



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea Luglio 2023

Tesi di Laurea Magistrale

**Benefici della simulazione nella
decarbonizzazione dello
sviluppo prodotto in ambito veicolistico**

Relatore:

Prof. Eugenio Brusa

Candidato:

Francesco Di Martino

Relatore aziendale:

Ing. Carlo Romanò

Abstract

La prototipazione virtuale, le tecnologie *Hardware/Driver-in-the-Loop* e i *Digital Twin* stanno prendendo sempre più piede nella fase di sviluppo prodotto in ambito automobilistico. Inoltre, una maggiore attenzione e riguardo a livello ambientale e di sostenibilità nell'industria porta ad operare determinate scelte su quali tecnologie utilizzare per la progettazione e per la verifica di un prodotto. Durante lo sviluppo prodotto, specialmente in ambito automobilistico, sono presenti prototipi fisici che vengono utilizzati come strumento per la validazione costruito. Grazie al miglioramento tecnologico e alla necessità di una transizione digitale essi non sono più l'unico strumento utilizzabile per la validazione. Per questo in ottica transizione digitale ed ecologica, il lavoro presentato in questo progetto di tesi si basa sullo sviluppo e sull'implementazione di una metodologia per la valutazione degli impatti ambientali e sui possibili benefici della simulazione *Hardware-in-the-Loop* in fase di sviluppo prodotto in ambito veicolistico. Le simulazioni *Hardware-in-the-Loop* e i *digital twin* permettono, in fase di sviluppo prodotto, una riduzione del numero di prototipi fisici; per questo si è scelto di valutare la possibile riduzione di impatto ambientale generata dall'utilizzo di queste tecnologie rispetto ad un classico sviluppo prodotto implementato attraverso prototipi fisici. La metodologia è stata sviluppata per valutare l'impatto ambientale in termini di CO₂ equivalente di un intero prototipo di veicolo però è applicabile anche ad un sottosistema o un componente della vettura. Questa metodologia è stata utilizzata per valutare l'impatto ambientale in alcuni casi reali. L'azienda in cui è stato svolto il progetto è Danisi engineering s.r.l. I risultati mostrano, che il risparmio in termini di CO₂ equivalente è sempre presente, con diversa intensità a seconda dell'applicazione presa in esame.

Abstract in inglese

Virtual prototyping, Hardware/Driver-in-the-Loop technologies and Digital Twin are increasingly taking place in the automotive product development phase. In addition, increased environmental and sustainability focus in the industry leads to a different choice for the technologies to use for the design and testing of a product. During product development, especially in the automotive sector, physical prototypes are used as a tool for product validation. Thanks to technological improvement and the need for a digital transition, they are no longer the only tool that can be used for validation. For this reason, in view of the digital and ecological transition, the work presented in this thesis project is based on the development and implementation of a methodology for the assessment of environmental impacts and the possible benefits of the Hardware-in-the-Loop simulation in product development in the vehicle field. Hardware-in-the-Loop simulations and digital twins allow, during product development, a reduction of physical prototypes; for this reason, it was chosen to evaluate the reduction in environmental impact generated by using these technologies compared to a classic product development implemented through physical prototypes. The methodology has been developed to assess the environmental impact in terms of CO₂ equivalent of an entire vehicle prototype but is also applicable to a subsystem or a component of the car. This methodology has been used to assess the environmental impact in some real cases. The company in which the project was carried out is Danisi engineering. The results show that the savings in terms of CO₂ equivalent are always present, with different intensity depending on the application under consideration.

Ringraziamenti

Ringrazio l'azienda Danisi Engineering che mi ha dato la possibilità di svolgere questa Tesi di Laurea. In particolar modo, devo ringraziare l'Ingegnere Carlo Romanò che mi ha seguito nello sviluppo di questo progetto e in questo percorso di crescita in azienda. Inoltre, un sentito grazie al Professor Eugenio Brusa per avermi dato la possibilità di lavorare su questo progetto di tesi e per tutti gli spunti forniti in questo periodo.

Infine, vorrei ringraziare chi mi ha sempre supportato in questo bellissimo percorso universitario: la mia famiglia, la mia ragazza, i miei amici e i colleghi.

Sommario

Indice delle figure	7
Indice delle tabelle	9
Acronimi	11
Capitolo 1 – Stato dell’arte	12
1.1 Lo sviluppo prodotto	12
1.2 La prototipazione.....	14
1.2.1 Il prototipo	14
1.2.2 Il prototipo virtuale	15
1.3 I <i>Digital Twin</i>	16
1.4 Il <i>Model-Based Systems Engineering</i>	18
1.4.1 Il diagramma a “V”	19
1.5 Applicazioni “X-in-the-LOOP”	20
1.6 Ciclo vita del prodotto	22
1.7 <i>Life Cycle Assessment</i>	22
1.7.1 Indici ambientali	24
1.8 Economia circolare.....	25
1.9 Transizione digitale ed ecologica	26
1.10 UE e altre organizzazioni	26
1.11 DANISI Engineering	27
1.12 Altre aziende.....	27
Capitolo 2 - Metodologia	29
2.1 Impatto ambientale del prototipo di vettura fisico	29
2.1.1 Costruzione del prototipo	31
2.1.2 Prova in pista	33
2.2 Impatto ambientale del prototipo virtuale ottenuto attraverso il simulatore	35

2.3 Carbon footprint	36
2.4 Tragitto casa-ufficio dei dipendenti	37
2.5 Raccolta dei dati e delle informazioni	39
2.6 Considerazioni e assunzioni	39
Capitolo 3 - Prototipo e simulazione.....	41
3.1 Distinta base di un autoveicolo	41
3.2 Processi e lavorazioni meccaniche	46
3.3 I simulatori	47
3.4 Fasi di sviluppo prodotto in Danisi engineering	50
Capitolo 4 – Strumenti e dati	55
4.1 Software: OpenLCA.....	55
4.2 Metodologia implementata su Excel	62
4.3 Dati utilizzati	68
Capitolo 5- Applicazioni	71
5.1 Test in pista	71
5.1.1 Singolo giro di pista del prototipo fisico e virtuale	71
5.1.2 Test in pista fisico e virtuale includendo la logistica.....	74
5.1.3 Test in pista completo.....	79
5.2.1 Impatto ambientale del progetto con simulazione	83
5.2.2 Impatto ambientale del progetto senza simulazione.....	89
5.2.3 Risultati.....	91
5.2.4 Smart working	92
Capitolo 6 – Conclusioni e prospettive future.....	95
Bibliografia	97

Indice delle figure

Figura 1 - Diagramma a blocchi di comparazione tra prototipazione fisica e virtuale.....	16
Figura 2 -Diagramma del livello di integrazione delle tecnologie Model-Based [7]	18
Figura 3 - Rappresentazione generale del diagramma a "V" [10]	19
Figura 4 - Diagramma a barre che mostra le tecnologie impiegate durante lo sviluppo di una vettura [20].....	21
Figura 5 - Struttura della valutazione d'impatto ambientale	24
Figura 6 - Economia circolare (a sinistra) e Sustainable development goals (a destra)	25
Figura 7 - Diagramma a blocchi del ciclo vita di un prototipo di vettura.....	31
Figura 8 - Schema a blocchi del volume di analisi di impatto ambientale per un prototipo di vettura fisica.....	31
Figura 9 - Schema a blocchi del volume di analisi di impatto ambientale per un prototipo di vettura virtuale	35
Figura 10 - Chilometri giornalieri per ogni dipendente	38
Figura 11 - Analisi dei chilometri medi per ogni dipendente	39
Figura 12 -Telaio di un'autovettura [45]	42
Figura 13 - Sospensioni di un'autovettura [46]	42
Figura 14 - Componenti che intercorrono dal motore alle ruote [47].....	43
Figura 15 - Sottosistema sterzo di un'automobile [48]	45
Figura 16 -Simulatore statico di Danisi engineering	47
Figura 17 -Simulatore dinamico di Danisi engineering.....	48
Figura 18 -Diagramma a "V" di Danisi engineering	50
Figura 19 -Sviluppo prodotto in Danisi engineering integrando lo human-in-the-Loop.....	52
Figura 20 - Selezione del database e di un nuovo processo con il software OpenLCA	55
Figura 21 -Inserimento dei processi in input nel software OpenLCA per un'analisi riferita al processo di produzione e trasporto di un acciaio basso legato	56
Figura 22 - Schermata riferita alle informazioni generali del processo acciaio nel software OpenLCA.....	57
Figura 23 - Risultati di impatto ambientale ottenuti con il software OpenLCA riferite alla categoria Global warming e ai materiali (manganese emesso in aria)	58
Figura 24 -Anlisi di impatto: lista delle categorie ottenute con il metodo ReCiPe 2016 Midpoint (H)	58
Figura 25 -Risultatati di impatto ambientale a livello geografico con il software OpenLCA	59
Figura 26 - Creazione di un nuovo flusso con il software OpenLCA	59
Figura 27 - Informazioni generali e creazione di un nuovo sistema prodotto con il software OpenLCA.....	60
Figura 28 -Diagramma a blocchi del sistema su OpenLCA	61
Figura 29 - Analisi di impatto ambiente di un van e di un lorry 16t ottenuto con OpenLCA per eseguire il confronto dei risultati con quelli ottenuti nella metodologia implementata su Excel	62
Figura 30 - Suddivisione delle cartelle nel foglio di calcolo Excel per valutare i benefici delle simulazioni durante lo sviluppo prodotto.....	62
Figura 31 -Schermata del foglio "Dati" della metodologia.....	63

Figura 32- Schermata del foglio "Costruzione prototipo" fisico della metodologia.....	64
Figura 33- Schermata dei risultati della costruzione del prototipo (grafici a torta, a barra e di Pareto)	65
Figura 34- Schermata del foglio "Test in pista" del prototipo fisico della metodologia	66
Figura 35- Schermata dei risultati del "test in pista" del prototipo fisico (grafici a torta e a barra) ..	66
Figura 36- Schermata del foglio "Simulazione" del prototipo virtuale della metodologia.....	67
Figura 37- Schermata dei risultati del "Simulazione" del prototipo virtuale (grafico a torta e a barra)	67
Figura 38- Andamento della corrente su una linea durante il test in pista di una vettura virtuale al simulatore dinamico	72
Figura 39- Rappresentazione al CAD della sottostima sospensione posteriore	81
Figura 40- Distinta base dei componenti della sospensione	82
Figura 41- Rappresentazione al CAD del banco prova e dei supporti.....	83
Figura 42- Sottosistema sospensione assemblato	83
Figura 43- Grafico a torta riferita all'impatto della costruzione dei prototipi.....	85
Figura 44- Diagramma di Pareto riferito all'impatto della costruzione dei prototipi.....	85
Figura 45- Immagine della pista di test con rispettiva lunghezza.....	86
Figura 46- Grafico a torta riferito al test in pista	87
Figura 47- Grafico a torta riferito alla simulazione nel progetto	88
Figura 48- Confronto dell'impatto ambientale riferito alla prototipizzazione fisica e virtuale durante il progetto	88
Figura 49- Grafico a torta riferito alla costruzione dei prototipi fisici nel caso in cui non è presente la simulazione	89
Figura 50- Diagramma di Pareto riferito all'impatto della costruzione dei prototipi nel caso in cui non è presente la simulazione	90
Figura 51- Grafico a torta nel caso in cui non è presente la simulazione	90
Figura 52- Risultati e confronto dell'impatto ambientale con e senza simulazione	91
Figura 53- confronto dell'impatto ambientale con e senza simulazione	92
Figura 54- Confronto caso senza smart working e con il 40%	93
Figura 55- Confronto t CO ₂ eq in un anno tragitto casa-lavoro con differenti percentuali di smart working	94

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Componenti chimici presenti nella CO ₂ equivalente.....	37
Tabella 2 - Analisi di impatto ambientale di un van e di un truck ottenuto con la metodologia implementata su Excel per eseguire il confronto dei risultati di quelli ottenuti con OpenLCA.....	62
Tabella 3 -Dati primari da inserire nel foglio di calcolo.....	68
Tabella 4 - Dati secondari riferiti ai mezzi di trasporto su gomma.....	69
Tabella 5 -Dati secondari riferiti ai mezzi di trasporto non su gomma (aereo e treno)	69
Tabella 6 -Confronto dati secondari per i mezzi di trasporto su gomma.....	70
Tabella 7 - Dati secondari riferiti ai materiali.....	70
Tabella 8 - Caso applicativo: test in pista al Nurburgring, reale e virtuale di tre differenti vetture ..	73
Tabella 9 - Caso applicativo: test in pista a Nardò, reale e virtuale di tre differenti vetture	73
Tabella 10 - Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nurburgring e squadra cliente proveniente da Londra.....	75
Tabella 11 -Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nardò e squadra cliente proveniente da Londra	75
Tabella 12 -Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: “Terza pista” e squadra cliente proveniente da Londra.....	75
Tabella 13 -Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista con logistica, squadra cliente proveniente da Londra	75
Tabella 14 - Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nurburgring e squadra cliente proveniente da Stoccarda.....	76
Tabella 15 - Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nardò e squadra cliente proveniente da Stoccarda	76
Tabella 16 - Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: “Terza pista” e squadra cliente proveniente da Stoccarda.....	76
Tabella 17 -Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista con logistica, squadra cliente proveniente da Stoccarda	76
Tabella 18 - Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nurburgring e squadra cliente proveniente da Torino	77
Tabella 19 - Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nardò e squadra cliente proveniente da Torino	77
Tabella 20 - Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: “Terza pista” e squadra cliente proveniente da Torino	77
Tabella 21 - Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista con logistica, squadra cliente proveniente da Torino	77
Tabella 22 - Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista, rispetto un giro singolo di pista, includendo la logistica.....	78
Tabella 23 - Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista, rispetto a cento giri di pista, includendo la logistica.....	78
Tabella 24 - Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista, rispetto un giro singolo di pista, includendo la logistica ma senza la presenza del cliente.....	78

Tabella 25- Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista, rispetto a cento giri di pista, includendo la logistica ma senza la presenza del cliente.....	78
Tabella 26 -Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista completo, squadra cliente proveniente da Londra	79
Tabella 27 -Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista completo, squadra cliente proveniente da Stoccarda	80
Tabella 28 -Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista completo, squadra cliente proveniente da Torino	80
Tabella 29 -Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista completo, rispetto a un singolo giro di pista.....	80
Tabella 30 -Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista completo, rispetto a cento giri di pista	80
Tabella 31 - Ore e persone impiegate nel progetto per ogni reparto dell'azienda.....	83
Tabella 32 - Materiali e rispettivo peso utilizzati per la costruzione delle sospensioni delle attrezzature di supporto	84
Tabella 33 - Trasporto dei materiali e dei componenti commerciali per la costruzione dei prototipi.....	84
Tabella 34 - Consumi delle macchine utensili per la costruzione dei prototipi	84
Tabella 35 - Impatto ambientale riferito alla costruzione dei prototipi fisici	85
Tabella 36 - Emissioni del motore di un prototipo in pista.....	86
Tabella 37 - Logistica per il trasporto dei prototipi e dei meccanici/ingegneri in pista.....	86
Tabella 38 - Impatto totale test in pista	87
Tabella 39 -Impatto ambientale della simulazione nel progetto	87
Tabella 40 -Impatto ambientale della costruzione dei prototipi fisici nel caso in cui non è presente la simulazione	89
Tabella 41 -Impatto ambientale del test in pista nel caso in cui non è presente la simulazione	90
Tabella 42 - Risultati e confronto dell’impatto ambientale con e senza simulazione.....	91
Tabella 43 - Impatto ambientale dello Smart working.....	93
Tabella 44 - Impatto ambientale in base alla percentuale di Smart working	93

Acronimi

ADAS	<i>Advanced Driver Assistance Systems</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CO ₂	Anidride carbonica
CO _{2eq}	Anidride carbonica equivalente
CNC	Controllo Numerico Computerizzato
DT	<i>Digital twin</i>
FEM	<i>Finite element method</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HiL	<i>Hardware-in-the-Loop</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engines</i>
LCA	<i>Life cycle assessment</i>
LCI	<i>Life cycle inventory</i>
LCIA	<i>Life cycle inventory assessment</i>
MBSE	<i>Model-based systems engineering</i>
MiL	<i>Model-in-the-Loop</i>
NVH	<i>Noise-Vibration-Harshness</i>
SiL	<i>Software-in-the-Loop</i>
SDGs	<i>Sustainable development goals</i>
TTW	<i>Tank to Wheel</i>
ViL	<i>Vehicle-in the Loop</i>
WTW	<i>Well to Wheel</i>

Capitolo 1 – Stato dell’arte

In primo luogo, verrà svolta una introduzione delle tecnologie trattate in questa tesi. Verrà fatto riferimento a pubblicazioni su riviste scientifiche, alle normative vigenti e all’attuale stato di sviluppo delle tecnologie in Danesi engineering e delle aziende concorrenti. Le tecnologie analizzate sono: la prototipizzazione, i *Digital Twin*, il *Model Base System Engineering*, i *V-model*, “*X*” -*in-the-Loop*. Inoltre, verrà svolta una breve introduzione delle fasi di sviluppo prodotto e delle metodologie di impatto ambientale. A livello bibliografico non sono stati trovati articoli o pubblicazioni che vadano a evidenziare il vantaggio a livello di sostenibilità ambientale delle simulazioni nella fase di sviluppo prodotto: per questo motivo si cercherà di delineare una metodologia per valutare l’impatto ambientale delle simulazioni e confrontarlo con l’impatto dei prototipi fisici.

1.1 Lo sviluppo prodotto

Lo sviluppo del prodotto è l’insieme di attività che iniziano con la percezione di una opportunità all’interno del mercato e che proseguono con la produzione, la vendita e si conclude con la consegna del prodotto al cliente [1]. Lo sviluppo prodotto risulta vantaggioso se il prodotto riesce ad ottenere le seguenti caratteristiche: elevata qualità, costo del prodotto e di sviluppo accettabile rispetto al mercato, ottimo tempo di sviluppo e capacità di possibili sviluppi futuri.

Il ciclo di sviluppo prodotto è suddiviso in diverse fasi:

- La pianificazione: a seguito dell’analisi del mercato ed avendo individuato il prodotto desiderato, si procede con la pianificazione dell’architettura e dello schema del prodotto, nonché con la ricerca e l’analisi di nuove tecnologie;
- La progettazione concettuale: si procede con lo studio di fattibilità, si pianifica la fase di sviluppo industriale ed infine vengono costruiti i primi prototipi con il fine di svolgere i test sperimentali;
- La progettazione a livello di sistema: si sviluppa l’architettura del prodotto, si definiscono i sottosistemi e le varie interfacce tra i sottosistemi e il cliente, e si procede con l’ingegnerizzazione preliminare dei componenti;
- La progettazione di dettaglio: si definiscono le geometrie delle parti, si scelgono i materiali, si assegnano delle tolleranze (geometriche e funzionali) e si completa la progettazione industriale;
- I test e la rifinitura: si eseguono test di tutte le prestazioni, test di ripetibilità e di durata, si procede con la richiesta per le approvazioni regolamentali e di omologazione, si esegue una

valutazione degli impatti ambientali e si implementano le modifiche necessarie per ottenere i requisiti desiderati del progetto;

- Inizio della produzione (SoP: *Start of production*): il prodotto è delineato in tutte le sue caratteristiche e lo sviluppo prodotto è quindi terminato, il prodotto è pronto per procedere con la produzione dello stesso.

La prima fase su cui ci concentreremo è quella della progettazione concettuale ovvero la fase in cui vengono identificati gli obiettivi del prodotto, vengono sviluppati e valutati concept di prodotti alternativi e si selezionano le configurazioni desiderate per ulteriori sviluppi e test. In questa fase, si definiscono: la forma, le funzioni e le caratteristiche del concept attraverso una serie di specifiche tecniche e i dati che vanno a delineare tutte le proprietà del prodotto. Segue la fase di progettazione del sistema: in questa fase viene definita l'architettura del prodotto e il prodotto viene suddiviso in sottosistemi e in componenti. Definiti i sottosistemi e i componenti principali, si procede con un dimensionamento di massima e si definisce un primo processo di montaggio. A questo punto si procede alla progettazione di dettaglio che consta nella definizione di tutti i componenti del prodotto con le loro caratteristiche: geometriche, materiali e tolleranze. Infine, prima dell'inizio della produzione, è presente la fase di test dei prototipi e di rifinitura del prodotto.

La fase di sviluppo prodotto è una procedura molto compressa e articolata. Ad esempio, lo sviluppo di una vettura automobilistica (o di un aereo) è considerato molto complesso a causa dell'elevato numero di sottosistemi e quindi anche di componenti che lo compongono. Il processo si complica poiché bisogna, in molti casi, ripetere la procedura di sviluppo concept per ogni sottosistema e successivamente integrare tutte le diverse architetture dei vari sottosistemi al fine di ottenere il sistema auto completo. L'ultima fase, quella di test e di rifinitura, include non solo le prove della vettura completa ma anche la validazione e la verifica di tutti i sottosistemi e dei componenti che ne fanno parte.

Facendo ora riferimento all'analisi di impatto ambientale, essa viene considerata solo nell'ultima parte dello sviluppo, poiché necessaria per motivi legislativi. Considerato come dato di fatto che ogni prodotto produce un impatto ambientale, negli ultimi anni si sta introducendo sempre di più il concetto di "progettazione per l'ambiente", che ha come scopo quello di ridurre l'impatto ambientale del prodotto, pur mantenendo ugualmente elevata la qualità dello stesso o anche migliorarla. A questo proposito, successivamente, verranno trattate proposte come l'*eco-design* e l'economia circolare che hanno lo scopo di includere la valutazione dell'impatto ambientale in tutte le fasi di sviluppo e di ciclo vita del prodotto. L'impatto ambientale di un prodotto include: il consumo di energia per tutto il processo di produzione e trasporto, l'utilizzo di risorse naturali, le emissioni gassose e la produzione di rifiuti solidi e liquidi. Tutti questi fattori di impatto possono essere raggruppati in due macrocategorie ovvero energia e materiali. Per quanto concerne l'energia è possibile ridurre l'impatto utilizzando meno energia oppure producendola attraverso fonti rinnovabili, mentre per la scelta dei materiali non basta optare il più semplice ma bisogna focalizzarsi in ottica di ciclo vita, dando particolare riguardo alle fasi di riciclo e di riutilizzo del materiale. Questo particolare tipo di progettazione che si focalizza in ottica ambientale fa parte soprattutto della progettazione di concept e di dettaglio, in cui si prendono decisioni sul materiale da utilizzare, sull'efficienza energetica e sul processo (che è la fase responsabile degli scarti). La progettazione per l'ambiente getta le basi per il pensiero in ottica ciclo vita che verrà approfondito nel paragrafo 1.6.

1.2 La prototipazione

La fase di prototipazione è fondamentale nel ciclo di sviluppo prodotto: il prototipo viene sviluppato e costruito per differenti ragioni successivamente elencate. Il prototipo può essere fisico oppure virtuale. In questa tesi si è posta l'attenzione sulla prototipazione di una vettura automobilistica facendo riferimento al caso in cui, durante lo sviluppo prodotto, sia presente un prototipo sia virtuale che fisico.

1.2.1 Il prototipo

Il termine prototipo viene spesso inteso come una versione semplificata di una macchina o di una parte di essa che è stata creata per eseguire i test. I prototipi tradizionalmente sono costruiti nelle prime fasi di progettazione al fine di validare l'effettivo funzionamento del prodotto [2]. Un prototipo può avere o una funzione sperimentale, o essere la prima versione di un prodotto, oppure essere un prototipo virtuale che ha la stessa geometria del modello e permette di eseguire analisi statiche, dinamiche e termiche [3].

La fase prototipale è fondamentale per la realizzazione di un nuovo prodotto, essa permette di ridurre gli errori ed eliminare i fattori di rottura nella prima fase di progettazione [4]. Il prototipo è realizzato per verificare le richieste desiderate, attraverso determinate prove, e per studiare le tecnologie da implementare successivamente nel processo di produzione. Nelle aziende la fase di prototipazione viene suddivisa in cinque classi, ognuna di esse si focalizza su un determinato aspetto della prototipazione che deve essere analizzato. Le classi si dividono in:

- Classe A: il prototipo è realizzato per valutare gli ingombri e in alcuni casi per valutare l'estetica e la cinematica;
- Classe B: il prototipo è realizzato per essere sottoposto a prove definite, i materiali impiegati e il processo di costruzione solitamente non coincidono con le tecnologie che saranno usate durante la produzione;
- Classe C: il prototipo utilizza i materiali definitivi, alcuni dei componenti possono essere creati già con delle tecnologie simili a quelle definitive;
- Classe D: il prototipo utilizza i materiali e i componenti ottenuti dal processo di produzione definitivo, ma la procedura di assemblaggio non è quella definitiva;
- Classe E: il prototipo è costruito seguendo il processo di produzione finale, pertanto, esso è il prodotto finito che verrà venduto sul mercato e integrato in un sistema.

Il prototipo di classe A è il più primitivo, esso è costruito usando le dimensioni effettive ottenute dai disegni tecnici e unendo tutti i componenti. I componenti possono essere prodotti da materiali differenti rispetto a quello definitivo ed è possibile usare elementi che vanno a simulare determinati parti del complessivo, che sono non ancora disponibili, per valutare gli ingombri. Questa classe di prototipo può essere prodotta per fini estetici e per verificare le funzioni di cinematica. Nel caso più avanzato esso può essere costruito da componenti con materiali simili a quelli definitivi per permettere il movimento meccanico.

Il prototipo di classe B è costruito con la finalità di superare determinati test ma può avere ancora componenti di forme e materiali differenti, i quali non possono essere direttamente testati. A questo punto il processo di produzione non è ancora stato definito per questo, i componenti sono prodotti

con tecnologie differenti rispetto a quelle finali ma simulano correttamente le caratteristiche della parte.

Il prototipo di classe C è lo step di prototipazione più vicino alla versione di produzione, il processo di produzione è in parte definito, il prototipo è composto da componenti e materiali definitivi ma che sono ottenuti da un processo di produzione alternativo.

Il prototipo di classe D è la versione finale del prodotto, con tutti i componenti che hanno la forma e materiale ottenuti da processo di produzione definitivo, sebbene la procedura di assemblaggio non sia ancora quella finale.

