Registro degli Asset realizzato.

La registrazione degli elementi nel registro è iniziata riportando innanzitutto un primo gruppo di informazioni (prime 4 colonne della figura 4-2) che permettono di identificare, descrivere e assegnare un certo livello gerarchico agli elementi. La corretta gerarchizzazione e identificazione degli asset fornisce una struttura logica necessaria per mappare le dipendenze funzionali all'interno della bioraffineria. Questo passaggio è stato importante per lo studio condotto, poiché permette di propagare correttamente l'impatto di un guasto dal singolo componente fino ai vertici della catena produttiva. È stato dunque assegnato a ciascun elemento la “functional location”: un codice identificativo specifico realizzato partendo dal tag con cui sono indicati sui P&ID. Il codice della functional location è costruito in base all’ordine gerarchico degli oggetti che sono stati distinti in:

- **Principali (apparecchiature):** elementi come pompe, compressori, reattori, fornaci... per i quali è individuabile come elemento padre l’unità funzionale. In eccezione a questa definizione vengono classificati come principali le unità driver, come i motori e le turbine, che hanno come padre l’elemento che mettono e mantengono in moto.
- **Secondari:** elementi come i trasmettitori, valvole di regolazione, PSV... che hanno come elemento padre un elemento principale.

Per i principali la functional location è il tag stesso con cui gli oggetti sono rappresentati nei P&ID. Il tag già fornisce infatti la localizzazione di questi attraverso le prime due cifre che sono

quelle dell'unità funzionale a cui l'apparecchiatura appartiene. Per lo scambiatore di calore di figura 4-1 è stato quindi riportato "SC0213" ed è quindi un elemento appartenente all'unità di raffinazione (RAF 02 appunto). Per gli elementi secondari, come la valvola di temperatura TV 006 (figura 4-1), per evidenziare il legame con l'unità funzionale della raffinazione è stato costruito il codice 02TV006 (figura 4-2). A rafforzare l'identificazione univoca e per indicare l'ordine gerarchico è stata compilata la colonna superior functional location riportando il tag dell'elemento padre che, come precedentemente detto, può corrispondere anche l'unità funzionale. La descrizione breve inserita per ogni oggetto nella seconda colonna è stata molto importante ai fini dell'analisi svolta. Essa, infatti, contestualizza l'elemento nel processo, specificandone il ruolo operativo e il fluido gestito (es. *kerosene*). Il primo gruppo di informazioni si conclude quindi con un codice a lettere maiuscole che classifica la tipologia dell'oggetto ricavato sempre dal tag con cui gli elementi sono rappresentati nei P&ID e PFD. Tale codice è costituito normalmente da una o due lettere (P = pompa, SC = scambiatore di calore) al netto di eccezioni (PSV). Caso interessante sono i tag che riportano la lettera "X" come, ad esempio, i sensori di temperatura sui reattori indicati come TXE invece che con la normale sigla TE. Questa particolare codifica è stata usata per individuare immediatamente, senza la necessità di consultare altra documentazione, tutti gli elementi che hanno funzione di sicurezza e attivano le logiche di arresto.

Dalla quinta alla decima colonna del registro (figura 4-2) sono state riportate informazioni riguardo le caratteristiche funzionali e operative degli elementi censiti. La funzione svolta ("operating status") di un certo componente è stata dedotta dalla lettura dei P&ID e dalla descrizione processo forniti nella documentazione. Viste le precedenti ipotesi di esclusione esposte in 4.1 sono state solo due le funzioni individuate:

- CT = controllo: tutti gli elementi che giocano ruolo attivo nella regolazione del processo produttivo.
- SD = shutdown, spegnimento: tutti gli elementi che portano ad un arresto parziale o totale, su qualsiasi scala, dovuto ad esigenze di processo o di emergenza.

Per i componenti principali invece non è stata indicata alcuna sigla sottintendendo che la loro funzione sia quella di produzione. Lo stato operativo ("operating status", sesta colonna, figura 4-2) è stato riportato per definire in che condizione si trova l'apparecchiatura in un determinato momento rispetto al suo ciclo di lavoro e alla sua configurazione. Avendo escluso tutti gli elementi di indicazione o allarme, la maggior parte di quelli riportati sono stati dunque classificati tramite la sigla NO, ovvero Normalmente Operativi. Per i componenti che invece, dalla lettura dei P&ID e dalla descrizione processo, presentavano ridondanza si sono usate:

- D = duty, servizio. Per l'elemento/gli elementi normalmente in funzione.
- S = stand-by. Per l'elemento/gli elementi che svolgono la funzione di riserva e verranno impiegati quando, per guasto o fermo preventivo, l'elemento/gli elementi duty non sono in funzione.

Si è normalmente riscontrata e assunta una politica di ridondanza che prevede un solo elemento di riserva con gli altri normalmente in servizio. Eccezioni sono state comunque riscontrate e tenute in considerazione quando la documentazione sulla descrizione processo esplicitava differente politica. Per gli elementi con funzione di arresto (SD) lo stato operativo ha consentito una caratterizzazione più dettagliata potendo specificare il tipo di arresto che essi determinano. Si sono riconosciuti in particolare i seguenti due stati operativi di arresto:

- PSD = Process Shut-Down, spegnimento di processo.
- ESD = Emergency Shut-Down, spegnimento di emergenza.

Ulteriori informazioni di rilievo inerenti alle caratteristiche operative e funzionali hanno riguardato il tipo di fluido gestito dall'elemento, il tipo di servizio e la presenza di bypass sull'elemento. Il fluido è stato identificato per mezzo di un codice alfanumerico individuato sui P&ID in prossimità delle tubazioni. Le lettere ne individuano la tipologia distinguendo tra di fluidi di processo (P), vapore a media (MS) e bassa (LS) pressione, acqua di raffreddamento (CW)... Il codice numerico, invece, ha permesso un'identificazione certa che è specificata in un apposito documento, noto come lista fluidi, dove sono riportate anche tutte le proprietà chimico-fisiche per quel fluido. Le proprietà sono quelle che determinano la pericolosità o meno degli effluenti e hanno permesso di determinare il tipo di servizio degli oggetti del Registro mediante una codifica ad una lettera che definisce:

- H: fluido che presenta rischi HSE per natura infiammabile e/o tossica.
- N: fluido che non presenta rischi legati a infiammabilità o tossicità.

Sulla base di questa indicazione è stato possibile poi in FMEA descrivere correttamente gli effetti dei guasti che comportano l'attivazione dei sistemi di emergenza con le inevitabili conseguenze sul processo produttivo. Anche l'indicazione della presenza di un bypass (Y), o meno (N), riportata nel RA per le valvole, ha inciso sulla valutazione di scenari di guasto e/o manutenzione nella FMEA. Coerentemente con la fase di studio, non avendo informazioni di maggior dettaglio, si è in particolare assunto che tutte le valvole di controllo/regolazione dei processi potessero adoperare il bypass riscontrato nei P&ID. Valutazioni differenti hanno interessato le valvole dedicate a processi a elevata

dinamicità o con funzioni di sicurezza. In questi casi, pur in presenza del bypass sui P&ID, si è cautelativamente escluso la possibilità di impiego durante la marcia ordinaria per non compromettere la stabilità o la sicurezza dell'unità. Esclusivamente per le valvole (decima colonna, figura 4-2) è stata indicata la posizione in cui automaticamente si configurano al verificarsi su di esse un guasto (fail position). Sono state in particolare individuate dai P&ID le seguenti possibilità:

- FC = Fail Close: La valvola si guasta e si porta in posizione chiusa;
- FO = Fail Open: La valvola si guasta e si porta in posizione aperta;
- FL = Fail in Position: La valvola si guasta e mantiene la posizione al momento del guasto;
- FLO = Fail Locked (drift open): La valvola si guasta nella posizione che ha al momento del guasto, ma tende a portarsi nel tempo in posizione aperta.

Il Registro degli Asset è stato quindi completato integrando, per ogni elemento censito, le relative specifiche fisiche e operative (quali diametri, pressioni, temperature e potenze). Infine, è stato indicato il documento tecnico di riferimento, aggiungendo il codice identificativo del relativo P&ID.

Il totale degli oggetti che sono stati censiti è pari 3157 elementi di cui 974 (31%) principali e 2183 (69%) secondari. Tutti gli elementi risultano inoltre suddivisi nelle varie unità funzionali così come mostrato dalla figura a seguire:

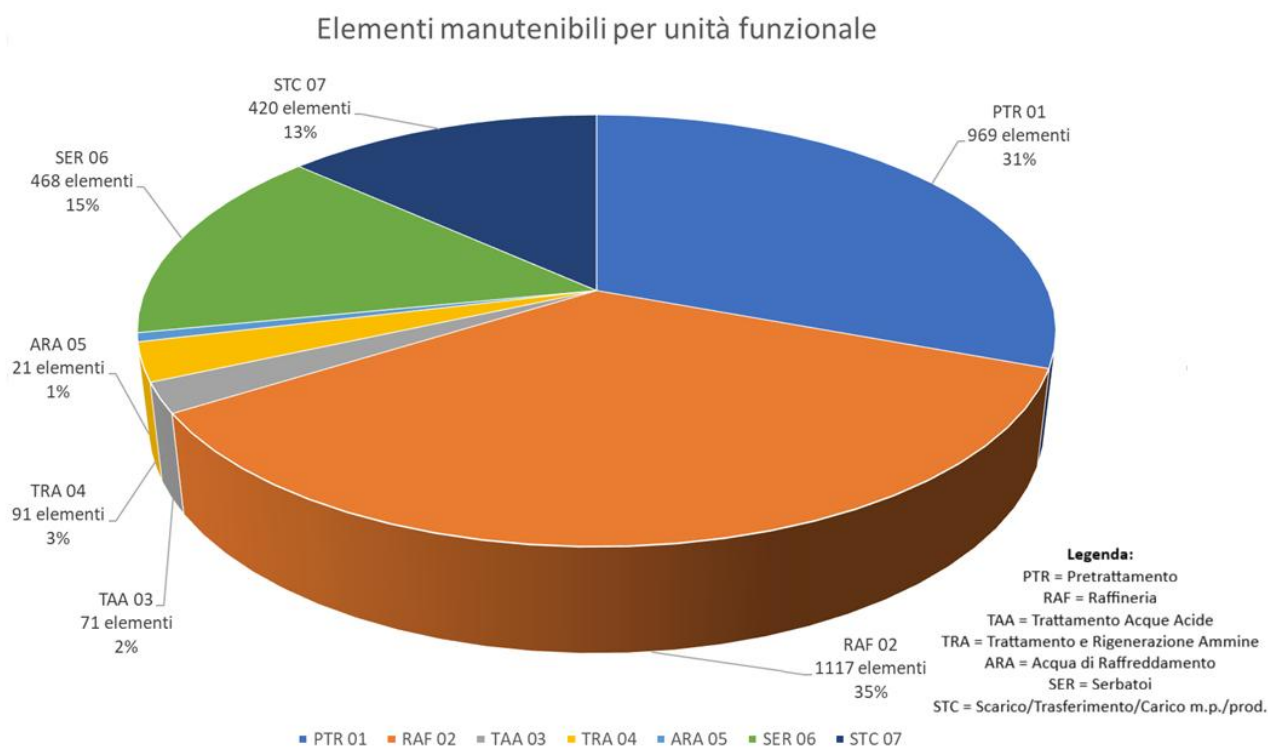


Figura 4-3 - Distribuzione degli elementi manutenibili per unità funzionali riportati nel Registro degli Asset.

Le unità di pretrattamento (PTR 01) e raffinazione (RAF 02) sono risultate dunque quelle di gran lunga con il maggior numero di elementi registrati. Queste, dunque, iniziano ad attirare l'attenzione in vista della determinazione della disponibilità finale come quelle da cui è possibile aspettarsi il maggior numero di guasti e fermi dell'impianto. Ciò, tuttavia, sarebbe un grosso abbaglio perché è la criticità degli elementi nel processo a determinare l'impatto sulla disponibilità, non la numerosità. Pertanto, si sono rese necessarie le valutazioni degli step di analisi esposti nei capitoli successivi di FMEA, Analisi di Manutenibilità e infine quella di disponibilità svolta tramite software Maros per tener conto delle complesse dinamiche dell'impianto. A seguire per numerosità di elementi censiti nel Registro vi sono le unità dello stoccaggio (SER 06) e quella di movimentazione delle materie prime, semilavorati e prodotti finali (STC 07). Molto più piccole e con molti meno elementi sono le unità funzionali TAA 03, TRA 04 e ARA 05.

Per tipologia di elemento è stato infine censito quanto di seguito rappresentato:

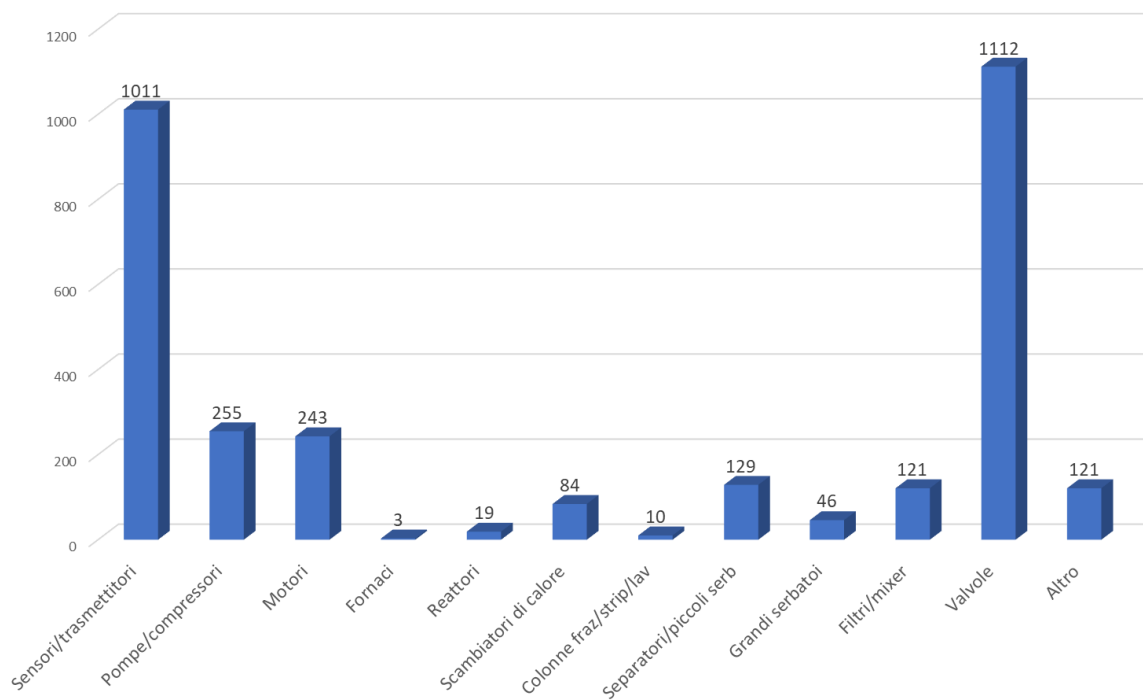


Figura 4-4 - Censimento e ripartizione degli asset della bioraffineria per tipologia di componente.

La scomposizione di tutti gli oggetti per famiglie di elementi simili si è rivelata utile per la redazione del Database dei Parametri R&M di cui segue approfondimento nel successivo paragrafo.

4.3 Database parametri R&M

Realizzato il Registro degli Asset il passo successivo è stata la stesura della banca dati di affidabilità e manutenibilità (R&M). Il Database dei parametri R&M risponde alla necessità di raccogliere informazioni per la rappresentazione del comportamento di affidabilità e manutenibilità di ogni elemento incluso nel Registro. Esso costituisce così la base per la modellazione e la valutazione delle prestazioni della bioraffineria nell'analisi quantitativa della disponibilità produttiva. La redazione del database ha riguardato la definizione di un catalogo di informazioni tipiche di affidabilità e manutenibilità denominate di seguito come R&M Type. Un R&M Type è completamente definito quando sono determinati il seguente insieme di parametri:

- **Confini;**
- **Tassonomia;**
- **Modi di guasto;**
- **Parametri di Affidabilità e Manutenibilità (R&M).**

I confini e la tassonomia, ovvero la classificazione sistematica degli elementi in gruppi generici, basata su fattori potenzialmente comuni a diversi articoli, sono stati definiti, come anticipato nel sottoparagrafo 2.2.2, in accordo a quelli forniti dalla norma ISO 14224 [17] quando applicabile. Ad ogni R&M type così parzialmente definito sono stati assegnati uno o più modi di guasto, in base alla funzione svolta, e i parametri a questi associati in termini di affidabilità e manutenibilità prelevati dalle banche dati di settore [18-22]. OREDA [22] è stata la banca dati di gran lunga più impiegata e non è stato possibile utilizzare dati provenienti dai fornitori/costruttori delle apparecchiature a causa della fase progettuale di FEED. Per la raccolta dati dai database sono stati seguiti i seguenti criteri:

- Le tassonomie sono state selezionate considerando la classe dell'apparecchiatura e almeno una tra la classe di progettazione (design class) e la classe di sistema, ove applicabile. Quando, per una data tassonomia, la popolazione raccolta è risultata molto ridotta (meno di 2 installazioni e 10 inventari), o non è stato possibile identificare una tassonomia adeguata in OREDA [22], sono state innanzitutto investigate versioni precedenti del database e successivamente si è ricorso all'uso delle altre banche dati [17-21].
- Sono state considerate nell'ambito di questo studio solo le modalità di guasto critiche (ovvero che causano la perdita totale della funzionalità dell'elemento interessato). Nel caso in cui, per una data tassonomia, non siano stati raccolti dati relativi a guasti critici e la popolazione sia

troppo esigua, è stato utilizzato in modo conservativo il limite superiore dell'intervallo di confidenza del tasso di guasto.

- I tassi di guasto sono stati individuati prevalentemente sulla base del Tempo Operativo riportato su OREDA (o sulle altre banche dati) [18-22]. Il tempo di calendario è stato utilizzato solamente per alcuni elementi a funzionamento intermittente.

Riguardo la selezione della tassonomia l'incrocio tra le classi è stato adottato per garantire che i tassi di guasto fossero realmente rappresentativi del contesto operativo. Imponendo poi una soglia minima di popolazione, si è voluto assicurarsi una solida affidabilità dei risultati finali. Si è scelto di focalizzarsi solamente sulle modalità di guasto critiche per modellare scenari di reale interruzione del flusso produttivo. L'adozione del limite superiore dell'intervallo di confidenza del tasso di guasto garantisce che il modello non sottostimi mai i potenziali rischi. La scelta di individuare i tassi di guasto prevalentemente sul tempo operativo e non su quello di calendario è stata fatta poiché questi terranno conto così dell'effetto dovuto all'usura durante l'esercizio.

Per la caratterizzazione dei modi di guasto è stato utilizzato un approccio aggregato ovvero raggruppando diverse tipologie di guasto elementari in categorie più ampie basate su effetti comuni o criteri operativi. Anche la scelta di questo approccio è strettamente legata allo scopo e ai limiti della fase di FEED per la quale è stata eseguita l'analisi RAM. Sono stati quindi considerati i modi di guasto aggregati di seguito elencati:

- **Perdita di contenimento (EXL):** considerata per tutti gli oggetti che gestiscono fluidi, ma soprattutto per quelli che gestiscono sostanze tossiche o infiammabili (secondo l'indicazione "tipo di servizio, H" del Registro degli Asset). È un guasto comune che può comportare l'arresto dell'impianto quando, in base alla filosofia di arresto e alla matrice causa-effetto, potrebbe attivare il sistema F&G (Fire & Gas).
- **Mancato Funzionamento (FTO/FTC per valvole o FTS per macchinari/motori):** considerato specificamente per gli oggetti on/off, in stand-by o con funzionamento intermittente durante le normali operazioni.
- **Funzionamento Spurio (SPO):** considerato specificamente per gli articoli on/off e gli articoli coinvolti nell'attivazione di trip/emergenza (tipicamente loop di controllo/sicurezza e valvole attuate). Include anche tutte le FFM che portano all'attivazione della logica di un loop senza una ragione effettiva. (Nota: solo per i dispositivi di protezione che possono compromettere le operazioni dell'impianto se attivati inutilmente).

- **Lettura Anomala dello Strumento (AIR):** considerata specificamente per gli elementi (tipicamente apparecchiature statiche) per i quali tale guasto potrebbe causare un'anomalia con manutenzione differita o con un intervento di riparazione non invasivo. Se la strumentazione montata localmente è stata considerata come elemento autonomo, questa FFM non è stata analizzata per l'apparecchiatura principale, per evitare il doppio conteggio del relativo effetto.
- **Altro Guasto Critico (OCF):** utilizzato per aggregare tutte le modalità di guasto critiche non classificate precedentemente. Include eventi che compromettono la funzionalità dell'asset e che potrebbero essere suddivisi, in base alla logica di intervento, in:
 - **Componente Minor:** guasti non invasivi, gestibili in situ da personale ordinario, che non richiedono lo smantellamento dell'elemento né l'impiego di ricambi critici.
 - **Componente Major:** guasti invasivi che necessitano dello smontaggio dell'asset, dell'intervento di squadre specializzate o dell'utilizzo di parti di ricambio critiche non disponibili localmente.
- **Ogni Guasto Critico (ALL):** quasi esclusivamente utilizzata per i guasti dei trasmettitori (dispositivi di *input* secondo la classe di apparecchiatura OREDA [22]). Raggruppa globalmente tutte le modalità di guasto, sia critiche che degradate, indipendentemente dalla loro diagnosticabilità. Tale classificazione include dunque:
 - **Guasti Rilevabili (DET):** anomalie identificate automaticamente da auto-test diagnostici e segnalate tramite allarme in sala controllo.
 - **Guasti Non Rilevabili (UND):** anomalie che non possono essere individuate dai sistemi automatici e che non generano alcuna segnalazione immediata all'operatore.

Si riporta dunque un estratto del Database dei Parametri R&M così realizzato:

R&M Type code	R&M Type description	FFM code	FFM description	S	OPER FR mean [10-6 hs]	Oper MTTF mean [y]	MRT mean [hs]	MHRS [hs]	Source
VA-GB	Actuated valve, Globe	EXL	External Leakage	C	0,9700	117,69	13,00	15,10	OREDA 2002 ref. 4.3.6
VA-GB	Actuated valve, Globe	OCF	Other Critical Failure	C	15,0626	7,58	14,34	15,92	OREDA 2002 ref. 4.3.6
FI-CA	Filter, Cartridge	EXL	External Leakage	n/a	0,4338	263,16	4,00	8,00	OGP 434-01 ref. Type (15)
FI-CA	Filter, Cartridge	OCF	Other Critical Failure	n/a	32,2166	3,54	2,00	4,00	NPRD 2016
VA-BA	Actuated valve, Ball	OCF	Other Critical Failure	C	1,4164	80,59	6,08	68,45	OREDA 2015 ref. 4.5.1
VA-BA	Actuated valve, Ball	EXL	External Leakage	C	1,0200	111,92	22,00	22,00	OREDA 2015 ref. 4.5.1
VA-BA	Actuated valve, Ball	FTC	Fail to close on demand	C	0,6700	170,38	5,10	6,30	OREDA 2015 ref. 4.5.1

Figura 4-5 – Estratto del database dei parametri R&M realizzato con i valori riportati ed elaborati dalle banche dati di settore [18-22].

Per ogni guasto è stata riportata la criticità (colonna S) con la quale essi sono stati considerati che, per il seguente caso studio, è sempre di livello critico. Il guasto, dunque, causerà la completa indisponibilità dell'elemento, rendendo necessario l'intervento manutentivo. Lo stesso modo di guasto (es: AIR), che causa il funzionamento degradato o problemi minori di servizio, non è stato preso in considerazione dunque in quanto l'elemento, seppur con prestazioni inferiori, continua ad operare. Per ciascun modo di guasto sono stati riportati dalle banche dati i valori minimi, medi e massimi del tasso di guasto.

Per questo caso studio per il calcolo dell'MTTF sono stati utilizzati nel modello creato solamente i valori medi dei tassi di guasto λ (colonna OPER FR mean):

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \text{ [h]} \quad (4.1)$$

Questa scelta rappresenta il miglior compromesso statistico per una previsione di lungo periodo, evitando sia eccessi di ottimismo che un pessimismo cautelativo che inficerebbero sul risultato finale della disponibilità produttiva.

Dai database consultati [18-22], sono stati pure riportati i tempi medi di recupero in caso di guasto (MRT) e le ore-uomo necessarie per eseguire l'attività di manutenzione per ripristinare l'elemento dopo un guasto (MHRS). A seguire quindi sono state indicate anche le abilità richieste (meccaniche, elettriche, elettroniche...) per la riparazione e il grado di intrusività della riparazione (I = intrusiva, N = non intrusiva).

Nel database R&M sono stati riportati 43 R&M type per un totale di 91 modi di guasto differenti da analizzare nell'analisi FMEA.

In definitiva, il Registro degli Asset e il Database dei Parametri R&M costituiscono l'impalcatura fondamentale su cui poggia l'intero studio condotto sulla disponibilità della bioraffineria. Attraverso il processo selettivo e rigoroso, precedentemente esposto, sono stati isolati 3.157 elementi critici, distinguendo chiaramente tra apparecchiature principali e secondarie oltre che alla loro funzione (controllo, sicurezza...). Questi sono stati dunque opportunamente gerarchizzati e quindi caratterizzati, sebbene con approccio aggregato per famiglia, con le grandezze legate alla frequenza di guasto e ai tempi medi dell'intervento per ogni modo di guasto ritenuto ad essi compatibile. L'aver fatto riferimento allo standard internazionale ISO 14224 [17] e ai database di settore [18-22] garantisce oggettività e robustezza dei dati, superando i limiti dovuti alla fase di progettazione FEED. Il Registro degli Asset e il Database dei Parametri R&M sono pertanto la prima risorsa indispensabile al prosieguo dello studio verso la valutazione della disponibilità produttiva con le successive analisi FMEA e di Manutenibilità.

5 FMEA

5.1 Approccio all'analisi

Redatti il Registro degli Asset e il Database dei Parametri R&M è stata eseguita l'analisi FMEA. L'obiettivo di questa analisi è determinare qualitativamente ciascun modo di guasto individuato per gli elementi inseriti nel Registro degli Asset, gli effetti sulla capacità produttiva della bioraffineria.