Infine, il prototipo di classe E coincide con il prodotto definitivo in tutti i suoi aspetti. [5]

La classificazione dei prototipi non è definita da uno standard; infatti, i costruttori di autovetture utilizzano differenti nomenclature e classificazioni. La classificazione descritta precedentemente è quella basata sul processo (materiali e tecnologie impiegate variano in base alla fase di sviluppo). Esiste anche la classificazione basata sulla funzionalità del prototipo ovvero per quale funzione nasce un determinato prototipo. Esso, infatti, può essere costruito per analisi estetiche, per analisi di ingombro, per eseguire determinate prove (statiche, dinamiche: NVH confort e Handling, prestazioni e termiche) come, ad esempio, i crash test che, se superati, permettono la validazione delle forme strutturali della vettura validando così il progetto della stessa.

Il prototipo fisico è creato grazie anche a tecnologie come il CAD (*Computer Aided Design*) e alla fabbricazione additiva. Il CAD permette di rappresentare entità solide in 3D durante la fase di progettazione, mentre la fabbricazione additiva permette di costruire componenti ad hoc nelle prime fasi di prototipazione accelerando il processo. Quando tutto il prodotto è rappresentato attraverso modelli che lo simulano si parla di prototipo virtuale.

1.2.2 Il prototipo virtuale

La prototipazione virtuale è una simulazione computerizzata di sistemi complessi con elevato realismo e precisione con il fine di migliorare il processo di progettazione dello stesso [6]. I progettisti usano modelli virtuali rispetto ai prototipi fisici per analizzare, attraverso le simulazioni, le condizioni di reale utilizzo del prodotto [3]. Il prototipo virtuale è creato sul riflesso di quello reale o il più simile possibile [3]. La prototipazione virtuale nasce dal bisogno di ridurre il time to market ed è stata favorita dal miglioramento dei computer e dall'aumento della potenza di calcolo degli stessi. Infatti, sul prototipo virtuale, realizzato attraverso i software CAD o i simulatori, è possibile fare attraverso le analisi agli elementi finiti, le analisi dei flussi termici e delle distribuzioni delle tensioni, analisi dinamiche e cinematiche di meccanismi complessi e test di impatto per le auto. Un miglioramento della prototipazione virtuale è legato alla sensoristica e all'interconnessione tra sistemi fisici e virtuali. Questa interconnessione dà vita ai digital twin o ad ambienti di simulazione Hardware-in-the-Loop che permettono di ricreare, migliorare, testare il prototipo in un ambiente virtuale. Queste tecnologie saranno trattate nei paragrafi successivi.

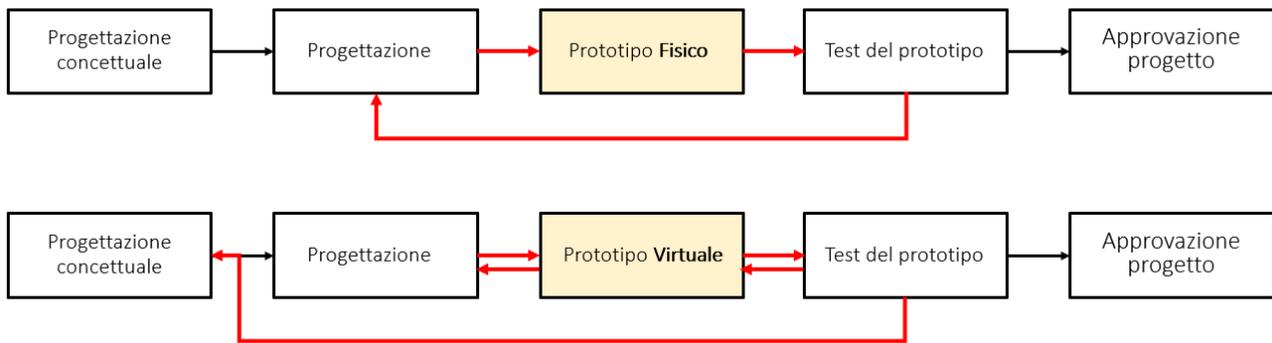


Figura 1 - Diagramma a blocchi di comparazione tra prototipazione fisica e virtuale

Il diagramma a blocchi (figura 1) mostra le fasi di sviluppo prodotto che vanno dall'idea alla fase di approvazione del progetto. Il primo diagramma a blocchi si basa sul prototipo fisico e si evidenzia un andamento lineare unidirezionale dalla fase di concept alla fase di test del prototipo, se le prove non vengono superate si ricomincia dalla fase di progettazione. Invece nel secondo diagramma è possibile notare la diretta interconnessione del prototipo virtuale con le fasi di test e di progettazione. Il vantaggio del prototipo virtuale viene esaltato dalla interconnessione bidirezionale delle fasi di progettazione e di test, poiché nel caso di prototipo fisico, se non vengono superati i test, i passaggi devono essere ripetuti (riprogettazione, ricostruzione del prototipo modificato e nuovamente i test, ripetuti N volte) sino a trovare una configurazione ottimale causando così l'aumento di tempi e di costo del prototipo. A livello bibliografico si evidenzia, infatti un risparmio di tempo e di denaro causato dalla non necessità di modificare, ricostruire e ritestare il prototipo fisico. Il guadagno derivante dall'utilizzo del prototipo virtuale è basato principalmente dalla riduzione del ciclo di progettazione ottenendo così un guadagno di tempo e costo [1]. Per questo motivo, aggiunto alla letteratura nascente e ai nuovi temi di sostenibilità, si è scelto di valutare l'impatto ambientale generato dalle simulazioni durante le fasi di sviluppo prodotto in particolare durante la prototipazione.

1.3 I Digital Twin

Il gemello digitale (*Digital Twin*) è definito come la rappresentazione virtuale di un oggetto che, durante il suo ciclo vita, può imparare e capire in tempo reale le informazioni oppure può essere definito come un modello di simulazione che acquisisce informazioni dal modello reale [7-8-9]. Come ulteriore definizione, il gemello digitale è visto come una convergenza tra il prodotto fisico e quello virtuale; infatti, esso contiene: da un lato la rappresentazione accurata del prodotto reale, utilizzata per la simulazione, l'ottimizzazione e le previsioni, e dall'altra contiene i dati provenienti da fasi di vita precedenti o da altri prodotti correlati [10]. La tecnologia basata sui gemelli digitali è una tecnologia innovativa e ha molteplici campi di applicazione, è usata in molte industrie poiché permette di rappresentare virtualmente oggetti complessi e simulare processi. È stata definita come una tecnologia che rivoluzionerà l'industria poiché ha effetti diretti sul prodotto, sul processo e sui servizi. È potenzialmente in grado di replicare ogni oggetto del mondo fisico e di dare un riscontro dal mondo virtuale agli ingegneri che stanno progettando o sviluppando un determinato prodotto o processo. Inoltre, il suo vantaggio principale è la velocità poiché è in grado di risolvere velocemente

i problemi fisici di progettazione e costruire così prodotti migliori [7]. Altre applicazioni della tecnologia *digital twin* sono: le simulazioni accurate, l'ottimizzazione, il monitoraggio in real-time e la realizzazione di modelli predittivi accurati.

Attualmente molte industrie usano Gemelli digitali per ottenere rappresentazioni virtuali accurate in differenti campi di applicazione. I campi di applicazione in cui si utilizzano maggiormente sono: le vendite al dettaglio, il settore sanitario e ciò che riguarda il benessere umano, l'industria mineraria, l'industria manifatturiera, i servizi pubblici, l'agricoltura, l'industria automobilistica, l'industria civile, l'ambito educativo e l'industria aerospaziale [7]. Il settore aerospaziale è attualmente l'industria in cui il ruolo dei digital twin si è più affermato poiché per primo ha iniziato a investire e a studiare questa tecnologia a causa della complessità dei sistemi e, degli elevati costi e tempi di sviluppo.

Nell'industria aerospaziale e nell'industria automobilistica i gemelli digitali presentano i seguenti vantaggi e applicazioni:

- Progettazione personalizzata,
- Rilevazione di difetti,
- Rilevazione di difetti sui veicoli/velivoli,
- Monitoraggio in tempo reale e analisi predittive,
- Ottimizzazione dei carichi di trasporto,
- Simulazioni al variare delle condizioni meteo,
- Memoria di analisi e dati,
- Tracciabilità.

Collegandoli al paragrafo 1.2.2, gli ingegneri usano i prototipi virtuali generati attraverso i digital twin durante la fase di progettazione per testare le varie configurazioni di progetto prima di investire sulla costruzione di un prototipo fisico. Ciò permette così di ridurre i costi, il tempo e le risorse per la prototipazione poiché non è necessario sviluppare N prototipi fisici prima di ottenere la configurazione ottimale.

A livello teorico, come accennato precedentemente, abbiamo differenti definizioni a seconda dell'interazione tra prodotto virtuale e quello reale. Come mostrato nella figura 2 [7] possiamo avere diverse condizioni: un modello digitale ovvero la rappresentazione virtuale di una entità fisica, un'ombra digitale (*digital shadow*) ovvero la rappresentazione virtuale con un flusso unidirezionale di informazioni. Questo flusso di informazioni e di dati proviene dall'oggetto fisico; infatti, un cambiamento dell'oggetto fisico provoca un cambiamento nell'oggetto digitale e non viceversa. L'ombra digitale permette di avere una visione dedicata di un processo di produzione, di sviluppo e di regolazione, con il proposito di creare un sistema in grado di acquisire ed elaborare dati in tempo reale ottenuti dal prodotto/processo fisico [11]. Infine, come massimo livello di integrazione abbiamo il *digital twin*, in questo caso abbiamo un flusso bidirezionale di dati e informazioni tra modello fisico e virtuale.

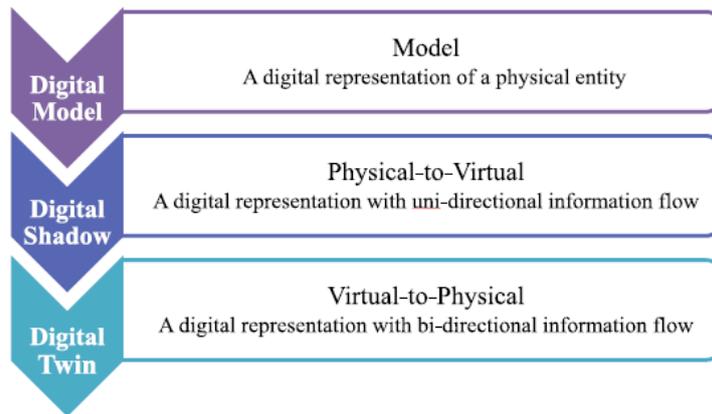


Figura 2 -Diagramma del livello di integrazione delle tecnologie Model-Based [7]

Le tecnologie implementate e integrate nei digital twin sono ancora in fase di sviluppo; infatti, come tecnologia viene ritenuta nella fase iniziale in molti settori. Nei settori in cui è presente però permette di avere un impatto positivo in termini di produttività, sostenibilità e innovazione [12].

1.4 Il *Model-Based Systems Engineering*

Alla base di un gemello digitale si pone il *Model-Based Systems Engineering* (MBSE) ovvero quella branca dell'ingegneria che si pone come obiettivo lo studio dei sistemi. L'ingegneria dei sistemi si basa sui modelli al fine di supportare le richieste del sistema in fase di progetto, di analisi, di verifica e di valutazione; queste attività iniziano dallo stato di progettazione concettuale e continuano attraverso lo sviluppo e successivamente in tutte le fasi del ciclo vita (INCOSE - *International Council on Systems Engineering*). È una scienza interdisciplinare che aiuta l'analisi, la pianificazione e la progettazione ottimale di sistemi tecnici complessi. Il sistema è un insieme di componenti correlati che interagiscono l'uno con l'altro in modo organizzato al fine di raggiungere uno scopo comune. I componenti di un sistema possono essere molto differenti, ad esempio: persone, organizzazioni, procedure, software ed equipaggiamenti [13-15-16]. I modelli su cui si basa il MBSE sono delle versioni semplificate di un fenomeno o di un concetto, che permettono l'astrazione della realtà eliminando tutto ciò che non sia strettamente necessario al fine di avere una miglior comprensione del sistema. Il modello può avere diverse rappresentazioni: matematiche, fisiche o grafiche. Questa tecnologia viene utilizzata spesso nelle fasi iniziali dello sviluppo prodotto [10].

Lo sviluppo dell'ingegneria di sistema è stato favorito negli ultimi anni da un incremento della velocità del mercato, dalla complessità dei prodotti odierni e dai cicli vita dei sistemi più veloci. I settori in cui l'ingegneria dei sistemi è applicata in maniera più regolare è l'industria aerospaziale civile e militare. L'ingegneria di sistema ha varie definizioni attraverso le varie industrie, autori e standard. INCOSE definisce l'ingegneria di sistema anche come un approccio interdisciplinare che ha come scopo la realizzazione di un sistema di successo; si focalizza sulle necessità del cliente e sulle richieste funzionali nelle prime fasi di sviluppo prodotto, e successivamente si procede con la validazione [14]. Il MBSE permette un incremento delle abilità di gestione di un sistema complesso grazie alle seguenti motivazioni: il modello può essere osservato rispetto prospettive differenti,

aumenta la tracciabilità (in caso di variazioni sull'analisi) a livello di ciclo vita ed è possibile avere dati e documenti partendo dal modello digitale, permette a coloro che prendono le decisioni di avere più informazioni e opzioni per le scelte, infine riduce i costi di sviluppo del sistema, gli errori umani e le attività di re-ingegnerizzazione.

Il system engineering è inoltre codificato e legiferato dalla normativa ISO 15288 [17] fornendo così una metodologia, un linguaggio, degli strumenti e una gestione dei dati unificata [13]. La metodologia applicata dall'ingegneria dei sistemi si basa sui modelli digitali che sono stati sviluppati attraverso dati riconosciuti dagli utenti acquisiti da un modello fisico.

L'ingegneria dei sistemi ha inoltre sviluppato dei metodi di rappresentazione del ciclo vita del prodotto unificati, i più comuni sono: il diagramma a cascata, a "V" e a spirale. Il diagramma a cascata è composto da una serie di blocchi che rappresentano la sequenza del ciclo vita del prodotto iniziando dal primo (più in alto) sino all'ultimo (più in basso). Il diagramma a spirale, invece, pone il prodotto al centro e crea una spirale attorno allo stesso indicando tutte le fasi del ciclo di vita: questo permette di avere una visione in ottica di economia circolare. Ed infine il diagramma a "V", forse il più utilizzato a livello industriale, verrà descritto più dettagliatamente nel paragrafo successivo, poiché è utilizzato anche in Danis Engineering.

1.4.1 Il diagramma a "V"

I modelli a V sono stati definiti nella VDI *guideline* 2006 [10] sono dei modelli grafici che permettono di avere un'ampia e riconoscibile visione su tutto il ciclo vita di un prodotto oppure su una parte di esso attraverso una rappresentazione a forma "V". Si ha una diretta interconnessione tra le fasi di produzione del prodotto e di progettazione del prodotto stesso. I modelli a V hanno svariati campi di applicazione e possono essere un ottimo punto di partenza per ogni processo di sviluppo prodotto.

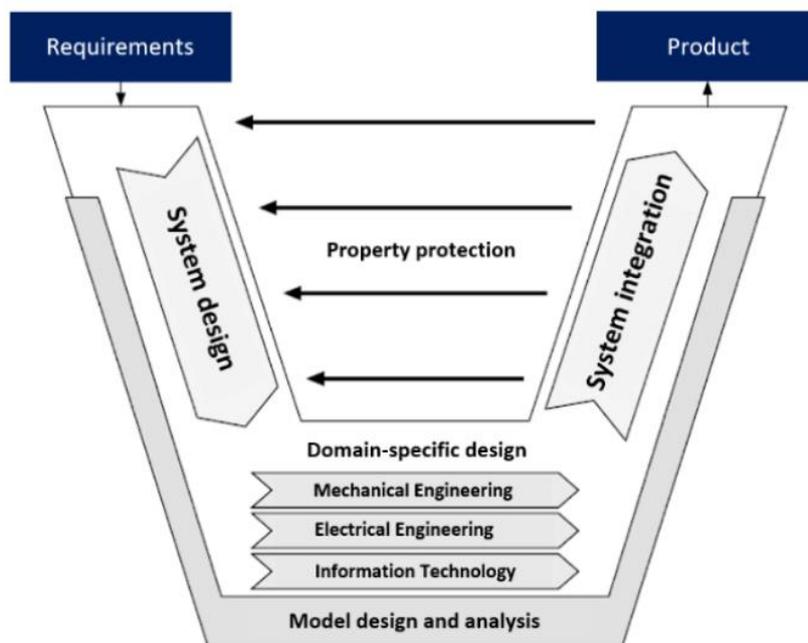


Figura 3 - Rappresentazione generale del diagramma a "V" [10]

Come possiamo osservare nella figura 3, il modello a V si focalizza sul processo di sviluppo prodotto dividendosi in tre macrogruppi principali. La fase di *system design*: si articola a partire dai requisiti imposti sul prodotto e sviluppa una soluzione sulla base di essi, ottenendo così una configurazione che descrive gli effetti logici e fisici del prodotto. A questo segue la fase della progettazione specifica per ogni dominio, che include una specifica elaborazione in modo distinto della soluzione nelle specifiche discipline (ing. meccanica, ing. elettrica, informatica). Come ultima fase si ha l'integrazione dei vari domini al fine di ottenere il prodotto desiderato. Tutte le fasi presenti nel diagramma sono anche supportate da modelli e simulazioni [10].

1.5 Applicazioni “X-in-the-LOOP”

Le tecnologie “*X*”-in-the-Loop sono delle tecnologie che si basano sulla simulazione di modelli a circuito chiuso. “*X*”-in-the-Loop permette anche l'integrazione (a livello di software, hardware e di modello) di tutti i componenti e sistemi [18-19]. Queste tecnologie permettono analisi e test in tempo reale di un intero sistema oppure parti di esso. Facendo un esempio automobilistico è possibile eseguire analisi sull'intero veicolo oppure su alcune parti di esso come il sistema sterzo. Queste analisi e test sono integrate direttamente con il diagramma a V. In ambito automotive sono presenti differenti metodologie applicative delle tecnologie “*X*”-in-the-Loop ma andremo ad approfondire le tecnologie usate in Danisi Engineering ovvero l' *Hardware-in-the-loop (HiL)* e il *Vehicle-in-the-Loop (ViL)*.

Il *Vehicle-in-the-loop* è definito come la fusione dell'ambiente reale del test del veicolo con l'ambiente virtuale in cui avviene la simulazione. Lo sviluppo implementato nell'ambiente virtuale si riflette non solo sulla dinamica del veicolo, che ottiene elevati vantaggi a livello di configurazione, ma anche sulla riduzione di costo di costruzione dei prototipi. Inoltre, si ha una riduzione del rischio di impatto con oggetti esterni durante la fase di test su strada/pista migliorando notevolmente la sicurezza nell'esecuzione delle prove. Sono presenti differenti metodi per la simulazione ma la maggior parte dei controlli sono sviluppati e verificati sui modelli a V [20].

In fase di sviluppo di una vettura possiamo evidenziare differenti strumenti e tecnologie di simulazioni a circuito chiuso che vengono utilizzate in base al punto di sviluppo [20]:

- *MIL: Model in the Loop*
- *SIL: Software in the loop*
- *HiL: Hardware in the loop*
- *ViL: Vehicle in the loop*
- *Test drive.*

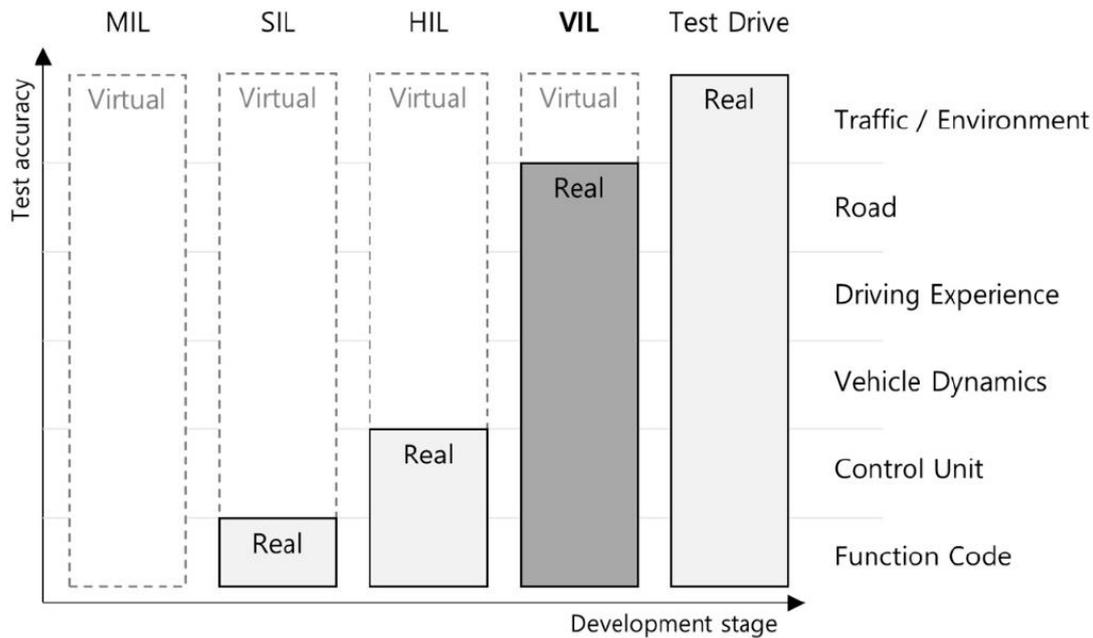


Figura 4 - Diagramma a barre che mostra le tecnologie impiegate durante lo sviluppo di una vettura [20]

ViL è la verifica di un sistema complesso che più si avvicina al veicolo reale da testare. In questa fase di sviluppo del veicolo è possibile svolgere le maggiori verifiche anche sul modello reale, focalizzandosi sui test di dinamica del veicolo, esperienza di guida e test su strada. *ViL* permette inoltre di verificare le funzionalità degli *ADAS* (*Advanced Driver Assistance Systems*) e include le funzionalità del *Driver-in-the-Loop*, ovvero l’inserimento di un pilota all’interno del simulatore che sia in grado di dare riscontri diretti riguardando la sensazione di guida del veicolo. Attività come

Vehicle/Driver-in-the-Loop vengono svolte di consueto in Danisi Engineering nella divisione AVD.

Analizzando ora la tecnologia *Hardware-in-the-Loop*, possiamo affermare che è una tecnologia molto diffusa nell’ambito automotive. La simulazione *Hil* è definita come un metodo in cui uno o più componenti /sottosistemi reali interagiscono in circuito chiuso con componenti/sottosistemi simulati in tempo reale in un ambiente virtuale [21]. La tecnologia *HiL* è inoltre integrata nel *V-design* ed è un approccio basato su algoritmi di progettazione e sui modelli di ambiente reale che possono essere eseguiti da un Hardware in tempo reale collegati ad un oggetto fisico [22].

È inoltre possibile definire il concetto di *Car-in-the-Loop* quando viene testato un veicolo completo o parte di esso in un banco prova. Il vantaggio principale di svolgere un test *Car-in-the-Loop* è l’approccio sequenziale e il risultato è ottenuto con un circuito chiuso [23]. Inoltre, è possibile integrare il pilota umano durante la fase di test del veicolo all’interno dell’ambiente simulato (*Human-in-the-Loop*).

Le tecnologie “X” in the Loop prima di essere applicate devono essere validate al fine di ottenere dei risultati attendibili rispetto il caso reale.

1.6 Ciclo vita del prodotto

Il ciclo vita del prodotto è l'insieme di tutte le fasi di vita di un prodotto dalla nascita sino allo smaltimento dello stesso e può essere visto sia in ottica industriale sia in ottica biologica. In ottica industriale, a seguito dello sviluppo prodotto, le materie prime vengono estratte e lavorate per la produzione dello stesso, segue la produzione, la distribuzione, l'utilizzo e lo smaltimento/riciclo. Il materiale riciclato entra in un nuovo processo e nella vita di un altro prodotto: questa è la base dell'economia circolare. In ottica biologica, le materie prime sono estratte dal suolo per la produzione del prodotto, questo genera un impatto a livello ambientale producendo sostanze tossiche, organiche e inorganiche. Le sostanze organiche entrano nel ciclo vita organico generando nuovi depositi che diventeranno risorse e nuove materie prime, mentre le sostanze tossiche e inorganiche sono le componenti che generano un impatto ambientale, oltre a quelle derivate dal ciclo industriale [1].

Attualmente ci focalizzeremo sul ciclo di vita del prodotto a livello industriale. Il processo di creazione di un nuovo prodotto comprende in sé la fase di programmazione dello stesso, di progetto, di preparazione del lavoro e produzione [10]. Il ciclo di sviluppo inizia con la fase di programmazione dello stesso, in cui si procede come la definizione delle richieste e degli obiettivi al fine di ottenere le caratteristiche desiderate. Si procede con tutte le fasi introdotte precedentemente nel paragrafo 1.1 sino all'inizio della produzione. Segue la produzione del prodotto che rispetta tutte le caratteristiche definite in precedenza nella prima fase dello sviluppo. Il prodotto finito viene distribuito in tutte i centri vendita ed in fine utilizzato in base al suo scopo dal cliente. L'oggetto infine deve essere correttamente smaltito al fine di riciclare alcune componenti per nuovi utilizzi o procedere con un corretto smaltimento e dismissione. Il ciclo vita di un prodotto è un processo molto complesso che va ad impattare su diversi sistemi, per questo nel paragrafo successivo si andrà ad analizzare la metodologia LCA per la valutazione degli impatti ambientali di un prodotto.

1.7 *Life Cycle Assessment*

La metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA) è uno strumento che attualmente viene usato per determinare l'impatto ambientale di prodotti o processi. L'applicazione del metodo è descritta nelle normative ISO 14000 ed è attualmente usata come riferimento per la valutazione dell'impatto ambientale dei prodotti e dei processi in un'ottica di ciclo vita, iniziando dall'estrazione delle materie prime, proseguendo nei vari processi produttivi, nell'utilizzo e infine la dismissione in discarica dello stesso. Ogni passo del ciclo vita del prodotto ha i propri impatti ambientali a causa dell'uso di risorse, generazione di emissioni e di sprechi. Il processo di LCA è sistematico e consiste in quattro passi fondamentali:

- definizione dello scopo e obiettivo,
- analisi di inventario,
- valutazione dell'impatto,
- interpretazione critica dei risultati.

In sintesi, l'LCA è uno strumento che aiuta le aziende nella identificazione della potenzialità di miglioramento del prodotto/processo relativamente all'efficienza energetica, al consumo di

materiali e alla minimizzazione degli sprechi, e permette la comparazione tra più possibili opzioni [24].

A livello normativo la procedura LCA è definita dalla ISO 14040 del 2006 [25] che definisce la gestione dell'impatto ambientale in particolare i principi e la struttura della stessa. LCA può essere usata per individuare l'opportunità per migliorare le performance ambientali dei prodotti durante il loro ciclo vita; informare i responsabili che prendono le decisioni nell'industria, nelle organizzazioni governative e non governative; selezionare gli indicatori principali per valutare le performance ambientali includendo le tecniche di misura e di marketing.

LCA valuta i potenziali impatti e aspetti ambientali attraverso il ciclo vita del prodotto dalla materia prima attraverso la produzione, l'uso, i trattamenti di fine vita, il riciclo e lo smaltimento. Come citato precedentemente è divisa in quattro fasi fondamentali e come mostrato dalla figura 5 si andrà ora ad analizzare le fasi nel dettaglio.

Lo scopo di una analisi LCA dipende dall'oggetto e dallo studio che vogliamo ottenere, in base a questo si definisce il livello di dettaglio e i confini del sistema, queste caratteristiche vengono definite nella prima fase. La seconda fase invece è l'inventario del ciclo vita LCI (*Life Cycle Inventory*), esso è l'insieme di dati in input e in output che riguardano il sistema che dobbiamo analizzare. Il livello di dettaglio dei dati viene fatto sempre in base agli obiettivi definiti al punto precedente. La terza fase è la valutazione dell'impatto del ciclo vita, LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*) in questa fase si aggiungono informazioni per migliorare i risultati della LCI e renderli più comprensibili per l'ultima fase dell'analisi. L'ultima fase della LCA è l'interpretazione dei risultati ottenuti nei punti precedenti. Da questi risultati è possibile fare considerazioni e prendere decisioni in base all'obiettivo e allo scopo prefissato all'inizio.

Sempre a livello normativo la ISO 14044 [26] definisce i requisiti e le linee guida dell'LCA. La normativa ISO 14067 del 2019 [27] si focalizza sulle emissioni di gas serra, specificando le indicazioni per i livelli dell'organizzazione per la quantificazione e la rendicontazione delle emissioni e degli assorbimenti di gas serra, definisce le emissioni dirette e indirette, il GWP (*Global Warming Potential*), la CO_{2eq} e le tipologie di dati e propone inoltre iniziative per la riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra.

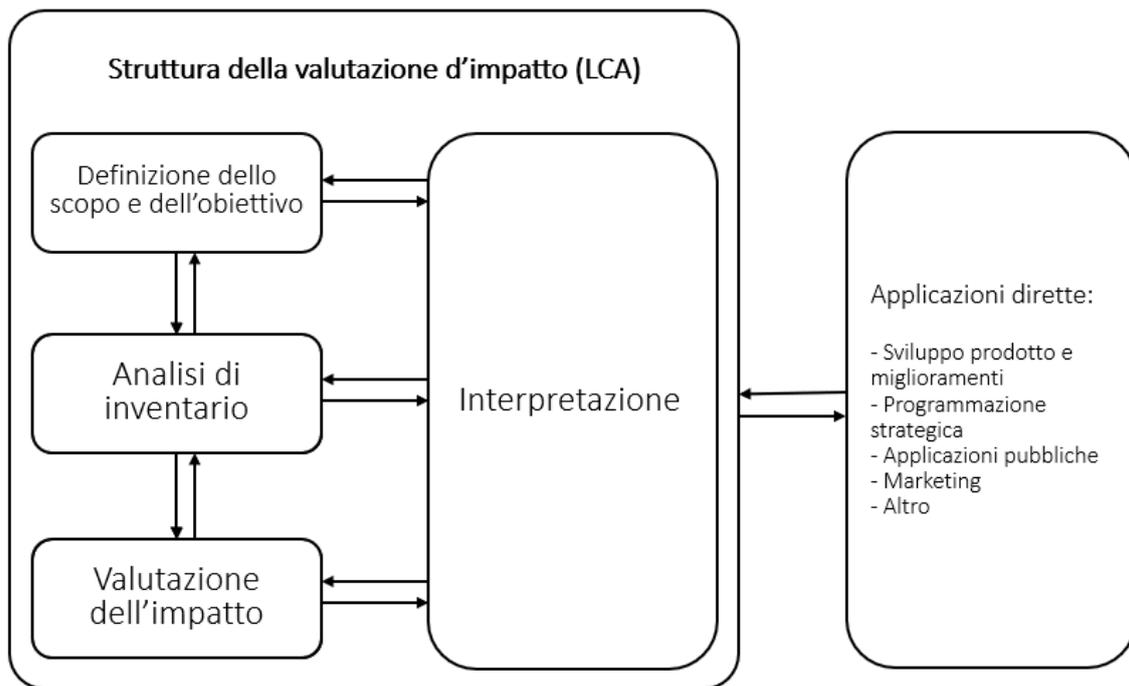


Figura 5- Struttura della valutazione d'impatto ambientale

È possibile come step finale l'integrazione dell'impatto ambientale durante la fase di sviluppo prodotto, questo processo si chiama *ECO-DESIGN*. È presente una direttiva europea sulla progettazione ecocompatibile che prevede regole per migliorare le prestazioni ambientali ed energetiche dei prodotti, fissando dei minimi per l'efficienza energetica [28:33]. In ambito industriale si ha difficoltà a mettere in pratica le richieste delineate della direttiva europea a causa della mancanza di strumenti e metodi che facilitino l'integrazione di parametri ambientali nei processi di sviluppo prodotto. Poiché la procedura LCA non stabilisce a priori quale sia il prodotto migliore in senso assoluto, è stato necessario sviluppare un approccio più semplice e veloce per integrare gli aspetti ambientali in fase di progettazione e sviluppo prodotto, per questo si sta puntando sull'*eco-design* [24].

1.7.1 Indici ambientali

Il ciclo vita di ogni prodotto genera un impatto ambientale, quest'ultimo viene classificato in base ad alcuni indici come [1]:

- Riscaldamento globale: è la somma di tutti i fattori che generano gas a effetto serra, particolato e vapore d'acqua nell'atmosfera generato dal processo industriale e del prodotto. Viene misurato in CO_{2eq} e include le emissioni di anidride carbonica (CO_2), metano (CH_4), clorofluorocarburi (CFCs), ossidi di azoto (NO_x), particelle di carbonio;
- Utilizzo delle risorse: le materie prime utilizzate per la produzione e l'energia ottenuta da fonti non rinnovabili sono limitate. Questo indice valuta appunto la limitatezza di queste risorse;
- Scarti solidi: durante il ciclo vita il prodotto genera degli scarti solidi che vengono in parte riciclati ma per la maggior parte vengono smaltiti in inceneritori e discariche. L'utilizzo di questi impianti generano inquinanti in atmosfera;
- Inquinamento dell'aria: i tipici inquinanti aeriformi sono la CO_2 , NO_x , SO_2 , O_3 e i composti organici volatili ottenuti durante tutto il ciclo di vita del prodotto;

- Inquinamento dell'acqua: causata principalmente dagli scarichi in acqua dei processi industriali;
- Degradazione della terra: consiste negli effetti causati dall'estrazione delle materie prime, i quali impattano sulla fertilità del suolo, sull'erosione e sulla deforestazione;
- Biodiversità: è l'insieme di varietà di piante e di specie animali. La biodiversità è messa a rischio da tutti i processi che hanno un impatto sulla terra come: lo sviluppo urbano e le attività delle industrie;
- Privazione dell'ozono: l'ozono è uno stato di gas che protegge la Terra dalle radiazioni solari.

Questi sono solo alcuni, tra i più comuni, indici ambientali, ne esistono altri che vanno ad analizzare gli effetti diretti e indiretti sull'uomo. Inoltre, sono presenti altri indici che vanno a raggruppare quelli precedentemente elencati che hanno lo scopo di valutare in maniera diretta l'impatto su una macrocategoria. Questi indici sono rielaborati e combinati al fine di valutare:

- Gli effetti sulla salute dell'uomo,
- Gli effetti sulla salute di un ecosistema,
- La disponibilità delle risorse.

1.8 Economia circolare

L'economia circolare è un modello di produzione e di consumo che permette di allungare il ciclo vita dei prodotti. A differenza dal tradizionale modello economico lineare, che si basava su un modello prendi-costruisci-consuma-usa e che imponeva grandi disponibilità di energia e di materie prime, l'economia circolare punta al riutilizzo, alla riparazione, alla ricostruzione e al riciclaggio dei materiali. Questi processi puntano a ridurre al minimo gli sprechi allungando così la vita di un prodotto. I vantaggi principali dell'economia circolare sono: la protezione dell'ambiente e la riduzione della dipendenza delle materie prime. Quest'ultima si ottiene grazie al riciclaggio che permette di riutilizzare i materiali (un esempio, è quello dei metalli ottenuti dai componenti elettronici). La protezione dell'ambiente è ottenuta grazie alla riduzione dell'utilizzo delle risorse naturali minimizzando così l'impatto sul paesaggio e sulla biodiversità [34,35]. Le politiche per l'attuazione dell'economia circolare verranno trattate nel paragrafo 1.10.



Figura 6 - Economia circolare (a sinistra) e Sustainable development goals (a destra)

L'economia circolare genera un cambiamento nel modo di pensare anche nella fase di progettazione introducendo così la progettazione circolare.

1.9 Transizione digitale ed ecologica

La transizione digitale è un cambiamento apportato da nuove tecnologie per rimanere competitivi “nell’era di internet”, sia nel settore pubblico che nel settore privato. La trasformazione digitale permette di: ampliare modelli di business, investire su nuove tecnologie, focalizzarsi sulle richieste del cliente e ampliare la gamma di servizi offerta dall’impresa [36]. La transizione digitale provoca un cambiamento sulle persone, sui processi e sugli strumenti. È possibile osservare la transizione digitale anche grazie ai prodotti “intelligenti” che hanno funzioni di monitoraggio continuo e di aggiornamento. Un esempio di transizione digitale a livello produttivo è l’industria 4.0. L’industria 4.0 sfrutta tecnologie digitali come: i dispositivi IoT (*Internet of Things*), i sensori, le simulazioni, la robotica, l’intelligenza artificiale, i *Big Data*, la realtà aumentata e la fabbricazione additiva. Tutte queste tecnologie permettono di avere un aumento della velocità, dell’interconnessione e della comunicazione all’interno dell’azienda e della produzione [37]. In ambito automotive, uno strumento fondamentale che favorisce la transizione digitale possono essere i *digital twin* [38,12].

La transizione ecologica si pone l’obiettivo di modificare radicalmente i processi di produzione e i consumi con il fine di mettere al centro di ogni processo l’ecologia. La transizione ecologica modifica anche il processo di sviluppo prodotto, in ottica economia circolare e ciclo vita del prodotto andando a focalizzarsi sul risparmiare energia, riutilizzare, riciclare e preservare la natura. La transizione ecologica ha un impatto non solo a livello industriale ma anche a livello di società andando a educare le persone.

Entrambe le transizioni contribuiscono al miglioramento dello sviluppo del ciclo vita prodotto attraverso una giusta valutazione delle risorse e dei fabbisogni dei sistemi.

1.10 UE e altre organizzazioni

L’Unione Europea e alcune organizzazioni, come ONU (Organizzazione Nazioni Unite) e UNFCCC (Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici), negli ultimi anni si sono attivate, attraverso obiettivi e decreti-legge, per attuare politiche a difesa dell’ambiente. Il primo accordo a livello globale per ridurre le emissioni di gas a effetto serra è stato il protocollo di Kyoto nel 1997. Questo ha portato a un cambiamento delle politiche a livello industriale per attuare e provare a raggiungere gli obiettivi prefissati. Negli anni gli obiettivi sono cambiati, infatti nel 2015 i paesi membri della UNFCCC hanno stipulato l’accordo di Parigi. È stata definita “l’Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile” in cui sono presenti, in particolare, 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (*SDGs*) che hanno lo scopo di migliorare a livello mondiale, entro il 2030, le condizioni economiche, sociali e ambientali [39]. A livello europeo i *SDGs* sono stati presi in considerazione nel 2019, oltre alle politiche: “*Green Deal*” e “*Fit for 55*”. Il “*Green Deal*” è un accordo tra i paesi dell’Unione Europea che si pone l’obiettivo: di combattere il cambiamento climatico, il degrado ambientale e migliorare il benessere e la salute dei cittadini europei [40]. In ambito industriale invece, il “*Green Deal*” si pone l’obiettivo di sfruttare energia pulita ottenuta da fonti rinnovabili e tecnologie all’avanguardia, edifici efficienti sotto il punto di vista energetico, una industria competitiva e resiliente. Mentre a livello di prodotto si pone l’obiettivo di avere prodotti più duraturi che possono essere riparati, riciclati e riutilizzati al fine di creare un minor impatto a livello ambientale. Mentre “*Fit for 55*” è una normativa europea che si pone l’obiettivo di ridurre del 55%

le emissioni di gas serra entro il 2030. Le politiche che devono essere attuate puntano a garantire una transizione ecologica equa a livello economico e sociale rafforzando l'innovazione e la solidità delle industrie [41]. Le politiche attuate per ridurre del 55% le emissioni sono: il miglioramento dell'efficienza energetica, l'utilizzo di energie ottenute da fonti rinnovabili, l'utilizzo di carburanti sostenibili per il trasporto aereo e marittimo, la costruzione di una infrastruttura per i combustibili alternativi, la delibera a nuove norme sulle emissioni di CO₂ per le autovetture, la creazione di un fondo sociale per il clima, la creazione di meccanismi di adeguamento del carbonio alle frontiere, la tassazione dell'energia e un'analisi sull'utilizzo del suolo.

1.11 DANISI Engineering

Danisi engineering è un'azienda specializzata nell'ingegnerizzazione dei veicoli e nella prototipazione nell'industria automotive. Fornisce diversi servizi: dalla progettazione di un singolo componente alla progettazione dell'intero veicolo, dal prototipo alla produzione di massa, allo sviluppo di tecnologie innovative come: controllo ADAS, guida autonoma e trazione ibrida ed elettrica. Inoltre, ha un reparto specializzato sulla dinamica del veicolo in cui sono presenti due simulatori: uno statico e uno dinamico in cui è possibile svolgere simulazioni con elevato realismo. Il simulatore statico è collegato ad un banco prova attuatori sterzo (brevettato da Danisi e Meccanica 42) che consente le simulazioni *Hardware-in-the-Loop* delle scatole sterzo, eventualmente con il pilota a borda (*Driver-in-the-Loop*) su tracciati reali digitalizzati. Il simulatore dinamico invece permette di sentire l'accelerazione e la decelerazione, il grip sul terreno e i feedback dello sterzo sulla strada attraverso un ambiente virtuale con elevato realismo (approfondimento nel paragrafo 3.3). Queste soluzioni estremamente realistiche permettono, oltre a risparmiare tempo e soldi, in quanto è possibile testare l'intero veicolo prima della costruzione del primo prototipo, sono estremamente sicure per l'essere umano poiché non si ha il rischio di incidenti con oggetti esterni durante la fase di test. Le tecnologie utilizzate si basano sull'*Hardware in the Loop* sfruttando un sistema che riproduce al guidatore il giusto *feedback* [42]. Per quanto concerne la fase di sviluppo prodotto in azienda esso verrà approfondito nel paragrafo 3.4 invece le attività e le tecnologie riguardanti i simulatori verranno approfondite nel paragrafo 3.3.

1.12 Altre aziende

Negli ultimi anni molte aziende si stanno dotando di sistemi innovativi che sfruttano tecnologie "*X*"-*in-the-loop* e i *digital twin*.

Danisi engineering collabora con un'azienda che fornisce software e dati per i simulatori. Questa azienda, chiamata VI-Grade, si è posta l'obiettivo di raggiungere zero prototipi fisici, ovvero la realizzazione di un solo prototipo virtuale. Questa azienda sviluppa sistemi che hanno come principali applicazioni le analisi di dinamica della moto, dinamica del veicolo, dinamiche ferroviarie, automobilismo (permette di fare analisi del circuito e ottimizzare il giro), NVH (rumore, vibrazione e durezza), ADAS e veicoli autonomi (attraverso software che vanno a simulare il comportamento su una strada reale trafficata), HMI (interfaccia uomo macchina) e le applicazioni di ride and Handling (simulatori vanno a valutare la guida e la maneggevolezza del veicolo) [43]. Molte aziende in ambito automotive si stanno dotando o sono già dotate di simulatori basati su MBSE con il fine di migliorare lo sviluppo della vettura. In ambito automotive, infatti, le tecnologie

MBSE e DT si stanno sviluppando e stanno sempre più prendendo piede all'interno delle case costruttrici. Tra i costruttori di autoveicoli che utilizzano queste tecnologie possiamo trovare marchi sia alto prestazionali sia non. Queste aziende sfruttano i digital twin sia in fase di sviluppo prodotto sia nella fase di processo.

In ambito aerospaziale invece, le tecnologie MBSE e *Digital twin* sono molto diffuse. Queste tecnologie sono molto presenti poiché l'industria aeronautica è stata la prima ad utilizzarne e a creare uno standard. Inoltre, gli aerei essendo prodotti estremamente complessi sia a livello di prodotto che di processo hanno facilitato la diffusione dei DT. La NASA infatti è stata una tra le prime agenzie a utilizzare DT. Successivamente aziende costruttrici di aeromobili, sia in ambito civile che in ambito militare, si sono dotate, ormai da anni, di tecnologie *model-based* in ambito sviluppo prodotto e di processo con il fine di ridurre il time to market e ridurre i costi di sviluppo.

Inoltre, queste tecnologie possono ricoprire un ruolo fondamentale per la transizione da vetture a motore termico a vetture a trazione ibrida o elettrica, infatti, molte aziende in ambito automotive si stanno adoperando per inserire i *digital twin* e le simulazioni Hil durante lo sviluppo prodotto. In ottica transizione elettrica i *digital twin* e la simulazione sono visti come una soluzione sempre presente durante lo sviluppo prodotto per essere sempre competitivi e rispettare i termini e il budget a disposizione per lo sviluppo di nuovi prodotti nelle aziende del settore. Secondo uno studio dell'ANFIA (Associazione Nazionale Filiera Industriale Automobilistica) attualmente le aziende che utilizzano in modo definitivo e costante queste tecnologie sono solo una piccola percentuale, il 18 %, tra tutte quelle che lavorano in ambito automotive [60].

Capitolo 2 - Metodologia

Da sempre, in ambito automobilistico, sono presenti i prototipi durante lo sviluppo prodotto di una vettura. Il prototipo, infatti, è uno strumento che viene utilizzato come mezzo al fine di validare un progetto durante la fase di sviluppo prodotto. Tra i motivi per il quale i prototipi vengono sviluppati è per lo svolgimento di prove di verifica al fine di controllare il corretto funzionamento. Pertanto, è da sottolineare il fatto che è solo un mezzo utilizzato per il raggiungimento del fine ultimo, ovvero quello della validazione. Ora è necessario chiedersi, e nel caso valutare, se sono presenti altri strumenti più efficienti ed efficaci, ottenuti grazie al miglioramento tecnologico, che possono essere utilizzati nella fase di sviluppo prodotto al posto della classica prototipazione fisica. Un possibile strumento che è applicabile al posto della costruzione dei prototipi fisici è quello ottenuto tramite la simulazione. La simulazione, infatti, può essere un altro mezzo affidabile e attendibile che permette la validazione del nostro progetto. Infatti, le simulazioni, a parità di risultato, permettono un risparmio di tempo e di denaro oltre ad un probabile risparmio di emissioni di CO₂. Il punto principale della tesi è la stesura di una metodologia che si pone proprio l'obiettivo di descrivere e valutare l'impatto ambientale, e il possibile vantaggio che si ottiene dalla generazione di un prototipo virtuale durante la fase di sviluppo prodotto. L'analisi si svilupperà valutando l'impatto ambientale del singolo prototipo di una vettura fisica e successivamente si analizzerà l'impatto ambientale di un prototipo virtuale ottenuto al simulatore. Seguirà inoltre nel capitolo 5 l'applicazione della metodologia ad alcuni casi pratici.

2.1 Impatto ambientale del prototipo di vettura fisico

L'impatto ambientale come citato nel paragrafo 1.7 è valutato attraverso il metodo *Life Cycle Assessment* (LCA) secondo la normativa ISO 14040 [25]. LCA è un processo normato e per questo sistematico che consta di quattro step fondamentali: definizione dello scopo e dell'obiettivo, analisi di inventario, valutazione dell'impatto e interpretazione critica dei risultati. Per applicarlo al caso in esame dobbiamo svolgere delle modifiche alla procedura al fine di poter paragonare l'impatto di un prototipo fisico rispetto al suo gemello digitale.

Il primo passo è la definizione dello scopo e dell'obiettivo: lo studio si propone come finalità quella di valutare l'impatto ambientale di un prototipo di vettura fisica al fine di confrontarlo con un prototipo virtuale (della stessa vettura) ottenuto con la simulazione durante lo sviluppo prodotto. In questa parte dell'analisi, infatti, lo scopo è quello di valutare l'impatto di un prototipo fisico che verrà preso da riferimento come unità funzionale per le analisi di impatto ambientale nel caso della produzione di differenti prototipi. In base allo scopo e all'obiettivo viene scelto il perimetro entro il quale svolgere l'analisi, infatti, quest'ultima è incentrata sulla costruzione e sul test del prototipo fisico che è presente all'interno del rettangolo blu della figura 8.

L'indicatore ambientale scelto per l'analisi è il fattore riscaldamento globale, espresso in CO₂eq. Questo indicatore verrà definito e approfondito successivamente nel paragrafo 2.3.

La seconda fase è l'analisi di inventario. L'inventario di tutti i componenti presenti nel prototipo viene fatto a partire dalla distinta base (*BOM -Bill of Material*). Nella distinta base sono presenti tutti i componenti con le rispettive caratteristiche, quantità, lavorazioni da svolgere e descrizione.

L' LCA del prototipo comprende:

1. l'estrazione e trasporto delle materie prime per la produzione del prototipo,
2. il trasporto della componentistica necessaria per costruire il prototipo,
3. la produzione dei componenti,
4. assemblaggio del prototipo,
5. la prova in pista,
6. infine, lo smaltimento e il riciclo.

Il primo punto riguarda l'estrazione e trasporto delle materie prime per la produzione dei materiali che poi verranno utilizzati sul prototipo. Le materie prime vengono estratte e trasformate in semilavorati (come, ad esempio, tubi o lamiere in acciaio) che arrivano in azienda per procedere con le lavorazioni successive.

Il secondo punto riguarda la gestione dell'impatto ambientale dei componenti commerciali. Si è scelto di valutare l'impatto ambientale legato solamente al trasporto del componente commerciale finito allo stabilimento per due principali motivi: il primo riguarda la difficoltà nel reperire dati e informazioni riguardanti la produzione e il rispettivo impatto ambientale di un componente commerciale, il secondo motivo è che quest'ultimo non è costruito con il fine di essere parte del prototipo ma viene prodotto per differenti applicazioni, e poi successivamente scelto per lo stesso.

Il terzo punto riguarda la produzione dei componenti del prototipo: i semilavorati principalmente in acciaio o leghe di alluminio (approfondimento nel paragrafo 3.1) subiscono alcune lavorazioni meccaniche e termiche (approfondimento nel paragrafo 3.2) al fine di ottenere i componenti desiderati. Si avrà un consumo di energia per il funzionamento dei macchinari (torni, frese e CNC). Ovviamente le lavorazioni meccaniche produrranno anche degli scarti di materiale, questi non vengono inseriti all'interno dell'analisi poiché è estremamente complesso da considerare nella valutazione ed inoltre si rientra in ottica riciclo e smaltimento.

Il quarto punto riguarda l'assemblaggio del prototipo: i componenti commerciali, i componenti prodotti (descritti nel punto precedente) e tutti i componenti necessari sono presenti all'interno dello stabilimento. A questo punto i vari sottosistemi della vettura vengono assemblati tra di loro per ottenere il prodotto finito.

Il quinto punto è la prova in pista che consiste nella vita utile del prototipo, questo punto verrà dettagliato meglio successivamente 2.1.2, così da avere una visione più chiara durante la valutazione dell'impatto ambientale e per eseguire analisi di confronto.

L'ultimo punto è lo smaltimento e il riciclo dell'oggetto in esame. In questo caso non verrà preso in considerazione al fine di avere un'analisi comparativa tra il prototipo reale e quello virtuale. Ovviamente è una tappa fondamentale del ciclo vita del prodotto e in una analisi LCA deve essere tenuta in considerazione, ma, in questa applicazione, definito l'obiettivo iniziale di valutazione e di

comparazione dell'impatto ambientale tra prototipo virtuale e fisico si rischierebbe di uscire dal perimetro di analisi e per questo non viene considerato.

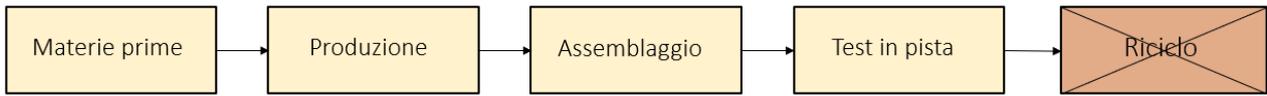


Figura 7- Diagramma a blocchi del ciclo vita di un prototipo di vettura

Si procede ora con una analisi più approfondita dividendo la fase di costruzione e quella di test su pista del prototipo. Questa distinzione viene fatta anche per rendere più facile il confronto e l'interpretazione critica dei risultati cercando di valutare quale fase impatta di più.