La valutazione degli effetti ha avuto approccio duale, più approfondito rispetto a metodologie semplificate che tendono a limitare la valutazione dell'effetto alla perdita immediata della funzione svolta dal componente. Considerando la complessità operativa dell'impianto, l'analisi è stata svolta distinguendo nettamente due effetti che possono impattare, con severità variabile, sulla produzione:

- **L'effetto diretto del guasto:** perdita di performance, parziale o totale, dell'impianto e del processo produttivo causato istantaneamente dal malfunzionamento fisico di un suo componente tale da causare una certa perdita di produzione.
- **L'effetto indotto dal processo di riparazione:** indisponibilità parziale o totale dell'impianto necessaria per eseguire l'attività di ripristino in condizioni di sicurezza e conformità tecnica. Può essere tale da ridurre o annullare del tutto la produzione.

È stato così messo in evidenza tramite la FMEA che l'impatto sulla producibilità della bioraffineria non è esclusivamente dipendente dall'entità del danno fisico. In diversi casi, infatti, si è potuto valutare che il guasto non comporta effetti sulla produzione, ma sono le attività di ripristino conseguenti a determinare anche perdite produttive significative. Ciò è legato a vincoli, procedure e attività necessarie al ripristino quali la messa in sicurezza dell'area, la depressurizzazione di un'intera sezione, l'isolamento... che incidono sulla capacità produttiva in base ai tempi che richiedono.

La FMEA ha quindi consentito di classificare come critici anche componenti e/o modi di guasto apparentemente secondari: elementi che non fermano la produzione quando si guastano, ma che impongono un fermo per essere riparati. L'analisi amplia così il focus dall'affidabilità del singolo componente alla sua manutenibilità su cui maggiori e opportuni dettagli, in merito ai tempi necessari per le attività di ripristino, sono forniti nel successivo capitolo ad essa dedicato.

Al fine di isolare il contributo di rischio specifico di ogni elemento e mantenere la trattazione gestibile e coerente, è stato adottato l'approccio metodologico del singolo guasto. Con questa tecnica la valutazione degli effetti di un determinato guasto, occorso ad uno specifico componente, è stata condotta ipotizzando il corretto funzionamento e la disponibilità di tutti gli altri elementi della

bioraffineria e delle risorse di supporto. Si riesce in questo modo a determinare la "criticità nativa" dell'asset senza introdurre il rumore di fondo generato da eventi concomitanti e indipendenti. L'impatto sulla capacità produttiva teorica permette così l'identificazione dei "colli di bottiglia" strutturali del processo produttivo e manutentivo evidenziando i veri limiti alla disponibilità. Da questo risultato, già in questa fase di studio, sarebbe possibile già suggerire soluzioni tali da migliorare le performance RAM della bioraffineria a beneficio della sua produttività. Tuttavia, è più opportuno ottenere i risultati da parte di un'analisi dinamica così da avere una validazione certa e quantitativa rispetto ad una approssimata e qualitativa come quella della FMEA.

5.2 L'analisi

Il punto di partenza dell'analisi sono stati gli elementi censiti nel Registro degli Asset a cui sono stati associati i modi di guasto individuati nel Database dei Parametri R&M in base alla famiglia in cui i primi erano identificabili. Per ciascun guasto e relativo intervento di manutenzione è stata dunque strutturata una descrizione gerarchica su più livelli.

Si è descritto innanzitutto cosa comporta il modo di guasto sul singolo elemento che lo subisce. Considerato, tuttavia, che per ipotesi ogni modo di guasto è stato assunto con livello di severità critico, allora a livello del componente si è sempre riscontrata la sua totale indisponibilità, fermo e necessità di manutenzione. Successivamente sono stati analizzati gli effetti sugli asset a livello superiore, ovvero sugli elementi che collaborano alla realizzazione dello specifico processo. Infine, è stato valutato l'impatto sull'intero impianto e sulla perdita di capacità produttiva che si potrebbe realizzare nella peggiore delle ipotesi. Tali descrizioni sono state elaborate grazie alle informazioni ricavate dalla documentazione di progetto e interpretate con approccio critico preferendo una sovrastima dell'impatto piuttosto che una sua sottostima.

Nella maggior parte dei casi gli effetti diretti del guasto sulle performance produttive sono stati valutati di medesima incidenza a quelli legati alle attività di ripristino.

Per esprimere sinteticamente il grado di impatto sulla bioraffineria valutato nelle descrizioni degli effetti si è adoperata una classificazione a quattro livelli e una codifica ad una lettera. I livelli di fermo riscontrati sono stati i seguenti:

- **N:** fermo e indisponibilità del solo componente coinvolto dal guasto. Con l'eccezione di un caso molto specifico non sono stati rilevati impatti sulla produzione in presenza di questo livello di impatto.

- **T:** fermo e indisponibilità di un treno produttivo. Si sono ritenuti possibili impatti più o meno rilevanti sulla produzione, mai totali
- **P:** fermo e indisponibilità dell'intero impianto per esigenze di processo. In questo caso per gli effetti del guasto e/o della manutenzione si è valutata la perdita totale della produzione
- **E:** fermo e indisponibilità dell'intero impianto per emergenza. Stesso effetto dell'impatto di livello P, ma per ragioni diverse. In questo caso il guasto si è rivelato pericoloso per la conduzione delle normali operazioni della bioraffineria ed automaticamente è intervenuto l'arresto di emergenza

Poiché però l'indisponibilità fisica dell'impianto può manifestarsi con gravità differente durante l'evento di guasto rispetto alla fase di ripristino, è stato adottato un criterio conservativo. Allo scopo di evidenziare subito la condizione più penalizzante si è riportato nella FMEA quello di massimo impatto riscontrato tra gli effetti del guasto e della riparazione.

Nonostante i livelli P ed E comportino l'azzeramento totale della produzione, la loro distinzione è stata fondamentale per le successive analisi di manutenibilità e della disponibilità produttiva:

- **Livello P (Processo):** Lo spegnimento è graduale e gestito secondo procedure controllate, progettate per preservare l'integrità degli asset e minimizzare gli stress termomeccanici. La successiva riaccensione è immediata al superamento delle criticità di processo.
- **Livello E (Emergenza):** L'arresto è repentino, finalizzato esclusivamente alla messa in sicurezza immediata dell'impianto e degli operatori. La repentinità può innescare effetti collaterali (shock termici, colpi d'ariete o solidificazione di fluidi di processo) ed ulteriori danneggiamenti. In maniera estremamente cautelativa, in caso si presenti una situazione emergenziale è stato sempre supposto l'arresto completo dell'intera bioraffineria. La sua riaccensione richiede tempi supplementari per l'ispezione dell'impianto e alla risoluzione delle criticità emergenziali (es: perdite sostanze pericolose).

In fase di FMEA è stato molto importante individuare e descrivere gli effetti di guasto e riparazione tenendo conto della presenza di elementi di mitigazione che possano ridurre gli effetti negativi dei guasti o dei tempi di attesa necessari al ripristino. Tra i più importanti si annoverano i serbatoi che, oltre a funzionare come organi di modulazione del normale processo produttivo, consentirebbero nelle circostanze del verificarsi di un guasto anche il prosieguo a regime pieno delle attività della bioraffineria. Un esempio di buffer che genera questo effetto positivo è quello dei serbatoi di raccolta delle acque acide S-0620 e S-0621. Questi appartengono all'unità funzionale dei

serbatoi, e sono essenziali per gestire situazioni di guasto che possono verificarsi in quella del trattamento acque acide. Si richiama di seguito la figura 3-6 riportata in 3.1.2:

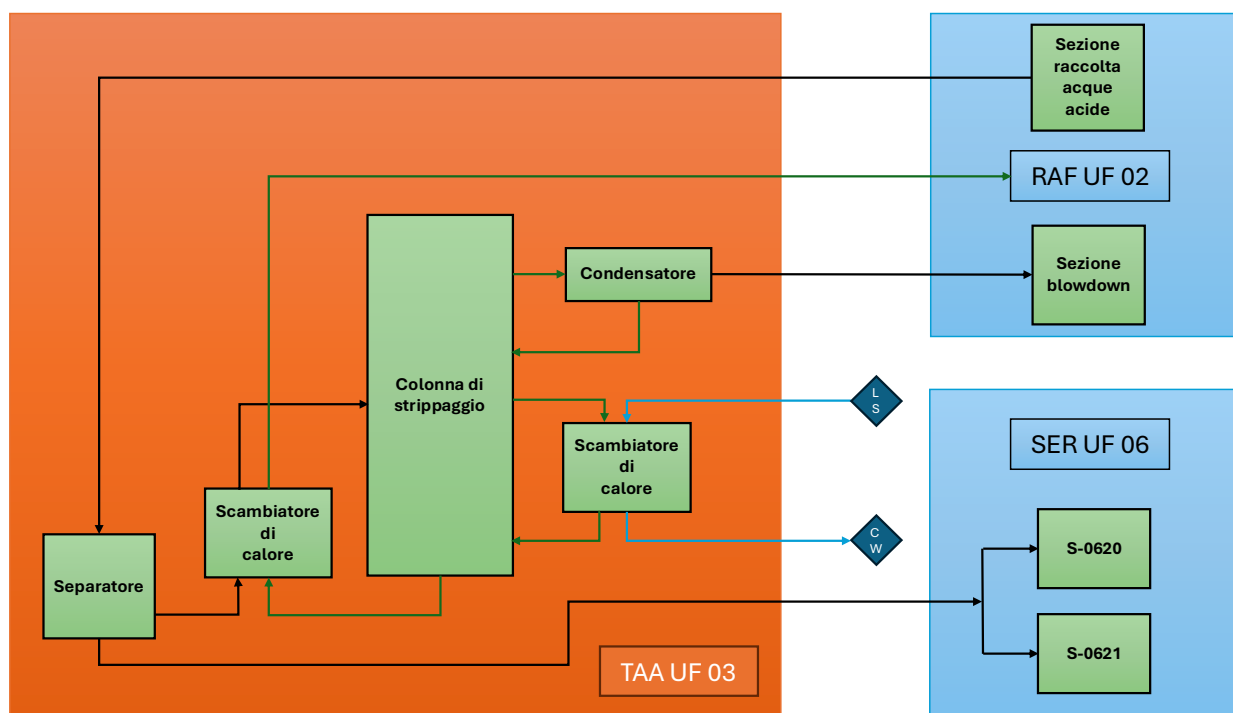


Figura 5-1 - Schema a blocchi di dettaglio dell'Unità di Trattamento Acque Acide (TAA).

Come mostra la figura 5-1, le acque acide che si generano durante il funzionamento della bioraffineria vengono inviate all'unità di trattamento per essere deacidificate nello stripper. Se l'unità dovesse presentare un guasto tale che l'acqua acida non sia più trattabile, si rischia l'intervento delle logiche d'arresto di processo che interromperebbero la raffinazione con conseguente perdite di produzione. Per evitare ciò sono stati considerati già in progetto preliminare i due serbatoi che garantiscono singolarmente un'autonomia di funzionamento pari a 470 h calcolata come il rapporto tra la loro capacità e la portata di sostanza da essi in uscita o in ingresso. L'acqua acida dalla bioraffineria verrebbe dunque convogliata verso questi accumuli e quella "pulita" necessaria sarebbe reintegrata all'unità di raffinazione grazie ad una linea di fornitura esterna fino a ripristino della piena funzionalità dell'unità di trattamento acque acide.

In numerose situazioni, come questa appena descritta, si è riscontrato che il buffer ha capacità teoriche sufficienti di garantire il corretto funzionamento della bioraffineria anche durante lunghi fermi di manutenzione di altre parti di impianto. Tuttavia, dati i limiti della FMEA, in quanto analisi statica, non è possibile sapere effettivamente se l'autonomia reale residua, al momento del guasto sia sufficiente o meno a coprire i tempi di recupero. Pertanto, si è ritenuto necessario in questa fase

adottare un approccio estremamente cautelativo valutando lo scenario peggiore di non poter usufruire del sistema di accumulo valutando dunque gli scenari di guasto nelle condizioni peggiori possibili. Tuttavia, la loro puntuale identificazione nella FMEA, la descrizione di come sarebbero intervenuti e il calcolo della potenziale autonomia massima sono stati passaggi propedeutici essenziali per la successiva modellazione in Maros. Grazie all'analisi dinamica e stocastica eseguita dal software, è stato possibile quantificare con precisione l'impatto reale dei buffer sulla disponibilità produttiva complessiva. Si vedrà dunque nel capitolo dedicato all'analisi di disponibilità i rilevanti effetti che i serbatoi di accumulo hanno garantito nel mantenere la continuità di produzione della bioraffineria.

Oltre ai buffer, sono stati individuati ulteriori elementi/strutture con funzione di mitigazione che hanno il compito di intervenire/essere disponibili nel momento in cui un elemento normalmente "marciante" è reso indisponibile da un guasto. In questo modo essi limitano o annullano completamente la perdita di produzione che si realizzerebbe. Nella maggior parte dei casi analizzati questi elementi sono riserve identiche agli elementi in servizio (pompe, compressori, serbatoi e filtri) oppure, nel caso di valvole di regolazione controllate da segnali di processo (pressione, flusso...), si è trattato di linee di bypass manualmente attivabili e regolabili. A rendere possibile l'uso di queste linee è stata l'accertata presenza nella documentazione di progetto di sensori ed indicatori locali monitoranti i parametri di processo. Ai fini della valutazione degli effetti positivi di tutti questi elementi è stato necessario valutare la tempestività con la quale potessero intervenire. Data la ridotta quantità d'informazioni disponibili visto lo stato preliminare della progettazione, sebbene sia un'ipotesi conservativa, si è valutato comunque accettabile supporre che l'entrata in funzione sia rapida, tale da non manifestarsi perdite di produzione. Ciò però è stato possibile solamente nel caso di guasti che non comportano l'attivazione del sistema di emergenza. A quel punto, infatti, come meglio si vedrà nel successivo capitolo e anticipato precedentemente, è stato valutato un tempo necessario al ripristino delle condizioni minime di sicurezza per poter poi riprendere la fase di esercizio.

Un elemento invece cruciale per l'analisi di manutenibilità emerso sempre durante la FMEA è stata la valutazione delle modalità di rilevazione dei guasti. Sono stati riscontrate, infatti, diverse modalità, dipendenti dall'elemento coinvolto nonché dal tipo di guasto stesso. Distinguerle è stato fondamentale per valutare la criticità e successivamente assegnare, in modo coerente, il parametro temporale legato alla tempestività d'individuazione (detection). Metodi di rilevazione diversi comportano, infatti, tempi di scoperta e livelli di incertezza variabili, impattando direttamente sul tempo totale di ripristino. Tali informazioni sono utili per l'analisi di manutenibilità approfondita nel

capitolo successivo. Dall'analisi FMEA sulla bioraffineria in esame, sono state individuate in particolare le seguenti quattro modalità:

- **CMON (Monitoraggio Continuo):** Permette una rilevazione istantanea o addirittura predittiva, minimizzando il tempo di "guasto nascosto". È stata assegnata questa modalità laddove i P&ID indicano la presenza di sensori, trasmettitori o logiche di monitoraggio che comunicano con pannelli in sala di controllo.
- **COBS (Osservazione Casuale):** assunta in assenza di sensoristica. Il guasto è individuato tramite rumori anomali, perdite visibili, odori o fumo affidandosi ai sensi dell'operatore o del manutentore durante i normali giri di campo. È il metodo meno affidabile perché non garantisce la ripetibilità e intercetta il guasto solo quando è già manifesto.
- **PI (Inferenza Produttiva):** assunta nei casi in cui il guasto non è direttamente rilevabile sul componente tramite sensori e non può essere osservato casualmente. Viene dunque dedotto da anomalie nel prodotto o nel processo (es.: diminuzione di portata a valle).
- **ODEM (su Domanda):** è ipotizzata per gli elementi in configurazione di riserva. Poiché non sono normalmente in funzione, i sensori non rilevano i parametri dinamici (come vibrazioni o pressione di mandata) e non possono quindi segnalare l'insorgere di anomalie. Il guasto rimane pertanto latente finché non viene richiesto l'avviamento "su domanda" dovuta a necessità (es: guasto elemento normalmente marciante). All'accensione il guasto verrà rilevato e causerà il "mancato avviamento" (FTS).

È chiaro che più la rilevazione risulta tempestiva e più sono ridotti i tempi di ricerca del guasto. Viceversa, in caso scarsa o tardiva rilevabilità del guasto, non solo si dilatano i tempi di ripristino, ma si espone la bioraffineria al rischio di guasti a cascata. Un'anomalia o un guasto non intercettato tempestivamente, infatti, può evolvere coinvolgendo più elementi e l'intero impianto e creando un danno sistemico complesso. Dal punto di vista gestionale e progettuale, la rilevabilità, correlata agli effetti dei modi di guasto, può orientare profondamente le decisioni relative all'introduzione di sistemi diagnostici, al miglioramento del monitoraggio, alla revisione delle strategie manutentive o alla modifica delle frequenze ispettive.

Un estratto dell'analisi FMEA realizzata è di seguito riportato:

Functional Location	R&M Type Code	R&M Type Description	FFM Code	Failure Effect @Failure	Failure Effect @Repair	SD level	LoP [%] @failure	LoP [%] @repair	Buffer time [hs]	Current Detection Method Type	Current Compensating/Mitigating Provision	AA SOW
C0213	HE-ST	Heat Exchanger, Shell and Tube	AIR	Upset in the local instrumentation. The repair can be deferred or performed without shutting down the component. No effect on production.	Same as Failure	N	0	0		COBS		N
C0213	HE-ST	Heat Exchanger, Shell and Tube	EXL	External containment loss of the heat exchanger. If the release involves kerosene emergency shutdown and loss of production as flammable gases would be detected by the appropriate sensors. Maintenance required with the need to interrupt the line	Same as Failure	E	100	100		CMON		Y
C0213	HE-ST	Heat Exchanger, Shell and Tube	OCF	Critical heat exchanger failure. Reduced flow rate, loss of heat exchange efficiency or internal leakage. Process shutdown and total loss of production. Maintenance required with the need to interrupt the line and consequently the production	Same as Failure	P	100	100		PI		Y
02TT006	IP-TT	Input device, Temperature	ALL	The instrument does not provide the signal, making automatic process control impossible. The instrument needs to be taken offline for maintenance. There are no significant consequences for production since local temperature indicator is available enabling manual intervention on a by-pass line	Same as Failure	N	0	0		PI	Local temperature indicator, by-pass line	N
02TV006	VA-GB	Actuated valve, Globe	EXL	External leakage from the valve. The kerosene flow to the downstream equipments is reduced. Emergency shutdown and loss of production as flammable gases would be detected by the appropriate sensors	Once the fault has been identified and the accumulation of the leak has been eliminated, the unit can be restarted using the bypass	E	100	0	4	CMON	By-pass line	Y
02TV006	VA-GB	Actuated valve, Globe	OCF	Critical valve failure and loss of its function. Maintenance required with line isolation. No consequences on production as the bypass line can be put into operation.	Same as Failure	N	0	0		PI	By-pass line	N

Figura 5-2 - Estratto riepilogativo della FMEA realizzata.

La colonna “Buffer time” è stata utilizzata anche per riportare il tempo di 4 ore di fermo necessario a ripristinare le condizioni di sicurezza dell’impianto a seguito di arresto di emergenza. Come visibile nella figura 5-2, ciò si verifica nel caso di perdite esterne dalla valvola TV-006. Quel guasto, infatti, causa il rilascio di kerosene che sarà rilevato dagli appositi sensori del sistema di sicurezza che imporranno l’attivazione delle logiche di spegnimento e arresto.

Nell’ultima colonna tramite lettera Y (Si) e N (No) è stato espresso sinteticamente se il modo di guasto, e l’elemento che ne è afflitto, debbano essere modellati sul software Maros ai fini dell’analisi finale di disponibilità produttiva. Tutti i modi di guasto degli elementi singoli che causano una perdita di produzione, anche se parziale, devono essere inseriti. In caso di elementi in configurazioni ridondanti, gli elementi in servizio e in standby vanno modellati, con i relativi modi di guasto, a meno che per entrambi gli oggetti siano state valutate qui in FMEA perdite dovute al guasto e alla riparazione nulle. In caso di elementi per i quali si è riscontrato un buffer come elemento di mitigazione agli effetti di guasto e/o riparazione, l’elemento e i modi di guasto devono essere modellati così come il buffer. I guasti degli elementi che si verificano in fasi operative non "normali"

(ad esempio solo durante la manutenzione, solo durante l'avvio, ecc..) non devono essere modellati. Con l'adozione di questi criteri si è perseguito così correttamente l'obiettivo di modellizzare solo ciò che effettivamente può incidere sulle performance produttive della bioraffineria.

5.2.1 Casi notevoli

L'applicazione della metodologia FMEA all'intero impianto ha richiesto in fase di esecuzione l'adozione di criteri di valutazione differenziati per gestire scenari operativi e di guasto caso per caso. Ciò è stato possibile grazie allo studio di tutta la documentazione di progetto disponibile: tavole tecniche (PFD e P&ID), descrizione di processo, matrici causa-effetto delle logiche di controllo/arresto, lista fluidi... Tuttavia, ci sono stati casi in cui tale documentazione non si è rivelata sufficiente, richiedendo un maggior onere d'interpretazione e la formulazione di opportune ipotesi o assunzioni. Di seguito sono dunque presentati tre casi particolari in cui ciò si è verificato. Sono in particolare riferiti ad assunzioni realizzate per un'unità funzionale, un modo di guasto e uno specifico oggetto della bioraffineria.

5.2.1.1 Unità di pretrattamento

Come si è anticipato nel capitolo del Registro degli Asset, lo stato di progettazione dell'unità di pretrattamento risulta ad uno stadio meno avanzato rispetto a quello del resto dell'impianto. Questa asimmetria ha generato una difficoltà nell'esecuzione dell'analisi poichè le informazioni disponibili sulle tavole di progetto si fermano al livello dei PFD, rendendo impossibile raggiungere il dettaglio di analisi realizzato per le altre unità grazie alla presenza dei P&ID. Anche la descrizione di processo di questa unità, indispensabile alla comprensione delle logiche di funzionamento, presentava, sulla documentazione progettuale, un livello di approfondimento minore rispetto a quelle delle altre sezioni di impianto. Per risolvere questa criticità, se a livello di Registro degli Asset si è intervenuto individuando gli elementi manutenibili direttamente sui PFD, per l'analisi FMEA si è invece reso necessario formulare ulteriori ipotesi ed assunzioni. Cercando comunque di mantenere coerenza con l'approccio utilizzato per le altre unità funzionali si è in particolare assunto che:

- Tutte le linee di tutte le sezioni dell'unità siano in normale funzionamento e critiche per la qualità dell'output. Non sono quindi state ipotizzate sezioni dell'unità che potessero lavorare con carico parziale durante i guasti o essere bypassate.
- Sia possibile bypassare il riscaldatore H-0101 senza effetti significativi sulla produzione in quanto ritenuto non strettamente correlato al processo di produzione.

- Le tramogge, i silos e i filtri dell'unità siano in una configurazione $n + 1$ ovvero con n elementi marcianti e un elemento di riserva non essendo state fornite diverse indicazioni nel documento di descrizione del processo.
- I condensatori nella sezione a vuoto sono considerati in serie. Entrambi devono dunque essere in servizio affinché l'unità funzioni correttamente.
- Tutte le valvole di controllo dei parametri di processo (pressione, temperatura, flusso...), siano dotate di linea di bypass locale attivabile manualmente e con la possibilità di regolare i flussi dei fluidi tramite valvola manuale. Nei PFD, infatti, tali linee di bypass non sono rappresentate e si è dunque immaginato vi fossero in analogia a quanto riscontrato nella quasi totalità di analoghi dispositivi in tutte le altre unità funzionali. Si è inoltre sempre assunto che l'attivazione del bypass mitighi completamente gli effetti dovuti al guasto e alla riparazione
- Il sistema di pre-coat sia ridondante con due linee, ciascuna composta da un miscelatore del coadiuvante di filtrazione del pre-coat, una pompa di pre-coat del filtro e un miscelatore olio/terra sbiancante. In caso di guasto in questa sezione, si è previsto che i filtri ermetici principali cessino di funzionare entro 4 ore con conseguente arresto della PTR.

È stato così possibile svolgere l'analisi FMEA sull'unità di pretrattamento che ha coinvolto 2675 modi di guasto che interessano 917 elementi dell'unità.

5.2.1.2 Perdite esterne

Sui 6159 modi di guasto individuati 1350 sono imputabili a perdite di contenimento e sversamento esterno, risultando questo evento il secondo modo di guasto più riscontrato nella bioraffineria. L'impatto sulla produzione è risultato estremamente variabile con perdite valutate da nulle a totali. A determinare la severità della perdita hanno inciso due fattori principali:

- **La criticità del componente:** elementi di primo rilievo non ridondati e non bypassabili (es: scambiatori di calore), la necessità di isolamento per il ripristino causa un inevitabile blocco totale.
- **Intervento delle logiche di sicurezza:** a prescindere da ridondanza e possibilità di bypass, è stato ritenuto che una perdita possa generare un fermo totale se il fluido sversato è tossico o infiammabile. Si attiva, infatti, il sistema di sicurezza che innesca il fermo d'emergenza.

Dato l'elevato numero e varietà di fluidi impiegati all'interno della bioraffineria si è fatto affidamento per quest'ultimo fattore alla "Lista Fluidi", un equivalente Registro degli Asset di tutti i fluidi dell'impianto dove sono riportate indicazioni circa l'infiammabilità e tossicità di questi.

Tuttavia, a causa della fase di avanzamento del progetto non è stato possibile fare affidamento su una lista fluidi completa per l'intero impianto, ma limitata ai soli fluidi dell'unità di raffinazione.

Per risolvere questa criticità e valutare l'eventuale intervento del sistema di sicurezza che comporterebbe perdita di produzione, si è reso necessario formulare delle assunzioni sulla tossicità e/o infiammabilità dei fluidi delle unità in cui la lista fluidi non era disponibile.

Si è assunto che, in caso di perdite esterne, non attivano il sistema F&G:

- I fluidi dell'unità di pretrattamento;
- L'ammina povera dell'unità di TRA 04 a valle della colonna di rigenerazione;
- L'acqua deacidificata dell'unità TAA 03 a valle della colonna di strippaggio;
- I fluidi diretti a torcia;
- Le materie prime rilasciate alle condizioni di stoccaggio dei serbatoi;
- I prodotti della bioraffineria alle condizioni di stoccaggio dei serbatoi.