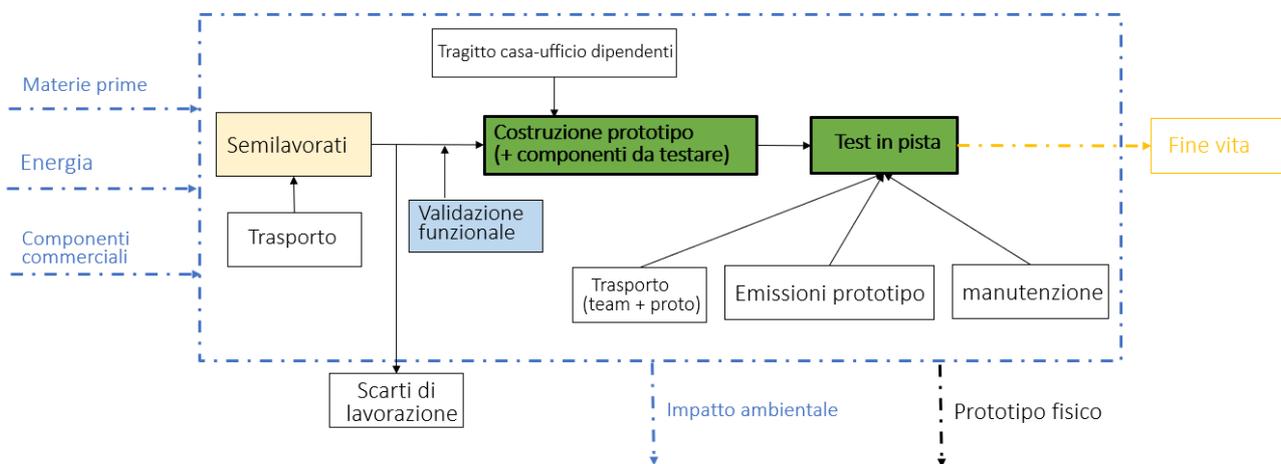


Figura 8- Schema a blocchi del volume di analisi di impatto ambientale per un prototipo di vettura fisica

Il diagramma a blocchi nella figura 8 mette in mostra il processo e i contributi di emissioni ambientali generati dalla costruzione e dal test in pista di un prototipo che verranno descritti nei paragrafi successivi. Il rettangolo tratteggiato in blu indica il perimetro dell'analisi. In ingresso al sistema sono presenti: i componenti commerciali, l'energia e le materie prime; in uscita si ha invece il prototipo fisico costruito e il rispettivo impatto ambientale. I rettangoli in verde rappresentano i punti principali di impatto ovvero la costruzione e il test in pista del prototipo. I blocchi non citati (in bianco) rappresentano tutti i contributi necessari alla costruzione e al test del prototipo fisico. Infine, fuori dal perimetro dell'analisi sono presenti gli scarti di lavorazione e il fine vita del prototipo.

2.1.1 Costruzione del prototipo

La costruzione di un prototipo si concentra sulle prime quattro fasi del LCA, ovvero le fasi riguardanti le materie prime, i componenti commerciali, la produzione e l'assemblaggio dello stesso.

Partendo dalla distinta base del prototipo è possibile raggruppare e dividere ogni componente in base al materiale e al processo produttivo che verrà eseguito.

Per quanto riguarda l'estrazione e trasporto delle materie prime per la produzione del prototipo, in stabilimento arrivano principalmente semilavorati. Questi sono stati ottenuti dalle materie prime a seguito di un processo industriale. Per poter calcolare l'impatto ambientale bisogna conoscere i kg

di CO_{2eq} rispetto al kg di materiale considerato, e la quantità di materiale (in kg). Note queste grandezze è possibile ottenere l'impatto ambientale di questo primo contributo con la seguente formula:

$$CO_{2eq} = (CO_{2eq}/kg) * kg \quad (1)$$

La CO_{2eq}/kg di materiale è una grandezza che è possibile ottenere attraverso alcuni database, per questo è possibile considerarla come dato secondario mentre i kg di materiale utilizzati per costruire il prototipo sono dati interni all'azienda e presenti nella distinta base del progetto, infatti, esso è considerato un dato primario.

Per quanto concerne il trasporto dei semilavorati che arrivano in stabilimento, conoscendo il luogo di provenienza del semilavorato è possibile valutare l'impatto ambientale applicando la seguente formula:

$$CO_{2eq} = (CO_{2eq}/km) * km \quad (2)$$

In questo caso la CO_{2eq}/km viene fornita attraverso alcuni database oppure direttamente della casa costruttrice del mezzo di trasporto utilizzato (che di solito sono camion/veicoli commerciali pesanti), per questo bisogna conoscere bene il mezzo di trasporto impiegato e il tragitto corretto per conoscere i km percorsi ed applicare la formula.

Il secondo punto riguarda la valutazione dell'impatto ambientale dei componenti commerciali. Nella distinta base sono anche presenti componenti commerciali (come ad esempio: viti, bulloni, rondelle), i quali non vengono considerati nell'analisi poiché, in quanto tali, non è possibile andare a fondo sul processo di produzione degli stessi, è possibile però associare ad essi un impatto causato dal trasporto del componente finito sino alla sede dello stabilimento. Ovviamente generano un impatto ambientale ma non diretto del prototipo. L'impatto ambientale dovuto al trasporto di componenti commerciali può essere calcolato noto il mezzo di trasporto impiegato (di solito veicoli commerciali leggeri) e la tratta eseguita, applicando la formula 2.

Per quanto concerne la produzione dei componenti del prototipo, i semilavorati subiscono alcune lavorazioni meccaniche oppure trattamenti termici o superficiali al fine di ottenere i componenti con le desiderate forme e caratteristiche. L'impatto ambientale è causato essenzialmente dal consumo di energia per il funzionamento dei macchinari. Questo impatto, noto il mix di energia utilizzato e quindi il rapporto tra i kg di CO_{2eq} e i kWh, è facile da calcolarsi noto il consumo di energia dai macchinari espresso in kWh, applicando la seguente formula:

$$CO_{2eq} = (CO_{2eq}/kWh) * kWh \quad (3)$$

Il consumo di energia dei macchinari è considerato come dato primario in quanto è possibile ottenerlo eseguendo una misura diretta sulla linea. Il mix energetico utilizzato espresso in CO_{2eq} / kWh, invece, è considerato come dato secondario poiché è associato all'azienda che fornisce energia elettrica allo stabilimento oppure può essere scelto il valore corrispondente al mix energetico nazionale.

L'ultimo punto riguardante la costruzione del prototipo è l'assemblaggio. In questa fase il prototipo viene assemblato principalmente a mano senza usare particolari macchinari, al più la saldatrice, per questo l'impatto ambientale di questa fase può essere ritenuta trascurabile rispetto le altre fasi.

Per quanto concerne la progettazione e la costruzione del prototipo bisogna considerare il tragitto casa-ufficio dei dipendenti che fanno parte della produzione e dell'ingegneria. Essendo un calcolo presente in tutte le casistiche esso viene approfondito nel paragrafo 2.4.

L'impatto ambientale totale della fase di costruzione del prototipo è calcolato sommando i vari contributi di CO_2_{eq} come mostrato nella seguente formula (4).

$$E_{costruzione} = E_{Produzione M.P.} + E_{Trasporto M.P.} + E_{Trasporto C.C.} + E_{Lav. Mec.} + E_{Dipendenti}$$

(4)

2.1.2 Prova in pista

Passando ora all'analisi della vita utile di un prototipo si esamina la fase di prova in pista. La fase di test in pista è la parte più importante in cui il prototipo viene testato in diversi modi al fine di verificare il corretto funzionamento della vettura e di validare il prodotto. In questo caso si devono considerare i seguenti stadi al fine di valutare l'impatto ambientale della vita utile:

- La logistica di trasporto del prototipo e del materiale alla pista,
- Viaggi del gruppo di lavoro e del gruppo di supporto tecnico,
- Viaggio del gruppo di clienti,
- Emissioni dell'ICE durante l'esecuzione delle prove,
- Consumo di combustibile (emissioni *Tank To Wheel*),
- (Manutenzione causate a guasti e rotture componenti + pneumatici.)

Una volta costruito, il prototipo deve essere testato attraverso determinate prove per verificare alcune caratteristiche come ad esempio: guidabilità, confort, durabilità e prestazioni. I test possono variare in base al livello di prototipazione. Ad esempio, i primi prototipi possono essere utilizzati per prove di misura mentre l'ultimo livello di prototipazione, che coincide con il prodotto finale, viene utilizzato per le verifiche di processo (ovvero che dallo stabilimento produttivo escano veicoli tutti uguali).

Il prototipo costruito in stabilimento deve essere trasportato insieme a tutto il gruppo di meccanici e ingegneri presso un circuito, oltre a tutta l'attrezzatura, gomme, componenti aggiuntive (per testare diverse configurazioni o in caso di rottura) al fine di essere testato. Si avrà quindi un impatto legato alla logistica: un autoarticolato per il trasporto del prototipo e un pullman/auto/aereo per il trasporto di persone.

Per valutare le emissioni di CO_2 equivalente relative ai mezzi di trasporto bisogna conoscere nel dettaglio i veicoli utilizzati sia per lo spostamento di persone sia per lo spostamento del prototipo e delle attrezzature. Noti i kg di CO_{2eq} al km o kg di CO_{2eq} al km per persona dei mezzi di trasporto (forniti dal costruttore o da enti/letteratura), il numero di persone e i chilometri che bisogna percorrere è facile ottenere così le emissioni di CO_2 equivalente, oltre ovviamente a sapere il numero di mezzi di trasporto impiegati.

I mezzi di trasporto più utilizzati per andare a svolgere un test in pista sono: il camion per il trasporto delle attrezzature e del prototipo, il treno o un pullman per il trasporto dei meccanici e degli ingegneri, e l'aereo per il gruppo di clienti che molto spesso sono stranieri. Le formule per valutare l'impatto ambientale per i mezzi di trasporto sono le seguenti:

$$CO_{2eq} = (CO_{2eq}/km) * km \quad (5)$$

$$CO_{2eq} = (CO_{2eq}/pkm) * km * persone \quad (6)$$

In pista, il prototipo funzionando emette degli inquinanti in base al tipo di motore, si avrà un impatto diretto dovuto alle emissioni dalla combustione di benzina/(diesel) (combustibili fossili) del motore a combustione interna. In questo caso si andrà ad analizzare l'emissione *Tank To Wheel* (dal serbatoio alla ruota-TTW) della vettura in prova. La scelta di una analisi basata sulle emissioni TTW è stata fatta poiché vogliamo valutare l'impatto diretto solo del prototipo; se estendessimo l'analisi alle emissioni *Well to Wheel* (dal pozzo alla ruota -WTW) l'impatto ambientale risulterebbe maggiore e si rientrerebbe nella filiera della produzione e della distribuzione del combustibile. Stesso discorso viene svolto per i mezzi impiegati nella logistica. Se la vettura utilizzata è elettrica non si avrà emissioni allo scarico durante l'utilizzo ma bisogna valutare la sorgente dell'energia utilizzata per ricaricare la batteria.

Per quanto concerne quindi le emissioni di CO₂ del prototipo su pista possiamo associare le emissioni del prototipo a quelle dichiarate dal costruttore del veicolo originale (oppure solo al motore che viene acquistato separatamente). Anche in questo caso le emissioni sono calcolate come kg di CO_{2eq} al km. Quindi note le emissioni al chilometro della vettura, la pista utilizzata per i test (quindi la lunghezza del circuito) e i giri percorsi dal prototipo, è semplice calcolare le emissioni dirette del prototipo in pista, in termini di CO_{2eq}, attraverso la seguente formula:

$$CO_{2eq} = (CO_{2eq}/km) * km_{giro} * N_{giri} \quad (7)$$

Sommando tutte le emissioni in termini di CO_{2eq} possiamo ottenere così le emissioni totali generate in un test in pista di un singolo prototipo per la fase di valutazione e messa a punto del prodotto: la vettura automobilistica.

$$E_{Test} = E_{Logistica Prototipo} + E_{Logistica Persone} + E_{Emissioni Prototipo} \quad (8)$$

Giunti a questo punto dell'analisi, avendo calcolato in maniera distinta la fase di costruzione e la fase di test di un singolo prototipo, l'impatto totale è dato dalla somma di questi due contributi.

$$E_{Prototipo fisico} = E_{Costruzione} + E_{Test} \quad (9)$$

Infine, viene svolta un'analisi critica dei risultati ottenuti. Da questa procedura è possibile valutare l'impatto ambientale in termini di CO_{2eq} di un singolo prototipo/sottosistema/componente di un'autovettura durante la fase di sviluppo prodotto.

In fase di sviluppo prodotto vengono solitamente costruiti differenti prototipi in base al livello di progettazione e di validazione, inoltre ogni casa costruttrice di automobili ha la sua nomenclatura e la sua procedura di prototipizzazione. Per questa ragione la procedura è stata sviluppata in modo più generale possibile affinché sia modulabile e applicabile in tutte le casistiche. Infatti, il numero di prototipi costruiti e testati non è fisso ma possono variare in base: alla tipologia della vettura desiderata, ai livelli di produzione e alle prove di validazione che devono essere svolte. Non essendo, quindi, presente uno standard sul numero di prototipi che devono essere realizzati precedentemente alla prima vettura per l'omologazione e quindi prima dell'inizio della produzione

di serie, si è scelto di basare la metodologia di impatto ambientale sul singolo prototipo con fine di poter moltiplicare tale grandezza per il numero effettivo di prototipi costruiti. Inoltre, a seconda del livello di prototipazione, i componenti di nuova costruzione aumentano man mano che ci si avvicina al primo esemplare per l'omologazione; quindi, questa scelta viene fatta anche per poter modulare il calcolo e permette di stimare più correttamente l'impatto ambientale durante tutto lo sviluppo del prodotto. Si è scelto inoltre di dividere la fase di costruzione da quella di test in pista, questa scelta si basa sul fatto che non tutti i prototipi costruiti vengono testati (un esempio possono essere i prototipi costruiti per valutare estetica e ingombri).

2.2 Impatto ambientale del prototipo virtuale ottenuto attraverso il simulatore

Per quanto riguarda l'impatto ambientale del simulatore possiamo affermare che esso è causato principalmente dalla costruzione dell'impianto e dal suo utilizzo. A livello costruttivo è possibile utilizzare l'analisi LCA per valutare l'impatto di costruzione del simulatore ma, in questo metodo, si è scelto di non tenerne conto poiché si vuole valutare l'impatto del simulatore utilizzato come mezzo di progettazione e di validazione del prodotto. Per questo motivo l'analisi è incentrata sull'utilizzo del simulatore (la costruzione del simulatore è fondamentale in ottica ciclo vita dello stesso ma darebbe un contributo aggiuntivo che non è presente nel caso di prototipazione fisica rendendo non equa e confrontabile la comparazione dell'impatto ambientale tra prototipo fisico e virtuale).

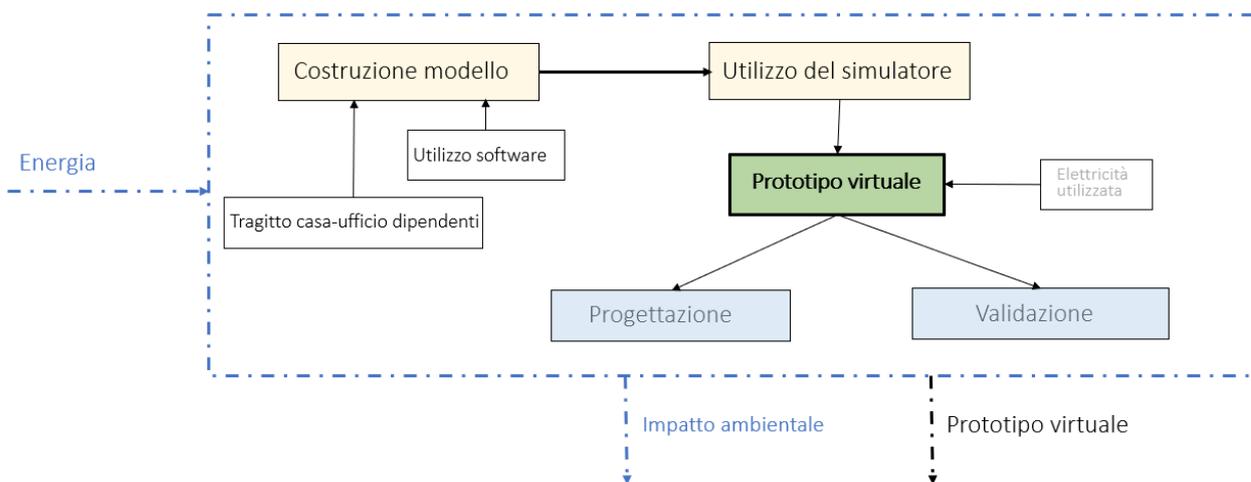


Figura 9 - Schema a blocchi del volume di analisi di impatto ambientale per un prototipo di vettura virtuale

L'indicatore ambientale scelto per l'analisi, anche in questo caso, è il fattore riscaldamento globale espresso in CO_{2eq} .

Per rendere l'analisi confrontabile alla prototipizzazione fisica si è scelto di focalizzarci solo sulla creazione di un prototipo virtuale che vada a rappresentare la vettura (schema a blocchi in figura 9). Quindi per creare un prototipo virtuale bisogna sviluppare un modello che serve a ricreare alcune o tutte le caratteristiche della vettura. Una volta implementato il modello esso viene eseguito al simulatore. La costruzione di un modello impatta sia nel consumo di energia dei vari computer ma anche nel tragitto casa ufficio dei dipendenti che si occupano di un tale progetto. Una volta creato un modello (e ritenuto attendibile) si procede con l'utilizzo del simulatore che permette la

prototipizzazione virtuale durante la fase di sviluppo prodotto in particolare nelle fasi di progettazione e di validazione.

La costruzione del modello ha due impatti: il tragitto casa ufficio e il consumo di elettricità causato dai computer impiegati per la creazione del modello. Per quanto riguarda il tragitto casa-ufficio dei dipendenti, come accennato precedentemente, esso verrà approfondito nel paragrafo 2.4 mentre il consumo dei computer è possibile calcolarlo conoscendo il numero di computer (N), le ore di utilizzo e il consumo di elettricità di ciascuno applicando la seguente formula:

$$CO_{2eq} = (CO_{2eq}/kWh) * kWh * N \quad (10)$$

Per quanto riguarda la fase di utilizzo ci focalizziamo sull'uso di elettricità necessaria per il funzionamento dell'infrastruttura. L'utilizzo del simulatore può essere valutato attraverso una misurazione diretta dell'elettricità assorbita. Nota la sorgente di energia e la quantità utilizzata (in kWh) valuto la CO_{2eq} applicando la formula 3.

Inoltre, si potrebbe tenere conto dei viaggi dovuti al gruppo di lavoro del cliente per visionare il lavoro svolto, in questo caso è possibile applicare la formula numero 6.

Sommando il contributo di costruzione del modello di vettura e quello di utilizzo diretto del simulatore è possibile trovare l'impatto ambiente totale dovuto allo stesso sommando i due contributi.

$$E_{SIM} = E_{Modello} + E_{Utilizzo} \quad (11)$$

2.3 Carbon footprint

La carbon footprint di un prodotto secondo la normativa ISO 14067 è "la somma delle emissioni di gas ad effetto serra di tutto il sistema prodotto". Essa è espressa in CO_{2eq} (CO_2 equivalente) ed è basata sulla valutazione del ciclo vita (LCA) [27]. Questo impatto ambientale rientra nella categoria cambiamento climatico (paragrafo 1.7.1).

La CO_{2eq} è l'unità di misura del carbon footprint, viene calcolata come la massa di un dato gas ad effetto serra moltiplicato per il potenziale di riscaldamento globale (*GWP - Global Warming Potential*).

$$CO_{2eq} = \sum_{n=1}^k (GWP_n * m_n) \quad (12)$$

I gas serra sono gas presenti in atmosfera e contribuiscono al bilancio energetico e fisico dell'atmosfera terrestre. Alcuni di questi gas sono presenti naturalmente in atmosfera altri invece sono prodotti dall'uomo. Questi gas generano una sorta di schermo, intrappolando il calore del sole e impedendo così la dispersione di esso nello spazio, provocando così un aumento delle temperature all'interno dell'atmosfera [44].

I gas serra sono:

- L'anidride carbonica: CO_2 ,
- Il metano: CH_4 ,

- L'ossido di diazoto: N₂O,
- Gli idro fluorocarburi,
- I Per fluorocarburi,
- L' esafluoruro di zolfo,
- I tri fluoruro di azoto.

Il potenziale di riscaldamento globale è un indice, basato sulle proprietà radioattive dei gas ad effetto serra, che viene misurato e confrontato rispetto alla CO₂ definito un determinato periodo temporale (20,100 o 1000 anni). Nella seguente tabella, riportata nell'appendice della normativa ISO 14067 [27], viene definito il GWP relativo alla CO₂ con orizzonte temporale di 100 anni per i gas serra più comuni.

Nome comune o industriale	Formula chimica	GWP per 100 anni
Anidride carbonica	CO ₂	1
Metano	CH ₄	25
Ossido di diazoto	N ₂ O	298

Tabella 1 - Componenti chimici presenti nella CO₂ equivalente

La scelta del carbon footprint per questa tesi si basa sulla sintesi e sulla chiarezza dell'unità di misura. Inoltre, a livello di direttive europee per lo sviluppo sostenibile la CO_{2eq} viene spesso utilizzata. Questo fa sì che i valori ottenuti forniscano un risultato di facile comprensione.

Scegliendo come impatto ambientale solo il cambiamento climatico limitiamo l'analisi rispetto a tutti gli altri indici ambientali citati nel paragrafo 1.7.1. Questo può essere visto come limite (poiché non vengono inclusi alcuni inquinanti) ma la CO_{2eq} permette di avere una analisi chiara e di ampia scala includendo le sostanze inquinanti più comuni.

2.4 Tragitto casa-ufficio dei dipendenti

Il tragitto casa-ufficio dei dipendenti è un percorso che viene svolto ogni giorno da tutti i dipendenti per recarsi dalla propria abitazione al luogo di lavoro. Si è scelto di calcolare l'impatto ambientale in termini di CO₂ equivalente generato dal tragitto casa ufficio dei dipendenti perché anch'esso sia nel caso dell'utilizzo del simulatore sia nel caso di prototipo completamente fisico, genera un impatto ambientale (non trascurabile) relativo allo sviluppo di un prodotto.

Per quanto riguarda l'impatto ambientale generato dal tragitto casa-ufficio dei dipendenti nel caso del prototipo fisico esso è composto dalla somma dei dipendenti che lavorano nel reparto ingegneria e nel reparto produzione. Mentre, per quanto riguarda l'impatto ambientale generato nel caso del prototipo virtuale esso è composto dai dipendenti che lavorano nel reparto simulazione dell'azienda, più in alcuni casi di personale del reparto ingegneria per valutare la fattibilità dello sviluppo. Per questo è fondamentale conoscere il numero di persone impiegate nel progetto.

I dati di partenza, quindi, sono: i chilometri percorsi al giorno di ogni dipendente nella tratta casa-ufficio, i giorni lavorativi dedicati al progetto/alla simulazione/alla costruzione di un prototipo (sia fisico che virtuale), il numero di dipendenti associati al progetto e la tipologia di vettura utilizzata al fine di ricavare i kg di CO_{2eq} diviso i km ottenuta grazie ai database.

$$CO_{2eq} = (CO_{2eq}/km) * (km_{al\ giorno}) * Giorni * N_{dipendenti} \quad (13)$$

I dati per svolgere l'analisi sono considerati primari in quanto tutti sono noti in azienda (o facilmente ottenibili); se non fosse così sarebbe possibile svolgere una analisi statistica basata sui valori medi mentre le emissioni di $\text{CO}_{2\text{eq}}$ / km sono state ottenute calcolando la $\text{CO}_{2\text{eq}}$ a partire dai database dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la ricerca Ambientale). Il database forniva i valori dei vari inquinanti separatamente in base alla categoria, per questo si è applicata la formula 12 e si è ottenuto l'impatto in termini di $\text{CO}_{2\text{eq}}$.

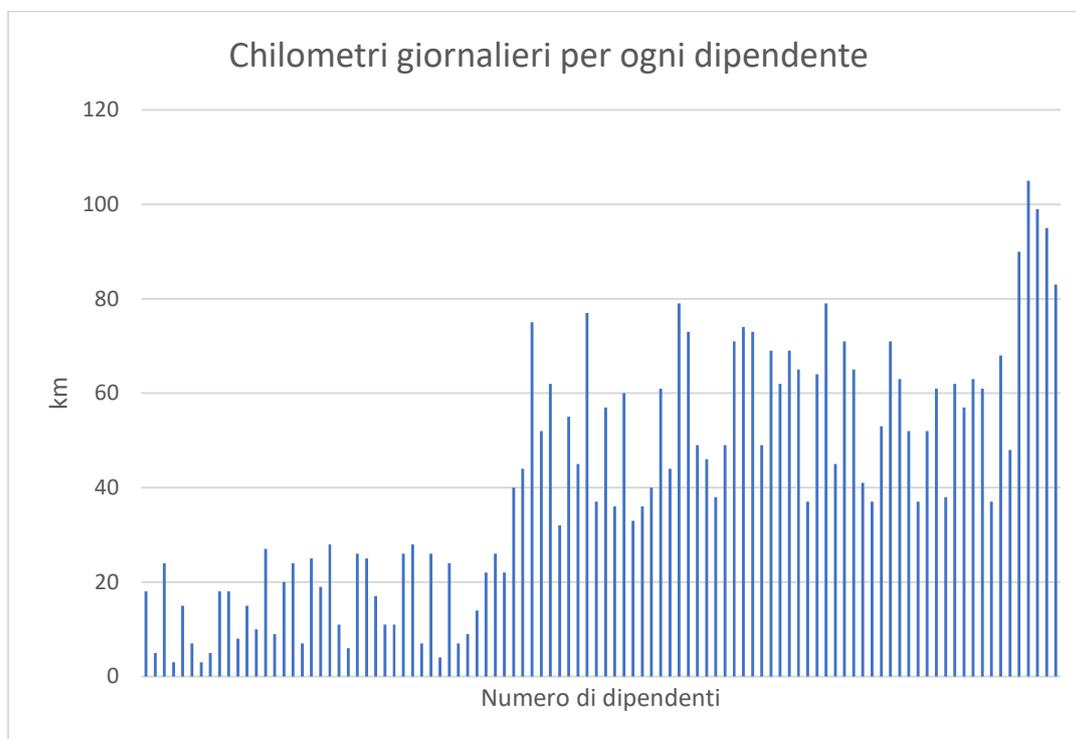


Figura 10- Chilometri giornalieri per ogni dipendente

La procedura utilizzata è basata su un documento presente in azienda (dato primario) in cui sono riportati i chilometri medi giornalieri per ogni dipendente dalla propria abitazione sino all'ufficio (andata e ritorno). I dati (in figura 10) sono stati riordinati e si è scelto di suddividere in tre macrogruppi il numero di dipendenti in base ai km percorsi.

Per ogni gruppo si è mediato il numero di km percorsi al giorno e si è moltiplicato il chilometraggio medio per il numero di dipendenti che lo compongono. La somma di tutti i chilometri giornalieri è stata moltiplicata per la $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{km}$ ottenendo così le emissioni di $\text{CO}_{2\text{eq}}$ al giorno di tutti i dipendenti. L'ultimo passaggio è stato quello di moltiplicare le emissioni di CO_2 giornalieri per i giorni lavorativi dedicati al progetto in esame.

N dipendenti	100		
N giorni lav anno	200		
emissioni	174	g CO2/km	
fascia di km (A\R)	N persone	km medi	km *N
minore di 30	40	14,025	561
30-80	55	52,41	2882,55
maggiore di 80	5	95,6	478
		km tot	3921,55
		km tot medi a per dipendente	39,2155

Figura 11- Analisi dei chilometri medi per ogni dipendente

Per fare una analisi più precisa e dettagliata è possibile includerli nella procedura di calcolo riportando i valori ottenuti in base al numero di dipendenti impiegati e in base anche al numero di giorni lavorativi del progetto preso in considerazione.

2.5 Raccolta dei dati e delle informazioni

Un ruolo fondamentale dell'analisi risiede nella corretta raccolta dei dati e delle informazioni necessarie per procedere con l'inventario e l'analisi. La raccolta dei dati e delle informazioni è funzione del livello di dettaglio definito all'inizio della procedura. Inoltre, bisogna sempre dichiarare l'origine dei dati e valutare la loro attendibilità. Questo è un problema significativo che provoca una grande variabilità nei risultati, molto spesso però i dati non sono facilmente reperibili per questo l'analisi può essere influenzata dalla disponibilità dei dati al momento dello svolgimento dell'analisi.

I dati possono essere:

- Primari: raccolti direttamente in base ai processi di interesse ottenuti in stabilimento oppure dati forniti dai fornitori;
- Secondari: sono dati non diretti, sono ottenuti attraverso letteratura o dati stimati;
- Specifici: sono dati associati alle singole fasi;
- Aggregati: aggregazione di dati riferiti a determinati processi o infrastrutture.

I dati scelti, con le rispettive fonti, verranno descritti nel capitolo riguardante il caso applicativo. I database presi in considerazione sono stati valutati al fine di ottenere la minor incertezza possibile sul risultato e quindi una maggior qualità.

I dati generali utilizzati per ogni stadio per eseguire l'analisi sono:

- Primari: kilogrammi di materiali, chilometri percorsi, numero e tipologia di mezzi di trasporto, consumi dei macchinari, ore di utilizzo del simulatore, ore di lavoro, corrente assorbita dal simulatore;
- Secondari: emissioni espresse in CO_{2eq}/unità (unità: km, kg, kWh, t*km e p*km)
- Aggregati: consumo dei macchinari.

2.6 Considerazioni e assunzioni

Durante la stesura e la descrizione della metodologia sono state fatte delle assunzioni riguardanti l'analisi di impatto ambientale. La definizione dello scopo e dell'obiettivo svolgono una funzione

fondamentale per delineare il confine di analisi e questo porta a non includere alcuni contributi di impatto. Ripetendo: lo scopo dell'analisi è quello di valutare l'impatto dei prototipi fisici e del suo gemello digitale durante la fase di sviluppo prodotto. Per questo non si tiene conto dell'impatto generato dalla costruzione dello stabilimento e delle rispettive infrastrutture sia nel caso della linea di produzione del prototipo fisico sia nel caso dell'infrastruttura necessaria per l'esecuzione delle simulazioni. Infatti, la costruzione del simulatore è necessaria per il funzionamento dello stesso, però in questa analisi non viene tenuto conto poiché si è posta l'attenzione nella fase di sviluppo prodotto. Stesso discorso vale per i macchinari (per esempio: torni, fresatrici e CNC) che contribuiscono a generare un impatto. Inoltre, per eseguire queste analisi riferite alla costruzione del simulatore, delle infrastrutture e dello stabilimento bisogna avere dati non facilmente reperibili, come ad esempio, le risorse utilizzate per la costruzione della struttura muraria, l'impatto ambientale di costruzione di ogni singolo macchinario e dei componenti utilizzati per costruire il simulatore. Se si fosse calcolato l'impatto ambientale generale riferito all'intero stabilimento si sarebbe dovuto trovare un metodo di ammortamento dell'impatto, infatti questo genera un impatto iniziale fisso che dovrebbe essere distribuito rispetto agli anni di utilizzo e/o i progetti realizzati (complesso da definirsi a causa della durata differente di ciascuno e dalla non semplicità di valutare i possibili progetti futuri).

Come citato precedentemente, per quanto riguarda la costruzione del prototipo fisico vengono fatte due principali assunzioni: la prima riguarda l'esclusione della fase di smaltimento/del recupero/ di riciclo e la seconda è l'esclusione della produzione dei componenti commerciali. La fase di smaltimento/riciclo ricopre un ruolo fondamentale in una analisi LCA, per questo la scelta di non di non includerla è basata sull'obiettivo che ci siamo posti all'inizio della metodologia. Non includendola è possibile avere lo stesso termine di paragone per confrontare la parte simulata rispetto a quella reale. Il riciclo o la dismissione di un prototipo, può essere differente in base alla funzione e dal numero di prodotti sviluppati, ed ovviamente varia a seconda della casa costruttrice. Il prototipo può essere dismesso e smaltito se non è possibile più riutilizzare alcun componente oppure è possibile recuperare pezzi e riutilizzarli per altri prototipi; quest'ultima casistica rientra in ottica economia circolare. La seconda approssimazione riguarda l'esclusione dall'analisi della produzione dei componenti commerciali, come citato precedentemente sono due le ragioni principali: la prima riguarda la difficoltà nel reperire dati e informazioni riguardanti la produzione e il rispettivo impatto ambientale di un componente commerciale, il secondo motivo è che quest'ultimo non è costruito con il fine di essere parte del prototipo ma viene prodotto per differenti applicazioni, e poi successivamente scelto per lo stesso.

Per quanto riguarda la fase di test su pista l'unica approssimazione fatta riguarda l'analisi delle emissioni dei combustibili utilizzati. Difatti, si è scelto di usare i dati riferiti ad un TTW rispetto ad una analisi WTW per avere una analisi delle emissioni dirette del prototipo, senza andare ad indagare sul processo di produzione e di distribuzione dei vari carburanti. Applicando una analisi TTW rispetto ad una WTW sottostimano l'impatto totale generato dai combustibili.

Per quanto riguarda la parte riguardante il prototipo virtuale non vengono svolte particolari approssimazioni, l'unica che può essere citata è riferita alla costruzione del simulatore ma già precedentemente motivata.

Capitolo 3 - Prototipo e simulazione

In questo capitolo si andrà ad analizzare il prototipo fisico sia da un punto di vista generale che analizzando il caso più specifico di Danisi Engineering. In primo luogo, verrà descritta in maniera generale la distinta base di un prototipo di vettura per evidenziare la complessità del sistema e la molteplicità di materiali impiegati con le rispettive lavorazioni meccaniche. Dopo avere trattato brevemente le lavorazioni meccaniche che vengono svolte sui prototipi, si procede con la descrizione dei simulatori presenti in Danisi engineering e delle attività che si possono svolgere. Infine, verrà fatta una analisi sulle fasi di sviluppo prodotto in azienda.

3.1 Distinta base di un autoveicolo

Come accennato precedentemente, l'autoveicolo è un sistema molto complesso. La complessità è dovuta dal numero di componenti e dalle sue funzionalità; infatti, i numeri di componenti si attesta intorno alle diverse migliaia. Per semplificare un sistema complesso esso viene diviso in sottosistemi in base alle loro caratteristiche o alle loro funzionalità. A seconda delle applicazioni e delle funzionalità dell'autoveicolo, esso può sfruttare diverse tecnologie e architetture.

L'autoveicolo, in generale, può essere suddiviso in questi macro-sottosistemi:

- Telaio,
- Sospensioni,
- Batteria (se veicolo elettrico),
- Motore e Trasmissione,
- Impianti,
- Sistema elettrico-elettronico,
- Interni,
- Sistema sterzo,
- Carrozzeria.

Questi sottosistemi sono sempre presenti, essi però possono variare leggermente in base alla nomenclatura o alla suddivisione delle case costruttrici. In questo paragrafo verranno descritti questi sottosistemi in generale e verrà riportato un esempio di materiali presenti per ogni sottosistema. I materiali elencati successivamente, ovviamente, possono variare, infatti, questi sono solo un esempio e sono stati inseriti poiché fanno riferimento ad un prototipo realizzato nello specifico in azienda.

Il primo sotto sottosistemi della vettura analizzato è il telaio. Esso è l'ossatura dell'auto, ha funzione strutturale e deve sopportare il peso di tutti i componenti e dei passeggeri dell'automobile. È composto principalmente da acciai e da leghe di alluminio. Tra queste possiamo trovare: acciai generali da costruzione come Fe37, acciai trafilati a freddo come il 25CrMo4, acciai inox, acciaio da cementazione come il 18NiCrMo4 e di leghe di alluminio come alluminio EN AW 7075, Al

6060, Al 5754. Infine, sono presenti componenti commerciali come viti, bulloni, rondelle e dadi utilizzati per i fissaggi.

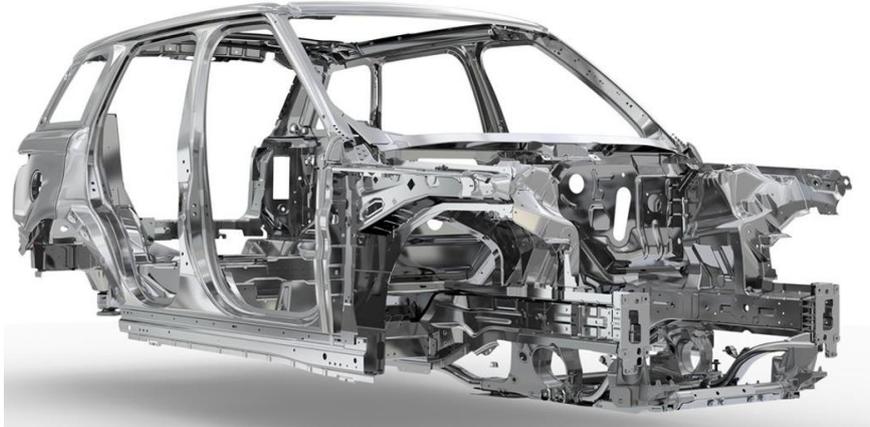


Figura 12-Telaio di un'autovettura [45]

La sospensione, invece, è un cinematismo che permette di scambiare forze tra il veicolo e la strada. I componenti che la costituiscono hanno capacità elastiche, le quali hanno il compito di smorzare le asperità causate con il contatto con il terreno. Esistono molte configurazioni in base al tipo di applicazione del veicolo come ad esempio: *multilink*, *McPherson* e assali rigidi. Il sottosistema sospensione include, non solo tutti i componenti della sospensione (braccetti, molle, ammortizzatori, giunti sferici, barre antirollio, boccole e supporti superiori e anteriori), ma anche le ruote, parte del sistema frenante (pastiglie, pinze, dischi e mozzo), le barre tiranti, gli uniball, i distanziali, i componenti commerciali (boccole, bulloni, dadi, rondelle, sieger, viti e rondelle), i sistemi di collegamento con il sottosistema sterzo e le componenti elettroniche come SbW (*Steer by Wire*) e EPAS (*Electric power steering control*) e infine i sensori. I materiali utilizzati sono svariati: acciai inossidabili come AISI 302, acciai legati al Ni Cr Mo, materiali compositi in fibre di carbonio, titanio (molle), leghe di alluminio e gomma.

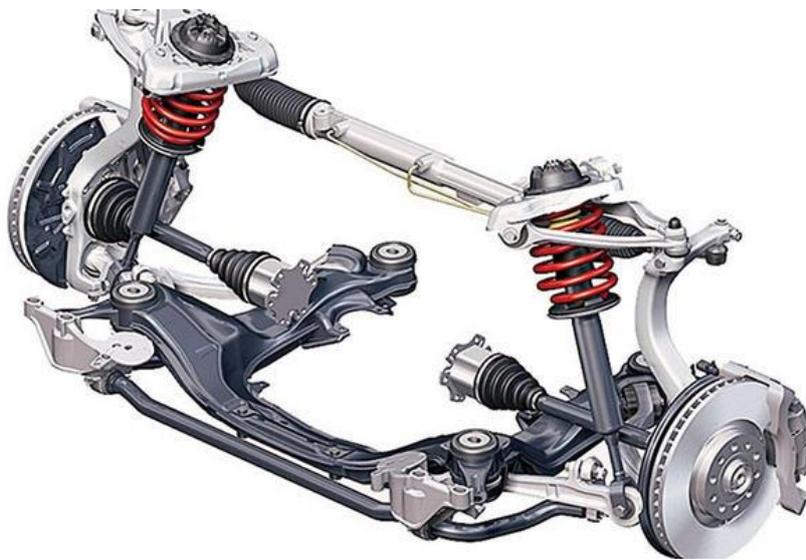


Figura 13- Sospensioni di un'autovettura [46]

La batteria è stata inclusa, poiché essa è presente a bordo se la vettura è elettrica o ibrida come accumulatore di energia. In questo caso viene inclusa sia poiché la vettura analizzata è elettrica sia per evidenziare il fatto che rispetto ad un classico serbatoio (per ICE), essa è un sottosistema estremamente complesso. La sua complessità, oltre a livello di progettazione e di costruzione, è la molteplicità di materiali necessari alla sua costruzione. I materiali utilizzati possono essere: conduttivi, isolanti e metalli rari. Il sottosistema batteria è costituito da diversi componenti: il blocco batteria (costituito da piccoli moduli di celle), lo strato isolante, le pareti di protezione interne, il rivestimento esterno, la tenuta ermetica, le piastre e le barre per i supporti, i collettori DC/DC, i collegamenti elettrici tra le singole celle interne alla batteria e i collegamenti tra la batteria e il sistema di potenza, tutto il sistema di raffreddamento per la batteria, i raccordi pneumatici, cavi e tubi, sistema di sensori (di corrente, di potenza e di temperatura), il sistema di controllo e di gestione della batteria e le classiche componenti commerciali (viti e bulloni). I materiali presenti nella cella della batteria sono il litio, il nichel, il manganese, il cobalto, l'alluminio e la grafite, ovviamente la composizione percentuale e i tipi di metalli possono variare in base alla batteria scelta. I materiali utilizzati per i supporti e i rivestimenti possono essere acciai e leghe di alluminio, inoltre è presente uno strato di materiale isolante. Sono presenti anche materiali di origine plastica come la protezione esterna dei sensori e dei sistemi di controllo e dei connettori, il rivestimento esterno dei cavi (interno invece in rame), i tubi multistrato, il teflon (usato come nastro) e il neoprene (una gomma sintetica). Facendo una breve digressione, riguardante l'impatto ambientale, possiamo affermare che la batteria essendo un sottosistema che comprende molti materiali e soprattutto metalli rari, questo genera un elevato impatto ambientale, non solo in termini di CO_{2eq} ma anche in base agli altri indicatori. Per questo il sottosistema dovrebbe essere considerato da solo per un LCA. Ora si passerà alla descrizione dei componenti che generano movimento.

Il motore è il componente che genera potenza all'interno dell'autoveicolo. Esso può essere a combustione interna (a benzina o a diesel), elettrico o ibrido. La trasmissione invece è l'insieme di tutti i componenti meccanici e non, che trasmettono il movimento dal motore sino alle ruote. Il motore, oltre a generare potenza alle ruote per lo spostamento fornisce potenza agli accessori/utenze della vettura. Nella figura 14 possiamo osservare l'insieme di componenti che costituiscono il sistema di trasmissione del moto. Partendo dal motore, si hanno la frizione e il cambio, alla fine di questo si ha l'ultimo rapporto di riduzione ed infine il differenziale che spartisce la coppia sugli assali delle ruote. All'interno di questi componenti sono presenti oli e lubrificanti per il corretto funzionamento dei componenti meccanici.

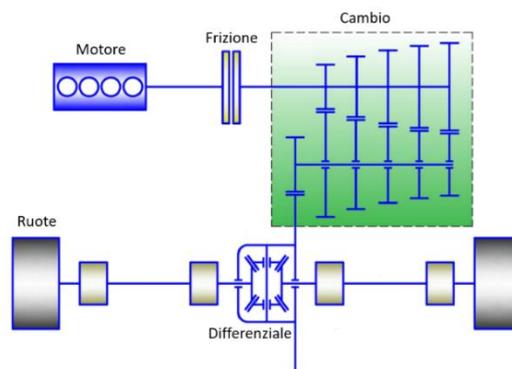


Figura 14- Componenti che intercorrono dal motore alle ruote [47]

Scendendo ancora di più nel dettaglio possiamo affermare che, oltre a motore, frizione, scatola del cambio e differenziale sono presenti i vari supporti per ogni componente al fine di collegarli con il telaio e agli altri sottosistemi. Altri componenti presenti sono: gli assali, i giunti a tripode, i distanziali, i componenti commerciali come viti esagonali, rondelle, boccole elastiche e dadi autobloccanti. Passando ora all'analisi dei materiali utilizzati, sono presenti: acciaio da cementazione come il 18NiCrMo4 e leghe di alluminio come EN AW 7075 per applicazioni automobilistiche. I motori invece possono presentare diversi materiali in base al tipo e all'applicazione. In un motore a combustione interna possiamo trovare materiali metallici, polimerici e ceramici. Possiamo trovare in particolare acciai, ghise, leghe di alluminio o leghe di magnesio; ad esempio, aumentando il livello di dettaglio, le bielle possono essere fatte in acciaio, ghisa, alluminio o titanio; i pistoni in leghe di alluminio o di magnesio; l'albero motore in acciaio al carbonio o acciai legati da bonifica, la testata viene fatta con leghe in alluminio oppure in ghisa. Un motore elettrico invece presenta i seguenti materiali: rame per gli avvolgimenti, resine polimeriche, fibra di vetro, teflon e materiali isolanti.

Gli impianti rappresentano un altro sottosistema dell'autovettura. Gli impianti possono essere: l'impianto frenante, l'impianto di climatizzazione, il cockpit, l'infotainment e l'impianto stereo. L'impianto di raffreddamento e l'impianto di climatizzazione sono composti principalmente da: tubi flessibili in gomma, radiatori, ventole, liquido refrigerante, pompe, termostati e raccordi in silicone. I materiali utilizzati per questo sottosistema sono: gomma EPDM, silicone, alluminio (come EN AW 6082) e acciaio inox AISI 304. Il sistema frenante è composto da tutto il circuito di tubi, dal pedale del freno, dalla valvola di pressione, l'ABS, la pompa doppia, i componenti commerciali e tutti i collegamenti con i componenti dell'impianto frenante che fanno parte del sottosistema delle sospensioni. Questo sistema è composto invece dai seguenti materiali: acciai inox, leghe di alluminio, gomma e silicone. Altri impianti presenti in questo sottosistema sono quelli relativi all'acceleratore e ai tergicristalli.

Oltre agli impianti precedentemente citati ci focalizziamo sull'impianto elettrico-elettronico, che può essere definito come un sottosistema a sé. Il sottosistema elettrico-elettronico è composto da: l'interfaccia di ricarica, il connettore per la ricarica, i supporti per i vari componenti, le guide DIN, i router, le centraline, i sensori, gli inverter, i collegamenti elettrici, l'unità di distribuzione della potenza (PDU), la classica batteria a 12V, tutti i componenti del CAN-bus dell'autoveicolo, i sistemi di emergenza elettronici, i componenti elettronici di comando (come interruttori on-off, switch, sistemi serie e parallelo) ed infine i componenti commerciali (sia meccanici che elettronici). Inoltre, sono presenti i fanali anteriori e posteriori e gli indicatori laterali di direzione. Sono anche presenti i sistemi di collegamento dello *Steer by wire*, gli inverter, il sistema a 48V, il cablaggio e il convertitore DC/DC. I materiali usati in questo sottosistema sono: materiali plastici (ABS-acrilonitrile butadiene stirene), acciai generali da costruzione come Fe37, leghe di alluminio come Al 6060, Al 5754 e rame.

Tutti i componenti interni all'autoveicolo costituiscono un altro sottosistema. Gli interni comprendono: i sedili, le guide degli stessi, le cinture di sicurezza, il pannello di controllo, i rivestimenti interni, la pedaliera, il sistema antincendio, lo specchietto retrovisore con rispettivo supporto, le lampade interne e l'interfaccia tra il guidatore e l'infotainment. I materiali usati possono essere svariati anche in base agli optional inseriti nella vettura. Anche in questo caso i

materiali più comuni sono acciai e leghe di alluminio, inoltre sono presenti materiali plastici e tessuti utilizzati come rivestimenti all'interno della vettura.



Figura 15- Sottosistema sterzo di un'automobile [48]

Il sistema sterzo è l'insieme dei componenti che permettono di variare l'angolazione delle ruote a seguito della variazione di angolo del volante definito dal guidatore. È il sottosistema che permette al guidatore di avere padronanza della vettura durante la guida. Il sistema sterzo è composto da: piantone dello sterzo, cuffia e distanziali dello stesso, boccole, supporti, mozzo ruota, mozzo volante, collegamenti per lo sterzo posteriore, frizione, tirante, componenti commerciali (come viti, rondelle, bulloni) e volante. Anche in questo caso la maggior parte dei componenti è prodotto in acciaio (come il 18NiCrMo4) o leghe di alluminio (come il Al 4744) e alcuni componenti di materie plastiche.

Come ultimo sottosistema analizzato abbiamo la carrozzeria. La carrozzeria è l'involucro esterno della macchina. Oltre alle portiere e alle parti fisse della carrozzeria, vengono realizzati i supporti (bande, cerniere, piastre e aste) di fissaggio della carrozzeria al telaio, i supporti per i fanali anteriori, posteriori e per le frecce. Sono presenti anche gli specchietti, i fanali, i vetri, oltre a tutti componenti commerciali. I materiali utilizzati sono: acciai inox come ad esempio AISI 316, acciaio da cementazione come il 18NiCrMo4, leghe di alluminio come Al5754, Al6060, il teflon (politetrafluoroetilene), le gomme EPDM (*Ethylene Propylene Diene Monomer*) e il plexiglass.

Una piccola nota sui materiali citati precedentemente in questo paragrafo. Essi sono stati presi da una distinta base di un prototipo di vettura presente in azienda. Ovviamente i materiali usati possono essere differenti ma si voleva evidenziare, con un esempio, senza andare troppo nel dettaglio, il numero elevato di componenti per ogni sottosistema e la varietà di materiali utilizzati.

È possibile affermare quindi che la distinta base di un autoveicolo è estremamente ampia e complessa. I materiali utilizzati sono svariati e possono essere conduttori e non conduttori, acciai, ghise, leghe di materiali metallici e non metallici, componenti plastiche e vetro. Questa complessità si traduce in una complessità legata alla valutazione dell'impatto ambientale dell'intero autoveicolo.

3.2 Processi e lavorazioni meccaniche

In questo paragrafo verranno descritti i processi e le lavorazioni meccaniche che vengono svolte in stabilimento per la costruzione del prototipo. In stabilimento arrivano i semilavorati, principalmente di acciaio e di alluminio e vengono sottoposti a lavorazioni meccaniche e a trattamenti termici al fine di ottenere il componente finito, con determinate caratteristiche meccaniche e geometriche, da montare sul prototipo. Le principali lavorazioni a cui un semilavorato viene sottoposto in azienda sono:

- Lavorazioni per deformazione plastica: come la tranciatura e la piegatura. La tranciatura è un processo industriale che permette di dividere, tagliando a freddo, un semilavorato come, ad esempio, una lamiera in acciaio/alluminio. Questo processo viene utilizzato per i tubi del telaio, per le staffe, per i distanziali, per i supporti e per le piastre. La piegatura invece è un processo che permette di ottenere una deformazione permanente di una lamiera ottenendo così la forma desiderata. Questo processo viene utilizzato per i supporti, per i rinforzi, per le staffe, per i pannelli e per le piastre.
- Lavorazioni per asportazione di truciolo: tornitura e fresatura (eseguite rispettivamente al tornio e alla fresa). Il tornio permette attraverso l'asportazione di truciolo la creazione dell'oggetto desiderato da un semilavorato pieno di forma circolare (assialsimmetrico) in rotazione attraverso un utensile. Questa lavorazione meccanica viene utilizzata per le boccole, per i distanziali, per le rondelle e per il blocco della molla della sospensione. Mentre la fresa permette di ottenere piani, spallamenti, asole e fori attraverso un utensile per l'asportazione di truciolo. Questa lavorazione meccanica viene utilizzata per le piastre, per i supporti, per i giunti e per le staffe.
- Tecniche di giunzione: la saldatura è un processo industriale che permette l'unione di due componenti differenti attraverso la creazione di una giunzione meccanica. I tipi di saldature presenti in azienda sono la Mig, Tig oppure tramite un materiale d'apporto. Questo processo viene utilizzato per creare i colleganti nel telaio, collegare i vari tubi, fissare i supporti e le staffe, e infine per collegare i cablaggi. Questa tecnica viene utilizzata principalmente nella fase di assemblaggio del prototipo.
- Trattamenti superficiali: i trattamenti superficiali sono trattamenti particolari che vengono fatti al componente a seguito delle lavorazioni meccaniche con il fine di ottenere determinate caratteristiche sulle superficie dell'oggetto. I trattamenti superficiali più comuni che vengono fatti sono la cromatura, la zincatura, la pallinatura, la sabbiatura, l'anodizzazione, la lucidatura e la verniciatura.
- Trattamenti Termici: i trattamenti termici sono trattamenti che vengono fatti attraverso una variazione di temperatura al fine di ottenere determinate microstrutture all'interno dell'acciaio. I processi più comuni tra i trattamenti termici sono: la tempra, la normalizzazione, la bonifica, la ricottura, la cementazione e la nitrurazione. Questi trattamenti vengono utilizzati per le varie piastre del telaio, per i braccetti e i giunti delle sospensioni, per i distanziali delle sospensioni e per i supporti del motore.
- Verniciatura: è un processo che permette di apportare al materiale un leggero strato di vernice al fine di proteggere e decorare il veicolo. Questo trattamento viene utilizzato per alcuni supporti, per alcuni tubi e piastre, ed infine la carrozzeria della vettura.

I componenti una volta finiti, prima di procedere con la costruzione del prototipo, vengono sottoposti ad una analisi dimensionale eseguita attraverso un banco di misura a portale (DEA). Questo passaggio permette di controllare la correttezza geometrica del componente aumentando così la qualità del prodotto.

Tutti i processi e le lavorazioni meccaniche che vengono svolte sono molto semplici e non utilizzano macchinari complessi o robotizzati, in quanto il numero di prototipi realizzati non è elevato e quindi non richiede lavorazioni più efficienti tramite l'impiego di macchinari automatizzati.

3.3 I simulatori

All'interno dell'azienda sono presenti due simulatori, uno statico (figura 16) e uno dinamico (figura 17), che permettono l'implementazione e lo sviluppo di prototipi virtuali, di *digital twin* e di tecnologie "X"-in-the-Loop.