Causano invece l'attivazione:

- L'ammina ricca dell'unità TRA 04 a monte della colonna di rigenerazione;
- L'acqua acida dell'unità TAA 03 a monte della colonna di strippaggio.

L'attivazione del sistema F&G e lo spegnimento di emergenza della bioraffineria causato dalle perdite di fluidi tossici e/o infiammabili inibiscono, inoltre, l'attivazione immediata degli elementi di compensazione/mitigazione contrariamente a quanto precedentemente ipotizzato. In questi casi, dunque, si è valutato già qui in fase di FMEA un tempo di 4 ore necessarie a circoscrivere ed eliminare la perdita ripristinando le condizioni minime di sicurezza per la ripresa delle attività della bioraffineria. L'impianto, dunque, viene riavviato tramite l'unità di riserva o la linea di bypass dell'elemento in cui si è registrata la perdita e l'attività manutentiva su di esso è ipotizzata condotta in seguito. Le 4 ore necessarie sono state riportate nella colonna del "buffer time". Di seguito un esempio legato alla perdita di acqua acida da una pompa dell'unità TAA.

5.2.1.3 *Sensori TXE dei reattori*

Nel processo di bioraffinazione i reattori catalitici sono il cuore della conversione delle cariche biologiche in biocarburanti. Data la natura fortemente esotermica delle reazioni, il monitoraggio continuo della temperatura rappresenta non solo un parametro di qualità, ma il principale presidio di sicurezza per i reattori e l'intero impianto. Nella bioraffineria in esame, i sensori di temperatura assolvono così una duplice funzione: il controllo del processo (ad esempio tramite la modulazione dei gas per regolare la reattività) e l'attuazione delle logiche di sicurezza. Questi sensori sono in

particolare dei dispositivi multipunto, collocati sia sulla superficie dei reattori sia in posizione tale da misurare la temperatura dei letti di reazione. Sono tutti collegati infine ad una specifica logica di sicurezza (SS) che innesca l'arresto di emergenza nel caso venga superata la soglia critica prestabilita (livello Alto-Alto, High-High, HH). Dalla documentazione di progetto (P&ID e matrici causa-effetto) è emerso che il sistema di sicurezza dei reattori opera con logica di voto 1ooN, un criterio volto a massimizzare la sicurezza operativa e l'integrità dell'asset. Ciò vuol dire, infatti, che in presenza di un segnale di temperatura rilevato superiore al valore critico, anche da parte di un solo sensore, viene attivato lo spegnimento del reattore. Lo spegnimento dei reattori comporterà a sua volta il fermo della bioraffineria e la perdita totale di produzione. Sono stati in particolare individuati sui reattori:

- N° 215 sensori di temperatura TXE per il reattore R-0201 appartenente alla sezione A dell'unità di raffinazione
- N° 131 sensori di temperatura TXE per il reattore R-0202 appartenente alla sezione B dell'unità di raffinazione

Si riporta immagine parziale del P&ID del reattore con visibili alcuni sensori di temperatura:

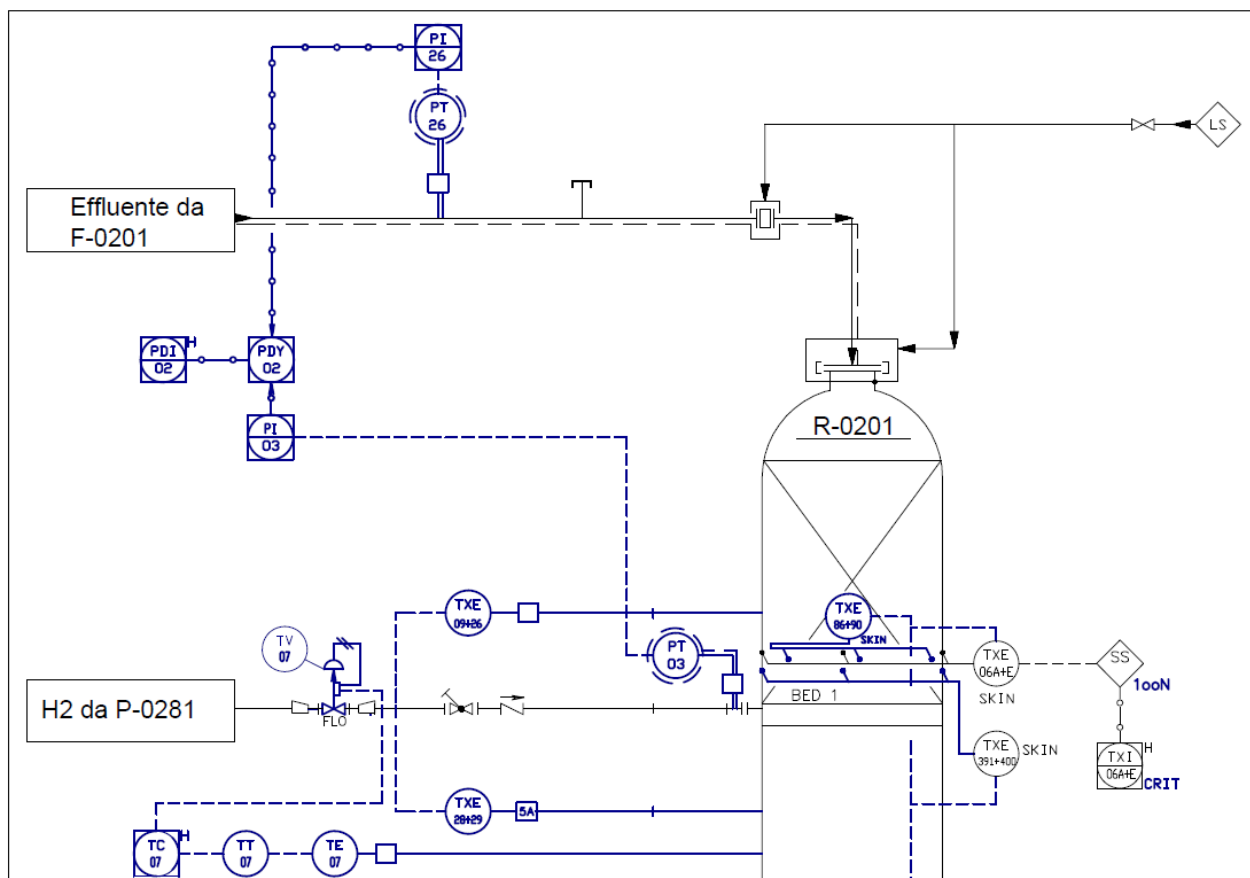


Figura 5-3 – P&ID del reattore della sezione A dell'unità di raffinazione. La numerosità dei sensori è espressa attraverso il simbolo “÷” che indica quindi un intervallo numerico o letterale. A destra del reattore con il tag “TXE-06A÷E” sono indicati 5 sensori di temperatura collegati alla logica di arresto (rombo con “SS”).

Per i sensori/trasmittitori, in fase di realizzazione della FMEA è stato considerato solamente il modo di guasto denominato “Qualunque Guasto Critico” (in codice ALL), un aggregato di tutti i possibili guasti critici che portano alla perdita di funzione del sensore. Tra i guasti critici associabili al sensore vi è anche quello di “Output Errato”, ovvero il sensore restituisce in uscita un valore errato di temperatura rispetto a quella reale. Di conseguenza, un valore errato alto di temperatura potrebbe portare allo spegnimento d'emergenza del reattore e alla perdita di produzione. Dato l'elevato numero di sensori la probabilità statistica che almeno uno di essi subisca un guasto di tipo "Segnale Alto" è estremamente elevata e non sarebbe accettabile ai fini di garantire una disponibilità produttiva robusta. È stato dunque necessario acquisire documentazione supplementare sul comportamento del sensore in caso di rottura. Si è chiarito che un qualunque guasto del sensore causi la perdita del segnale e mai un output errato di livello alto che porterebbe al fermo delle unità e perdita di produzione. Il reattore continuerà pertanto ad operare con logica di voto degradata ovvero non più 1ooN ma 1oo(N-1). Il sensore guasto verrà quindi sostituito o riparato tramite intervento manutentivo eseguito in condizioni tali da non interferire con l'attività del reattore. Tale considerazione è stata dunque riportata nella redazione dell'analisi FMEA.

5.3 Risultati dell'analisi

L'analisi FMEA elaborata per la bioraffineria, oggetto di studio in questa tesi, ha descritto gli effetti sulla disponibilità produttiva di 6159 modi di guasto diversi appartenenti a 2799 dei 3157 elementi individuati nel Registro degli Asset. Approfondendo gli studi sulla bioraffineria è stato ritenuto infatti non fosse necessario l'approfondimento in FMEA per 358 elementi del Registro. Le ragioni di ciò sono principalmente legate al fatto che tali oggetti non siano effettivamente in servizio durante la fase di produzione, al ricollocamento entro i limiti di batteria di apparecchiature più grandi o per elevata affidabilità intrinseca riscontrata da consultazione dei database di settore.

Si è riscontrata la seguente distribuzione dei guasti per unità funzionale:

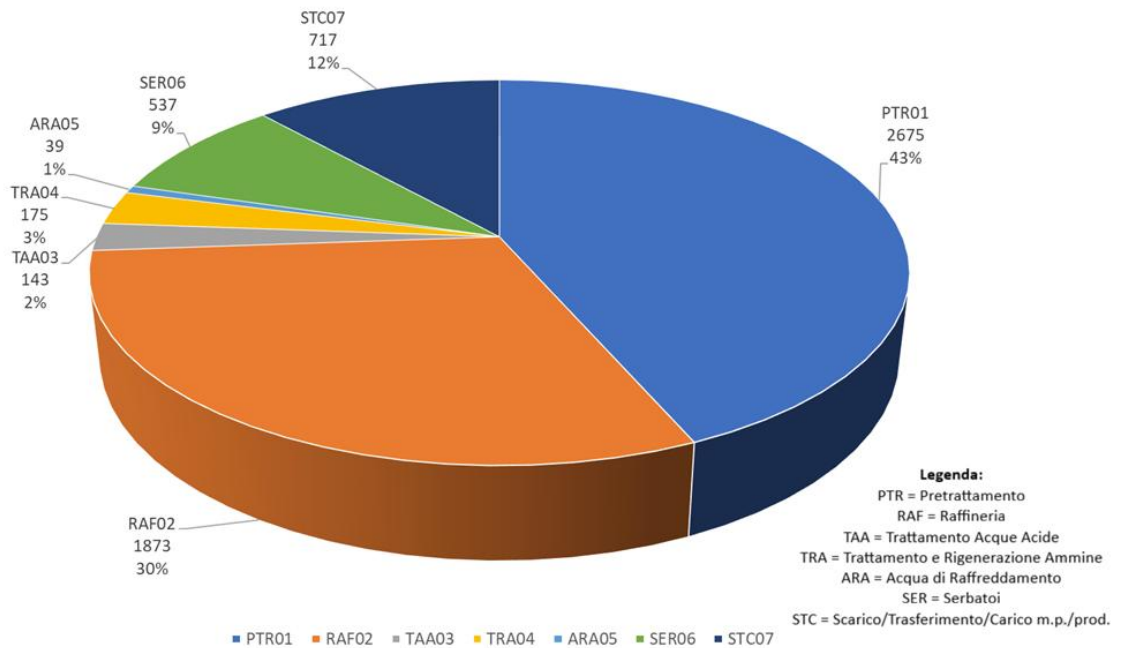


Figura 5-4 - Ripartizione della numerosità totale degli eventi di guasto per unità funzionale ricavata dalla FMEA.

Il risultato della figura 5-4 non è di per sé sorprendente risultando in linea con quanto trovato nel Registro degli Asset per la distribuzione degli oggetti nelle diverse unità: dove vi saranno più elementi è logico attendersi più guasti.

È interessante notare poi che dalla valutazione FMEA certi modi di guasto risultano essere più comuni di altri:

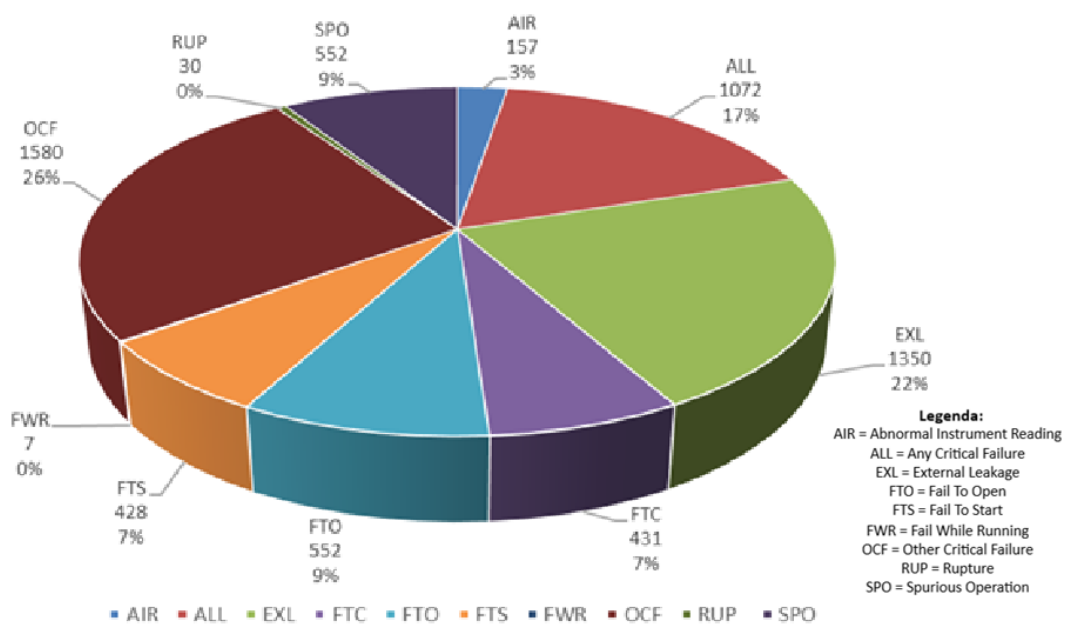


Figura 5-5 - Ripartizione della numerosità totale dei modi di guasto per tipologia ricavata dalla FMEA.

Queste informazioni consentono di capire quali tipi di problematiche dovranno essere affrontate durante l'esercizio dell'impianto, supportando la pianificazione di attività di controllo, la gestione operativa e l'ottimizzazione del magazzino ricambi. Il numero elevato di guasti per perdite esterne (EXL), ad esempio, è correlato all'ampia popolazione di valvole disseminate in tutte le unità funzionali. Tali oggetti risultano essenziali non solo per la regolazione dei processi produttivi, ma anche per la sicurezza. Sarebbe opportuno avere buona scorta di questo componente per sostituire quelle che nel corso del tempo si romperanno. Da non sottovalutare sono i modi di guasto "Fail To Close (FTC), "Fail To Open" (FTO) e "Fail To Start" (FTS) della macrocategoria di guasti rilevabili principalmente solo al momento "di richiesta". Per far fronte a questi è importante avere una buona strategia di scorta in magazzino specie su componenti più importanti quali pompe, compressori o per le grandi valvole motorizzate. Per queste ultime è attribuito anche un altro tipo di guasto riscontrato con parecchia frequenza: la "Spurious Operation" (SPO). Numerosi sono anche i guasti non specificamente categorizzati (ALL) che per la quasi totalità sono legati alle centinaia di sensori di controllo processo e sicurezza in tutta la bioraffineria.

A prescindere dalla tipologia non tutti i guasti però presentano la stessa severità come percentuale di perdita di produzione che possono potenzialmente causare. Si è infatti riscontrata la seguente situazione:

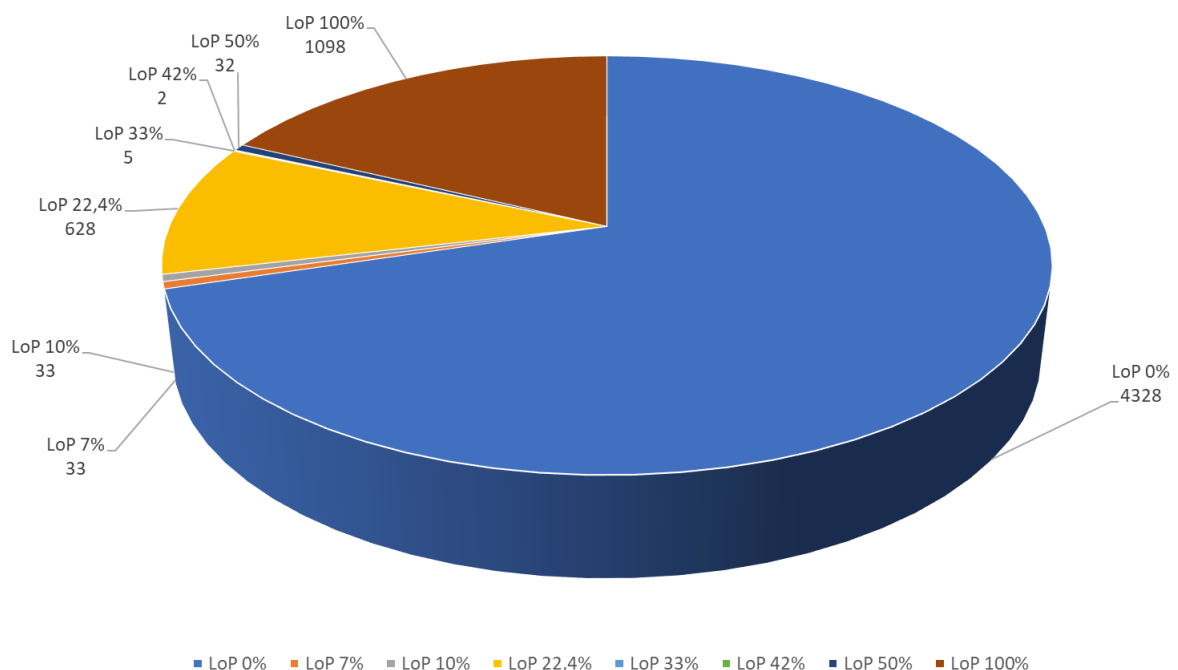


Figura 5-6 - Distribuzione degli eventi di guasto in base alla percentuale di perdita di produzione (Loss of Production - LoP) associata. Si nota come per la maggior parte dei guasti non è attesa alcuna perdita.

Dalla figura 5-6 si evince che, in accordo con le valutazioni FMEA svolte, la maggior parte dei guasti (4328 dei 6159, pari al 70%) non è causa di alcuna perdita di produzione. Tra questi sono tra l'altro presenti 943 modi di guasto che sono stati individuati ma infine esclusi dalla stessa FMEA perché non applicabili ad elementi normalmente in servizio e dunque non in grado di causare alcuna perdita di produzione. Un esempio di questi è il “Fail To Start” per le unità pompe e compressori che sono le unità ipotizzate in realtà sempre marcianti, non da mettere in funzione.

Sono invece 1831 i modi di guasto analizzati per i quali è attesa una certa perdita di cui 1.098 (pari a circa il 60% del sottoinsieme) critici al punto da causare la perdita totale di produzione.

Si è quindi approfondita l'analisi valutando la numerosità distribuzione di questi per tipologia evidenziando quanto mostrato dal grafico a seguire.

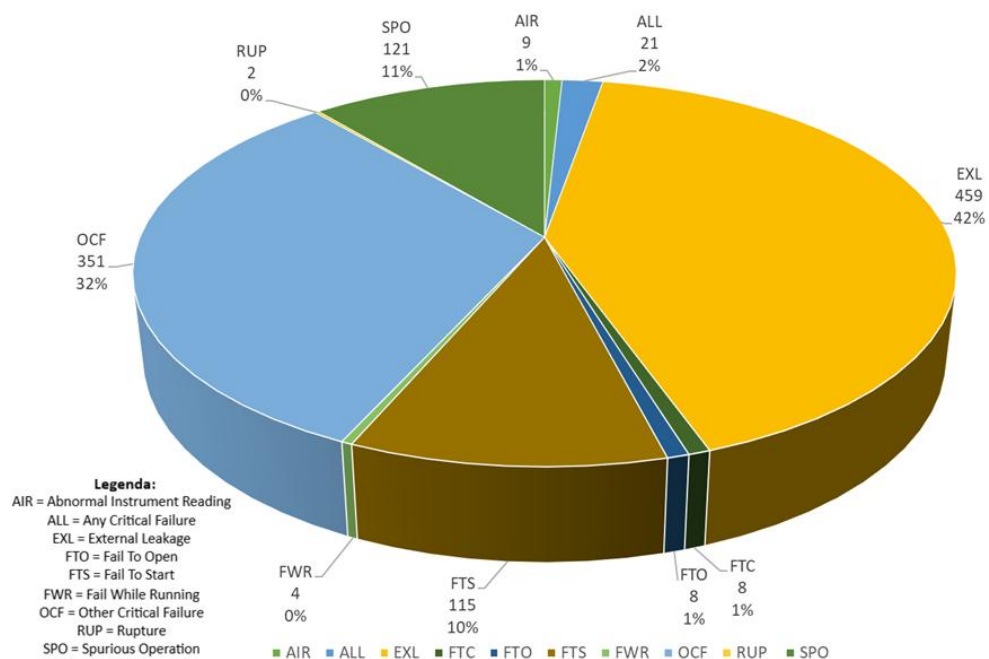


Figura 5-7 - Numerosità dei modi di guasto che potrebbero causare perdita completa di produzione ricavata dalla FMEA.

Dalla figura 5-7 risalta come le perdite di contenimento verso l'esterno (EXL) siano dunque, in termini di numerosità, il modo di guasto principale che causa fino al 100% di perdita di produzione seguite a stretto giro dal modo di guasto generalizzato “Altri guasti critici” (OCF). Per il primo modo il risultato è coerente con la pericolosità dei fluidi legata a tossicità e/o infiammabilità che causano l'attivazione dei sistemi d'emergenza e, per ipotesi conservativa precedentemente discussa, l'arresto dell'impianto fino al ripristino delle condizioni di sicurezza. Il secondo modo di guasto, invece, interessa molte apparecchiature di primo rilievo ai fini produttivi quali pompe e compressori, ma anche scambiatori di calore, fornaci e reattori e che non sono dotati di ridondanza. Vista la fase progettuale, avendo assunto i guasti sempre critici, tali da mettere completamente fuori uso il

componente, è allora chiaro perché questo modo di guasto è risultato così altamente impattante potendo affliggere la quasi totalità dei 974 elementi principali individuati nel Registro degli Asset. Abbastanza numerosi sono anche i modi di guasto “Spurious Operation” (121, 11%) e “Fail to Start” (105, 10%) che potrebbero causare ugualmente delle perdite totali di produzione. L’operazione spuria che incide principalmente sulle valvole motorizzate e di pressione (PSV) più importanti, infatti, può comportare depressurizzazioni improvvise, blocchi dei flussi o drenaggi indesiderati con conseguente attivazione delle logiche di arresto controllato del processo. Il guasto all’accensione su richiesta, invece, impatta fino al 100% di perdita produttiva interessando i componenti di riserva (pompe e compressori soprattutto) quando è richiesto il loro intervento essendo l’unità normalmente marciante fuori servizio. Se le riserve non entrano in funzione o una buona ridondanza allora il blocco della produzione diventa quasi inevitabile. Emerge qui ancora una volta il limite della staticità dell’analisi FMEA che non può tener conto effettivamente della richiesta d’intervento di tali componenti e del verificarsi in quel momento del guasto. Nonostante fossero numerosi, 1072 su 6159 (il 17%), il modo di guasto “Any Critical Failure” (ALL) ha invece una criticità molto bassa essendo che solamente per 21 di questi si è valutata la perdita totale di produzione. Ciò è sia all’ipotesi fatta per i sensori TXE, che all’accortezza progettuale di prevedere sensori locali e linee di bypass in prossimità e a supporto di quelli che regolano automaticamente le valvole.

Riguardo la località di occorrenza dove si verificano tali modi di guasto che causano il 100% di perdita si è infine riscontrato:

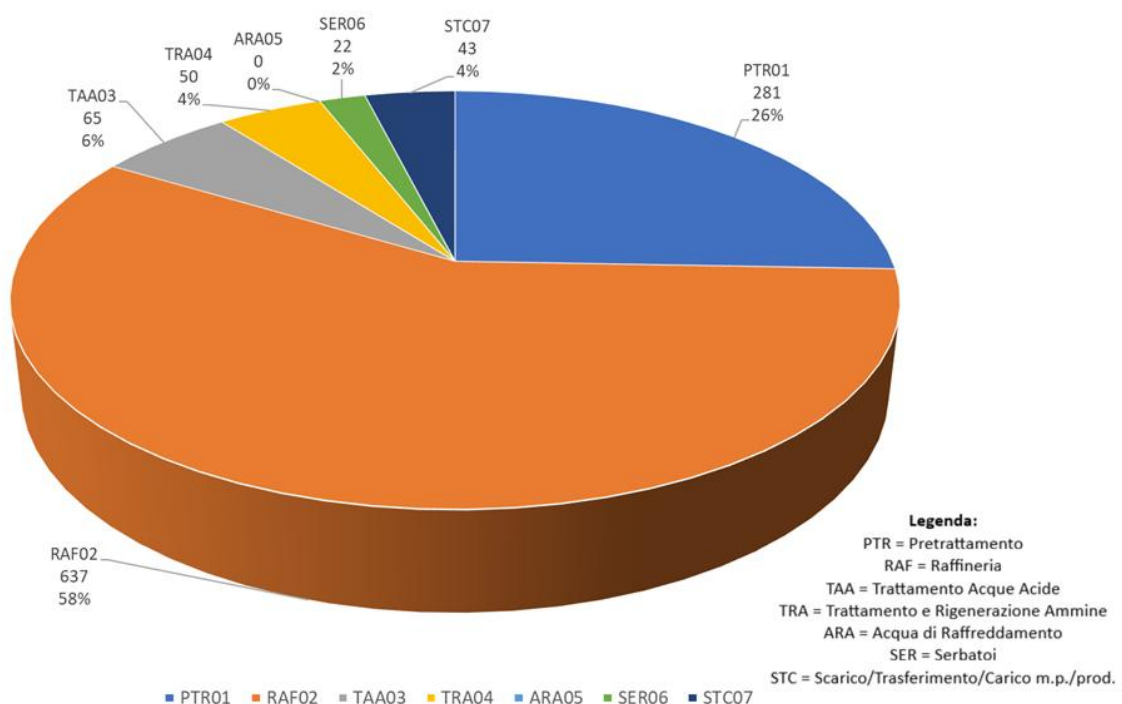


Figura 5-8 - Ripartizione degli eventi di guasto determinanti un arresto totale dell’impianto per unità funzionale ricavata dalla FMEA.