Figura 16-Simulatore statico di Danisi engineering

I simulatori presenti in azienda sono sviluppati principalmente per eseguire analisi di dinamica di guida attraverso l'*Human-in-the-Loop*. Il simulatore statico permette, oltre alle classiche analisi di dinamica, di svolgere indagini *Hardware-in-the-loop*, in quanto è dotato di un banco prova che permette di inserire l'hardware (un componente o un sottosistema) e testarlo attraverso condizioni reali ricreate virtualmente dal simulatore. Un esempio di sottosistema che può essere testato sul banco prova HiL è la scatola sterzo in quanto dopo aver creato il prototipo essa può essere testata in un banco prova inserito nel simulatore. Le forze che agiscono sui componenti sono generate dal simulatore in base ad un modello implementato nello stesso. Questo simulatore permette di fare principalmente prove oggettive (prove in cui vengono rilevate grandezze ingegneristiche).

Il simulatore dinamico invece permette di fare analisi più immersive permettendo così lo *Human/Driver-in-the-Loop*; infatti, è dotato di un cockpit in cui il pilota guida la vettura e riceve tutte le sollecitazioni e i feedback delle azioni attuate dal simulatore. In questo caso il pilota (*Human*) è inserito all'interno dell'ambiente di simulazione ed eseguendo delle prove stabilite

permette di ricevere delle sensazioni che vengono riportate in un questionario/tabelle standard al fine di migliorare il prototipo di vettura. Queste prove sono prove soggettive, in quanto non vengono rilevati dati oggettivi (come grandezze ingegneristiche) ma sensazioni del pilota. Queste sensazioni, ottenute soprattutto in base alla bravura del pilota, attraverso il questionario finale permettono di fare considerazioni sulla dinamica di guida della vettura ed hanno come fine il miglioramento e lo sviluppo del prodotto prima che la vettura sia effettivamente costruita.

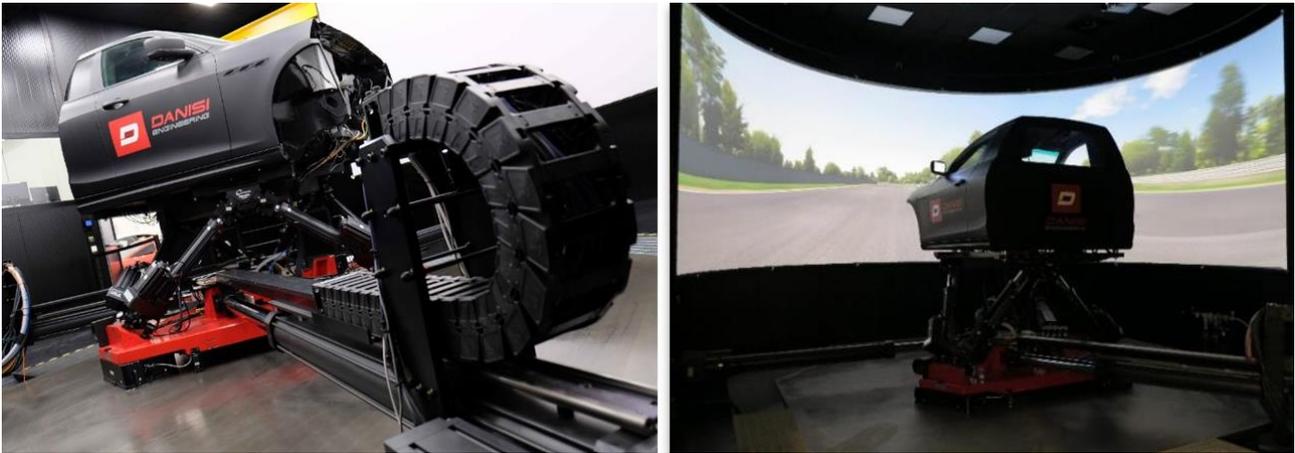


Figura 17-Simulatore dinamico di Danisi engineering

La sezione “*Advanced Vehicle Dynamics*” (AVD) di Danisi Engineering, in cui sono presenti i simulatori, si occupa principalmente dello sviluppo della dinamica di guida del veicolo. Vengono svolte analisi:

- per l’impostazione progettuale del prototipo
- per i test su pista simulati e messa a punto dei prototipi,
- soggettive,
- oggettive,
- Prove di simulazione del circuito,

L’AVD conduce simulazioni di dinamica di guida non solo di un nuovo prodotto (prototipazione virtuale), ma anche di un prodotto già esistente (generando il gemello digitale) oppure di parti di esso come sottosistemi e componenti del prodotto (es. sospensioni o scatole sterzo). Inoltre, oltre a generare nelle fasi di sviluppo prodotto un prototipo virtuale, successivamente viene prodotto anche un prototipo fisico al fine testarlo e rilevare alcuni dati e confrontarli, per verifica, con i risultati per ottenuti dal simulatore.

Possono essere testate vetture complete (sistema), o parti di essa (sottosistemi o componenti). Come esempio diretto in ambito dinamica di guida, oltre a testare il comportamento generale della vettura (sistema), è possibile testare le sospensioni (sottosistema) ed infine, ad esempio, le molle della sospensione (componente).

Le prove che vengono svolte più spesso sono:

- *lap optimization*: ottimizzazione del giro (nota la pista, la vettura e le caratteristiche dell’asfalto si ottimizza il giro sul circuito),
- Analisi delle gomme: si valuta il degrado delle gomme,

- Lavori sulle sospensioni,
- Sistema frenante,
- Controlli elettronici (abs, esp),
- test sulla dinamica di guida: *Handling*, dinamica verticale/longitudinale/laterale, confort,
- test degli ADAS,
- prove open loop (prove oggettive basate sui sensori),
- test diretti su alcuni componenti fisici (HiL),
- prove di durabilità (accumulo chilometrico),
- prove di misura,
- fault injection: ovvero prove in cui viene simulato un errore, un mal funzionamento o una rottura e si valutano le contromisure ad attuare (estremamente pericoloso in pista)
- Test di alcuni software,
- Ed infine, messa a punto e tuning.

Il MBSE è presente nei software del simulatore in quanto il simulatore funziona grazie a modelli semplificati che vanno a rappresentare una particolare caratteristica o un modo di funzionare di un sistema (vettura)/sottosistema/componente. I modelli presenti sono modelli matematici (principalmente equazioni) che descrivono il comportamento di una determinata caratteristica che vogliamo rappresentare. Un esempio di modello che gira sul simulatore dinamico è un modello a 14 gradi di libertà *real time*. È bastato da tabelle che vengono precedentemente create attraverso altri modelli per avere una caratteristica di dati incrociati. Prima di essere utilizzati tutti i modelli implementati sono stati validati e ritenuti affidabili.

In ambito sviluppo prodotto dopo aver definito il target, si inizia a dividere il sistema in sottosistemi e successivamente in componenti, sino a raggiungere il target per ogni componente. In questo caso si usa un approccio scalare in cui all'inizio non sono presenti molti dati/informazioni, infatti, si conoscono principalmente dati generali (come passo vettura, potenza, massa e distribuzione del peso), per questo motivo si usano inizialmente modelli semplici (pochi gradi di libertà e analisi multi-body), per poi migliorare l'analisi sino a raggiungere un livello di dettaglio elevato (per ogni componente). Raggiunto il livello di dettaglio desiderato, l'analisi viene completata al simulatore al fine di permettere in modo più veloce le successive fasi di validazione virtuale, funzionale e di prodotto. In seguito alla progettazione al simulatore, il progetto viene passato al dipartimento di ingegneria in cui vengono progettati i vari componenti procedendo con i disegni al CAD e vengono valutati gli ingombri. Infine, vengono fatte le analisi strutturali con software FEM prima di procedere con la costruzione del primo prototipo. In caso di problemi o incongruenze si rifanno le simulazioni e si ha la reingegnerizzazione del prodotto.

Il processo di sviluppo prodotto risulta più semplice e veloce poiché vengono inseriti i dati che vogliamo ottenere per la vettura finale direttamente nel simulatore e, attraverso modelli e analisi a ciclo chiuso si ottengono le configurazioni e le caratteristiche della vettura desiderata. Invece, come risultato delle analisi e dei test si ottengono principalmente dati e grafici. Il software di gestione del simulatore è direttamente collegato con software come Adams e Matlab Simulink per l'analisi dei risultati.

Il vantaggio principale delle simulazioni virtuali è il controllo continuo dell'evoluzione della vettura. Infatti, è possibile generare e testare configurazioni differenti e aver la possibilità di gestire in simultanea la variazione di alcuni parametri e situazioni (come, ad esempio, la variazione dei

parametri di alcuni componenti come ad esempio la rigidità dell'anti-roll bar o delle sospensioni, variare la superficie di contatto (asfalto, sabbia, asfalto bagnato, neve)). Inoltre, avendo il Driver in the loop in cui il pilota guida direttamente l'auto nel simulatore, non sono presenti rischi di incidenti dal punto di vista umano e non si ha rottura di componenti essendo un ambiente estremamente sicuro, oltre ad essere estremamente efficiente.

Dal punto di vista ambientale confrontandolo con il *proving ground* non si ha l'uso di pneumatici e il rischio di rompere componenti, oltre al discorso legato alla logistica e alla produzione di un elevato numero di prototipi fisici. In un futuro che cerca di ottenere il *carbon neutral*, la digitalizzazione sempre più spinta del prototipo può portare alla riduzione delle emissioni di inquinanti in ambito sviluppo prodotto nel settore automobilistico. Questo aspetto può essere incrementato andando ad analizzare le fonti dell'energia elettrica impiegata, favorendo e sfruttando sorgenti di energia rinnovabile, avvicinandosi sempre di più alla *carbon neutrality*.

A livello di simulazione non sono presenti limiti tecnici, però attualmente non è possibile virtualizzare il 100% della vettura ma solo alcuni sottosistemi. Il grande blocco di questa tecnologia è culturale e di fiducia. Infatti, in molte aziende da anni sviluppano un numero di prototipi standard e non commisurato alle reali necessità di sviluppo del prodotto. È presente, inoltre, una mancanza di fiducia rispetto a queste tecnologie, pur essendo affidabili e verificate. Il processo di verifica/validazione e affidabilità della simulazione è molto complesso e stringente poiché richiede un elevato numero di dati e quindi di tempo e di risorse per una valutazione completa. Tutti i modelli, però, prima di essere utilizzati nel simulatore devono essere validati.

3.4 Fasi di sviluppo prodotto in Danisi engineering

Lo sviluppo prodotto è una serie di passaggi che permettono la creazione di un nuovo prodotto. La fase di sviluppo prodotto in Danisi engineering può essere suddivisa in tre gruppi principali: la prima è la fase di concept, la seconda è la fase di progettazione e infine è presente la fase di validazione. Queste fasi vengono rappresentate attraverso il diagramma "V" della figura 18.

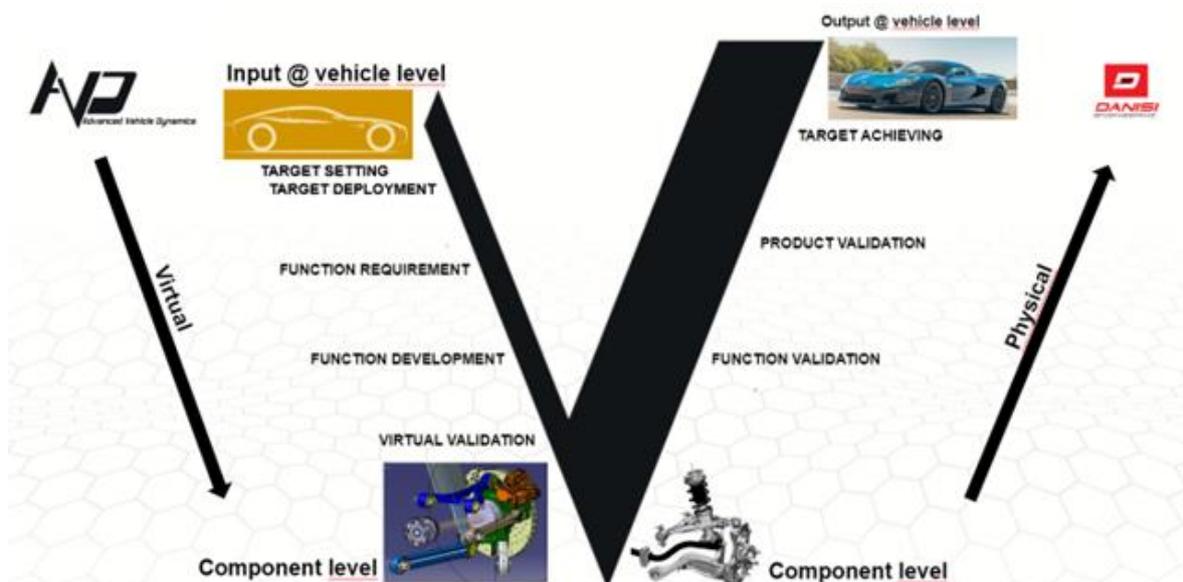


Figura 18-Diagramma a "V" di Danisi engineering

Le fasi di sviluppo prodotto sono:

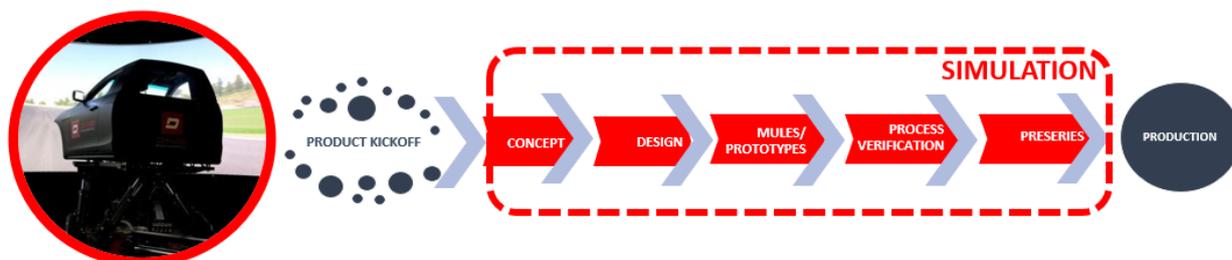
1. Definizione dell'obiettivo: in questa fase viene definito l'obiettivo, lo scopo e i dati di input del prodotto. Si procede inoltre con la definizione degli obiettivi di sviluppo del prodotto;
2. Definizione requisiti funzionali: noti i dati di input del prodotto vengono determinati i vincoli funzionali e le soluzioni tecniche per procedere con lo sviluppo del progetto;
3. Sviluppo funzionale: si sviluppa il prodotto in base ai requisiti funzionali definiti nel punto precedente. Si procede con l'ingegnerizzazione del prodotto e si disegnano i componenti al CAD. In questa fase si ha la progettazione di dettaglio in cui vengono progettati tutti i componenti che costituiscono i vari sottosistemi. È possibile utilizzare il simulatore come strumento per scegliere la configurazione ottimale prima ancora di iniziare la progettazione. Inoltre, sono presenti analisi FEM e analisi multi-body al fine di ottenere l'obiettivo;
4. Validazione virtuale: in questa fase vengono fatti calcoli strutturali dei componenti con software FEM al fine di ottenere la validazione virtuale di componenti e si procede con analisi di dinamica del veicolo con software come Adams car. Inoltre, in alcuni casi è possibile utilizzare il simulatore per svolgere determinati test;
5. Superata la validazione virtuale, dal CAD è possibile costruire il componente fisico. Quest'ultimo, una volta costruito, rientra nella classe B di prototipizzazione (riferimento alle classi di prototipizzazione riportate nel paragrafo 1.2.1). Molte volte però viene costruito il componente di classe A per fini estetici e di ingombro;
6. Assemblaggio del prototipo di livello B una volta avvenuta la costruzione di tutti i componenti.
7. Validazione funzionale: in questa fase vengono testati i vari sottosistemi e se il prototipo di livello B risulta corretto si procede con la costruzione dei prototipi di livello successivo in base allo sviluppo del prodotto. Questa fase viene svolta sia con test sui componenti fisici sia attraverso l'ausilio della simulazione;
8. Costruzione e assemblaggio dei prototipi;
9. Validazione del prodotto: Il prototipo viene testato e se rispecchia le richieste definite nella fase iniziale l'obiettivo è raggiunto.

Le fasi 1 e 2 rientrano nella fase di concept del prodotto, la fase 3 è compresa nella progettazione mentre le fasi dalle 4 alle 9 fanno parte della fase di validazione. Durante la fase di validazione vengono costruiti i prototipi fisici al fine eseguire determinate prove per ottenere i vari livelli di validazione (virtuale e funzionale) sino a raggiungere quello di prodotto (come caso aziendale). I livelli di validazione sono presenti nel Piano di Validazione del Progetto (DVP- *design validation plan*). Questo documento contiene in una lista dei metodi e di procedure da utilizzarsi per verificare e validare il progetto. Una volta definito il DVP è possibile definire quali e come devono essere costruiti i prototipi. Il DVP include la validazione sia virtuale che fisica del prototipo.

Come descritto nel digramma a "V", sono presenti tre differenti tipi di validazione: virtuale, funzionale e di prodotto. La validazione virtuale avviene principalmente attraverso l'analisi FEM. L'analisi FEM è fondamentale per fare una analisi virtuale dei carichi che agiscono sui componenti, analisi delle tensioni e delle deformazioni. Questa analisi permette di progettare il componente con le caratteristiche desiderate dopo aver definito la geometria al CAD. Nella validazione funzionale invece vengono eseguite delle prove (prove differenti ideate per verificare aspetti specifici del prodotto) per convalidare il corretto funzionamento dei componenti. Questa fase di validazione è

possibile eseguirla sia tramite un prototipo fisico sia tramite uno virtuale. Infine, viene eseguita la validazione di prodotto: il componente finito più simile possibile a quello finale viene testato e se rispetta tutti gli obiettivi definiti nella fase di concept si procede con la produzione dello stesso.

Un vantaggio del simulatore è che esso prende parte sia alla fase di progettazione sia alle fasi di validazione, a differenza del prototipo fisico che viene utilizzato solo per la validazione.



Prototipo virtuale nel «HUMAN in the LOOP»

Figura 19-Sviluppo prodotto in Danisi engineering integrando lo human-in-the-Loop

Il prototipo virtuale è presente in tutte le fasi dello sviluppo prodotto compresa la preserie. Inoltre, è in grado di ricreare anche i muletti architettonici. I muletti architettonici sono vetture che vengono costruite prima dei prototipi. Queste particolari vetture sono realizzate nelle fasi embrionali dello sviluppo prodotto in cui molte caratteristiche della vettura non sono note. Vengono costruite appunto per fare analisi e rilevare alcuni dati. Di solito vengono costruiti partendo da vetture di altre case costruttrici ma con caratteristiche simili alla vettura finale desiderata (a livello di passo, presentazioni e peso). In Danisi, per creare i muletti, scelta la vettura, vengono, ad esempio, modificate le sospensioni e si procede con analisi di dinamica di guida e studi di fattibilità. Stabilite le caratteristiche e la fattibilità si procede con il prototipo di livello A in avanti.

I vari livelli di prototipizzazione (utilizzati in Danisi) sono descritti nello stato dell'arte, nel paragrafo 1.2.1 riferito al prototipo fisico. La scelta di sviluppare la procedura sino al prototipo di livello C risulta chiara in quanto l'azienda non sviluppa prototipi per la produzione di massa. Per questo il prototipo di livello C viene definito come obiettivo nello sviluppo prodotto. In alcuni casi però si è spinti a costruire prototipi di livello superiore sempre più simili al livello di produzione.

Definizione del numero di prototipi

La definizione del numero di prototipi non è definita da nessuna normativa. Per questo le case costruttrici di automobili non seguono una norma ma la costruzione di diversi prototipi dipende dalle procedure interne di sviluppo prodotto. Il numero di prototipi può variare per diverse ragioni, le più importanti sono lo scopo del prototipo e il numero di caratteristiche che devono essere testate nelle fasi di sviluppo prodotto. Infatti, lo scopo del prototipo è quello di testare una o più caratteristiche della vettura, il numero di caratteristiche testate sulla stessa vettura provoca una variazione sul numero di prototipi da costruire. Il numero di prototipi può variare anche in base alle disponibilità economiche del costruttore e in base alle consuetudini, in particolare le grandi aziende di costruttori di automobili costruiscono un numero fisso di prototipi per ogni fase per tradizione.

Prima di mettere su strada un veicolo vengono testate tutte le caratteristiche della vettura. Vengono svolte prove di durata e di affidabilità. Come, ad esempio, prove di fatica su determinati componenti (esempio: il montante della sospensione). Per svolgere queste prove devono essere costruite molte macchine da testare per validare le varie configurazioni (es. cambio pneumatico-cambio carichi per la fatica). Vengono costruite alcune vetture per eseguire i crash test fondamentali per valutare la capacità della vettura di assorbire gli urti e rendere sicura la vettura per i passeggeri. Inoltre, vengono costruite vetture per valutare le prestazioni del veicolo, le emissioni dello stesso e si ha la necessità di costruire altre macchine per testare NVH e la dinamica di guida.

Una considerazione che deve essere fatta riguardante le vetture fisiche necessarie per validare un modello di vettura virtuale. Questo caso non rientra nell'analisi, poiché è esterno all'obiettivo delineato però è fondamentale affermare che il modello virtuale implementato al simulatore è stato validato e reso affidabile da prove eseguite con vetture fisiche (queste vetture coincidono con auto precedentemente prodotte e testate).

Omologazione di una vettura

L'omologazione di una vettura ricopre un ruolo fondamentale per l'inserimento del prodotto nel mercato. Nel paragrafo non si approfondirà nel dettaglio questo argomento ma si è scelto di fare una breve descrizione della sua importanza e di come essa influisca nella fase di progettazione e verifica di un prodotto. L'omologazione di una vettura viene fatta sull'esemplare finito di produzione dopo aver verificato il processo (ripetibilità e riproducibilità del processo) e permette di controllare che la vettura sia conforme alla normativa vigente.

L'omologazione di una automobile varia a seconda della legislazione presente in ogni paese e in base al mercato (europeo/americano), inoltre varia a seconda del tipo di produzione (serie, piccola serie e modello unico). Un esempio riguardante la modalità di omologazione: in Europa l'omologazione di una vettura passa attraverso un ente (come, ad esempio, il CSIsipa) prima di interfacciarsi con il Ministero dei trasporti del paese interessato mentre in America per omologare la vettura basta un'autocertificazione del costruttore che attesta la conformità della vettura. Per questa ragione in fase di progettazione bisogna tenere conto delle varie normative al fine di avere un prodotto in regola nei vari paesi.

Per l'omologazione di una automobile vengono svolte differenti test su vetture fisiche: sia prove distruttive (crash test) sia non (prove di misure) per la verifica. Per l'omologazione in Europa, infatti, sono obbligatorie la verifica su vetture fisiche (questa fase è successiva allo sviluppo prodotto per questo non rientra nella nostra analisi).

A livello legislativo sono presenti alcune prove in cui è possibile utilizzare la simulazione durante l'omologazione come, ad esempio, la valutazione della conformità del sistema di guida automatizzata. In questo caso, per la verifica del principio di sicurezza è possibile utilizzare strumenti come la simulazione e i modelli matematici, solo in casi in cui sono presenti degli scenari difficili da sottoporre a prova in condizioni di guida reali. I costruttori però devono essere in grado di dimostrare il funzionamento dello strumento di simulazione, la sua validità per lo scenario in questione e la convalida effettuata per la catena degli strumenti di simulazione (correlando del risultato con le prove fisiche) [49-50].

In altre prove, la simulazione interviene per ridurre il numero di test che devono essere svolti durante la fase di controllo della conformità. Un possibile esempio è quello riferito alle prove per la sicurezza passiva per il contatto tra uomo e plancia della vettura in caso di incidente. Il test completamente fisico prevede che la plancia sia divisa in 9 sezioni ed esse devono essere verificate una ad una; invece, è possibile avere una riduzione delle prove grazie l'integrazione delle simulazioni testando solamente 3 configurazioni (frontale e con una variazione di più o meno 30 gradi). Ovviamente le simulazioni sono state verificare e validate.

Esistono invece alcune prove che non potranno mai essere rese virtuali come, ad esempio, le prove di tenuta dell'acqua (*water tightness*).

Questo evidenzia il fatto che anche in ambiti successivi allo sviluppo prodotto è possibile trovare la simulazione come metodo di validazione ovviamente rispetto ad altri casi è un ambiente in cui non è tanto diffuso.

Capitolo 4 – Strumenti e dati

In questo capitolo verranno analizzati gli strumenti e dati utilizzati durante questo lavoro di tesi. In primo luogo, si è scelto di utilizzare il software “Open LCA” per valutare l’impatto ambientale del prototipo fisico. A seguito di alcune analisi (successivamente descritte) si è scelto di implementare completamente la procedura della metodologia attraverso un foglio di calcolo Excel. Seguirà un paragrafo in cui vengono riportati i dati secondari utilizzati.

4.1 Software: OpenLCA

Il software scelto inizialmente per eseguire l’analisi di valutazione di impatto ambientale (*Life Cycle Assessment-LCA*) è “OpenLCA”, software open source che permette di valutare l’impatto ambientale del ciclo di vita dei prodotti e dei processi. Con il software open LCA è possibile creare studi LCA conformi alle normative ISO 14040 e 14044 [25,26]. Il software mette a disposizione agli utenti diversi database (sia gratuiti che a pagamento). I database scelti per i materiali e i mezzi di trasporto, disponibili gratuitamente e sul sito di open LCA, sono: “Worldsteel”, “NEED”, “ELCD” ed “ecoinvent”. Questi database insieme metodi di valutazione di impatto ambientale sono stati importati sul software [51,52].