Come mostrato dalla figura 5-8 è interessante che la distribuzione dei guasti con perdite totali non rispecchi la tendenza tracciata dalla numerosità degli eventi di guasto della figura 5-4. La FMEA, infatti, ha individuato nei guasti dell'unità di raffinazione (637 su 1.098, pari al 58%) la causa prevalente delle perdite totali di produzione. Risulta decisamente inferiore, invece, il contributo dell'unità di pretrattamento: solo 281 casi su 1.098 (26%), nonostante il numero totale di guasti individuati in quest'ultima fosse significativamente più alto rispetto alla raffinazione (2.675 contro 1.873). Si ritiene ciò sia da imputare all'architettura dell'unità di pretrattamento che, come anticipato in 3.1.1, è largamente basata su tre differenti linee, una per ogni tipo di prodotto, prima dell'unione di queste in una sola linea di processo. Pertanto, nel caso in cui si verificasse un guasto su una delle linee, tale da metterla fuori uso, l'unità di pretrattamento potrebbe continuare ad operare normalmente con le altre due e fornire una portata continua, seppur ridotta, all'unità di raffinazione che realizzerà i prodotti finali. Questo risultato sulla criticità dell'unità di pretrattamento non tiene conto per di più dell'effetto mitigativo che fornirebbero i serbatoi, consentendo con la loro autonomia all'unità di raffinazione a valle la marcia normale, a causa dei già citati limiti della FMEA. È attendibile, dunque, e sarà evidenziato nella successiva analisi di disponibilità, che l'unità di pretrattamento non sia particolarmente critica per le performance produttive della bioraffineria.

In conclusione, l'analisi FMEA ha permesso di ottenere una mappatura dettagliata e rigorosa delle vulnerabilità della bioraffineria. Attraverso lo studio sistematico di oltre seimila modi di guasto è stato possibile non solo identificare le modalità più ricorrenti. È emersa l'indicazione di come le minacce principali alla continuità di produzione risiedano nell'unità di raffinazione, e imputabili a specifiche tipologie di guasto. Tali evidenze costituiscono già di per sé un interessante risultato per l'ingegneria di manutenzione, fornendo i primi suggerimenti per l'ottimizzazione del magazzino ricambi. Sono tuttavia emersi, e puntualmente evidenziati con esempi, anche alcuni limiti metodologici intrinseci della FMEA: essa è, per sua natura, un'analisi statica e prevalentemente qualitativa. Valutando gli eventi secondo lo scenario più conservativo, infatti, la FMEA ha escluso a priori le dinamiche temporali e i benefici reali dei sistemi di accumulo (buffer). Inoltre, si limita solo a descrivere gli effetti dei guasti e delle relative azioni di ripristino senza fornire una quantificazione del tempo necessario per riportare l'elemento alla sua piena funzionalità. Risulta pertanto necessario trasformare le informazioni qualitative raccolte finora, tra le quali la tempestività di individuazione del guasto (*detection*), in valori temporali ben definiti. L'analisi di manutenibilità esposta nel successivo capitolo, quindi, è stata elaborata per completare il quadro elaborato grazie alla FMEA e poter infine eseguire le simulazioni per la valutazione della disponibilità produttiva con il software Maros.

6 ANALISI DI MANUTENIBILITA'

L'Analisi di Manutenibilità (AM) è uno step importante dello studio RAM realizzato i cui risultati, uniti a quelli della FMEA, hanno costituito i dati di partenza per la simulazione Monte Carlo sul modello dell'impianto per l'analisi di disponibilità produttiva.

L'obiettivo dell'AM è quello di identificare e definire in maniera sistematica le procedure e i tempi necessari al ripristino delle funzionalità di un elemento fuori servizio. Il fuori servizio non è necessariamente causato dai guasti, ma anche da interventi di manutenzione preventiva programmata. All'analisi FMEA, precedentemente svolta e descritta, sono stati quindi integrati, guasto per guasto, i tempi necessari al ripristino ovvero all'esecuzione della manutenzione correttiva. Ciò completa e definisce quantitativamente l'effetto sulla produzione degli interventi di manutenzione che in precedenza erano stati valutati solo qualitativamente.

I tempi legati alla manutenzione preventiva invece, basata su logica programmata, sono stati acquisiti dalle indicazioni progettuali proprie della bioraffineria.

Si è scoperto che il tempo di fuori servizio risultante (downtime), valutato per entrambi i tipi di manutenzione, dipende, in generale, da una serie di diversi fattori critici legati a:

- **Componente.** In base a caratteristiche quali:
 - Peso e dimensioni che rendono necessario o meno l'impiego di opportuni mezzi;
 - Accessibilità;
 - Modularità, possibilità di veloci sostituzioni Plug&Play senza interrompere i processi;
 - Diagnostica integrata per l'individuazione rapida del guasto evitando ad esempio i tempi dei test;
- **Guasto.** Sebbene siano stati considerati tutti guasti critici vi sono alcuni che, anche in base al componente e alla sua funzione, risultano più semplici da gestire. Ciò dipende, infatti, dall'intrusività dell'intervento o dalle attività collaterali ad esso propedeutiche o successive alla sua realizzazione.
- **Organizzazione e gestione.** Gestione del magazzino dei ricambi, formazione e disponibilità del personale incidono molto sulla manutenibilità.

In particolare, per la manutenzione correttiva, per ogni modo di guasto di ogni componente, al fine di valutare il CMT (Corrective Maintenance Time – Tempo Correttivo di Manutenzione) sono state svolte le seguenti attività principali:

- Identificazione delle attività ausiliarie necessarie da svolgere prima (es. isolamento) e dopo (es. prova di tenuta) un intervento di riparazione;
- Definizione delle risorse di manutenzione (es. squadra operativa) e della strategia di intervento (es. riparazione in situ);
- Stima dei “tempi di localizzazione e diagnosi del guasto” (FLDT), dei “ritardi tecnici” (TD) che comprendono il “tempo di messa fuori servizio” (TOST) e “tempo di rimessa in servizio” (BIST) e dei “ritardi logistici” (LD) basandosi sui risultati dei punti precedenti e sulle assunzioni espresse nel successivo paragrafo;
- Stima complessiva del CMT, tenendo conto di possibili sovrapposizioni temporali fra attività (AOT) e del tempo medio di riparazione (MRT) secondo lo schema di riferimento. Il CMT risulta dunque la composizione di diversi intervalli temporali, approfonditi nel successivo paragrafo, come mostrato dalla figura a seguire:

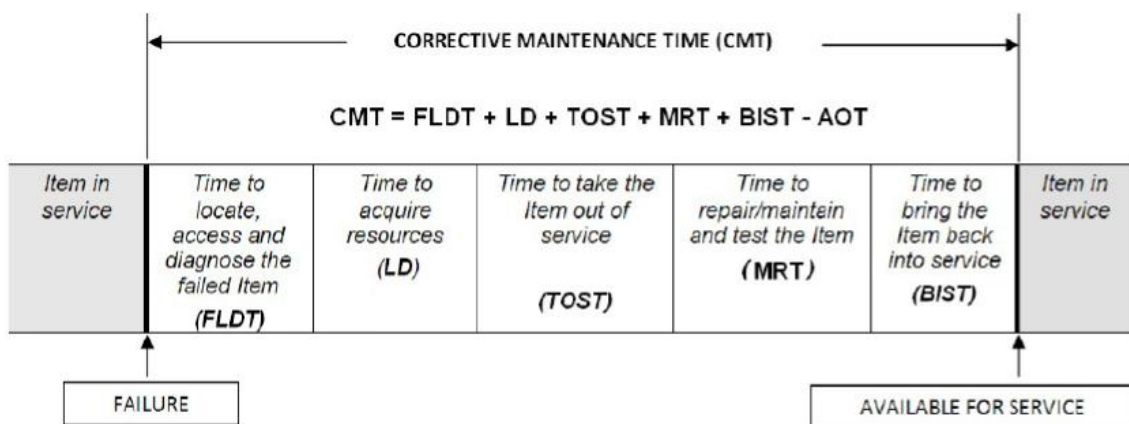


Figura 6-1 – Scomposizione del tempo di manutenzione correttiva (Corrective Maintenance Time - CMT) nelle sue componenti elementari in ordine temporale.

Come da figura 6-1 il CMT risulta dunque dalla somma di diversi intervalli temporali associabili a diverse fasi o step della manutenzione che vanno dalla localizzazione del guasto fino alla rimessa in servizio.

Completato questo quadro d’insieme nel successivo paragrafo sono state descritte le attività preliminari all’analisi, con le ipotesi e assunzioni generali elaborate. A seguire sono poi dettagliate approfonditamente le fasi di TOST e BIST esponendo le attività elementari di queste fasi, per quali oggetti sono realizzate e i tempi necessari. In un sotto paragrafo dedicato sono fornite maggiori informazioni circa gli interventi di manutenzione programmata e la loro durata. Il capitolo si conclude quindi mostrando a confronto la distribuzione di tutti i modi di guasto e di quelli per i quali sono

attese perdite di produzione in funzione dell'intervallo temporale necessario a realizzare l'intervento manutentivo.

6.1 Attività preliminari, ipotesi e assunzioni generali

Analogamente a quanto svolto per la redazione del Database dei Parametri R&M, considerata l'elevata numerosità dei componenti oggetto di studio, si è optato per un approccio di analisi aggregato per "famiglie di manutenzione" anziché per singolo componente. Questa metodologia è stata scelta sulla base della necessità di bilanciare il dettaglio analitico con l'efficienza operativa, evitando una dispersione di risorse che non avrebbe apportato incrementi significativi alla precisione statistica dei dati e dei risultati finali. Questo approccio e il livello di dettaglio che garantisce è, inoltre, ben compatibile con la fase di avanzamento progetto della bioraffineria. Gli elementi sono stati raggruppati, quindi, in famiglie definite da parametri comuni quali la tipologia e il contesto applicativo. Ad ogni gruppo, ai fini di tracciabilità e rapidità di recupero dei dati nelle fasi successive del progetto, sono stati associati due codici univoci AM e AM key. Il primo codice identifica l'elemento di riferimento da cui prende il nome l'intera famiglia, con l'aggiunta di ulteriori informazioni per specificare la funzione (es: PR, processo), o per distinguere applicazioni dell'elemento critiche (H, Hazardous) da quelle non (N, Non Hazardous). L'AM key integra poi al codice di AM una codifica a due lettere, l'AM FM, che esprime la macrocategoria di impatto operativo dovuta alla manutenzione dell'elemento. Sono state definite due diverse classi di onere manutentivo:

- **Guasti Minori (L1):** eventi che non richiedono la sostituzione del componente e per i quali l'azione correttiva avviene in situ. I tempi di impatto sono stati valutati contenuti.
- **Guasto Maggiore (L2):** eventi più impattanti ed intrusivi che possono richiedere la sostituzione del componente danneggiato e la riparazione in aree attrezzate specifiche. I tempi di impatto sono stati valutati generalmente superiori o molto superiori ai guasti minori.

Si è scelto di definire due sole classi di onere sempre allo scopo di bilanciare precisione e sostenibilità operativa, coerentemente con la fase di FEED. Ciò permette di isolare immediatamente gli interventi prioritari, evitando la definizione di categorie intermedie difficili da caratterizzare, ma anche poco funzionali al raggiungimento di un robusto risultato finale.

Si sono riscontrati casi però, come per i filtri e le PSV, in cui non sono stati individuati due livelli di impatto operativo per la manutenzione; è quindi stato assegnato il solo codice L2 classificandoli cautelativamente come di maggiore criticità.

Le ipotesi e assunzioni generali considerate hanno coinvolto la maggior parte delle attività dell'intero processo manutentivo, dall'individuazione dell'eventuale guasto fino alla rimessa in servizio del componente e/o dell'intero impianto. Queste ipotesi sono state elaborate dalle informazioni ricavate dalla documentazione di progetto esaminata o, quando non disponibili o rintracciabili, facendo riferimento agli standard operativi dei complessi del settore Oil & Gas. In misura minore si è potuto ricorrere a dati provenienti dall'esperienza interna da impianti simili. In particolare:

- **Ritardi logistici (LD).** Data la fase di progetto di FEED, tutti i ritardi nell'approvvigionamento di attrezzature, personale, componenti e materie prime richieste dall'esterno della bioraffineria non sono stati valutati.
- **Magazzino e parti di ricambio.** Pur non avendo ricevuto indicazioni circa la presenza e politica di gestione di un magazzino per le parti di ricambio, si è presunto che un tale ambiente sia presente coerentemente a quanto normalmente riscontrabile in impianti del settore. Pertanto, per tutti i pezzi di ricambio più comunemente utilizzati, che non hanno grande valore economico o particolari specifiche tecnico-costruttive, si è ipotizzato siano sempre disponibili in esso. Non è stato dunque preso in considerazione alcun ritardo, sempre di natura logistica, per la fornitura di tali pezzi o elementi di ricambio.
- **Strategie di sostituzione.** Si è considerata una strategia di sostituzione plug & play per le seguenti tipologie di articoli:
 - motori elettrici e pompe (fino a 100 kW);
 - strumenti (es: sensori, trasmettitori...);
 - valvole (di ogni genere e tipo fino a 6").

Richiamando l'ipotesi di presenza del magazzino sopra descritta, si è in particolare presunta la disponibilità di un ricambio completo di tutti questi elementi (o simili ad essi). Pertanto, il tempo di riparazione MRT (ricavato da OREDA) non viene applicato. L'oggetto verrà infatti riparato in officina successivamente al riavvio del sistema con il ricambio. Si sono applicati solamente i tempi dovuti alle attività di TOST e BIST.

- **Personale manutentivo.** Data la natura della bioraffineria come impianto a ciclo continuo (24/7) e l'elevata criticità dei processi biochimici realizzati, si è assunta la presenza di un

presidio costante del personale manutentivo qualificato. La loro disponibilità è stata ritenuta immediata, annullando il ritardo logistico dovuto alla reperibilità

- **Tempo di identificazione e localizzazione del guasto (FLDT).** È stato assunto un tempo nullo, facente parte del tempo attivo di manutenzione per:
 - strumentazione e i macchinari che per evidenza (da P&ID o descrizione processo) o buona pratica ingegneristica sono dotati di appositi strumenti di monitoraggio delle condizioni operative
 - per tutti quei guasti di elementi dell'impianto che causano l'attivazione del sistema di emergenza F&G

Per entrambi i casi nella FMEA era stata riportata la metodologia di individuazione CMON. Per tutti le altre modalità di identificazione (COBS, PI e ODEM) è stato assunto un tempo di localizzazione del guasto pari a 2h.

- **Tempi delle varie attività di TOST e BIST.** Dallo studio della documentazione progettuale sono stati assunti sulla base di opportune assunzioni ingegneristiche. Dove possibili sono stati considerati tempi tecnici sull'esperienza interna su asset simili alla bioraffineria oggetto di studio in questa tesi.
- **Tempo di spegnimento, riavvio e di messa a regime.** Il tempo stimato comprende sia la fase di spegnimento e raffreddamento precedente l'intervento, sia la fase di rimessa in servizio successiva. Tale tempistica è stata applicata in aggiunta al tempo di riparazione propriamente detto, come riportato nel Database dei Parametri R&M e nell'Analisi di Manutenibilità. In dettaglio, per lo spegnimento è stato assunto che nel caso di:
 - **trip strumentale:** non è richiesto alcun tempo di spegnimento o riaccensione:
 - **fermo impianto breve (fino a 36 h):** stimate 30 h:
 - **fermo impianto prolungato (oltre le 36 h):** stimate 36 h. Ciò anche nel caso di interventi meccanici intrusivi sul circuito dell'unità di raffinazione anche qualora il fermo totale sia di durata inferiore alle 36h.

In aggiunta ai tempi sopra riportati, è stato considerato un tempo di messa a regime lineare (al 100%) di 4 h. Tale incremento si applica a qualsiasi scenario di arresto, inclusi i trip. Non è stato considerato infine alcun tempo di riavvio per unità diverse da quella di raffinazione, a meno che il loro arresto non provochi un fermo a cascata della stessa.

- **Tempo risparmiato per attività eseguite in parallelo (AOT).** A scopo conservativo dovuto alla fase progettuale si sono considerate tutte le attività manutentive sequenziali e dunque tale tempo, che riduce il CMT, è stato ipotizzato nullo. Questa è un'assunzione piuttosto

conservativa per la stima dei tempi di manutenzione. La si è ritenuta però necessaria non avendo informazioni circa la possibilità da parte del personale dell'impianto di riuscire ad eseguire più attività in parallelo che presupporrebbe la presenza sul campo di diverse squadre specializzate per ogni attività.

Sulla base di quanto esposto è stata così condotta la caratterizzazione dei tempi di tutte le possibili fasi e attività della manutenzione per determinare, caso per caso, i tempi necessari al ripristino.

6.2 L'analisi

Il tempo di fermo totale per ciascuna "famiglia" è il risultato della sommatoria dei tempi associati alle singole fasi dell'intervento. Per ogni scenario è stato selezionato, dunque, un set specifico di attività elementari, escludendo quelle che non appartengono al caso specifico. La scomposizione del tempo totale è stata realizzata in accordo alle seguenti quattro macrocategorie:

- **Localizzazione e diagnosi del guasto.** Tempo dedicato all'individuazione e alla conferma del guasto. Nel paragrafo precedente si è già spiegato come sia stato valutato e i tempi ad esso correlati.
- **Messa in sicurezza e predisposizione.** Tempo che intercorre tra l'ordine di inizio lavori e il momento in cui il manutentore può effettivamente intervenire fisicamente sull'oggetto in totale sicurezza. Si farà riferimento ad esso con la sigla TOST (Take Out of Service Time).
- **Tempo attivo della riparazione.** Corrisponde al MRT riportato sul Database dei Parametri R&M ricavato dalle banche dati consultate (principalmente da OREDA) [18-22].
- **Tempo di reintegro in servizio.** Intervallo di tempo necessario per reintegrare l'elemento nel processo produttivo una volta terminata la riparazione o la sostituzione meccanica. Si farà riferimento ad esso con la sigla BIST (Bring Into Service Time).

Tutte le tempistiche relative alle singole attività ricadenti nelle macrocategorie TOST e BIST sono state stimate attraverso criteri ingegneristici standardizzati e buone pratiche del settore Oil & Gas. Viene garantita così la piena coerenza con gli standard operativi del sito. Si riporta di seguito un estratto dello studio condotto presentato nei sottoparagrafi 6.2.1 e 6.2.2:

MA code	Description	MA FM	MA key	ITEM REPLACEMENT	Repair place	TAKE OUT OF SERVICE TIME (h)											BRING INTO SERVICE TIME (h)					TOTALS			
						Process Isolation	Depressurization	Cool down	Electrical Isolation	Draining	Purging	Blinding	Ventilation	Washing	Item Removal	Item conveyance to workshop	Item conveyance from workshop	Reinstalling	Leak test	Air removal	Commissioning & Start up	TOST (sequential)	BIST	TD (BIST + TOST)	
HB-PR	Boiler, process	L1	HB-PR_L1	N	S	0,25	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,50
HB-PR	Boiler, process	L2	HB-PR_L2	N	S	1,00	0,50	0,00	0,25	1,00	4,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	8,75	4,00	12,75
CE	Centrifuge	L1	CE_L1	N	S	0,50	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,50	1,25
CE	Centrifuge	L2	CE_L2	N	S	0,50	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,50	1,25
CO	Compressor, general	L1	CO_L1	N	S	0,25	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,25	0,75
CO	Compressor, general	L2	CO_L2	N	S	0,25	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,25	0,75
CO-PR	Compressor, process	L1	CO-PR_L1	N	S	0,25	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,25	0,75
CO-PR	Compressor, process	L2	CO-PR_L2	N	S	0,25	0,00	0,00	0,25	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	2,00	0,00	0,00	0,00	4,50	2,25	6,75
CT	Cooling Tower	L1	CT_L1	N	S	0,25	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,25	0,75
CT	Cooling Tower	L2	CT_L2	N	S	0,25	0,00	0,00	0,25	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	2,00	0,00	2,50	2,25	4,75
EE	Electric equipment, general	L1	EE_L1	N	S	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,50
EE	Electric equipment, general	L2	EE_L2	N	S	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,50

Figura 6-2 - Dettaglio della scomposizione del Take Out Of Service Time e del Bring Into Service Time (espressi in ore) per diverse classi di asset e livelli di manutenzione.

6.2.1 Take Out of Service Time (TOST)

Le attività elementari di manutenzione della fase di TOST possono essere raggruppate idealmente in quattro fasi/categorie:

1. Preparazione e arresto;
2. Isolamento e messa in sicurezza;
3. Bonifica e decontaminazione;
4. Smontaggio.

La fase di preparazione e arresto funge da interfaccia tra l'esercizio operativo dell'impianto e l'inizio delle attività manutentive. La sua corretta gestione è fondamentale non solo per la salvaguardia dell'asset, ma anche per l'ottimizzazione dell'intero arresto, poiché errori in questa fase possono generare ritardi a cascata su tutte le operazioni successive. Sono state individuate tre attività elementari:

- 1.1. Support service;
- 1.2. Spegnimento;
- 1.3. Raffreddamento.

La prima riguarda la mobilitazione di risorse pesanti e l'allestimento delle misure di protezione. In una bioraffineria, ciò implica spesso il posizionamento di mezzi di sollevamento in aree congestionate e il montaggio di ponteggi certificati. Per il caso studio affrontato non è stato assunto

alcun tempo speso per tale attività non ritenendola di particolare rilevanza. L'attività di spegnimento considera invece il tempo legato alle attività di transizione dinamica del processo, come la riduzione della portata, fino allo spegnimento se queste richiedono tempi significativi. Non è stato considerato per le famiglie dell'analisi di manutenibilità perché incluso come parte dei tempi di accensione e spegnimento definiti a livello unità. Il raffreddamento, infine, richiede tempi di grande rilievo per apparecchiature che operano ad alta temperatura ed è considerato un tempo di attesa obbligatorio prima che sia possibile procedere, in sicurezza, con le fasi di bonifica e smontaggio meccanico. Questo tempo è dettato da leggi fisiche e vincoli metallurgici: un raffreddamento troppo rapido potrebbe causare shock termici o fenomeni di infragilimento sulle pareti dei recipienti in pressione. Per il raffreddamento si sono dunque specificamente considerate:

- Per elementi come reattori e fornaci, poiché il loro fermo comporta immediatamente l'arresto dell'unità, tale tempo è inglobato in quello necessario per l'intera unità;
- Per le turbine è stato assunto un tempo di 4 h;
- Per gli scambiatori di calore si sono invece valutate 2 h.

Non appena l'elemento o l'impianto sono in stato di fermo, e sono raggiunte temperature compatibili con l'intervento umano, si può procedere alla messa in sicurezza ed isolamento. Sono state individuate anche in questa fase tre attività elementari distinte, non comuni a tutti gli elementi.

Queste sono:

- 2.1. Process isolation;
- 2.2. Electrical isolation;
- 2.3. Blinding.

L'attività di process isolation rappresenta l'isolamento valvolare dell'elemento soggetto a manutenzione. È il tempo necessario agli addetti per chiudere, tipicamente manualmente, tutte le valvole d'intercettazione sulle linee che giungono o si dipartono dal componente o su tratti e sezioni da isolare per la sua manutenzione. È stato generalmente ipotizzato pari a 15 minuti, ma per i componenti dell'impianto dove è stato riscontrato un importante numero di linee da interrompere sono stati considerati tempi 30 minuti (es: turbine a vapore) o 1 h (es: recipienti in pressione e scambiatori di calore).

Per i componenti elettrici è stato invece valutato l'equivalente electrical isolation tenuto in considerazione anche per tutti quegli elementi che ricevono alimentazione elettrica per poter operare correttamente. Tra questi vi sono ad esempio la quasi totalità di pompe e compressori essendo messe in funzionamento grazie alla presenza di motori elettrici come organo motore. In tutti i casi si è ritenuto consono un tempo necessario per l'isolamento pari a 15 minuti.

Il blinding, infine, è un altro tipo di isolamento, che consiste tipicamente nell'inserimento di flange cieche o dischi otturatori, essenziale per tutti gli interventi che prevedono l'apertura di apparecchiature o l'ingresso di personale in spazi confinati. Caratterizza quindi tipicamente i serbatoi nel momento in cui è necessario l'intervento al loro interno da parte degli operatori. È stato considerato anche per le fornaci e valutato un tempo di realizzazione dell'attività pari sempre a 2h.

Completate, ove necessario, le procedure di isolamento l'elemento e/o l'impianto si trovano in uno stato di sicurezza statica, ma il loro volume interno potrebbe costituire ancora un potenziale pericolo. Nella macro-fase di bonifica e decontaminazione è dunque imperativo rimuovere dagli elementi soggetti alla manutenzione tutti i residui di qualsiasi sostanza chimica, tossica o infiammabile, rendendo l'ambiente interno chimicamente inerte e, se necessario per l'intervento degli operatori, anche respirabile. In ambito industriale, questa fase è nota come prerequisito obbligatorio per l'emissione del cosiddetto "Permesso di Lavoro a caldo". Per questa fase sono state riscontrate diversi tipi di attività elementari che possono essere realizzate sugli elementi della bioraffineria. Nel dettaglio, queste sono:

- 3.1. Depressurizzazione;
- 3.2. Svuotamento linea;
- 3.3. Drenaggio;
- 3.4. Purging;
- 3.5. Lavaggio;
- 3.6. Ventilazione.

La depressurizzazione è necessaria per tutte quelle apparecchiature di processo in pressione con volume non trascurabile. La pressione viene portata al valore di quella atmosferica tramite l'apertura delle linee di blowdown manuale e inviando i gas a torcia dove vengono bruciati per ragioni ambientali e di sicurezza. È stato considerato un tempo necessario di 30 minuti per tale operazione per componenti quali i serbatoi in pressione, gli scambiatori di calore e le fornaci per i guasti di impatto L2. In tutti i casi di oggetti di piccolo volume tale tempo è stato invece ritenuto trascurabile.

Svuotamento linea e drenaggio si riferiscono entrambi all'attività di rimozione di liquidi, ma da componenti diversi. Lo svuotamento linea è riferito esclusivamente a tutto ciò che è classificabile come tubazione; il drenaggio invece si riferisce alla rimozione di liquidi da apparecchiature (serbatoi, scambiatori di calore...). Visto che nel Registro degli Asset erano già state escluse le tubazioni, in quanto valutate come elementi con grande affidabilità intrinseca, lo svuotamento linea, come la precedente attività di support service, è stata esclusa dall'analisi di manutenibilità. Il drenaggio invece è necessario per molti dei componenti che sono stati riportati nel Registro degli Asset con valutazioni dei tempi significativamente diverse da caso a caso. Come linea generale si è seguito il principio che

tale tempo dipende sia dal volume di liquido considerato che dal numero e dalla dimensione delle linee di drenaggio. Sono stati pertanto assunti:

- 15 minuti per bracci di carico (unità STC 07)
- 1 h per scambiatori e le fornaci
- 2 h per recipienti a pressione generici o le colonne di distillazione e lavaggio ammine
- 8 h per i grandi serbatoi di stoccaggio (es: serbatoi materie prime e dei prodotti)

Questi tempi sono stati inoltre applicati solamente agli interventi ritenuti intrusivi, e impattanti (L2). Per apparecchiature contenenti esclusivamente gas o con volumi trascurabili invece, come le pompe, il tempo si è considerato nullo.

Le ultime due attività manutentive appartenenti alla categoria delle attività di bonifica e decontaminazione sono quelle di lavaggio e ventilazione. Sono due attività ben distinte in base principalmente al target da rimuovere, rispettivamente residui solidi e gassosi, e allo stato fisico degli agenti normalmente utilizzati, liquidi e solventi piuttosto che gas e aria compressa. Il lavaggio è stato considerato per i serbatoi, in cui è necessario l'intervento degli operatori al loro interno, che operano con fluidi pericolosi dal punto di vista dell'inflammabilità e/o tossicità e fluidi "sporchi", che causano incrostazioni sulle superfici degli stessi. Si è dunque assunto un tempo di 8h per i serbatoi di grandi dimensioni e 1 h negli altri casi. La ventilazione ha lo scopo invece di instaurare un'atmosfera respirabile all'interno degli apparecchi sempre per la necessità di consentire l'intervento degli operatori al loro interno. Analogamente al lavaggio sono state ipotizzate 8 h per i grandi serbatoi, dove vi è il rischio di stratificazione dei gas, e 2 h negli altri casi. Lavaggio e ventilazione non si escludono a vicenda; anzi, sono sempre eseguiti entrambi, con la sola eccezione dei recipienti contenenti sostanze non pericolose, dove la ventilazione non si rende necessaria.

Ultima macrocategoria degli interventi di TOST riscontrati nella bioraffineria è infine quella dello smontaggio dell'apparecchiatura. Tale attività è stata considerata se l'apparecchiatura necessita di essere sostituita totalmente o se va riparata in officina. Si sono assunti 1 h per strumenti e valvole e 2 h per altri oggetti. Questo tipo di operazione è stata ovviamente valutata, per quanto detto in precedenza, solamente per gli interventi ritenuti particolarmente impattanti (L2).

Riguardo l'officina ci sarebbe in realtà un'ulteriore attività legata alla manutenzione che è quella riguardante il trasporto dal sito in cui l'elemento è installato ad essa in cui viene realizzata la riparazione. Come detto in precedenza, dato lo stato di progettazione, si è ritenuto sulla base della buona pratica di settore che un'officina di riparazione sia localizzata all'interno o in prossimità della bioraffineria. Pertanto, i tempi logistici del trasporto delle apparecchiature da riparare sono stati

considerati trascurabili. Tale approssimazione realizzata per le attività di TOST è stata estesa alle attività di BIST dove, in presenza di informazioni più dettagliate, andrebbe considerato anche il tempo che intercorre per il trasferimento dall'officina al sito in cui l'elemento era installato.

Sulla base di tutto ciò gli elementi della bioraffineria con tempi di TOST maggiori o uguali alle 4 ore appartengono a 9 delle 43 famiglie individuate, con severità di intervento L2, e sono di seguito riportati in un grafico a colonne con i rispettivi tempi:

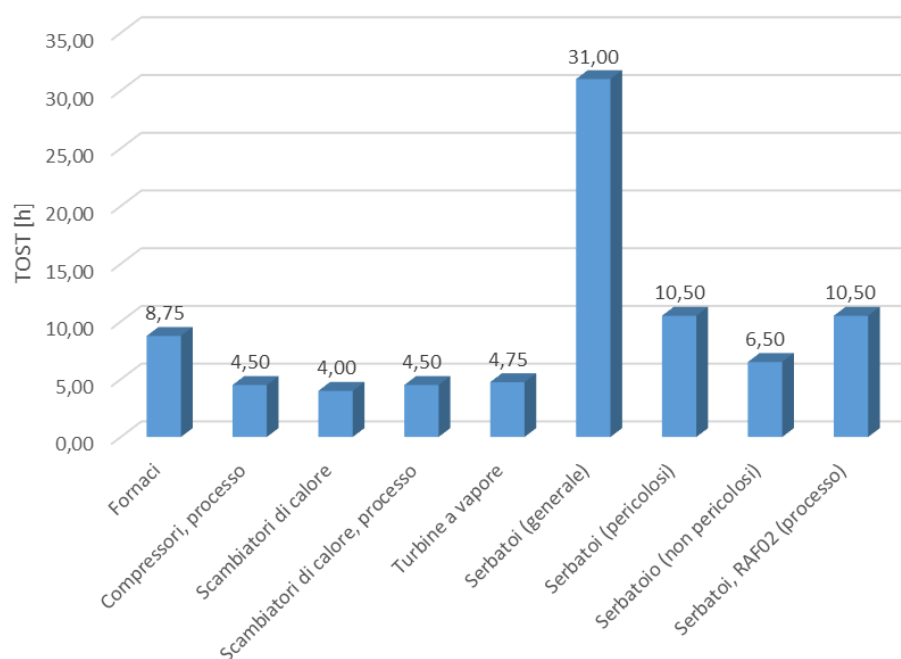


Figura 6-3 – Tempi di TOST maggiori o uguali a 4 ore per tipologia di componente. Si noti il valore elevato relativo ai serbatoi dovuto alle operazioni di bonifica.

Concluse le operazioni di TOST vi è l'attività di riparazione vera e propria i cui tempi, gli MRT, sono stati raccolti nel Database dei Parametri R&M e che dipendono dal tipo di componente e dal guasto che deve essere risolto o dall'attività di manutenzione preventiva.

Terminata la riparazione intercorre tuttavia ulteriore tempo e devono essere compiute ulteriori operazioni prima che l'apparecchio possa rientrare in funzione e quindi la sezione o l'impianto siano rimessi nuovamente in marcia. Il tempo associato a tali attività è quello del BIST dettagliato più approfonditamente nel successivo paragrafo.

6.2.2 Bring Into Service Time (BIST)

Il BIST quantifica l'intervallo temporale necessario per ripristinare la piena operatività di un asset una volta concluso l'intervento attivo della manutenzione. In generale la durata del BIST non è legata

esclusivamente alla tipologia di apparecchiatura, ma presenta una forte variabilità dipendente dal contesto installativo. Asset identici possono pertanto richiedere tempi di riavvio differenti a seconda delle interconnessioni funzionali e meccaniche con il resto dell'impianto.

La stima del BIST prevede dei tempi distinti per:

- **Reintegrazione Sicura:** verifica di tutte le interfacce con i sistemi circostanti (rimozione isolamenti, riallineamento valvole).
- **Riavvio del Processo:** incorpora anche le tempistiche necessarie per le procedure di Start-up e la “rampa di salita fino alle condizioni di regime” (Ramp-up) nel caso in cui il guasto causi un arresto dell'impianto o una depressurizzazione di emergenza. Nel caso dell'analisi condotta però questo tempo di avviamento è stato considerato a parte e inserito nel modello di disponibilità produttiva solamente nei casi di arresto dell'impianto. In questo modo si è potuto considerare il BIST per tipologia di apparecchiatura e poi, caso per caso in base agli effetti valutati nella FMEA, si è aggiunto nella simulazione finale il tempo di ramp-up.

Come attività di BIST sono state individuate la reinstallazione, il test di perdita e il commissioning & start up.

La reinstallazione è un processo che richiede l'esecuzione di ulteriori sotto-attività quali la reinstallazione fisica dell'oggetto e l'allineamento, qualora fosse stato rimosso, oppure la rimozione delle flange se era stato eseguito il blinding oltre a quella di altri isolamenti ove sono stati utilizzati. Sono stati quindi ipotizzati tempi molto variabili con un minimo di 15 minuti e un massimo di 4 h in base alla necessità di eseguire le azioni precedenti, in base al componente interessato dall'intervento. In particolare:

- 15 minuti per le pompe (L1), le torri di raffreddamento e le valvole di regolazione (L1);
- 30 minuti per le turbine a vapore;
- 1 h per le valvole PSV e le valvole di regolazione (L2);
- 2 h per le fornaci e gli scambiatori di calore;
- 4 h per le pompe (L2).

Per quanto riguarda il test sulle perdite si è invece assunto che venga realizzato con pressurizzazione graduale del sistema con inerte (o con il gas di processo se consentito) e verificando la tenuta delle flange smontate. È un'operazione necessaria solo quando sono stati eseguiti interventi intrusivi e per fluidi pericolosi. In linea teorica dipenderebbe, anche considerevolmente, dai volumi in gioco, dalle pressioni e dal flusso di gas di test disponibile. Per l'analisi condotta, come ipotesi semplificativa,

sono state assunte 2 h per elementi come le fornaci, compressori e scambiatori di calore. È stato ritenuto invece trascurabile per oggetti di volume ridotto.

Il commissioning e start-up, infine, comprende altre sotto attività, tra le quali il riempimento/ricarica di fluidi. In base all'intrusività dell'intervento sono stati ad esempio stimati 1h per gli scambiatori di calore, 2 h per le torri di raffreddamento e 4 h per i serbatoi di grandi dimensioni.

Sulla base di quanto detto gli elementi della bioraffineria con tempi di BIST maggiori o uguali alle 4 ore appartengono a 8 delle 43 famiglie individuate, con severità di intervento L2, e sono di seguito riportati in un grafico a colonne con i rispettivi tempi:

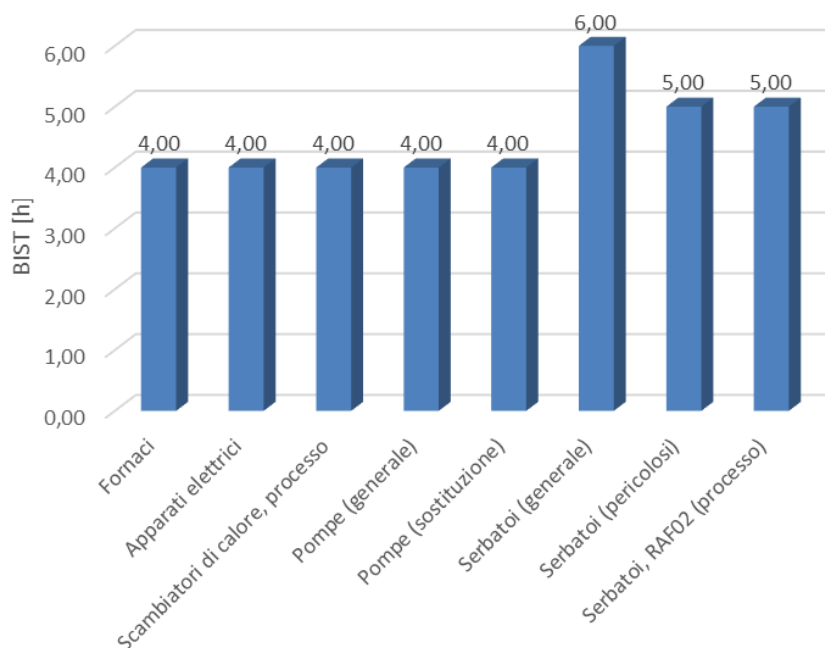


Figura 6-4 - Valori medi del parametro BIST (ore) per tipologia di componente.

Valutati anche i tempi per le attività di BIST può essere dunque calcolato il tempo di riparazione correttiva totale come somma del TOST, del MRT, riportato nel Database dei Parametri R&M creato, e del BIST stesso.

Conclusa l'esposizione dettagliata delle due fasi di TOST e BIST, che caratterizzano i tempi di durata della manutenzione correttiva, si introduce nel successivo sottoparagrafo quanto considerato per la manutenzione preventiva.

6.2.3 Interventi di manutenzione preventiva

La manutenzione preventiva ha lo scopo di massimizzare la continuità operativa prevenendo appunto la rottura di componenti critici il cui guasto e successiva riparazione comportano il fermo

impianto non pianificato. Come si è detto nel capitolo sulla metodologia esistono diversi approcci con cui schedulare tale tipo di attività. Nella bioraffineria oggetto di studio gli interventi di manutenzione preventiva si basano principalmente su una logica programmata data la complessità dell'impianto e la necessità di garantire la continuità di servizio. Tutti gli interventi possono comunque essere suddivisi in due categorie:

- Interventi che non necessiterebbero del fermo impianto;
- Interventi che necessiterebbero del fermo impianto.

Per i primi il fermo impianto è scongiurato grazie principalmente all'architettura della bioraffineria. Come già evidenziato nella FMEA, infatti, ci sono componenti che presentano unità di riserva che possono essere messe in servizio quando l'unità normalmente attiva va in guasto. Ciò può ovviamente essere fatto anche nel caso di fermo per manutenzione dell'unità normalmente in servizio. La valutazione di assenza di impatto in caso di guasto si estende dunque anche per la riparazione ed è stata valutata sempre nella FMEA. Se non è presente un'unità di riserva, una linea di bypass o altro tipo di soluzione compensativa allora il fermo impianto diventa in certi casi necessario anche se profondamente impattante sulla produzione.

In questo studio, su indicazioni di progetto della bioraffineria e sulla base di buone pratiche ingegneristiche del settore, sono stati individuati due importanti interventi di manutenzione preventiva programmata:

- **Sostituzione dei catalizzatori nei reattori.** Durante il normale ciclo i catalizzatori tendono ad un processo di degradazione noto come avvelenamento. Tale fenomeno ha cause varie (inquinanti non correttamente eliminati, formazione di residui solidi...) e incide sul controllo delle delicate reazioni che avvengono nei reattori. Col tempo la qualità dei prodotti finali quindi si abbassa fino al punto da non essere più compatibili alla vendita.
- **Fermata generale.** È un intervento che coinvolge l'intero impianto. Serve ad effettuare un check-up completo dell'impianto, con lo scopo individuare criticità non gestibili durante il normale esercizio. Oltre a tali interventi, sempre di natura manutentiva, costituisce l'occasione migliore per apportare modifiche importanti all'architettura dell'impianto, consentendo implementazioni tecnologiche, ampliamento o riconversioni parziali.

Per questi due interventi sono state valutate rispettivamente delle durate di fermo impianto totale di 21 e 35 giorni (504 e 840 ore) da effettuarsi con cadenza di 24 e 48 mesi. Nel caso di annualità in cui dovranno essere effettuati entrambi gli interventi si è opportunamente ipotizzato che all'interno

della fermata generale venga eseguita anche la sostituzione dei catalizzatori dei reattori. Ciò scongiura un'ulteriore perdita di produzione. Per quanto riguarda infine la valutazione su interventi minori che potrebbero causare anche solo parzialmente una perdita di produzione, non avendo informazioni più approfondite in coerenza con la fase di FEED, si è assunto che essi siano allineati con i due principali sopra esposti. Tale assunzione è motivata da ragioni di ottimizzazione dei processi e sulla logica di manutenzione opportunistica. In questo modo vengono evitate più fermate che con i lunghi tempi di spegnimento e riaccensione dell'impianto penalizzerebbero profondamente la disponibilità produttiva.

6.3 Risultati dell'analisi

La valutazione dei tempi manutentivi (TOST e BIST) ha permesso di quantificare il ritardo tecnico della manutenzione correttiva per ogni famiglia funzionale. Tali valori sono stati quindi opportunamente trasposti nella FMEA, calibrandoli sugli elementi della bioraffineria e sui loro modi di guasto in ragione della loro criticità. Integrando i tempi di localizzazione e diagnosi del guasto (FLDT), che dipendono dal meccanismo di rilevazione individuato nella FMEA, e i tempi di rimessa in servizio (analizzati nel paragrafo 6.1) è stato determinato il tempo della manutenzione correttiva (CMT) per ogni modo di guasto. Si sono presentate due possibilità per il calcolo del CMT:

- $CMT = FLDT + TD + (LD - AOT) + \text{Restart Time}$. Per 3443 dei complessivi 6159 modi di guasto in cui si è ritenuto attuabile una strategia manutentiva basata sulla sostituzione dell'elemento interessato da guasto.
- $CMT = FLDT + TD + (LD - AOT) + MRT + \text{Restart Time}$. In 1773 dei complessivi 6159 modi di guasto in cui si è ritenuto attuabile una strategia manutentiva basata sulla riparazione dell'elemento interessato da guasto.

In entrambi i casi si ricorda che per assunzione conservativa esposta nel paragrafo 6.1 non è stato valutato alcun tempo di AOT.

Per i 943 modi di guasto individuati, non approfonditi nell'analisi FMEA di cui si è detto nel paragrafo 5.3, non è stato valutato il tempo di manutenzione CMT. I modi di guasto che dunque presentano un CMT non nullo sono in totale 5216.

Allo scopo di avere ulteriori informazioni preliminari sul possibile impatto della manutenzione è stato ricavato il seguente grafico:

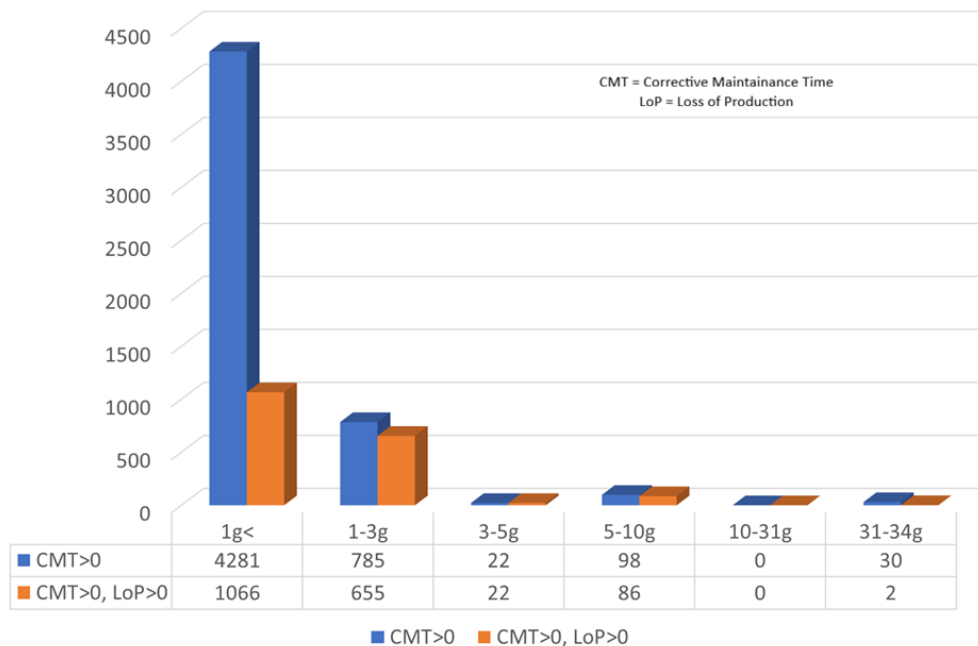


Figura 6-5 - Distribuzione della durata dei guasti (CMT) e incidenza sulle perdite di produzione. Il grafico confronta il numero totale di eventi manutentivi con quelli che hanno generato una perdita di produzione (Loss of Production), suddivisi per classi di durata in giorni (g).

Nel grafico di figura 6-5 le colonne blu rappresentano la distribuzione dei modi di guasto per durata del CMT necessario per la rimessa in servizio. Le colonne arancioni, invece, computano solamente i modi di guasto per i quali in FMEA è stato valutato un impatto sulla produzione in relazione ai CMT riscontrati. Come è ben visibile per l'82% dei modi di guasto, a prescindere dalle perdite che possono causare, il CMT è molto ridotto risultando inferiore a un giorno. Ciò riflette in parte quanto trovato già nel Registro degli Asset dove il 69% di tutti gli elementi censiti erano stati classificati come secondari (valvole, trasmettitori...) per i quali è stato riscontrato che:

- Le operazioni di manutenzione richiedono poco tempo;
- È possibile applicare una strategia di sostituzione del componente piuttosto che riparazione. Non viene conteggiato in CMT dunque il termine MRT.

Risultano ancora abbastanza numerosi i guasti con CMT della durata compresa tra 1 e 3 giorni mentre sono molto pochi (meno del 3%) quelli che richiedono tempi di recupero superiori ai 3 giorni. È importante notare che, sebbene siano pochi i modi di guasto con CMT estesi, la severità dei guasti cresce drasticamente. Per gli FFM con tempi di manutenzione correttiva inferiori al giorno solo nel 24,9% si è ipotizzata una perdita di produzione a causa degli effetti del guasto stesso o della riparazione. Questa percentuale di casi in cui si verifica una perdita di produzione sale però a:

- 83,44% per modi di guasto con CMT compreso tra 1 e 3 giorni;
- 100% per modi di guasto con CMT compreso tra 3 e 5 giorni;
- 87,76% per modi di guasto con CMT compreso tra 5 e 10 giorni.

Non sono stati riscontrati casi in cui il CMT avesse durata tra i 10 e i 31 giorni, mentre sono stati individuati 30 modi di guasto con tempi di recupero per manutenzione correttiva valutati in 31-34 giorni. Solo in due casi si è valutata una perdita effettiva di produzione nonostante la severità del guasto e dell'intervento di recupero necessario, ma ciò non deve sorprendere anche se fortemente in controtendenza con quanto discusso finora. Innanzitutto, questi 30 modi di guasto sono tutti identici e interessano lo stesso tipo di componente: rottura (RUP) di serbatoi di grandi dimensioni. I serbatoi interessati, 30 in totale, sono quelli di stoccaggio delle materie prime, dei prodotti e scarti dell'unità di pretrattamento e di stoccaggio finale dei prodotti della bioraffineria. I lunghi tempi sono quindi giustificati dai trattamenti di pulizia e svuotamento (TOST), ripristino condizioni operative (BIST), ma soprattutto per la manutenzione vera e propria per la quale è stata valutata una strategia di riparazione e tempi MRT pari a 720 h ricavati dal database IOGP [20] e riportati nel Database dei Parametri R&M. Nonostante questi lunghi tempi non sono attese perdite in 28 dei 30 casi perché a livello di progetto è prevista la presenza di più serbatoi identici per lo stesso scopo garantendo una forte ridondanza. Ad esempio, i serbatoi di stoccaggio finali del SAF sono addirittura 5. I due casi in cui si è valutata una perdita di produzione interessano invece due serbatoi che non hanno ridondanza.

In conclusione, l'analisi di manutenibilità ha permesso quindi di completare la valutazione prettamente qualitativa degli effetti dei guasti e delle riparazioni, elaborata in sede di FMEA, grazie alla quantificazione temporale delle attività di manutenzione. L'integrazione dei tempi delle fasi di messa in sicurezza (TOST), riparazione attiva (MRT) e riavvio (BIST) ha consentito di definire il tempo correttivo di manutenzione (CMT) per ogni specifico modo di guasto analizzato. I risultati restituiscono infine una fotografia chiara delle dinamiche manutentive della bioraffineria. Una solidissima maggioranza degli interventi (82%) richiede tempi di ripristino inferiori alle 24 ore, ma la probabilità di subire perdite di produzione al verificarsi di un guasto subisce un'impennata drastica al crescere del CMT. Ciò è da ritenersi coerente con l'aumento della complessità degli interventi, arrivando fino al 100% per fermi compresi tra i 3 e i 5 giorni. Tuttavia, come dimostrato dal caso particolare dei serbatoi di stoccaggio, l'analisi ha confermato che tempi di riparazione estremamente estesi non si traducono in fermi impianto se sono presenti elementi di riserva che mitigano la situazione. A questo punto dello studio, sono stati così definiti e quantificati tutti i "mattoni" fondamentali del comportamento della bioraffineria:

- Le frequenze di guasto (Database dei Parametri R&M) e la mappatura delle criticità (FMEA);

- I tempi di ripristino per la manutenzione correttiva e la ciclicità e i tempi di arresto per la manutenzione preventiva programmata (Analisi di Manutenibilità).

Tuttavia, lo scenario che tale analisi consentirebbe di descrivere è ancora statico, privo della reale complessa dinamicità delle attività della bioraffineria e del manifestarsi nel tempo dei guasti e degli interventi di manutenzione programmata. Pertanto, quanto fino ad ora costruito e valutato, in questo e nei capitoli precedenti, non è stato un punto d'arrivo, bensì il punto di partenza per l'ultimo step dello studio RAM condotto. Nel successivo capitolo dedicato all'Analisi di Disponibilità, infatti, tali risultati hanno alimentato il modello di simulazione stocastica (metodo Monte Carlo), il cui fine ultimo è stato il calcolo rigoroso dell'effettiva disponibilità produttiva dell'impianto.

7 ANALISI DI DISPONIBILITA' PRODUTTIVA

In questo capitolo è infine descritto come è stata calcolata la disponibilità produttiva per la bioraffineria oggetto di studio di questa tesi. Con il percorso metodologico seguito ed esposto nei precedenti capitoli è stato possibile definire il perimetro dell'analisi e le caratteristiche dell'impianto:

- Il Registro degli Asset ha catalogato i componenti critici dell'impianto e, raggruppandoli in famiglie, si è creato il Database dei Parametri R&M individuando per ciascuna i modi di guasto con i relativi parametri di guasto (MTTF) e riparazione (MRT);
- La FMEA ha successivamente analizzato tutti i possibili modi di guasto ad essi associati e gli effetti dei guasti e delle riparazioni;
- L'Analisi di Manutenibilità (AM) ha permesso la stima dei tempi necessari al ripristino delle funzionalità degli oggetti interessati da un guasto e della bioraffineria considerando tutti i tempi tecnici degli interventi. Sono stati considerati anche i due interventi preventivi programmati di fermo impianto.