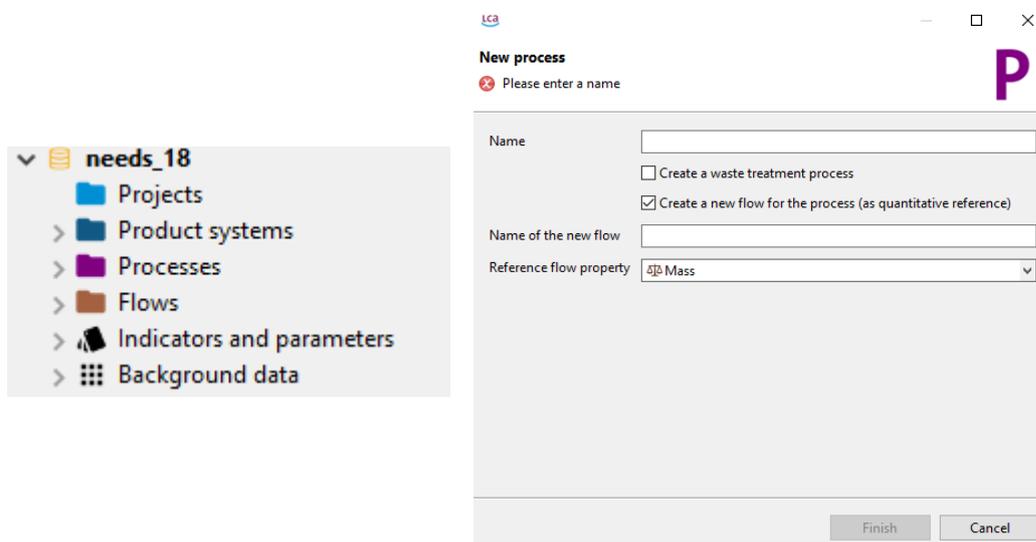


Figura 20- Selezione del database e di un nuovo processo con il software OpenLCA

La procedura inizia selezionando un database tra quelli disponibili: in questo esempio si è scelto “needs_18” (figura 20), database open source che permette di eseguire analisi LCA. Scelto il database si procede con la creazione di nuovo processo, selezionando sulla cartella “processes” e si definiscono: il nome e le proprietà del flusso nella schermata successiva creando così un nuovo processo di nostro interesse.

Creare un nuovo processo è possibile definire i dati di input dello stesso. Questi sono aggiunti con il segno “+” in alto a destra nella figura 21, da qui è possibile navigare nel database e trovare il materiale o il processo desiderato; in questo caso si è preso come esempio il ciclo vita di un acciaio basso legato. Aumentando il livello di dettaglio è possibile trovare nella sezione “flusso” la descrizione di quale fase del ciclo vita si va ad analizzare o il materiale scelto; nella sezione “categoria” viene riportata la caratteristica del flusso e nelle sezioni successive si definisce la quantità e la rispettiva unità di misura. È possibile, inoltre, parametrizzare le quantità delle grandezze di interesse nella sezione “parametri”. Andando a dettagliare ora l’esempio: nella prima riga è riportata l’estrazione del materiale necessario per la produzione dell’acciaio (kg), nella seconda riga è riportato lo scarto (kg), nella terza riga viene riportato il trasporto dell’acciaio per mezzo di un camion da 16 t (t*km) e infine nell’ultima riga viene riportata l’elettricità consumata durante il processo (MJ). Le quantità non sono state definite quindi i risultati ottenuti successivamente non hanno rilevanza, si è scelto infatti di andare a riportare la procedura di utilizzo del software.

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality entry	Description
steel, converter, low-alloyed, at plant - RER	metals/extraction	1.00000	kg		none				
Steel waste	Waste/ecopoints 97, CH	1.00000	kg		none				
transport, lorry 16t - RER	transport systems/road	1.00000	t*km		none				
electricity, production mix UCTE - UCTE	electricity/production mix	1.00000	MJ		none				

Figura 21-Inserimento dei processi in input nel software OpenLCA per un’analisi riferita al processo di produzione e trasporto di un acciaio basso legato

Definiti i dati di input dell’analisi, si torna alla schermata iniziale in cui vengono riportate le informazioni generali del progetto come in figura 22. Tra le informazioni generali è possibile trovare il nome del progetto, una descrizione dello stesso e il tempo e la geografia nel caso in cui il processo è sviluppato in un lungo periodo e in diverse parti del mondo; infatti, magari, ad esempio, si può avere una parte della produzione che avviene in Cina e le lavorazioni successive e/o la costruzione avviene in Europa; quindi, si avrà una distribuzione delle emissioni in due zone differenti. Nella schermata delle informazioni generali è possibile eseguire il calcolo diretto oppure inserirlo all’interno di un sistema, inoltre una volta definiti i parametri è possibile eseguire confronti tra diverse configurazioni.

P General information: acciaio

▼ General information

Name

Description

Version 00.00.002

UUID

Last change 2023-03-23T17:20:30+0100

Tags

Infrastructure process

► Time

► Geography

► Technology

► Data quality

General information | **Inputs/Outputs** | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Social aspects | Impact analysis

Figura 22- Schermata riferita alle informazioni generali del processo acciaio nel software OpenLCA

Eseguendo il calcolo diretto si apre una nuova schermata che permette di scegliere il metodo di impatto ambientale più appropriato. Le metodologie di impatto ambientale sono messe a disposizione dal software OpenLCA. Il calcolo è stato svolto utilizzando il metodo di impatto ambientale ReCiPe 2016 Midpoint (H).

Di seguito vengono riportate alcune schermate di output di calcolo del software, i risultati ottenuti non hanno alcun significato a causa dei dati di input inseriti che non hanno alcuna validità. Nella figura 23 sono riportate le categorie di impatto (gli indicatori scelti in base al metodo) e i materiali impiegati nel flusso con la rispettiva CO_{2eq} emessa. Per ogni categoria e materiale sono riportate rappresentazioni grafiche e in quale macrogruppo vanno ad impattare. È riportato inoltre l'inventario dei risultati, ovvero la descrizione dell'impatto ambientale materiale per materiale, partendo dal dato di input (risorsa) sino all'output e in quale categoria va ad impattare.

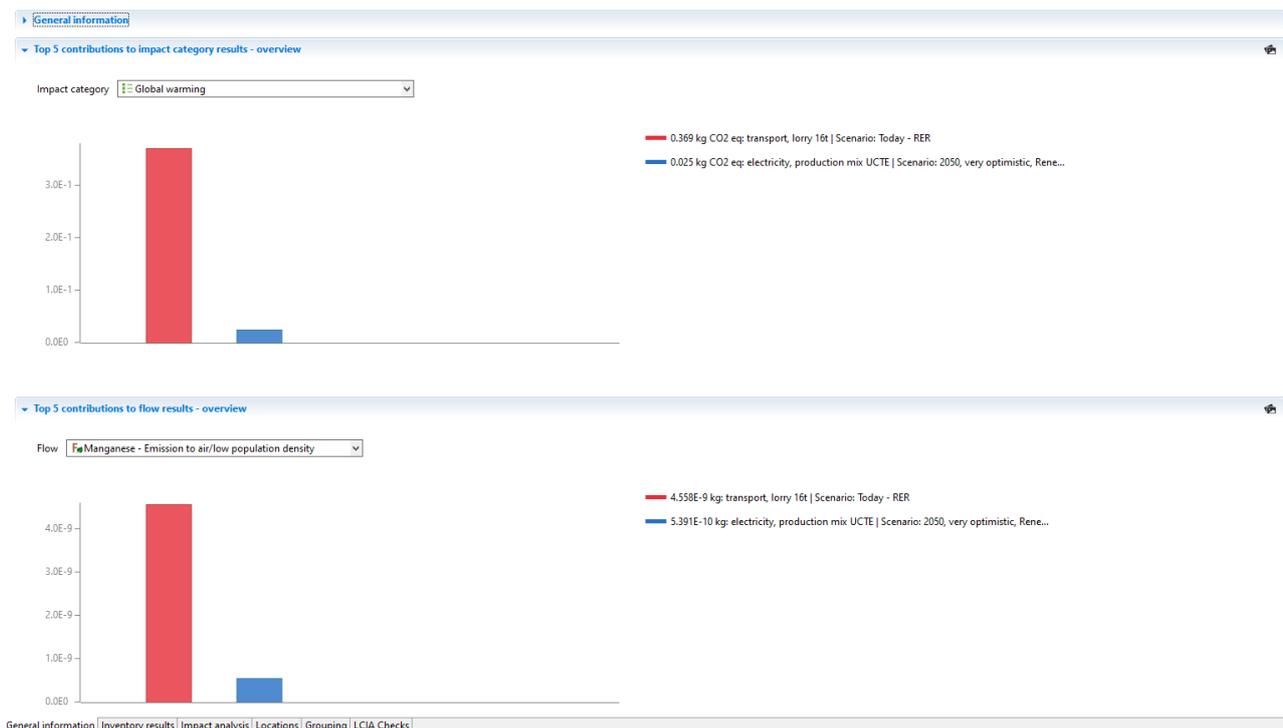


Figura 23- Risultati di impatto ambientale ottenuti con il software OpenLCA riferite alla categoria Global warming e ai materiali (manganese emesso in aria)

Nella figura 24 sono riportati gli indicatori di impatto ambientale totali dell'intero processo definiti in base al metodo scelto, in questo esempio si è scelto il ReCiPe 2016 Midpoint (H). Il metodo scelto è tra i più utilizzati per svolgere analisi LCA. È possibile osservare i 18 indicatori del metodo scelto con i rispettivi valori di impatto e unità di misura. Questi indicatori sono Midpoint poiché valutano un impatto intermedio e non quello diretto sull'umano (Endpoint). Il simbolo "H" si riferisce invece alla durata degli impatti ambientali, infatti, questi valori si riferiscono a cento anni.

Impact analysis: ReCiPe 2016 Midpoint (H)

Subgroup by processes Don't show < 1 %

Name	Category	Inventory result	Impact factor	Impact result	Unit
> Human carcinogenic toxicity				0.00957	kg 1,4-DCB
> Terrestrial ecotoxicity				0.52221	kg 1,4-DCB
> Terrestrial acidification				0.00156	kg SO2 eq
> Water consumption				392.83245	m3
> Ozone formation, Terrestrial ecosystems				0.00307	kg NOx eq
> Land use				0.00789	m2a crop ...
> Human non-carcinogenic toxicity				0.10420	kg 1,4-DCB
> Marine ecotoxicity				0.00434	kg 1,4-DCB
> Marine eutrophication				9.63343E-7	kg N eq
> Freshwater eutrophication				1.56423E-6	kg P eq
> Stratospheric ozone depletion				3.30335E-7	kg CFC11 ...
> Freshwater ecotoxicity				0.00254	kg 1,4-DCB
> Fine particulate matter formation				0.00073	kg PM2.5 eq
> Ionizing radiation				0.03270	kBq Co-60...
> Global warming				0.39476	kg CO2 eq
> Mineral resource scarcity				0.00110	kg Cu eq
> Fossil resource scarcity				0.13246	kg oil eq
> Ozone formation, Human health				0.00295	kg NOx eq

Figura 24- Analisi di impatto: lista delle categorie ottenute con il metodo ReCiPe 2016 Midpoint (H)

Come ultima figura riguardante i risultati, la figura 25 riporta la mappa dell'impatto ambientale nella zona del processo, in questo caso viene mostrato come l'impatto non è locale ma può avere origini diverse in base all'origine dei materiali e dell'energia.

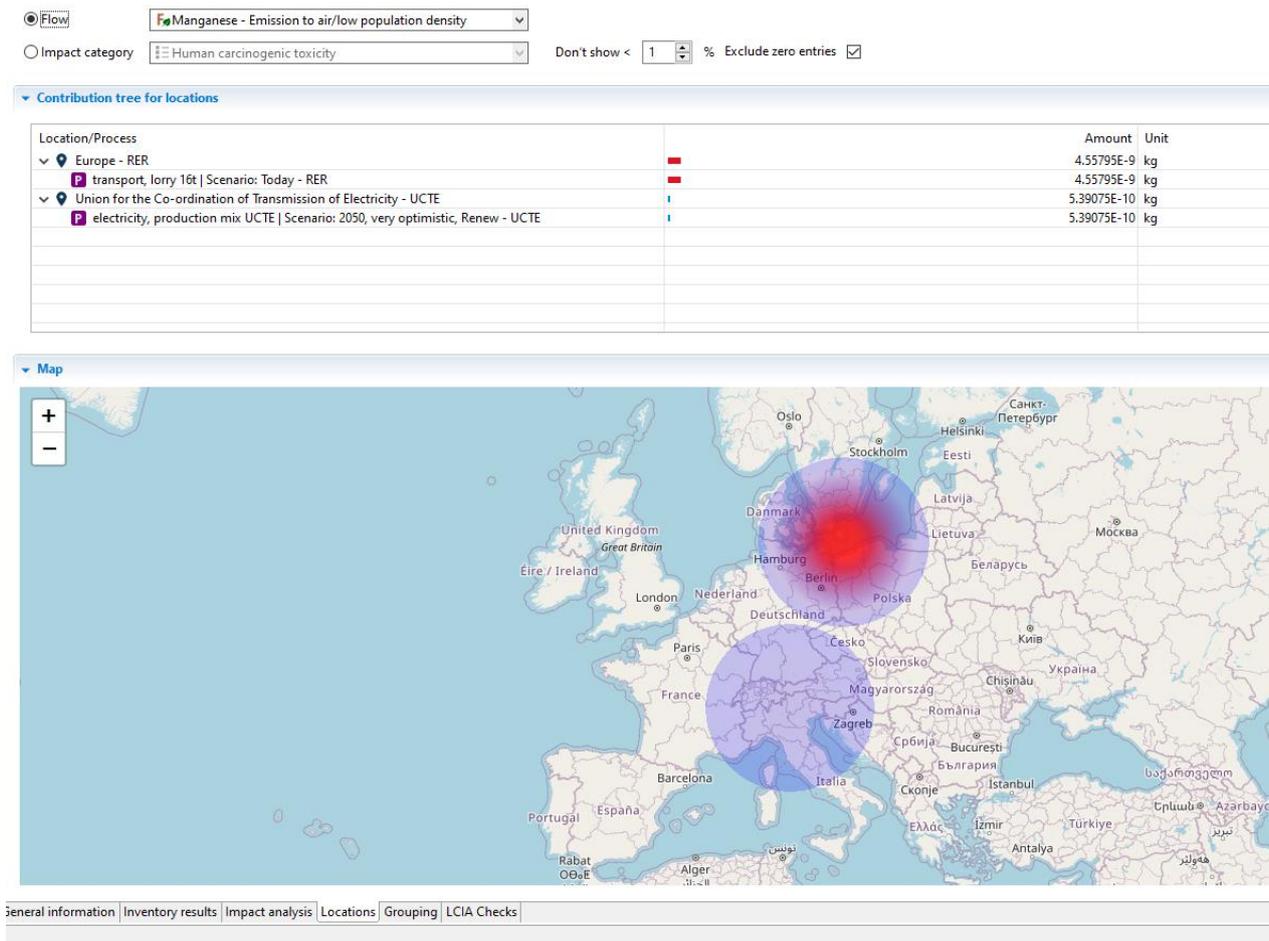


Figura 25-Risultati di impatto ambientale a livello geografico con il software OpenLCA

A livello grafico, per quanto riguarda la rappresentazione dei risultati finali è possibile optare su grafici a tornata, grafici a barra e diverse rappresentazioni, inoltre è possibile eseguire comparazione di differenti scenari, andando a modificare i parametri di input dei flussi.

New flow
 Creates a new flow

F

Name

Description

Flow type ▼

 Elementary flow
 Elementary flow
 Product
 Waste

Reference flow property

Figura 26- Creazione di un nuovo flusso con il software OpenLCA

È possibile, inoltre, creare un nuovo flusso da zero. Selezionando la voce “nuovo flusso” si aprirà la schermata della figura 26 ed è possibile definire il nome, aggiungere una descrizione e selezionare il tipo di flusso (elementare, prodotto o scarto). Il flusso elementare è un flusso che impatta direttamente sull’ambiente senza una prima lavorazione da parte dell’uomo. Il flusso di prodotto invece può essere un processo, un componente, un sistema ed infine il flusso scarto che rappresenta il fine vita o gli scarti durante un processo o un prodotto. Questo flusso può essere incluso in un processo.

Una volta definito un processo è possibile includerlo all’interno di un sistema prodotto. Per generare un nuovo sistema prodotto basta selezionare “create product system” all’interno delle informazioni generali del processo.

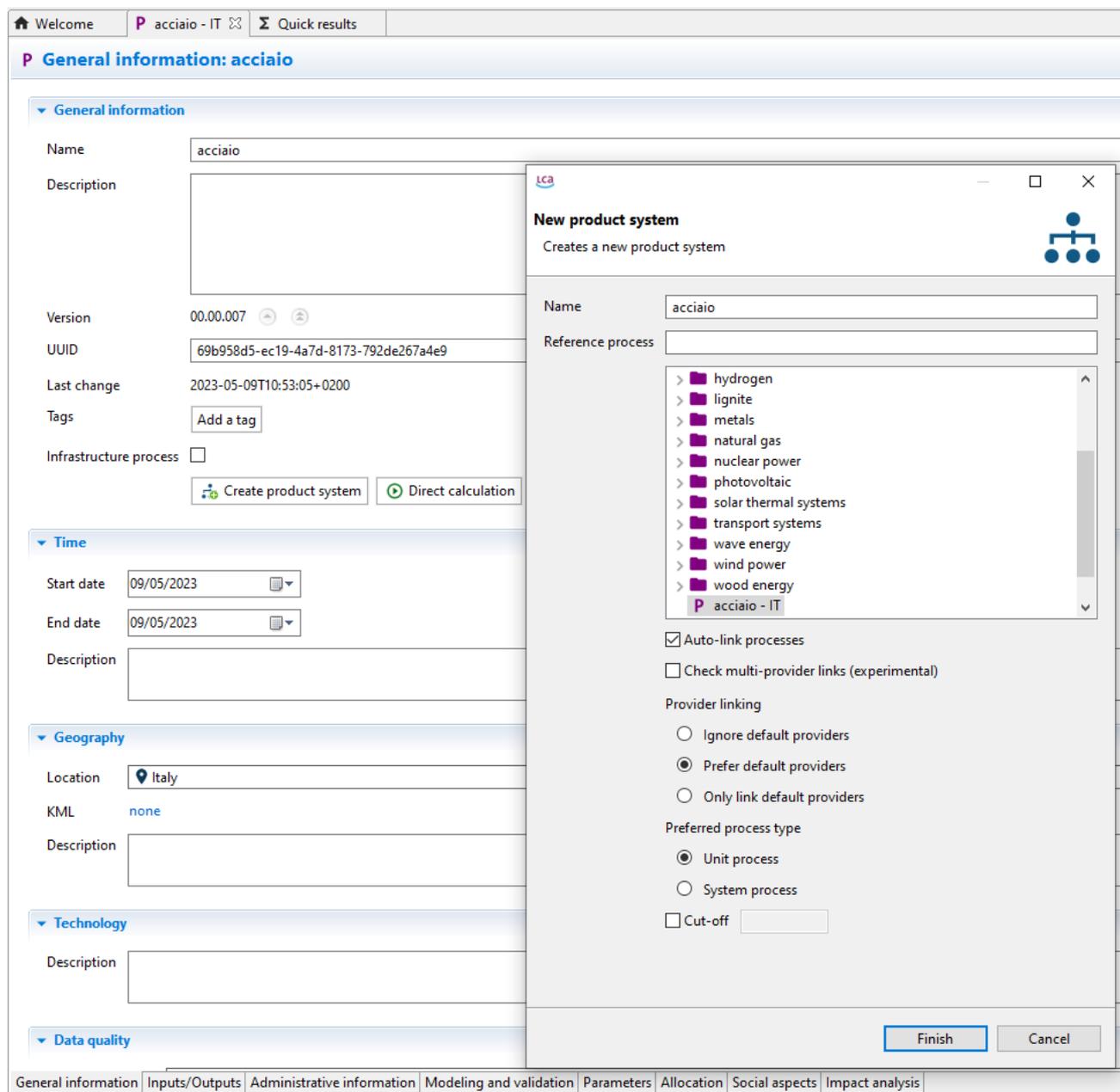


Figura 27- Informazioni generali e creazione di un nuovo sistema prodotto con il software OpenLCA

Il sistema viene rappresentato con tutte le varie sottofasi in forma grafica come nella figura 28. In questo caso è possibile osservare che l'impatto è generato dalla elettricità e dal trasporto; in esempi più complessi è possibile osservare diagrammi più articolati con tutti le varie sottofasi e i vari contributi minori del sistema. Sono presenti, inoltre, delle informazioni statistiche in una apposita cartella.

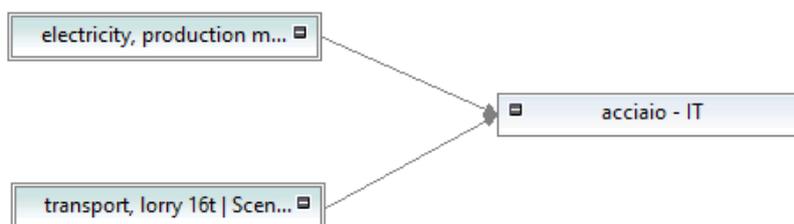


Figura 28-Diagramma a blocchi del sistema su OpenLCA

Anche in questo caso è possibile calcolare direttamente l'impatto ambientale del sistema prodotto selezionato scegliendo un metodo di impatto ambientale [51,52].

Il software permette di fare analisi LCA complete ma poiché i database trovati sono incompleti (quelli completi sono disponibili molto spesso solo nelle versioni a pagamento come, ad esempio, ecoinvent), e inoltre molte volte i limiti di analisi dei dati di un processo sono diversi rispetto a quelli definiti per la metodologia, si è scelto di implementare completamente la stessa attraverso un foglio di calcolo Excel. Molto spesso questi database forniscono dati che differiscono per l'analisi che vogliamo svolgere oppure tengono conto di alcune fasi del ciclo vita che non andremo ad analizzare (ad esempio il recupero/ riciclo dei materiali). In ogni caso una parte della metodologia, in particolare quella simulata, doveva essere implementata in un foglio di calcolo Excel.

Nonostante ciò, si è scelto di usare solo alcuni risultati disponibili del software come termine di paragone per i risultati forniti da alte fonti. In questo caso vengono analizzati e confrontati i dati (riferiti ai mezzi di trasporto) a disposizione del software con quelli utilizzati nel foglio di calcolo generato per applicare la metodologia.

Il primo confronto che viene fatto si riferisce all'analisi dei valori ottenuti da un van con carico minore delle 3.5t e un camion da 16t. I dati di input sono gli stessi: 1200 km per il camion, 50 km per il van e le tonnellate trasportate. Il database utilizzato su OpenLCA è Needs e la metodologia di impatto ambientale è ReCiPe 2016 Midpoint (H) mentre i dati inseriti sul file Excel hanno come fonte ISPRA. I risultati ottenuti dal software sono riportati nella figura 29 (per il camion i km di CO_{2eq} sono 443.3 mentre per il van sono 13.6) mentre gli altri risultati ottenuti con il foglio di calcolo sono pari a 396 kg di CO₂ per quanto concerne il camion e 12.05 kg di CO₂ per quanto concerne il van come riportato nella tabella 2.



Figura 29- Analisi di impatto ambiente di un van e di un lorry 16t ottenuto con OpenLCA per eseguire il confronto dei risultati con quelli ottenuti nella metodologia implementata su Excel

Mezzo di trasporto	Numero di mezzi	gCO _{2eq} /km ISPRA	Distanza [km]	CO _{2eq} [kg]
Truck	1	330	1200	396
Van	1	241	50	12

Tabella 2- Analisi di impatto ambientale di un van e di un truck ottenuto con la metodologia implementata su Excel per eseguire il confronto dei risultati di quelli ottenuti con OpenLCA

Confrontando i risultati possiamo affermare che non si ha molta differenza tra i valori ottenuti utilizzando il software e i risultati ottenuti con il foglio di calcolo per quanto riguarda le emissioni di CO₂ dei mezzi di trasporto su ruota.

4.2 Metodologia implementata su Excel

La metodologia descritta nel capitolo 2 è stata implementata su un foglio di calcolo Excel. È stata suddivisa in diversi fogli in base all'argomento trattato (come suddivisa nella metodologia).

Il primo foglio con nome "DATI" permette l'inserimento dei valori di input primari e secondari oltre alle informazioni generali del progetto analizzato. Nel foglio "Casa-Ufficio" è implementata l'analisi del percorso casa-lavoro dei dipendenti. Nei fogli con nome "costruzione prototipo" e "test su pista" è implementata la procedura di valutazione di impatto ambientale della costruzione del prototipo fisico. Nella cartella simulazione invece si valuta l'impatto del prototipo virtuale. Infine, vengono mostrati tutti i risultati dell'analisi nell'ultimo foglio.

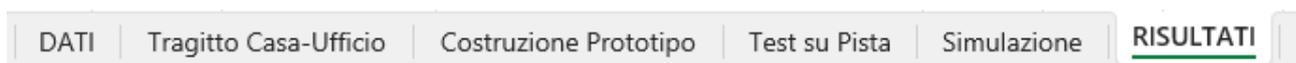


Figura 30- Suddivisione delle cartelle nel foglio di calcolo Excel per valutare i benefici delle simulazioni durante lo sviluppo prodotto

Procedendo con una descrizione più dettagliata di ogni foglio di calcolo l'immagine seguente (figura 31) riporta parte della schermata del Foglio "Dati". I dati inseriti sono fondamentali per l'analisi. La loro correttezza e l'affidabilità rendono corretta o meno un'analisi.

DATI primari	valore			
Tipologia mezzi di trasporto				
Numeri di mezzi di trasporto				
km percorsi				
Numero di persone				
km di materiale				
Tipologia di materiale				
DATI SECONDARI				
mezzo di trasporto:	fonte	valore	unità di misura	finalità
Truck max 7.5 t EURO 5/6			gCO2eq/km	trasporto prototipo
Truck 14-20t EURO 5/6			gCO2eq/km	trasporto materiale lunga distanza
Veicolo commerciale			gCO2eq/km	trasporto materiale breve distanza
Treno lunga percorrenza			gCO2eq/pkm	trasporto di persone
Aereo in europa			gCO2eq/pkm	trasporto di persone
Aereo intercontinentale			gCO2eq/pkm	trasporto di persone
materiale:	fonte	valore	unità di misura	
Acciaio			kg CO2eq/kg	
Acciaio inox				
Al				
Rame				
Nickel				
Titanio				
Plastica				

Figura 31-Schermata del foglio "Dati" della metodologia

Nella sezione “tragitto Casa-Ufficio” è stato implementato il calcolo del paragrafo 2.4 per la valutazione dell’impatto ambientale dovuto allo spostamento dei dipendenti nel percorso casa-ufficio.

Entrando ora nella parte centrale della metodologia nell’immagine 32 viene riportata solo una parte di tutto il foglio di calcolo. Si è scelto come esempio solo la parte riferita all’acciaio e alle leghe di alluminio (gli acciai/leghe di alluminio citati in figura sono solo un esempio di materiali impiegati nella costruzione). In questa parte viene affrontata la produzione del materiale, il trasporto dello stesso e le varie lavorazioni meccaniche (utilizzo). Infine, vengono riassunti gli impatti ambientali per ogni categoria riferita alla costruzione del prototipo come sistema/sottosistema/componente.