Per FMEA e AM sono stati ricavati anche dei risultati relativi alle unità funzionali più interessate da guasti e quali le attività di manutenzione che richiedono più tempo. Tuttavia, pur rappresentando una buona base per la comprensione del comportamento, questi risultati restituiscono una rappresentazione "statica" della bioraffineria. La FMEA, ad esempio, non fornisce una modellazione temporale delle occorrenze, non descrive in modo probabilistico la distribuzione degli eventi nel corso della vita operativa dell'impianto ed è stata condotta con la logica del guasto singolo, non considerando dunque guasti multipli contemporanei. Analogamente l'Analisi di Manutenibilità, sebbene permetta di stimare i tempi necessari per il ripristino delle funzionalità, non considera le dinamiche con cui i guasti si manifestano nel tempo né le strategie di manutenzione. Per superare tali limiti e rappresentare in modo più realistico il comportamento operativo della bioraffineria è necessario tenere conto dei dati del Database dei Parametri R&M, quali i tempi medi a guasto (MTTF o FPPD) e di riparazione (MTTR), conducendo un'analisi dinamica del sistema mediante simulazione stocastica. È stata pertanto adottata la metodologia Monte Carlo, simulando numerosi scenari operativi con sequenze di eventi di guasto e riparazione distribuite nel tempo secondo le rispettive occorrenze statistiche. Attraverso un elevato numero di iterazioni è stato infatti possibile ottenere una stima robusta delle prestazioni complessive dell'impianto.

Lo strumento impiegato per realizzare tali simulazioni è stato Maros v9, un software sviluppato da DNV. Attraverso un'interfaccia grafica, Maros consente di costruire un modello comportamentale dinamico del sistema mediante una logica RBD (Reliability Block Diagram), in cui i blocchi rappresentano i sottosistemi, i singoli elementi e le relazioni funzionali della bioraffineria. Il software realizza una simulazione event-driven, tenendo conto di guasti, configurazione dell'impianto, capacità produttiva, manutenzione, logistica e logiche operative. Infine, stima l'effetto di tali eventi su produzione, continuità del servizio e tempi di fermo.

I guasti non sono più trattati come eventi isolati, ma come fenomeni distribuiti nella vita della bioraffineria in funzione di:

- parametri di affidabilità;
- interdipendenze tra gli elementi e le diverse unità di processo;
- tempi di ripristino valutati sia per la manutenzione correttiva che per quella preventiva programmata.

Riguardo la modellazione con gli input necessari e le ipotesi formulate si rimanda per una migliore trattazione al paragrafo successivo.

I risultati ottenuti, infine, hanno permesso di centrare l'obiettivo finale di questo lavoro di tesi: la valutazione delle prestazioni complessive del sistema in termini di produzione annua. Approfondendo di più l'analisi si è potuto apprezzare il contributo delle perdite dovute a guasti, interventi manutentivi e limitazioni operative. L'analisi, quindi, ha consentito di quantificare il contributo dei diversi sottosistemi, unità operative, singoli componenti nonché quello della manutenzione preventiva all'indisponibilità totale dell'impianto. Ciò fornisce una buona base conoscitiva necessaria alla valutazione di possibili interventi di miglioramento, indirizzando in maniera mirata gli sforzi di ottimizzazione. Per il caso studio è stata dunque sviluppata e presentata una seconda simulazione ottimizzata sia in termini di modello, rilassando una delle ipotesi di carattere conservativo riguardo i modi di guasto, sia proponendo un intervento sull'architettura dell'impianto. Lo studio è stato quindi concluso confrontando i risultati della prima simulazione (caso base) con gli equivalenti di un medesimo studio appartenente ad una raffineria tradizionale. Ciò ha permesso di identificare i differenziali di performance e validare il grado di maturità tecnologica della bioraffineria.

Nel paragrafo a seguire viene dettagliato come è stato creato il modello, quali input ed ipotesi si siano resi necessari e vengono presentati anche esempi pratici del funzionamento della logica del software.

7.1 Modello, input ed ipotesi

Per poter eseguire le simulazioni sul software Maros è stato necessario convertire l'intera bioraffineria in una particolare rete logica a blocchi che rappresenta il sistema in termini di relazioni funzionali. L'analisi FMEA condotta ha già investigato qualitativamente le relazioni funzionali e le relative misure di mitigazione, quali ridondanze, buffer e treni paralleli, ai fini della valutazione del comportamento del sistema e della sua disponibilità. I risultati di tali analisi sono stati quindi tradotti nella struttura e nelle logiche con cui è stato realizzato il modello disponendo in maniera opportuna i blocchi. Più nel dettaglio sono stati adoperati:

- **Blocchi di nodo:** raggruppano anche più unità funzionali e funzioni logiche per consentire un rapido colpo d'occhio sull'organizzazione logica dell'intera bioraffineria.
- **Blocchi di Sistema:** hanno consentito di strutturare il modello in una configurazione gerarchica, raggruppando in un unico elemento tutti gli oggetti di una stessa unità o treno, rendendo l'intera struttura più snella e comprensibile.
- **Blocchi Apparecchiatura:** contengono i dati di affidabilità e manutenzione (MTTF, FPPD, MRT) per ogni modalità di guasto di ogni elemento considerato come da indicazione data in FMEA (AA SoW). In base all'architettura dell'impianto, questi blocchi possono essere organizzati all'interno dell'**unità blocco parallelo**. Questa permette di suddividere i flussi su più elementi o treni e di considerare gli elementi ridondanti assegnando come modo di funzionamento la tipologia "active" (attiva, per gli oggetti normalmente in marcia) o "passive" (passiva, per gli oggetti di riserva).
- **Blocchi Programmati:** contengono i dati relativi alla manutenzione preventiva e possono essere riferiti a singoli elementi (es. campagna di manutenzione delle turbine) o all'intero sistema (fermate generali o *turnarounds*). Nel caso della bioraffineria ne è presente uno riferito alla sostituzione dei catalizzatori nei reattori e un altro per la fermata generale. Sono programmati inserendo la frequenza dell'intervento e la durata dello stesso. In questo modo il software apprende informazioni sul tempo in cui l'apparecchiatura o il sistema risulteranno indisponibili a causa delle attività di manutenzione preventiva.
- **Blocchi condizionali:** utilizzati per rappresentare vincoli operativi o logiche non rappresentabili tramite semplici connessioni dirette come, ad esempio, lo spegnimento d'emergenza dell'intero impianto dovuto a particolari guasti. In questo modo, se il guasto fosse su un ramo di parallelo, il software non tenterebbe, erroneamente, di aggirarlo sfruttando gli altri rami, ma replicherebbe le corrette procedure operative della bioraffineria.

Con i blocchi non sono stati tradotti dunque in elementi della simulazione i soli oggetti della bioraffineria, ma anche particolari logiche di funzionamento. L'insieme di questi blocchi ha portato alla realizzazione del modello rappresentato nelle seguenti immagini:

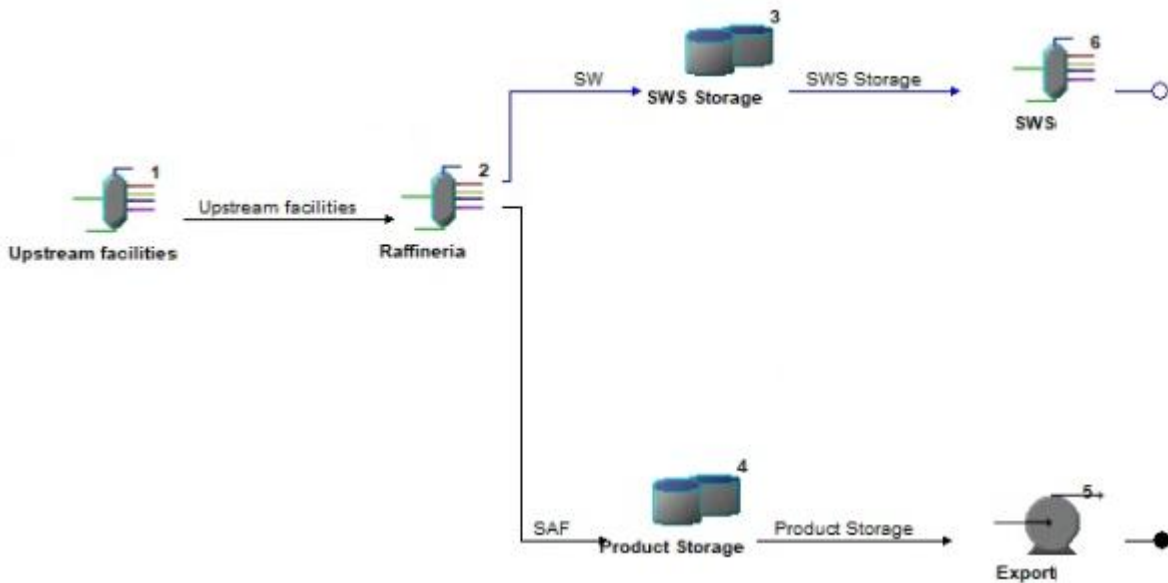


Figura 7-1 - Modellazione a “blocchi di nodo” della bioraffineria realizzata su Maros. Si distinguono in uscita dal nodo raffineria il flusso produttivo (SAF) e quello delle acque acide di scarto (SW)

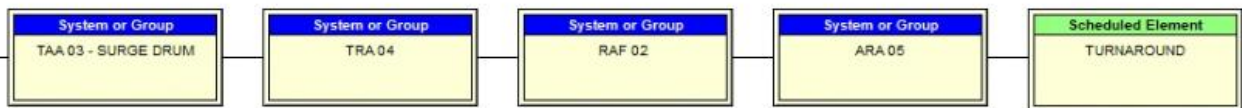


Figura 7-2 – Modellazione dei “blocchi sistema” e “blocco programmato” del nodo “Raffineria” realizzata su Maros.

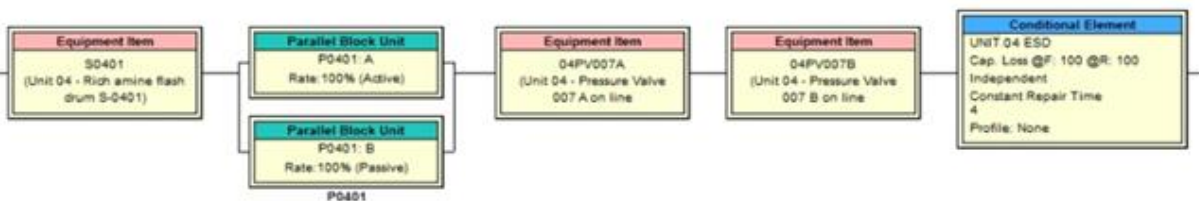


Figura 7-3 – Modellazione dei “blocchi elemento”, “blocco parallelo” e “blocco condizionale” del blocco sistema “TRA 04” realizzata su Maros.

La figura 7-1 mostra la modellazione a “blocchi di nodo” della bioraffineria e descrive la catena produttiva della bioraffineria, partendo dall'approvvigionamento della materia prima fino alla distribuzione dei prodotti finiti e alla gestione dei sottoprodotti. Il flusso ha origine nelle Upstream Facilities (Nodo 1), che rappresentano l'interfaccia con la fornitura esterna della biomassa e pertanto conterrà gli elementi e le logiche di funzionamento associate alla ricezione e scarico. La materia prima

viene inviata alla Raffineria (Nodo 2), il "cuore" del processo. Nel nodo avvengono tutti i processi sulla materia prima e vi è stata inclusa, dunque, anche l'unità di pretrattamento. La raffineria agisce come un nodo critico: un arresto in questa sezione interrompe l'intero flusso a valle, a meno che non siano previste ridondanze interne non visibili in questa vista di alto livello. Da questo nodo emergono dunque due linee: una di prodotto denominata per semplicità SAF (ma viene prodotto contemporaneamente pure il Diesel HVO) e l'altra di sottoprodotto denominata SW (Sour Water – Acqua Acida). Il prodotto viene inviato al Product Storage (Nodo 4) che contiene al suo interno tutti i serbatoi di stoccaggio finale che fungono da "polmone" (buffer). Se l'unità di esportazione a valle subisce un guasto, la raffineria può continuare a produrre finché il serbatoio non raggiunge la massima capacità. L'Export (Nodo 5) è il punto di consegna finale che si interfaccia con l'esterno attraverso gli elementi di carico e invio. Con la stessa logica lavora il ramo parallelo di sottoprodotto dell'acqua acida che si occupa della sua raccolta (Nodo 3) e trattamento (Nodo 6) con i processi spiegati per l'unità di Trattamento Acque Acide esposti nel paragrafo 3.1.2.

Le figure 7-2 e 7-3 scendono rispettivamente di livello nel nodo della raffineria e quindi all'interno del "blocco di sistema" dell'unità funzionale di Trattamento e Rigenerazione Ammine (TRA 04).

La figura 7-2 mostra l'organizzazione logica del nodo raffineria in diversi blocchi di gruppo, disposti in serie, seguiti dal "blocco programmato" della manutenzione. Con opportuna impostazione, quest'ultimo è richiamato sugli elementi che, passato il tempo prestabilito inserito all'interno del blocco sistema, devono essere mantenuti facendo così scattare ad esempio l'eventuale fermo dell'impianto per la manutenzione biennale sui catalizzatori dei reattori.

La figura 7-3 mostra invece un estratto di ciò che è stato modellato al livello più basso all'interno del gruppo TRA 04 dove sono distinguibili i "blocchi apparecchiatura", un "blocco parallelo" e uno "condizionale". Il parallelo fa sì che in condizioni normali tutto il flusso (100%) passi attraverso l'unità A impostata come "Active". Nel caso l'unità A fosse indisponibile allora il software commuterebbe il flusso verso l'unità B impostata come "Passive". Il blocco condizionale, similmente a quello programmato, è collegato a tutti i modi di guasto di tutti gli elementi del blocco sistema TRA 04 che, al loro verificarsi, impongono l'arresto d'emergenza. Per questo, in particolare, il modo di guasto è la perdita esterna di acqua acida che farebbe scattare il sistema di rilevazione di sostanze pericolose. Il blocco condizionale, dunque, impone il fermo "tagliando" la linea di flusso e imponendo il tempo di 4h per il ripristino delle condizioni di sicurezza atte a permettere la successiva manutenzione discussa nel capitolo della FMEA.

Il modello così realizzato ricorda per forma quello logico-analitico basato su RBD e la connessione tra i vari elementi determina la corretta continuità della produzione. Per tradurre gli

effetti qualitativi di perdita di produzione valutati in FMEA è necessario istruire Maros sulla capacità produttiva che ogni modo di guasto fa perdere alla sua occorrenza. Ciò è stato realizzato modulando da 0% a 100% i coefficienti “Cap Loss Fail” e “Cap Loss Repair” (rispettivamente “capacità persa per guasto/riparazione”) all’interno di ogni blocco apparecchiatura per ciascun modo di guasto. È importante distinguere questi coefficienti dai valori di perdita riportati precedentemente nella FMEA. Mentre in quest’ultima indicano l’effetto finale attendibile sull’intero sistema, in Maros invece descrivono l’effetto locale del guasto e sarà poi la rete logica a calcolare l’effetto globale.

Per chiarire questa importante differenza, si consideri la FMEA sulle pompe P-0401 A/B della precedente figura 7-3:

Functional Location	Operating Status	FFM Code	Failure Effect @Failure	Failure Effect @Repair	SD Level	LoP [%] @failure	LoP [%] @repair
P0401A	D	EXL	External release and inability to send the lean amine to the final user. No shutdown because the spare pump can be put into service	n/a	N	0	0
P0401A	D	FTS					
P0401A	D	OCF	Critical pump failure and shutdown. Inability to supply the lean amine to the final user. No shutdown because the spare pump can be put	n/a	N	0	0

Figura 7-4 - Estratto della FMEA sulle pompe P-0401 A dell’unità di Trattamento e Rigenerazione Ammine (TRA) le cui LoP (Loss of Production) a guasto e riparazione sono valutate nulle.

Mentre nel modello sono stati riportati:

Equipment	Tag String	Mode	Cap Loss Fail	Cap Loss Repair
P0401A	Unit 04 - Amine regenerator bottom pump P-0401	EXL	100%	100%
P0401A	Unit 04 - Amine regenerator bottom pump P-0401	OCF	100%	100%

Figura 7-5 – Modellazione dei modi di guasto della pompa P-0401 A dell’unità di Trattamento e Rigenerazione Ammine (TRA) con i valori di Cap Loss Fail e Cap Loss Repair impostati al 100%. In questo modo Maros può simulare l’interruzione della linea se dovesse presentarsi uno dei due modi di guasto.

I due valori al 100% (figura 7-5) servono quindi a forzare il software a spostare il flusso di produzione sulla pompa di riserva dove sarà presente anche il modo di guasto FTS. Nel caso in cui intervenisse la pompa di riserva e Maros simulasse per essa un guasto FTS, allora il software riconoscerà che non ci sono strade alternative e bloccherà la produzione. Stessa cosa si verificherebbe se occorresse un altro guasto che ne interrompesse il suo funzionamento con l’unità marciante ancora indisponibile. Maros inizierebbe dunque il conteggio del tempo di fuori servizio dell’impianto e dell’indisponibilità.

Realizzata la struttura, recuperati e riportati i dati e le correlazioni logiche da tutte le precedenti fasi di studio, è stata avviata la simulazione Monte Carlo (MC) per la stima della disponibilità produttiva, il numero di guasti attesi e la scomposizione dell'indisponibilità. La simulazione, ciclo dopo ciclo, approssima la probabilità di determinati esiti dipendenti dagli eventi che si possono manifestare nell'impianto eseguendo molteplici prove e utilizzando variabili casuali lungo il tempo di missione considerato.

Per avere una buona robustezza dei risultati finali per l'analisi condotta, data la complessità dell'impianto, si è ritenuto necessario eseguire e sovrapporre 1000 simulazioni considerando una vita utile della bioraffineria pari a 20 anni. Un numero di simulazioni così elevato, al pari della vita utile, sono comunque standard di settore per questo tipo di impianti. A conferma della validità statistica dell'analisi, si riporta di seguito la curva di convergenza della disponibilità produttiva media (running medium efficiency per il software) la cui osservazione è stata fondamentale per verificare che il numero di cicli impostato sia stato sufficiente a stabilizzare il risultato:

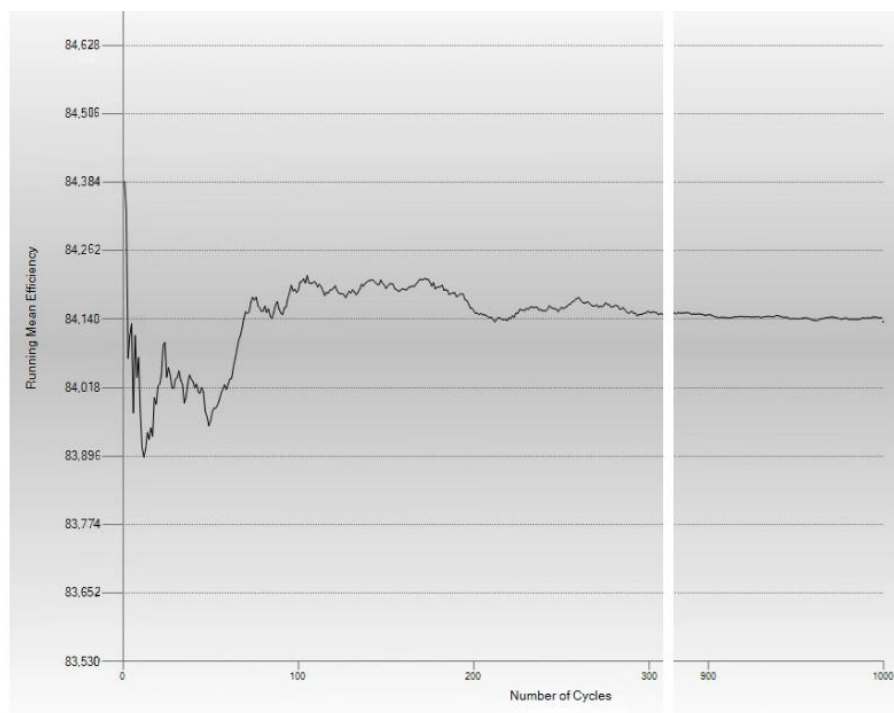


Figura 7-6 - Grafico di convergenza della Running Mean Efficiency (la disponibilità media produttiva) elaborato da Maros in funzione del numero di cicli.

Come si evince dal grafico della figura 7-6, nelle prime fasi la curva presenta marcate oscillazioni. In questo intervallo, i singoli eventi rari o critici (come guasti gravi o fermate prolungate) hanno un peso sproporzionato sulla media, rendendo il dato ancora incerto. All'aumentare delle prove quindi le oscillazioni iniziano a smorzarsi per il prevalere della "legge dei grandi numeri" che bilancia le

variabilità stocastiche, portando la stima verso un valore più rappresentativo della realtà operativa dell'impianto. Nella parte finale della curva, l'andamento diventa pressoché piatto, stabilizzandosi intorno al valore di disponibilità produttiva complessiva dell'84,14% e confermando quindi l'ottima scelta nell'aver eseguito 1000 iterazioni.

Sono quindi presentati e dettagliati i risultati ottenuti nel successivo paragrafo.

7.2 Risultati dell'analisi: caso base

Come anticipato, la disponibilità media complessiva della bioraffineria, valutata sulla base delle 1000 simulazioni in un orizzonte di vita utile di 20 anni è pari all'84,14%. Alternativamente, si può considerare la sua complementare: l'indisponibilità media complessiva pari al 15,86%. Questo risultato è complessivo, non è differenziato per i due prodotti SAF e Diesel HVO che, al netto dello stoccaggio finale, seguono la medesima catena di produzione e sono ricavati dallo stesso fluido.

Per prima cosa si è deciso di estrarre tutti i valori di disponibilità produttiva annuali alla ricerca di particolari ciclicità temporali riportate nell'istogramma a seguire:

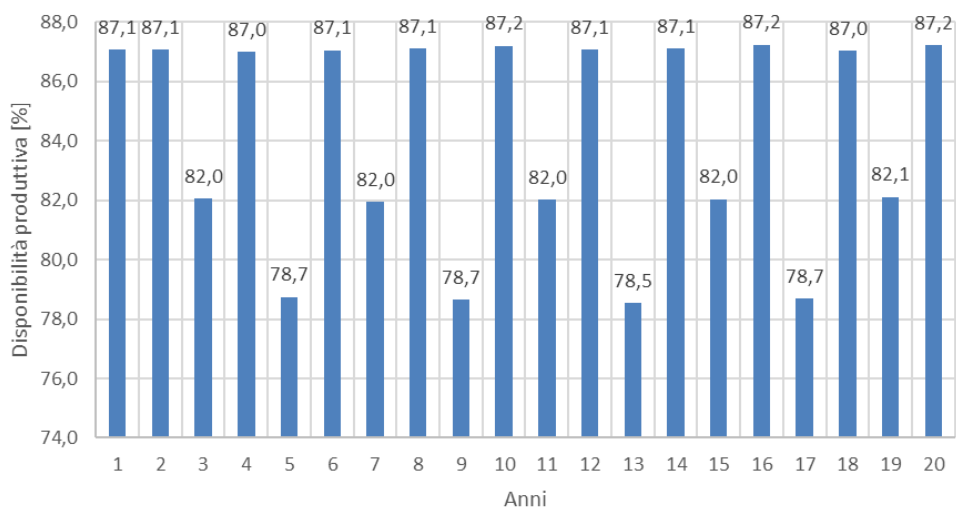


Figura 7-7 - Andamento della disponibilità media produttiva della bioraffineria sull'orizzonte di vita utile di 20 anni. Si nota subito la presenza di tre regimi produttivi periodici.

Dalla figura 7-7, sono ben distinguibili tre regimi operativi principali dipendenti dagli interventi di manutenzione preventiva discussi in 6.2.3. Negli anni in cui non sono previste le fermate programmate (ad esempio gli anni 1, 2, 4, 6, ecc.), la bioraffineria mantiene una disponibilità più alta, oscillante tra l'87% e l'87,2%. Questo valore può essere visto come un target operativo standard al netto della manutenzione ordinaria e dei guasti accidentali. Ogni due anni però, al netto del primo

biennio, avendo ipotizzato i primi interventi manutentivi ritardati, si osserva una flessione sistematica della disponibilità verso valori prossimi a:

- 82% nelle annualità in cui è programmata la sostituzione dei letti catalitici dei reattori che portano a un fermo impianto di 21 giorni
- 79% nelle annualità in cui è programmata la fermata generale della bioraffineria, della durata di 35 giorni, all'interno della quale è sempre effettuata la sostituzione dei letti catalitici dei reattori

Il risultato complessivo della disponibilità produttiva annuale, sebbene sia un indicatore di performance molto utile a livello manageriale per stimare le perdite economiche, risulta insufficiente per la fase operativa. Non è possibile, infatti, identificare le unità/gli elementi più critici, la presenza di difetti di design e limiti strategici o ancora, ad esempio, quantificare l'efficacia dei serbatoi di stoccaggio nel mitigare gli impatti sulla produzione. Si è proceduto all'analisi dei dati tramite il software estraendo, innanzitutto, la scomposizione dell'indisponibilità nei contributi dovuti ai guasti (ovvero alla manutenzione correttiva), a loro volta riportati per unità funzionale, e alla manutenzione preventiva. Si è riscontrata la seguente situazione riassunta nella tabella 7-1:

Tabella 7-1 - Prospetto riassuntivo dell'indisponibilità assoluta e relativa per unità funzionali e contributo della manutenzione preventiva.

Unità funzionale	Indisponibilità assoluta [%]	Indisponibilità relativa [%]
Raffinazione - UF 02	11,63	73,33
Trattamento e rigenerazione ammine - UF 03	0,76	4,79
Serbatoi - UF 06	0,07	0,44
Trattamento acque acide - UF 04	0,03	0,19
Scarico-Trasferimento-Carico - UF 07	0,03	0,17
Pretrattamento - UF 01	< 0,01	< 0,01
Acqua di raffreddamento - UF 05	< 0,01	< 0,01
Totale Manutenzione Correttiva	12,52	78,25
Manutenzione Preventiva	3,34	21,06
Totale	15,86	100

La scomposizione dell'indisponibilità, come mostrato dalla tabella 7-1, è riportata per ogni voce in termini assoluti, per quantificare l'impatto reale, e in termini relativi, per evidenziare il peso percentuale sul totale del valore assoluto complessivo.

I risultati evidenziano una netta prevalenza della componente non programmata. La manutenzione correttiva necessaria al ripristino delle operazioni in seguito ai guasti, infatti, rappresenta la voce principale contribuendo per il 78,25% all'indisponibilità totale. Al contrario, la manutenzione preventiva legata agli interventi programmati biennale (sostituzione catalizzatori reattori) e

quadriennale (fermo generale di manutenzione) incide solo per il 21,06%. Questo sbilanciamento suggerisce che l'efficienza globale della bioraffineria è influenzata maggiormente dall'affidabilità intrinseca dei componenti e da eventi stocastici piuttosto che dalle fermate pianificate. La bioraffineria è dunque sensibile a guasti critici che, quando si verificano, comportano fermate prolungate con importanti perdite di produzione.

Entrando nel dettaglio sull'indisponibilità per unità funzionale, è confermato quanto in buona parte anticipato dai risultati della FMEA. Già in quella fase, sebbene solo sul maggior numero di guasti che potenzialmente causano una perdita totale di produzione, era stata valutata l'unità di raffinazione come quella più critica. Al secondo posto, con peso significativamente minore, era stata individuata l'unità di pretrattamento e, con ancora meno importanza, tutte le altre. Quanto precedentemente valutato in FMEA per il trattamento però, non è qui riscontrato: l'unità di pretrattamento ha impatto praticamente trascurabile. Maros, infatti, ha introdotto le variabili tempo e affidabilità e la dinamica di funzionamento della bioraffineria. Le ha quindi legate all'architettura dell'unità di pretrattamento, basata su 3 linee indipendenti, ciascuna per una tipologia di materia prima trattata, e la presenza dei grandi serbatoi di accumulo interposti tra le unità di pretrattamento e raffinazione.

Riguardo i serbatoi in particolare, in fase di FMEA si era optato per un approccio prudente immaginando gli effetti finali di guasto e riparazione come se questi non fossero presenti. Ogni singola interruzione dell'unità di pretrattamento, o un suo rallentamento (es: una linea fuori uso), si traduceva in FMEA istantaneamente in una certa perdita di produzione a valle. Maros, invece, considerando la loro autonomia residua e tenendo conto di tutte le portate in ingresso e uscita, modella la reale dinamica di questi importanti elementi e l'effetto positivo che ne deriva per l'intera bioraffineria. Il risultato ottenuto in tabella 7-1 sull'indisponibilità, infatti, è da ritenersi espressione del fatto che l'accumulo tra le due unità è in grado di garantire una fornitura alla raffinazione superiore alla durata media dei guasti che colpiscono il pretrattamento. Di conseguenza, si è quasi totalmente annullato il peso di questa unità funzionale sul valore di indisponibilità media complessiva. Quanto per l'unità di pretrattamento accade anche per l'unità di trattamento delle acque acide grazie all'azione dei già citati serbatoi S-0620 e S-0621 (si veda paragrafo 5.2). Questo risultato, apprezzabile solamente grazie alla simulazione con Maros certifica, pertanto, l'importanza di elementi come i serbatoi intermedi. Essi sono capaci, infatti, di funzionare come polmoni logistici mitigando potenziali cause di indisponibilità che penalizzerebbero le prestazioni produttive della bioraffineria.

Allo scopo di avere un risultato di dettaglio maggiore, la scomposizione dell'indisponibilità è stata ulteriormente approfondita a livello di singolo componente per evidenziare criticità e poter

valutare strategie d'intervento su questi. Per prima cosa Maros ha individuato per ogni unità il numero di elementi che in caso di guasto o malfunzionamento, hanno un impatto diretto sulla capacità produttiva: gli OCE (Operational Critical Element – Elementi Critici Operativi). Sono stati individuati 221 OCE sui 3157 elementi censiti nel Registro degli Asset. È interessante notare come siano molto pochi, il 7% del totale, gli elementi critici tali che da un guasto possa discendere infine un impatto sulla produzione dell'impianto. Si è constatato che gli OCE sono così distribuiti per unità funzionale:

Tabella 7-2 – Distribuzione degli OCE (Operational Critical Element) per unità funzionale. Si noti come la maggior parte siano concentrati nell'Unità di Raffinazione.

Unità funzionale	N° OCE	OCE [%]
Raffinazione - UF 02	180	81,45
Trattamento e rigenerazione ammine - UF 03	26	11,76
Serbatoi - UF 06	7	3,17
Trattamento acque acide - UF 04	2	0,9
Pretrattamento - UF 01	0	0
Acqua di raffreddamento - UF 05	4	1,82
Scarico-Trasferimento-Carico - UF 07	2	0,9
Totale	221	100

E che i 16 OCE più critici in termini di indisponibilità siano i seguenti:

Tabella 7-3 - Indisponibilità assoluta e relativa dei 16 OCE più critici. Si noti come i primi 15 appartengano tutti all'Unità di raffinazione.

Tag	Descrizione elemento	UF	Indisponibilità assoluta [%]	Indisponibilità relativa [%]
P0281	Compressore di riciclo	02	0,669	4,22
F0202	Fornace sezione B	02	0,575	3,63
F0203	Fornace sezione C	02	0,569	3,59
F0201	Fornace sezione A	02	0,54	3,39
ST0212	Stripper Kerosene	02	0,19	1,17
SC0245	Scambiatore blowdown	02	0,184	1,16
SC0213	Scambiatore ker-carica nuova	02	0,183	1,16
SC0238	Raffreddatore prodotti stripper	02	0,183	1,15
SC0233	Raffreddatore Naphta	02	0,183	1,15
SC0215	Raffreddatore Kerosene	02	0,182	1,15
TVP0281	Turbina a vapore P0281	02	0,182	1,15
SC0203	Scambiatore flussi stripper-isomerizzazione (2 stadi)	02	0,182	1,15
SC0201	Scambiatore carica combinata (3 stadi)	02	0,181	1,14
SC0204	Scambiatore flussi carica-frazionatore (2 stadi)	02	0,181	1,14
SC0202	Scambiatore carica combinata isomerizzazione (2 stadi)	02	0,18	1,13
SC0301	Scambiatore ammina ricca/povera (2 stadi)	03	0,18	1,13

Tra tutti gli elementi riportati in tabella 7-3 spiccano in maniera importante il compressore di riciclo (P-0281) e le tre fornaci (F-0201/02/03), ma non trascurabile è pure la turbina a vapore TVP-0281 che mette e mantiene in moto proprio il compressore di riciclo. Pur essendo questi solo 5 dei 221 OCE, il loro contributo relativo cumulato è pari al 16,18% del totale, il 2,535% dell'indisponibilità assoluta. Compressore e turbina globalmente incidono sull'indisponibilità assoluta per lo 0,852%, con un peso relativo dunque del 5,37%.

Per quanto riguarda le fornaci un'indisponibilità così importante è legata ai valori di tasso di guasto ricavati da OREDA che risultano elevati. Per il compressore di riciclo e la turbina a vapore, invece, ad incidere fortemente potrebbe essere il fatto che, a differenza di tutti gli altri compressori/pompe e relativi motori/turbine, questi non siano ridondati.

Non è sorprendente, infine, che i primi 15 elementi per contributo di indisponibilità appartengano all'unità di raffinazione. Ciò conferma il ruolo di collo di bottiglia seriale dell'unità già emerso nella scomposizione di livello superiore della tabella 7-1.

In sintesi, dunque, l'analisi ha restituito un valore di disponibilità media complessiva dell'84,14% ovvero un'indisponibilità del 15,86%. Dalla scomposizione di tale valore è emerso che la componente accidentale sia ampiamente preponderante su quella programmata: la manutenzione correttiva vale il 78,25% dell'indisponibilità rispetto al 21,75% della manutenzione programmata. L'indagine, quindi, è stata approfondita scomponendo l'indisponibilità per cause accidentali dapprima per unità funzionali, quindi per singolo elemento. Si è scoperto che l'unità di raffinazione è l'unità "collo di bottiglia" dell'impianto e che in essa figurano gli elementi più critici. È stato interessante anche notare che, nonostante la sua complessità, l'unità di pretrattamento ha impatto praticamente trascurabile rispetto alla disponibilità produttiva grazie in parte alla sua architettura, ma soprattutto alla presenza dei serbatoi. Ritornando al risultato globale, l'84,14% di disponibilità rappresenta un risultato di per sé discreto se confrontato con impianti del medesimo settore che, quando operativi, raggiungono valori di disponibilità prossimi al 90%. Considerando però che l'intero studio è stato condotto su un progetto in fase di FEED, il risultato è già di buon valore considerando che l'analisi è stata necessariamente realizzata con ipotesi e assunzioni cautelative.

Alla luce di questa differenza tra la prestazione finale valutata e il benchmark di settore in fase operativa si è sviluppato il successivo paragrafo dove è illustrato un caso "ottimizzato".

7.3 Caso studio ottimizzato

Il caso studio ottimizzato qui presentato mira a massimizzare la disponibilità produttiva dell'impianto, riducendo il gap di quasi 6 punti percentuali tra la disponibilità del caso base e il target operativo finale degli impianti del medesimo settore.

Considerando l'impostazione dello studio e i risultati che ne sono conseguiti, la strategia di ottimizzazione si è articolata intervenendo su due fronti distinti: affinamento metodologico su una delle ipotesi dello studio e intervento mirato sull'architettura della bioraffineria. Questo tipo di attività e le soluzioni adottate portano lo studio in una fase più avanzata verso lo studio di progettazione definitiva, superando i limiti della fase di FEED.

Per quanto riguarda l'ipotesi dello studio, si è deciso, limitatamente agli elementi più critici (OCE) individuati nella tabella 7-3, di superare l'approccio di modi di guasto aggregato scomponendoli nei guasti elementari. Il modo di guasto aggregato, infatti, tende a impattare maggiormente rispetto all'insieme dei singoli modi di guasto che lo costituiscono. Si migliora così la granularità dell'analisi. Si è deciso di intervenire però solamente per gli OCE ritenuti più critici, alcuni dei quali sono riportati nella tabella 7-3 perché, oltre che per semplicità e rapidità, il peso sull'indisponibilità di tutti gli altri elementi si riduce drasticamente. Il vantaggio marginale che ne deriverebbe da questi è dunque ritenuto trascurabile. Si riporta dunque come è stato modellato il compressore di riciclo P-0281 prima e dopo la scomposizione dei modi di guasto aggregati:

Equipment	Tag String	Mode	Description	MTTF
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P0281	EXL	External Leakage	16.5203
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P0281	OCF	Other Critical Failure	0.99852

Figura 7-8 - Modi di guasto aggregati del compressore di riciclo P-0281 dell'Unità di Raffinazione.

Equipment	Tag String	Mode	Description	MTTF
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	AIR	Abnormal instrument reading	7.36485
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	BRD	Breakdown	42.7548
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	ERO	Erratic output	20.7555
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	ELP	External leakage process medium	16.5203
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	ELU	External leakage utility medium	8.00528
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	INL	Internal leakage	18.2066
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	SER	Minor in-service problems	190.259
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	OTH	Other	10.987
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	OHE	Overheating	38.4361
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	PDE	Parameter deviation	3.45925
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	PLU	Plugged/choked	36.2398
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	UST	Spurious stop	3.04983
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	UNK	Unknown	42.1237
P0281	Unit 02 - Recycle Gas Compressor P-0281	VIB	Vibration	3.24766

Figura 7-9 – Scomposizione del modo di guasto aggregato OCF del compressore di riciclo P-0281 dell'Unità di Raffinazione.

Confrontando le figure 7-8 e 7-9 si evince come il modo "Other Critical Failure" sia stato sostituito da ben 13 modi di guasto singoli che descrivono stati di guasto molto più vari e specifici. Tale operazione è stata ripetuta, con le specificità del caso, per gli altri componenti critici della tabella

7-3. Tra gli elementi più critici individuati nella tabella 7-3 questo intervento di ottimizzazione non è stato possibile sulle fornaci a causa di imposizioni progettuali.

Per quanto riguarda l'intervento sull'architettura della bioraffineria il suggerimento è stato fornito dai risultati della tabella 7-3 che individuano il compressore di riciclo P-0281 come il più critico di tutto l'impianto. Sempre tra i più critici si può notare nella stessa tabella anche la turbina a vapore TVP-0281 collegata al compressore. La loro criticità è legata agli alti valori di tasso di guasto riscontrati su OREDA che determinano quindi in fase di simulazione con Maros quanto poi emerso. Questi valori di tasso di guasto però sono stati utilizzati per tutti i componenti della stessa categoria, ovvero per altri compressori e altre turbine a vapore che però non sono risultati ugualmente critici. Dallo studio dei P&ID e dei PFD si è notato che il compressore di riciclo e la turbina, a differenza di analoghe pompe/compressori e relativi motori/turbine, non sono ridondati. Si è quindi deciso di valutare l'effetto di una ridondanza modellando sul software un blocco parallelo. In ogni blocco del parallelo sono presenti un compressore P-0281A/B e una turbina a vapore in serie TVP-0281A/B. Si è realizzata pertanto una configurazione 2x100%, con il gruppo compressore-turbina A in servizio e quello B in riserva:

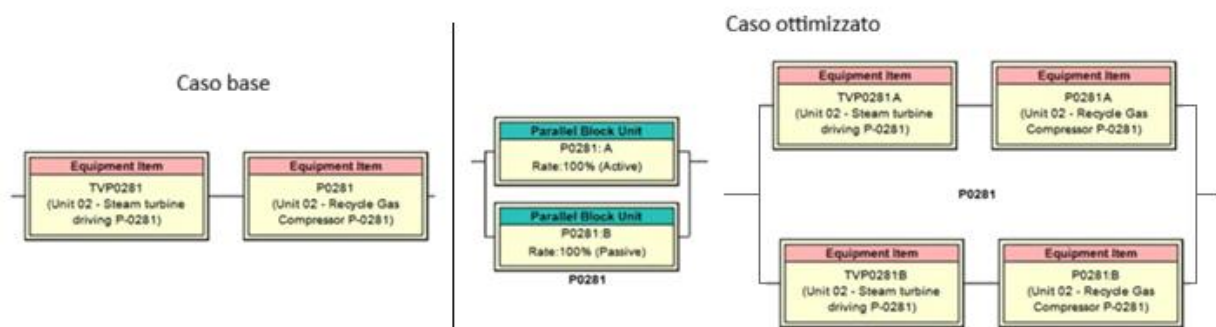


Figura 7-10 - Confronto della struttura a blocchi (RBD) per il gruppo turbocompressore P0281. L'immagine illustra il passaggio dalla configurazione in serie ("Caso base") alla configurazione in ridondanza passiva con standby ("Caso ottimizzato").

La figura 7-10 mostra quanto realizzato sul software Maros. Nel caso base, a sinistra, è presente una singola configurazione in serie turbina-pompa. Nel caso ottimizzato, invece, sono stati introdotti due "parallel block unit" (visibili al centro della figura) che definiscono la logica di ridondanza. La configurazione interna (dettaglio a destra) prevede per ciascun ramo la ripetizione della serie turbina-compressore. In questo modo l'operatività è assicurata anche in caso di fermo di uno dei due rami.

È stata dunque ripetuta la simulazione mantenendo sempre pari a 1000 il numero di cicli simulati e a 20 anni l'orizzonte temporale. Si è ottenuto un importante miglioramento della disponibilità produttiva media complessiva che passa dall'84,14% all'86,02%, un aumento dell'1,88%. In

alternativa è possibile dire che l'indisponibilità si è ridotta dal 15,86% al 13,98%. La disponibilità produttiva presenta il seguente andamento nel corso del tempo:

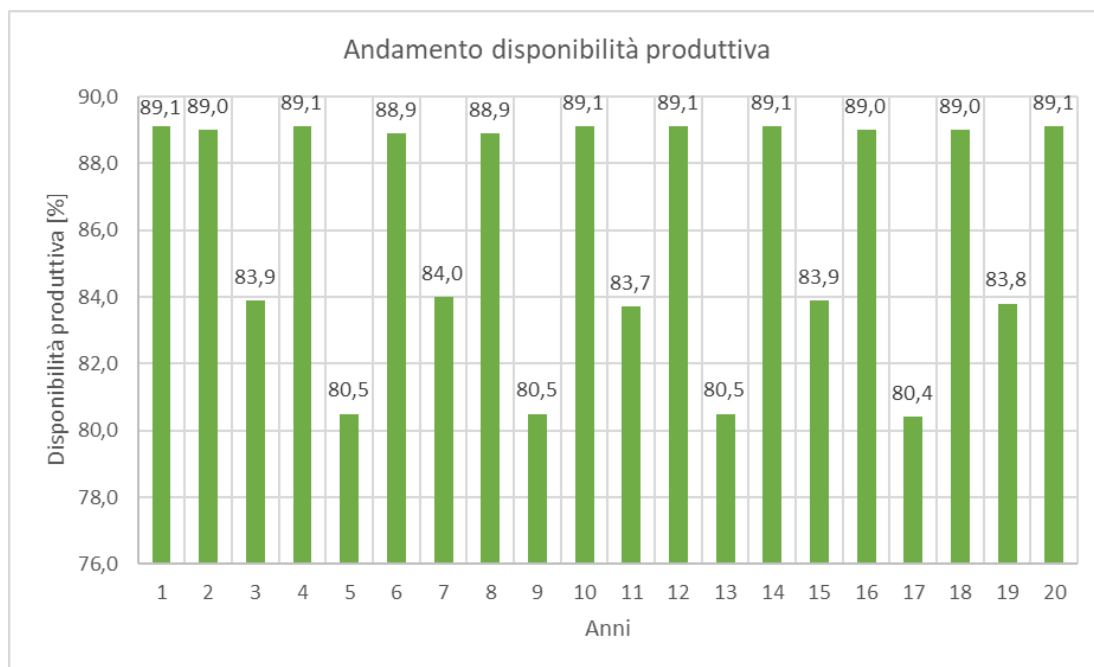


Figura 7-11 - Andamento della disponibilità media produttiva della bioraffineria sull'orizzonte di vita utile di 20 anni. Si nota come permangono i tre diversi regimi di produzione che presentano, tuttavia, valori di disponibilità complessiva più alti.

Osservando l'andamento della disponibilità dalla figura 7-11, permangono sempre i tre regimi principali dovuti alla presenza di interventi di manutenzione preventiva programmata biennale e quadriennale. L'aumento di disponibilità produttiva, tuttavia, si manifesta anche in queste annualità per le quali non si osservano valori al di sotto dell'80%. Nelle annualità in cui non è prevista alcuna attività manutentiva la disponibilità risulta anche superiore all'89%.

Sebbene un incremento di quasi il 2% della disponibilità produttiva possa apparire a prima vista modesto, esso risulta in realtà significativo per la tipologia e la fase progettuale del caso studio. È un valore complessivo che meglio si avvicina al target finale del 90% e affina lo studio condotto in maniera superiore ai limiti e scopi della fase di FEED. Contestualizzando al caso studio stesso l'entità del miglioramento, un aumento dell'1,88% della disponibilità assoluta equivale a tre volte l'indisponibilità dell'elemento più critico (il compressore di riciclo, 0,669%). Considerando l'indisponibilità totale del caso base (15,86%), l'incremento ottenuto rappresenta una riduzione relativa del 12,5%. Si tratta di un miglioramento pari a oltre la metà dell'intero peso che la manutenzione programmata ha sull'indisponibilità della bioraffineria.

La scomposizione dell'indisponibilità del caso ottimizzato sulle varie unità funzionali, confrontata con l'equivalente del caso base, è la seguente:

Tabella 7-4 - Confronto tra i valori di indisponibilità assoluta e relativa (caso "Base" vs caso "Ottimizzato") suddivisi per unità funzionale.

Unità funzionale	Raffineria Tradizionale		Bioraffineria	
	Indisponibilità assoluta [%]	Indisponibilità relativa [%]	Indisponibilità assoluta [%]	Indisponibilità relativa [%]
Raffinazione - UF 02	11,63	73,33	9,79	70,03
Trattamento e rigenerazione ammine - UF 03	0,76	4,79	0,74	5,29
Serbatoi - UF 06	0,07	0,44	0,05	0,36
Trattamento acque acide - UF 04	0,03	0,19	0,03	0,24
Scarico-Trasferimento-Carico - UF 07	0,03	0,17	0,03	0,18
Pretrattamento - UF 01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Acqua di raffreddamento - UF 05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Totale Manutenzione Correttiva	12,52	78,25	10,64	76,11
Manutenzione Preventiva	3,34	21,06	3,34	23,89
Totale	15,86	100	13,98	100

La tabella 7-4 evidenzia come, grazie agli interventi di ottimizzazione, vi siano variazioni nella distribuzione dei contributi all'indisponibilità complessiva del sistema a livello di unità funzionale sia sui valori assoluti che relativi.

L'unità in cui si manifesta la variazione di indisponibilità assoluta più importante è quella della raffinazione RAF 02. Ciò è imputabile al fatto che la maggior parte degli elementi più critici, visti precedentemente nelle tabelle 7-2 e 7-3, sia localizzata proprio in quell'unità. Questa unità ha dunque beneficiato sia dell'intervento sulla scomposizione dei guasti aggregati, che della ridondanza operata sul compressore di riciclo e la turbina a vapore. Come mostrato in tabella anche per altre unità funzionali, sebbene in maniera molto meno apprezzabile, si è registrata una diminuzione dell'indisponibilità compatibile sempre con la miglior caratterizzazione dei modi di guasto. Rimane inalterata, in quanto indipendente dalle ottimizzazioni proposte e realizzate, l'indisponibilità legata alla manutenzione preventiva.

Per quanto riguarda la variazione dei valori relativi di indisponibilità si osserva, con la sola eccezione dell'unità serbatoi, un aumento generalizzato per tutte le altre unità e per la manutenzione programmata. Ciò riflette il calo dell'indisponibilità assoluta dell'unità di raffinazione.

In ottica iterativa di possibili ulteriori ottimizzazioni, al netto del fatto che le migliori potenzialità risiedono sempre nell'unità di raffinazione, diventa quindi più interessante individuare azioni che riducano l'impatto della manutenzione preventiva.

Per interventi al riguardo però è più prudente fare delle valutazioni solo ad impianto avviato, quando si potrà constatare effettivamente l'usura che la bioraffineria subisce. È comune nel settore,

infatti, che in operatività l'intervallo tra un intervento manutentivo e l'altro si dilati e che la durata dello stesso si riduca. In fase di FEED, infatti, si tende ad essere molto cautelativi e conservativi su questi aspetti.

La riduzione dei valori assoluti delle indisponibilità per unità funzionale riflette ovviamente l'effetto complessivo delle riduzioni della stessa su ogni componente. Si riporta di seguito, a confronto con il caso, base un estratto degli 8 OCE più critici del caso ottimizzato:

CASO BASE

Tag	Descrizione elemento	UF	Indisponibilità assoluta [%]	Indisponibilità relativa [%]
P0281	Compressore di riciclo	02	0,669	4,22
F0202	Fornace sezione B	02	0,575	3,63
F0203	Fornace sezione C	02	0,569	3,59
F0201	Fornace sezione A	02	0,54	3,39
ST0212	Stripper Kerosene	02	0,19	1,17
SC0245	Scambiatore blowdown	02	0,184	1,16
SC0213	Scambiatore ker-carica nuova	02	0,183	1,16
SC0238	Raffreddatore prodotti stripper	02	0,183	1,15

CASO OTTIMIZZATO

Tag	Descrizione elemento	UF	Indisponibilità assoluta [%]	Indisponibilità relativa [%]
F0202	Fornace sezione B	02	0,589	4,19
F0203	Fornace sezione C	02	0,572	4,09
F0201	Fornace sezione A	02	0,55	3,93
SC0203	Scambiatore flussi stripper-isomerizzazione (2 stadi)	02	0,186	1,33
SC0205	Scambiatore vapori separatore-gas stripper (2 stadi)	02	0,185	1,32
SC0242	Raffreddatore ammine povere	02	0,185	1,32
SC0212	Scambiatore ker-carica nuova	02	0,184	1,31
SC0218	Raffreddatore Diesel	02	0,183	1,31

Figura 7-12 – Confronto delle indisponibilità assolute e relative degli 8 componenti più critici per il caso “base” e quello “ottimizzato”. Si nota come nel caso “ottimizzato” spariscano sia il compressore di riciclo che lo stripper kerosene, lo scambiatore blowdown e il raffreddatore prodotti stripper.

Come si può ben notare in figura 7-12, non compare più il compressore di riciclo (stessa cosa per la turbina se si considera l'elenco più esteso). Sia la scomposizione dei modi di guasto, sia la ridondanza proposte, hanno fatto sì che questi due oggetti raggiungano insieme un'incidenza sull'indisponibilità assoluta e relativa inferiore allo 0,01%.

I valori di indisponibilità assoluta delle fornaci, per quanto anticipato prima, restano simili a quelli del caso base con leggere oscillazioni dovute all'incertezza stocastica della simulazione. Aumenteranno in maniera marcata invece i valori relativi in seguito alla riduzione dell'indisponibilità degli altri componenti. Per lo stripper kerosene, lo scambiatore di blowdown e il raffreddatore prodotti stripper si è registrato l'effetto positivo della scomposizione dei guasti e infatti non compaiono più nella lista degli OCE più critici del caso ottimizzato.

In conclusione, la figura 7-12 permette anche di dare una stima circa l'impatto specifico dei due interventi di ottimizzazione analizzando il miglioramento ottenuto per il compressore di riciclo con la sua turbina a vapore. Per questi si è passati da un valore complessivo di indisponibilità assoluta pari a 0,852% a un valore inferiore allo 0,01%. Considerando che valori di indisponibilità similmente bassi sono stati riscontrati in altri casi di sistemi pompa/compressore con motore/turbina allora si può stimare che:

- L'ottimizzazione che ha coinvolto la ridondanza abbia inciso sull'indisponibilità assoluta in misura di circa lo 0,8%;
- L'ottimizzazione che ha coinvolto la scomposizione dei modi di guasto abbia inciso invece in misura di circa l'1,1%;

È interessante notare come miglioramenti piuttosto simili siano stati conseguiti da azioni diametralmente opposte essendo la prima focalizzata su un punto ben specifico dell'impianto, mentre l'altra incidente a più largo spettro.

In conclusione, con il presente caso studio di ottimizzazione si è quindi dimostrato come oculati interventi possano impattare positivamente sulla disponibilità media complessiva. Tale miglioramento, frutto di due azioni sinergiche di cui è stato possibile pesare l'impatto, ha inciso con un incremento della disponibilità dall'iniziale 84,14% al 86,02%. Sulla base di questo risultato si ritiene ragionevole che, se fossero disponibili ulteriori informazioni, ci si potrebbe avvicinare ulteriormente al target del 90% degli impianti in piena fase operativa. La fase progettuale di FEED, infatti, ha imposto delle necessarie cautele che quindi nascondono parte delle vere potenzialità produttive della bioraffineria.

A completamento di questo lavoro di tesi, il paragrafo successivo presenta un'analisi comparativa tra il caso base della bioraffineria e un modello equivalente riferito, tuttavia, a una raffineria di tipo tradizionale.

7.4 Comparazione con impianto tradizionale

7.4.1 Premesse

L'ultima fase del presente lavoro di tesi è dedicata al confronto tra i risultati ottenuti per il caso base della bioraffineria con le prestazioni di un impianto di raffinazione tradizionale, grazie all'acquisizione di analogo studio RAM.

Tale comparazione, sebbene riferita a un asset tecnologicamente distinto, assume un elevato valore tecnico e scientifico, in quanto permette di validare il modello RAM della bioraffineria all'interno di un contesto industriale consolidato. È possibile, infatti, isolare le dinamiche prestazionali legate alle unità funzionali e sistemi comuni che, nonostante il passaggio alla tecnologia "bio", mantengono inalterate configurazioni e logiche operative. Pertanto, se certe criticità rilevate per la bioraffineria tendono a ripresentarsi si ha conferma della robustezza delle ipotesi e assunzioni adottate. Parallelamente, si può inoltre valutare l'impatto delle nuove sezioni di processo e della nuova tecnologia "bio" impiegata.

La raffineria tradizionale presa in riferimento (denominata da qui in poi anche come "*benchmark*") raffina petrolio greggio in ingresso realizzando carburanti tradizionali quali Diesel, GPL, Naphtha petrolchimica e da reforming. È un impianto che per fisiologia, grazie alla catena di approvvigionamento ben consolidata del petrolio, elabora in massa 20 volte più materia prima della bioraffineria per la quale è stato condotto il precedente studio di disponibilità. Si è scelto comunque questo impianto grazie ad analogie ritenute più importanti della differenza di volumi produttivi, che non si reputa che possa influenzare significativamente le sue performance di disponibilità produttiva. Entrambi gli impianti, infatti, condividono innanzitutto parte della tecnologia di raffinazione (l'hydroprocessing). L'approccio dell'analisi RAM per la raffineria tradizionale, la fase progettuale in cui è stata condotta (la FEED) e l'orizzonte di vita utile pari a 20 anni, inoltre, coincidono con quelli della bioraffineria analizzata.

I risultati di disponibilità produttiva del benchmark, tuttavia, non sono complessivi dell'impianto come per la bioraffineria, ma ricavati per ogni singola produzione. Ciò perché sono state ritenute presenti importanti differenze nell'approvvigionamento e nel trattamento della materia prima per realizzare i diversi prodotti. Sebbene si potrebbe ritenere opportuno considerare un valore di disponibilità produttiva medio ponderato sui volumi, si è deciso di fare riferimento per l'impianto tradizionale ai risultati ottenuti per la "sezione" Diesel. La produzione di Diesel, infatti, rappresenta da sola per esso l'80% dei volumi produttivi. Dallo studio della documentazione, nella "sezione" Diesel, inoltre, è stato possibile identificare gli equivalenti sistemi di approvvigionamento e trattamento dell'impianto di bioraffineria analizzato. Nel seguito, pertanto, quando si farà riferimento

alla raffineria tradizionale per il confronto con la bioraffineria, si intenderà implicitamente la sola sezione Diesel.

Per garantire la miglior coerenza metodologica nel confronto, inoltre, esso si focalizza primariamente sui rispettivi casi base. Tale scelta permette di comparare le performance nominali di entrambi gli impianti nelle loro configurazioni e gestioni standard. I risultati finali di due scenari di sensitività realizzati per il benchmark, tuttavia, saranno richiamati poiché discendono da interessanti ipotesi e assunzioni già valutate o valutabili sulla bioraffineria.

A seguire quindi il paragrafo dedicato alla comparazione tra i risultati finali dell'analisi di disponibilità produttiva della bioraffineria e della raffineria tradizionale.

7.4.2 Il confronto

I primi risultati messi a confronto sono quelli della disponibilità produttiva nel corso dei 20 anni e il valore medio complessivo:

Bioraffineria		Raffineria tradizionale	
Anno	Disponibilità produttiva media	Anno	Disponibilità produttiva media
1	87,1	1	86,3
2	87,1	2	86
3	82,1	3	85,9
4	87	4	74
5	78,8	5	85,8
6	87,1	6	85,6
7	82	7	85,5
8	87,1	8	73,7
9	78,7	9	85,7
10	87,2	10	86
11	82	11	85,9
12	87,1	12	73,7
13	78,5	13	85,7
14	87,1	14	85,8
15	82	15	86,4
16	87,2	16	73,8
17	78,7	17	86,2
18	87	18	86
19	82,1	19	85,9
20	87,2	20	86
Media complessiva	84,14	Media complessiva	83,49

Figura 7-13 - Confronto delle disponibilità produttive annuali sull'orizzonte di vita dei 20 anni e del valore medio complessivo tra Bioraffineria e Raffineria tradizionale

Dalla figura 7-13, risulta evidente che la disponibilità media complessiva della bioraffineria (84,14%) è molto simile a quella della raffineria tradizionale (83,49%) evidenziando per di più un leggero vantaggio (0,65%) del primo impianto rispetto al secondo.

Guardando attentamente l'andamento della disponibilità produttiva annuale si notano però alcune differenze nonostante la similarità del risultato finale. Innanzitutto, nella raffineria tradizionale sono individuabili due regimi produttivi invece che tre: è previsto infatti solo un fermo per manutenzione preventiva con cadenza quadriennale della durata di 52 giorni. Le annualità di manutenzione, inoltre, non sono allineate avendo supposto per la bioraffineria che gli interventi venissero compiuti l'anno successivo al primo biennio e quadriennio. Allineando dunque le annualità è possibile confrontare i valori di disponibilità produttiva dei due impianti osservando che:

- negli anni in cui per entrambi non sono previsti fermi programmati, la bioraffineria presenta una disponibilità produttiva un punto percentuale superiore;
- durante il fermo biennale della bioraffineria per la sostituzione dei catalizzatori, la disponibilità produttiva dell'impianto tradizionale supera quella dell'impianto "bio" di circa quattro punti percentuali;
- durante il fermo quadriennale comune è nuovamente la bioraffineria ad avere prestazioni migliori fino a cinque punti percentuali di disponibilità produttiva.

Nelle annualità di fermo quadriennale, in cui gli impianti vengono messi fuori servizio per la medesima necessità di "fermo generale", lo scarto è dunque più importante. Sulle ragioni, per quanto è stato possibile desumere dalle rispettive documentazioni progettuali, si ritiene che la differenza sia imputabile alla diversa durata del fermo. Nel caso della bioraffineria, infatti, la manutenzione quadriennale prevedeva tempi di fermo di 35 giorni, ma per la raffineria tradizionale ne sono previsti ben 52. Si ritiene che tale scarto non sia imputabile a ragioni inerenti alla tecnologia o i processi dei due impianti, ma alle dimensioni molto più grandi della raffineria tradizionale. Sebbene non sia stato trovato riscontro nella documentazione, è ragionevole ipotizzare che per le medesime ragioni anche i tempi di fermata e riavvio siano proporzionalmente più lunghi. Anche questo incide inevitabilmente, in maniera più generale, sulle performance produttive del benchmark.

Il confronto tra i due impianti è dunque approfondito sulla scomposizione dell'indisponibilità tra quella dovuta a guasto e quella dovuta a manutenzione. Si riporta a seguire in tabella la comparazione tra i due impianti:

Tabella 7-5 - Sintesi comparativa delle performance tra Bioraffineria e Raffineria tradizionale con indisponibilità scomposta nei contributi relativi per manutenzione correttiva e programmata.

	Bioraffineria	Raffineria tradizionale
Disponibilità produttiva	84,14%	83,49%
Indisponibilità produttiva <i>di cui</i>	15,86%	16,51%
Contributo manutenzione correttiva (1)	12,52%	14,01%
Contributo manutenzione programmata (2)	3,34%	2,50%
Contributo relativo di (1) su indisponibilità totale	78,94%	84,86%
Contributo relativo di (1) su indisponibilità totale	21,06%	15,14%

Dalla tabella 7-5, si evidenzia tra i due impianti un'importante differenza riguardo la scomposizione dell'indisponibilità soprattutto per il contributo della manutenzione programmata.

Per la bioraffineria, infatti, risulta un incremento del carico manutentivo programmato di circa il 39% rispetto alla raffineria tradizionale. Tale differenza è da imputare alla strategia di gestione del ciclo di vita dei catalizzatori condizionata dalla tipologia di materie prime trattate dalla bioraffineria. Queste, infatti, presentano una composizione molto più variabile e contengono impurità per quantità e tipologia non trascurabili. Le impurità più critiche, riscontrabili negli oli vegetali, sono in particolare il fosforo (presente nei fosfolipidi) e i metalli alcalini o alcalino-terrosi (sodio, potassio, calcio e magnesio). Studi sperimentali sulla deossigenazione catalitica di oli vegetali hanno dimostrato che tali specie possono causare una disattivazione molto più rapida dei catalizzatori comunemente impiegati nei processi di idrotrattamento e idrodeossigenazione [25]. Nelle raffinerie tradizionali invece la disattivazione dei catalizzatori è più lenta e meglio controllabile grazie alla maggiore uniformità delle correnti di alimentazione e alla presenza di filiere e tecnologie di trattamento consolidate. Nelle bioraffinerie, pertanto, la maggiore variabilità delle biomasse e dei residui oleosi comporta una più elevata incertezza operativa e richiede strategie di gestione più conservative per preservare l'integrità e l'efficienza dei catalizzatori. Per questo motivo sono state adottate per il caso studio soluzioni di pretrattamento delle materie prime più importanti quali i citati processi di filtrazione e degumming (3.1.1). Nell'unità di raffinazione, inoltre, si era menzionato per i reattori anche la presenza di letti di guardia per la cattura delle impurità e l'iniezione di composti solforati (ad esempio DMDS) per mantenere il catalizzatore nella sua forma solfuro attiva (3.1.1). Tuttavia, anche in presenza di tali accorgimenti, una parte delle impurità può comunque raggiungere il letto catalitico principale, contribuendo nel tempo alla progressiva perdita di attività e alla necessità di una loro sostituzione più frequente. Ricerche su materiali innovativi, procedure di manutenzione e di

gestione più oculate potrebbero condurre a soluzioni che in futuro ridurranno questa problematica manutentiva. grazie all'esperienza che inizia ad accumularsi sulla conduzione delle bioraffinerie

Uno dei due casi particolari sviluppati per la raffineria tradizionale però considerava anche per essa, in maniera estremamente cautelativa, la sostituzione biennale dei catalizzatori. Tale intervento, di durata pari a 60 giorni anziché 21 come per la bioraffineria, prevede un rallentamento al 50% della produzione della sezione Diesel invece che l'arresto totale. Ciò è reso possibile grazie alla suddivisione della produzione su più treni operativi, mentre per la bioraffineria vi è una sola linea di produzione. Sebbene il fermo venga scongiurato, questo ulteriore intervento manutentivo programmato impatta negativamente in maniera importante sul valore medio complessivo della disponibilità produttiva della raffineria tradizionale riducendolo al 79,93%. A parità di strategie manutentive, dunque, con l'84,14% di disponibilità produttiva complessiva la bioraffineria presenta un vantaggio pari al 4,21% rispetto all'impianto benchmark. Nonostante la bioraffineria del caso studio sia stata sviluppata su tecnologie molto più recenti della raffineria tradizionale a confronto, questo risultato suggerisce che essa possiede già un ottimo grado di maturità. Ciò rafforza la bontà del risultato di disponibilità del caso base (84,14%) come punto di partenza e che ha dunque ottime prospettive, con l'impianto effettivamente a regime, di raggiungere il target del 90%. Questo importante risultato è sicuramente da imputare all'eredità dell'architettura, del know-how, delle soluzioni tecnologiche e operative sviluppate e consolidate nel tempo sulle raffinerie tradizionali. La conversione dell'unità tradizionale in unità "bio" conserva tale vantaggio acquisito ed è quindi da ritenere preferibile, quando fattibile, rispetto alla costruzione di nuovi impianti.

Il secondo caso particolare nello studio della raffineria tradizionale considera, invece, la gestione strategica della sovracapacità produttiva al fine di migliorare il valore complessivo della disponibilità produttiva. In questo scenario si assume che, durante i periodi di fermo programmato, la produzione venga contabilizzata come completamente persa rispetto alla capacità nominale dell'impianto. Nei periodi di piena operatività, invece, si ipotizza di sfruttare la sovracapacità produttiva disponibile, pari al 10%, per compensare parzialmente la produzione non realizzata durante il fermo. Tale recupero è valutato sempre con riferimento alla capacità nominale dell'impianto (100%) e non alla capacità massima teorica (110%). In questo modo l'eventuale incremento temporaneo è una compensazione della produzione precedentemente persa e non un aumento della capacità produttiva nominale dell'impianto. Per la raffineria tale operatività si ritiene possibile anche grazie alla presenza di grandi serbatoi di stoccaggio dei prodotti finiti che fungono da buffer alla produzione nel momento in cui questa è interrotta. Il risultato finale di disponibilità produttiva valutato è pari a 90,54%, ovvero +7,05% rispetto al caso base (83,49%). Si ritiene interessante questo caso particolare studiato per l'impianto tradizionale perché potenzialmente replicabile per la bioraffineria del caso studio. Essa,

infatti, come anticipato in 3.1 possiede una sovracapacità produttiva del 10% e grandi serbatoi di stoccaggio dei prodotti finali. Si potrebbero pertanto ottenere valori di incremento e finali simili della disponibilità produttiva raggiungendo la soglia del 90%. Quest'ultima valutazione avvalorata ulteriormente la bontà del caso studio e delle bioraffinerie in generale sancendole come una soluzione industriale pronta e pienamente competitiva nel panorama energetico attuale.

In sintesi, il confronto con la raffineria tradizionale restituisce un quadro incoraggiante per la bioraffineria del caso studio. Nonostante un aggravio del 39% sul carico di manutenzione programmata l'impianto *bio* dimostra performance produttive comparabili o superiori. Questi risultati certificano il ragguardevole grado di maturità tecnologica raggiunto dalle bioraffinerie che beneficiano anche dell'eredità (architettura, *know-how* e logiche di processo) degli impianti tradizionali. La potenzialità dello sfruttamento del 10% di sovracapacità nominale e dei parchi serbatoi finali, che hanno portato il *benchmark* al 90,54% di disponibilità produttiva, conferma che l'obiettivo industriale di regime del 90% sia concretamente raggiungibile.

In conclusione, l'analisi in questo capitolo ha permesso di superare i limiti statici della FMEA, valutando il reale comportamento della bioraffineria quantificando l'impatto dei guasti sull'output produttivo in un orizzonte di 20 anni. Partendo dal modello "base", conservativo e coerente con la fase di FEED, si è determinata tramite Maros una disponibilità dell'84,14%. Questo valore è stato successivamente innalzato all'86,02% nel caso studio "ottimizzato" intervenendo sulla granularità dei dati di guasto e sull'architettura di due componenti critici (compressore e turbina). Il raffronto con uno studio analogo su una raffineria tradizionale ha contestualizzato ulteriormente i risultati ottenuti all'interno del settore Oil & Gas. Sebbene vi siano nuove sfide legate all'usura dei catalizzatori, l'analisi ha sancito che la transizione verso impianti di trattamento di cariche "bio" non presenti problematiche tali da fermarne l'avanzamento. Le bioraffinerie si possono dunque affermare nel panorama energetico non solo come un'alternativa ecologicamente necessaria, ma come asset industriali solidi, affidabili e competitivi.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha permesso di valutare, attraverso un approccio rigoroso e quantitativo, la fattibilità operativa della riconversione di un asset di raffinazione tradizionale in un polo per la produzione di biofuel. Lo studio è stato condotto seguendo un approccio RAM generale strutturato in accordo agli standard internazionali di riferimento, ma opportunamente adattato al caso studio in fase di FEED.

È stato innanzitutto redatto il Registro degli Asset per l'identificazione dei componenti manutenibili. Tali elementi sono stati poi raggruppati in famiglie all'interno di un database R&M, ai quali sono stati assegnati i relativi parametri di affidabilità e manutenibilità provenienti da banche dati di settore. È stata quindi eseguita un'analisi FMEA per individuare i modi di guasto critici e descrivere qualitativamente le loro conseguenze. Parallelamente alla FMEA, è stata condotta anche l'analisi di manutenibilità finalizzata alla caratterizzazione dei tempi di riparazione in base alle strategie manutentive adottate e alle attività da compiere, valutate caso per caso. I risultati di queste ultime analisi sono stati integrati in un modello di simulazione sviluppato sul software Maros, impostato per riprodurre il comportamento dell'impianto nel corso dei 20 anni di vita utile previsti.

La simulazione eseguita con Maros ha restituito una disponibilità produttiva complessiva pari all'84,14%, ovvero un'indisponibilità del 15,86%. Scomponendo più nel dettaglio le cause di indisponibilità si è evidenziato che il contributo dominante è dovuto alla manutenzione correttiva. In particolare, il peso relativo di questa è del 79% (contributo assoluto del 12,48% sull'indisponibilità totale), mentre la manutenzione preventiva contribuisce soltanto per il restante 21% (3,32% come valore assoluto).

Dalle evidenze emerse da questo caso "base" è stato sviluppato un caso studio "ottimizzato". Si è deciso quindi di agire sia dal punto di vista metodologico che dell'architettura della bioraffineria per mitigare le criticità sistemiche dello studio e quelle puntuali dell'impianto. Tali interventi hanno innalzato la disponibilità all'86,02% dimostrando come scelte ingegneristiche mirate e l'affinamento dell'analisi possano incidere positivamente sulle performance finali.

A validazione definitiva della bontà dello studio e del progetto, si è infine effettuato un benchmarking rispetto a uno studio equivalente relativo per una raffineria tradizionale. Il confronto ha dimostrato la solidità dell'approccio RAM adottato e la maturità tecnologica dell'impianto del caso studio, nonostante fisiologiche criticità proprie della tecnologia correlate alla tipologia di materie prima raffinata. Sono emerse le potenzialità della bioraffineria che, in termini di disponibilità

produttiva, potrebbe concretamente raggiungere il target finale del 90% degli impianti dello stesso settore.

Da un punto di vista ingegneristico e manageriale, il lavoro di tesi realizzato potrebbe fornire tutti gli input necessari per la valutazione dei trade-off CAPEX/OPEX. Sarebbe possibile stimare economicamente, infatti, l'effetto di interventi progettuali o organizzativi che mirano all'incremento della producibilità giustificando gli investimenti richiesti.

Dal punto di vista scientifico e metodologico, lo studio rappresenta un caso applicativo significativo per la conversione "bio" di altre infrastrutture del settore Oil & Gas incoraggiando ancor di più la transizione energetica. L'approccio RAM qui adottato, infatti, costituisce un workflow replicabile e documentabile. Il modello sviluppato con il software Maros, inoltre, pone le basi per la futura gestione operativa della bioraffineria quando entrerà in esercizio. Se il modello venisse alimentato con i dati reali di marcia e usura la simulazione potrebbe evolvere, ad esempio, in uno strumento capace di supportare dinamicamente le strategie di manutenzione predittiva.

In definitiva, il presente lavoro dimostra come la riconversione di unità di raffinazione tradizionali in bioraffinerie sia una soluzione industrialmente matura. Per questi impianti si è infatti dimostrato possibile coniugare resilienza ed eccellenza operativa, garantendo livelli di disponibilità produttiva competitivi nell'attuale panorama energetico globale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Parlamento Europeo e Consiglio, "Regolamento (UE) 2021/1119 del 30 giugno 2021 che istituisce il quadro per il conseguimento della neutralità climatica ('Legge europea sul clima')", *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, 2021
- [2] H. Fang, "Research on the reliability and availability of hydrogen production system based on hydrogen energy storage," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 781, p. 042023, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/781/4/042023.
- [3] AIChE, "Hydrogen Flammability," *The Elemental*, American Institute of Chemical Engineers. URL: https://www.aiche.org/sites/default/files/docs/pages/the_elemental_hydrogen_flammability.pdf [Ultimo accesso: 10 Marzo 2026].
- [4] Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M., Edwards, R., & Lonza, L. (2020). *JRC Well-to-Wheels Analysis: v5.0*. European Commission, Joint Research Centre.
- [5] Parlamento Europeo e Consiglio, "Direttiva (UE) 2023/2413 del 18 ottobre 2023 che modifica la direttiva (UE) 2018/2001, il regolamento (UE) 2018/1999 e la direttiva 98/70/CE per quanto riguarda la promozione dell'energia da fonti rinnovabili", *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, 2023.
- [6] Parlamento Europeo e Consiglio, "Direttiva 2009/30/CE del 23 aprile 2009 che modifica la direttiva 98/70/CE per quanto riguarda le specifiche relative alle benzine, al combustibile diesel e alle gasoli e l'introduzione di un meccanismo inteso a controllare e ridurre le emissioni di gas a effetto serra", *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, 2009
- [7] Commissione Europea, "Regolamento delegato (UE) 2019/807 del 13 marzo 2019 che integra la direttiva (UE) 2018/2001 per quanto riguarda la determinazione delle materie prime ad alto rischio di cambiamento indiretto della destinazione d'uso dei terreni", *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, 2019.

- [8] C. Nair, "Refining 101," Northwestern University Transportation Center Workshop, 2009. URL: <https://transportation.northwestern.edu/docs/2009/20091104-workshop-nair.pdf>. [Ultimo accesso: 12 Marzo 2026].
- [9] Jeferson Seibel, João Henrique Cabral Wancura, Flávio Dias Mayer, Process simulation and technology prospection to the hydrotreating of vegetable oils and animal fats, *Energy Conversion and Management*, Volume 315, 2024.
- [10] "Impact of HVO, as a drop-in fuel, on emissions and performance of a heavy-duty diesel engine", *"Neste Renewable Diesel Handbook"*, Neste (2020).
- [11] ETIP Bioenergy (European Technology and Innovation Platform). *"Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Factsheet"*. URL: https://old.etipbioenergy.eu/images/ETIP_B_Factsheet_HVO_feb2020.pdf [Ultimo accesso: 13 Marzo 2026].
- [12] Ahtiainen, M., & Hillamo, H. (2016). *"LCA of Renewable Diesel: Greenhouse Gas Emissions and Compatibility with Existing Engines"*.
- [13] UNI EN IEC 60050-192. Ente Italiano di Normazione (UNI), "UNI EN IEC 60050-192:2015 - Vocabolario elettrotecnico internazionale - Parte 192: Fidatezza", Milano, Italia, 2015.
- [14] IEC 60300-1. International Electrotechnical Commission, "IEC 60300-1:2014 - Gestione dell'affidabilità - Parte 1: Gestione e applicazione", Ginevra, Svizzera, 2014.
- [15] IEC 61703. International Electrotechnical Commission, "IEC 61703:2016 - Espressioni matematiche per i termini di affidabilità, disponibilità, manutenibilità e logistica di manutenzione", Ginevra, Svizzera, 2016.
- [16] IEC 60812. International Electrotechnical Commission, "IEC 60812:2018 - Analisi dei modi di guasto e dei loro effetti (FMEA)", Ginevra, Svizzera, 2018.
- [17] ISO 14224. International Organization for Standardization, "ISO 14224:2016 - Industrie del petrolio, petrolchimiche e del gas naturale - Raccolta e scambio di dati di affidabilità e di manutenzione per le apparecchiature", Ginevra, Svizzera, 2016.

[18] AIChE (CCPS) Center for Chemical Process Safety (CCPS), "Guidelines for Process Equipment Reliability Data, with Data Tables", American Institute of Chemical Engineers (AIChE), New York, NY, 1989.

[19] UK HSE 2019 Health and Safety Executive (HSE), "Failure Rate and Event Data (FRED) for use in Land Use Planning Risk Assessment", Bootle, Regno Unito, 2019.

[20] IOGP (International Association of Oil & Gas Producers) IOGP, "Report 434: Risk Assessment Data Directory", Londra, Regno Unito, 2010

[21] NPRD (Nonelectronic Parts Reliability Data) Quanterion Solutions Inc., "NPRD-2016: Nonelectronic Parts Reliability Data", Utica, NY, Stati Uniti, 2016.

[22] OREDA Consortium, "OREDA: Offshore and Onshore Reliability Data Handbook", 4^a, 5^a e 6^a Edizione, Volume 1 (Topside Equipment) e Volume 2 (Subsea Equipment), Det Norske Veritas (DNV), Høvik, Norvegia, 2002-2015

[23] C. Gutiérrez-Antonio, F.I. Gómez-Castro, J.A. de Lira-Flores, S. Hernández, "A review on the production processes of renewable jet fuel", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 79, 2017.

[24] D. Seddon, "A Guide to Sustainable Aviation Fuel (SAF)," *Duncan Seddon & Associates Pty Ltd*. URL: <https://www.duncanseddon.com/docs/pdf/a-guide-to-sustainable-aviation-fuel-SAF.pdf>. [Ultimo accesso: 13 Marzo 2026].

[25] Kubička, D., Horáček, J., "Deactivation of HDS catalysts in deoxygenation of vegetable oils", *Applied Catalysis A: General*, vol. 394, n. 1-2, pp. 9-17, Elsevier, 2011.