Produzione materiale	Quantità [kg]	GWP kgCO2eq /kg	CO2eq [kg]
Acciaio da costruzione (Fe37)			0
Acciaio trafilato a freddo (25CrMo4)			0
Acciaio inox (AISI 302)			0
Acciaio da cementazione (18NiCrMo4)			0
EN AW 7075			0
Al 6060			0
Al 5754			0

Materiale	Mezzo di trasporto	Numero di mezzi T	Peso materiale [t]	Distanza [km]	g CO2/km	CO2eq [kg]
Acciaio da costruzione (Fe37)						0
Acciaio trafilato a freddo (25CrMo4)						0
Acciaio inox (AISI 302)						0
Acciaio da cementazione (18NiCrMo4)						0
EN AW 7075						0
Al 6060						0
Al 5754						0

Utilizzo	ore di utilizzo	Kg CO2/kWh	kW	kWh	CO2eq [Kg]
Tornio					0
Fresa					0

	CO2eq [kg]
produzione	0
trasporto	0
lavorazioni meccaniche	0
tragitto dipendenti	0
totale	0

Figura 32-Schermata del foglio "Costruzione prototipo" fisico della metodologia

I risultati sono riportati sia nella tabella sia in forma grafica attraverso un grafico a barra e a torta. Per ogni foglio blocco si è scelto di riportare i risultati in forma grafica per evidenziare quale fase impatta di più e poter (nel caso) intervenire adoperando possibili accorgimenti. Nella prima riga della figura 33 sono riportati i grafici a torta e a barar riferiti alla costruzione del prototipo fisico, nella seconda riga della stessa figura sono riportato invece gli stessi risultati integrati con il tragitto casa-ufficio dei dipendenti del reparto produzione e ingegneria in grafici a torta e di Pareto.

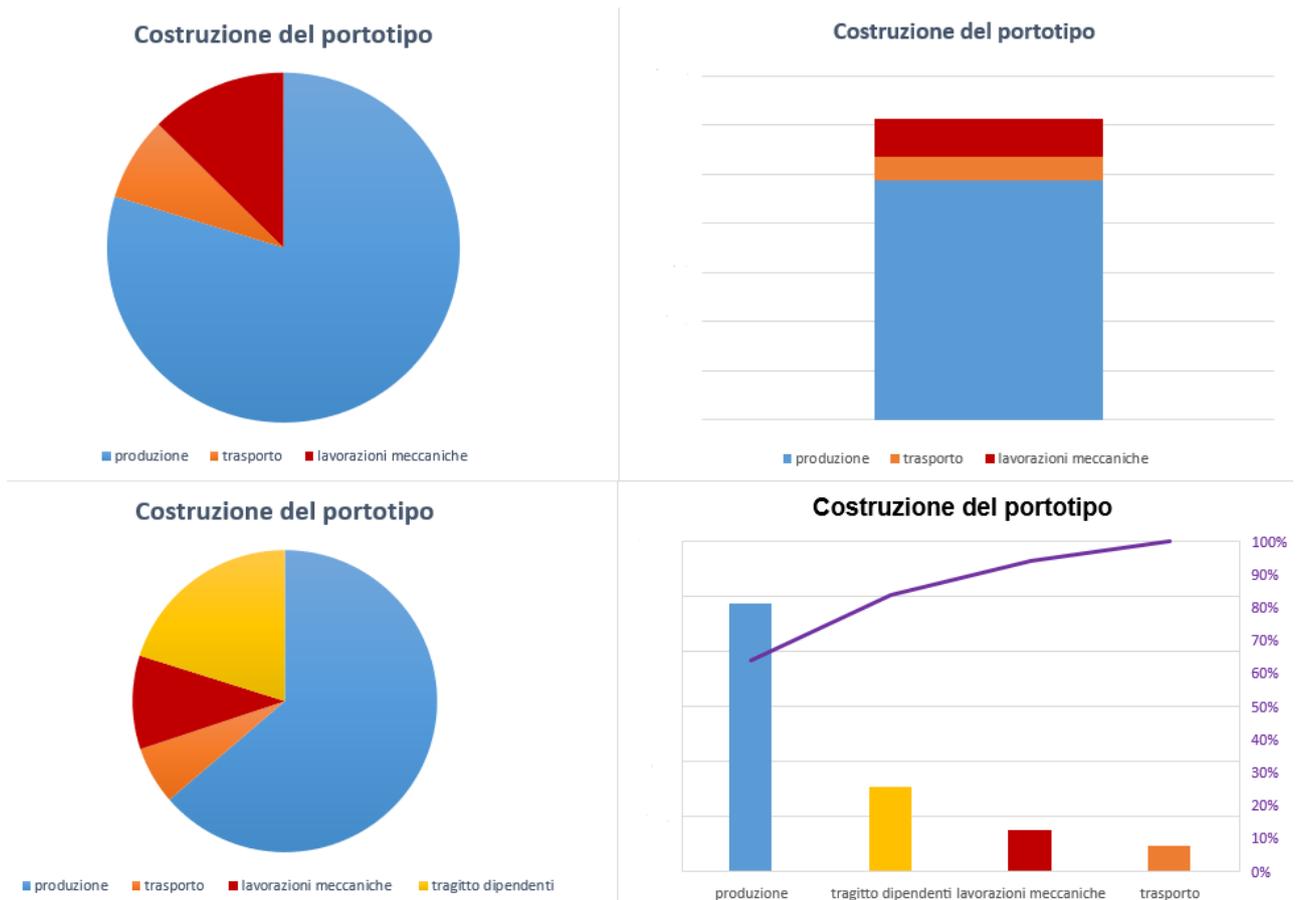


Figura 33- Schermata dei risultati della costruzione del prototipo (grafici a torta, a barra e di Pareto)

Sempre riferito al prototipo fisico, nella cartella “test su pista”, si valuta l’impatto ambientale legato alle emissioni dirette del prototipo in pista e a tutta la logistica di trasporto di persone e attrezzature. Nella figura 34 sono riportate le informazioni per calcolare l’impatto ambientale della logistica dividendo l’analisi rispetto al trasporto del/dei prototipo/i, al trasporto degli ingegneri e dei meccanici (gruppo aziendale) e al cliente. In questo caso è possibile inserire il mezzo di trasporto, il numero di mezzi o persone che si occupano del progetto e la distanza trascorsa. Infine, è possibile inserire le emissioni del prototipo in pista note le caratteristiche della vettura e della pista. Anche in questo caso sono riportati i risultati in forma tabellare e grafica nella figura 35. Una nota sui valori dei grafici: non sono stati riportati poiché questo è solo un esempio del foglio di calcolo implementato; infatti, si è scelto di mostrare solo una parte e senza inserire i valori nelle varie tabelle.

LOGISTICA	Mezzo di trasporto	Numero di mezzi T	gCO2eq/km	Distanza [km]	CO2eq [kg]
trasporto prototipo/componenti					0

LOGISTICA	Mezzo di trasporto	Numero di persone	gCO2eq/pkm	Distanza [km]	CO2eq [kg]
trasporto meccanici/ing					0

LOGISTICA	Mezzo di trasporto	Numero di persone	gCO2eq/pkm	Distanza [km]	CO2eq [kg]
trasporto team cliente					0

	Emissione di CO2 [g/km]	N. di Giri	Lunghezza track	Distanza [km]	CO2 [kg]
Emissioni ICE del porotipo in pista					0

	CO2eq [kg]
trasporto prototipo/componenti	0
trasporto meccanici/ing	0
trasporto team cliente	0

	CO2eq [kg]
Logistica materiali e persone	0
Emissioni porotipo in pista	0
Totale	0

Figura 34-Schermata del foglio "Test in pista" del prototipo fisico della metodologia

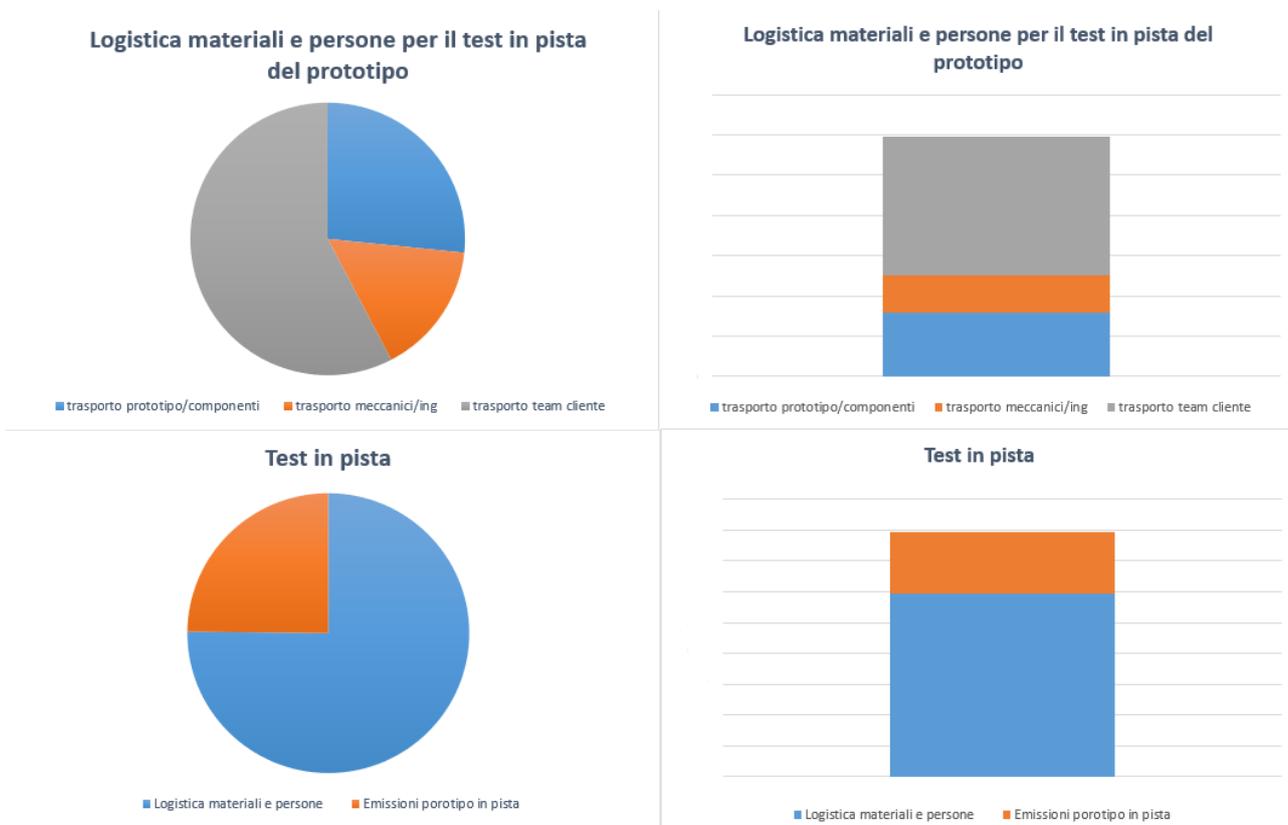


Figura 35-Schermata dei risultati del "test in pista" del prototipo fisico (grafici a torta e a barra)

Passando ora al prototipo virtuale si valuta l'impatto ambientale causato dalla simulazione. Il prototipo virtuale impatta sia per quanto riguarda la creazione del modello sia dall'utilizzo dello stesso. Nella figura 36 viene riportato il calcolo di consumo energetico sviluppato per valutare l'impatto ambientale del simulatore durante la fase di costruzione del modello (generato dal tragitto casa lavoro dei dipendenti sommato al consumo dei dispositivi elettronici utilizzati per la creazione dello stello) e durante il suo utilizzo (nelle fasi di validazione virtuale, funzionale e di prodotto). Anche in questo caso vengono riportati i risultati in forma grafica come in figura 37.

costruzione del modello					
	CO2 eq[Kg]				
tragitto casa ufficio dipendenti	0				
consumo dispositivi	0				
totale:	0				

UTILIZZO	ore di utilizzo	Kg CO _{2eq} /kWh	kW	kWh	CO2 eq[Kg]
Validazione Virtuale					0
Validazione Funzionale					0
Validazione Prodotto					0
					0

Figura 36-Schermata del foglio "Simulazione" del prototipo virtuale della metodologia

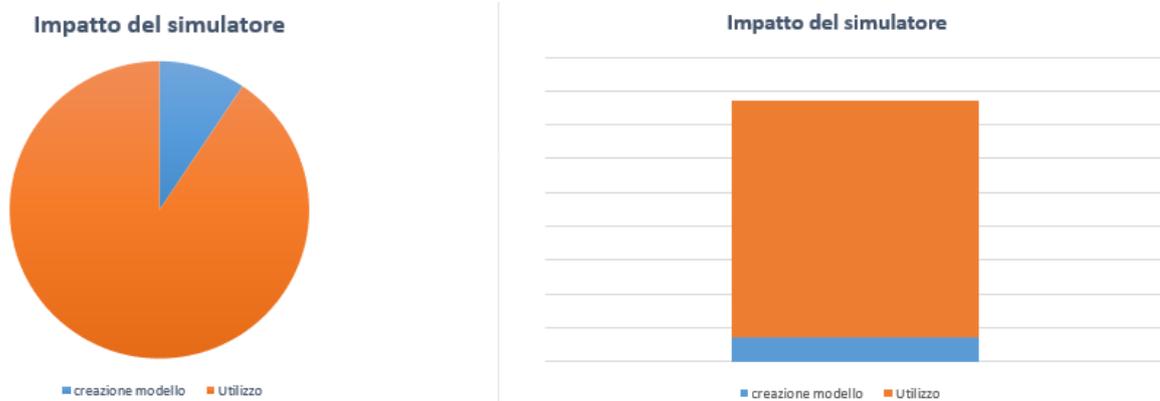


Figura 37-Schermata dei risultati del "Simulazione" del prototipo virtuale (grafico a torta e a barra)

Ed infine è presente un ultimo foglio di calcolo i cui sono mostrati i risultati riassuntivi dei fogli di calcolo precedenti. Questi risultati permettono di visualizzare in modo semplice se è presente un effettivo risparmio di CO_{2eq}, e fare alcune considerazioni sulle fasi che impattano di più e provare ad attuare politiche aziendali mirate ad una maggiore riduzione.

Nel foglio Excel devono essere inseriti varie tipologie di dati (citati nel paragrafo 2.5). Nel paragrafo seguente (4.3) vengono trattati i dati secondari (con le rispettive fonti) che sono stati inseriti nel foglio di calcolo per eseguire la valutazione di impatto ambientale.

4.3 Dati utilizzati

I dati inseriti nella procedura di calcolo svolgono una funzione fondamentale nell'analisi. Infatti, la loro qualità e la loro attendibilità permette di eseguire una analisi più o meno accurata. La descrizione delle varie tipologie di dati e di informazioni sono state approfondite nel paragrafo 2.5.

I dati primari sono dati diretti presenti nell'azienda: questi dati sono ottenuti direttamente attraverso misure o da dati calcolati internamente.

DATI PRIMARI	Valore	Unità di misura
Quantità di materiale		kg
Tipologia del mezzo di trasporto		
Numero dei mezzi di trasporto		
Percorso del mezzo di trasporto		km
Consumo del simulatore		kWh
Potenza Assorbita		W
Numero di ore		
Numero di persone		
Numero di giorni		
Numero di giri di pista		
Percorso della vettura in test		km

Tabella 3-Dati primari da inserire nel foglio di calcolo

I dati secondari (espressi in ((g o kg) CO_{2eq}) /unità) sono i dati che hanno più variabilità: questi, infatti, sono stati ottenuti attraverso una ricerca bibliografica e tra fonti di organizzazioni nazionali e internazionali che svolgono ricerca sulla valutazione dell'impatto ambientale. I dati secondari che sono necessari per eseguire l'analisi sono quelli riferiti ai mezzi di trasporto e quelli riferiti alla produzione dei materiali necessari a costruire il prototipo.

La fonte riferita ai dati di impatto ambientale secondari per i mezzi di trasporto su gomma è ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). I dati presenti in questa fonte sono dati del 2020. Il database utilizzato presentava il valore di emissioni di diversi inquinanti (CH₄, NO, NO₂, CO, CO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2,5}, NMVOC, BC, OM, FC e benzene) al variare della categoria di mezzo di trasporto (macchine, veicolo commerciali leggeri, veicoli pesanti (al variare del peso) e pullman). Inoltre, per ogni tipologia di mezzo di trasporto si ha una suddivisione in base al tipo di combustibile (benzina, diesel, ibrido, elettrico e bifuel) e alla tecnologia presente (le varie omologazioni EURO 1-6d). Questo database non forniva la CO_{2eq} diretta ma è stata calcolata utilizzando la formula 12. I risultati ottenuti per le categorie di mezzi di trasporto più utilizzate sono state riportate nella tabella 4.

I dati riferiti ai mezzi di trasporto su gomma vengono utilizzati per valutare l'impatto del trasporto del prototipo alla pista per i test, le emissioni del prototipo in pista, le emissioni delle vetture dei dipendenti nel tragitto casa-ufficio e il trasporto dei componenti commerciali e dei semilavorati dalla fabbrica di produzione sino allo stabilimento.

Mezzo di trasporto	Combustibile	EURO	gCO _{2eq} /km
Automobili medie	benzina	4	203
Automobili medie	benzina	5	196
Automobili medie	benzina	6	193,7
Automobili SUV- alto prestazionali	benzina	5	343
Automobili SUV- alto prestazionali	benzina	6	316
Automobili SUV- alto prestazionali	ibridi	6	146
Automobili medie	diesel	4	161
Automobili medie	diesel	5	157
Automobili medie	diesel	6	151,7
Automobili SUV	diesel	5	231
Automobili SUV	diesel	6	217
Veicoli commerciali leggeri	diesel	6	241,6
Camion <7,5t	diesel	VI	331
Camion 7,5-12 t	diesel	VI	462,5
Camion 12-14 t	diesel	VI	461

Tabella 4- Dati secondari riferiti ai mezzi di trasporto su gomma

La fonte riferita ai dati di impatto ambientale secondari per i mezzi di trasporto non su gomma (quindi principalmente treno e aereo) adibito al trasporto di persone è l'articolo scritto da autori dal Politecnico di Milano, con titolo: "Convenzione tra il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ed il Politecnico di Milano del 24 marzo 2014 per l'attuazione delle metodologie di calcolo dell'impronta di carbonio e di compensazione delle emissioni di CO₂ di EXPO 2015 - D.1.2 Approfondimento metodologico: viaggi" [53]. Sono presenti anche dati riferiti ai mezzi di trasporto su gomma ma si è scelto di utilizzare quelli dell'ISPRA poiché come data risultano più recenti.

Mezzo di trasporto	Combustibile	Unità di Misura	Valore
Voli all'interni del continente Europeo – Aereo passeggeri	Kerosene	gCO _{2eq} /pkm	143
Voli intercontinentali - Aereo passeggeri		gCO _{2eq} /pkm	91
Treno regionale – Occupazione Alta (50%)		gCO _{2eq} /pkm	34
Treno regionale – Occupazione media (100%)		gCO _{2eq} /pkm	17
Treno a lunga percorrenza – Occupazione media (50%)		gCO _{2eq} /pkm	26
Treno a lunga percorrenza – Occupazione media (100%)		gCO _{2eq} /pkm	13

Tabella 5-Dati secondari riferiti ai mezzi di trasporto non su gomma (aereo e treno)

I dati riferiti ai mezzi di trasporto non su gomma vengono utilizzati per valutare l'impatto del trasporto di persone al *proving ground* quando la distanza diventa rilevante. Infatti, questi mezzi di

trasporto possono essere utilizzati dal cliente che molte volte proviene da uno Stato estero, per questo potrebbe utilizzare un aereo oppure per esempio, i meccanici e gli ingegneri per arrivare ad una pista possono utilizzare un treno a lunga percorrenza a seconda delle esigenze. I dati presenti in questo articolo possono essere ritenuti attendibili poiché si riferiscono ai dati di ARPA Lombardia e al database Ecoinvent 3.1.

Una considerazione che è possibile fare confrontando i dati riferiti ai mezzi di trasporto su gomma è che non sono presenti elevate discrepanze tra i dati presenti nelle due differenti fonti (ISPRA e articolo in bibliografia numero 53). Infatti, per quanto concerne i trasporti i dati presenti sono elevati e affidabili.

Mezzo di trasporto	Combustibile	gCO ₂ eq/km [53]	gCO ₂ eq/km ISPRA
Automobili	benzina	181	193
Automobili	diesel	171	157
Veicoli commerciali leggeri	diesel	239	241

Tabella 6-Confornto dati secondari per i mezzi di trasporto su gomma

Passando ora a definire i dati secondari utilizzati per l'analisi di impatto ambientale per i materiali i database utilizzati sono differenti a seconda del materiale. Il questo caso per quanto concerne la produzione di vari materiali metallici si è scelto di analizzare l'impatto ambientale per la produzione del metallo "dalla culla al cancello", in assenza di materiale riciclato per la produzione dello stesso. Le informazioni sono state prese dall'articolo "Assessing the environmental impact of metal production processes" articolo del 2006 [54-55]. Per quanto riguarda la produzione di alluminio si è scelto una diversa fonte: "Circular Aluminium action plan – a strategy for achieving aluminium's full potential for circulat economy by 2030" dell'european aluminium [56], prendendo come dato di impatto ambientale la media della produzione europea nel 2018. Per quanto riguarda i materiali compositi e le resine utilizzate si fa riferimento ai dati "LCA database of environmental impacts to inform material selection process" sviluppati da DACOMAT per l'Unione Europea [57]. Infine, relativamente ai materiali di origine plastica la fonte scelta è "L'impatto delle materie plastiche sul consumo energetico e sulle emissioni di gas serra lungo il loro ciclo di vita in Europa" del 2010 [58].

Materiale	kg CO ₂ eq/kg	Fonte
Acciaio	2,3	Articolo [54]
Acciaio Inox	6,8	
Rame	4,8	
Nickel	13,8	
Titanio	35,7	
Alluminio	6,7	European-Al [56]
Plastica	1,9	Articolo plastica [58]

Tabella 7- Dati secondari riferiti ai materiali

Una considerazione che è possibile fare riguardo ai dati utilizzati per i materiali e che essi sono riferiti ad articoli non recenti. Questo potrebbe generare un'incongruenza tra le emissioni di CO₂eq stimate rispetto a quelle reali. L'analisi sviluppata potrebbe essere resa più accurata utilizzando dati più aggiornati che attualmente sono disponibili solo su database a pagamento.

Capitolo 5- Applicazioni

In questo capitolo verrà applicata la metodologia implementata nel capitolo 3 a diversi casi aziendali. La scelta di queste casistiche è stata effettuata dall'azienda al fine di valutare l'impatto ambientale delle attività che vengono svolte con maggiore frequenza.

I casi analizzati sono:

- Test in pista,
- Progetto e prototipizzazione di una sospensione posteriore per un veicolo commerciale leggero.

A causa della variabilità di progetti e delle attività svolte in azienda si è scelto di valutare un caso più generale (il primo che verrà presentato) e un caso molto più dettagliato di progetto e prototipizzazione concluso nel 2022 (il secondo).

5.1 Test in pista

Il primo caso in cui viene applicata la metodologia è quello più semplice e generale riferito ad un test in pista. Il test su pista, infatti, è la fase più importante per un prototipo fisico in quanto, esso viene testato al fine di validare il prodotto. Inoltre, ricopre anche lo stesso ruolo fondamentale il test in pista virtuale, ottenuto grazie ai simulatori che fornisce la possibilità sia di progettazione che di verifica del prototipo. Il simulatore permette di eseguire il giro di pista sia con la presenza del *Driver-in-the-Loop* sia in sua assenza, agendo comunque sugli attuatori della piattaforma del simulatore.

L'analisi del test in pista viene suddivisa in tre differenti casistiche:

- Singolo giro di pista del prototipo fisico e virtuale (nelle stesse condizioni),
- Test in pista fisico e virtuale includendo la logistica,
- Test in pista completo (costruzione del prototipo fisico, creazione del modello di vettura, logistica e test).

La scelta di dividere l'analisi in queste tre casistiche permette di evidenziare i vari aspetti fondamentali nel test su pista. Come, ad esempio, come influisce la logistica e i fattori che possono dare contributi differenti durante tutta l'analisi. Permette inoltre di avere una descrizione più chiara dell'analisi fornendo così una valutazione più critica dei risultati.

5.1.1 Singolo giro di pista del prototipo fisico e virtuale

Il singolo giro di pista è una attività svolta molto spesso in azienda. Si è scelto di valutare un singolo giro per confrontare le emissioni di CO_{2eq}, nelle stesse condizioni, riferite a un giro di pista reale e uno svolto al simulatore. Le vetture testate al simulatore di solito sono vetture di alta gamma, per questo si è scelto di valutare l'impatto di due super car (una ibrida e una a benzina) e di

una vettura di media gamma a benzina (facendo sempre riferimento alle emissioni medie di categoria, la vettura in esame è di segmento B/C con potenza pari a 150CV). Non vengono considerate in questo esempio auto diesel poiché non sono così spesso utilizzate ma sono facilmente calcolabili poiché il foglio di calcolo comprende anche questa casistica. Si sono scelte due piste, le più utilizzate che sono: il Nurburgring-Nordschleife (pista localizzata in Germania di Lunghezza: 20,380 km) e l'anello di Nardò (pista in Puglia di lunghezza: 12,6 km) che vengono usate anche per i test in pista con vetture fisiche. Le piste citate sono molto utilizzate per i costruttori di vetture per testare il corretto funzionamento di una nuova automobile di un suo sottosistema.

Le assunzioni che vengono fatte per eseguire questa analisi sono le seguenti: la vettura fisica è stata precedentemente costruita e che il modello virtuale della stessa vettura è già presente nel simulatore (non è stato necessario crearlo da zero). In questo caso si valuta un singolo giro in diversi tracciati senza includere quindi la costruzione di una vettura fisica, la logistica per il test e la creazione di un modello virtuale di vettura. Infine, si hanno le stesse condizioni di prova sia nel caso virtuale che nel caso fisico (come, ad esempio, il SOC - *state of charge* - della batteria dell'auto, il peso della vettura e le condizioni metodo e di temperatura della pista).

I dati riferiti al tempo sul giro singolo sono dati primari acquisiti delle prove al simulatore. Per quanto riguarda la potenza è stata scelta quella di picco per valutare il comportamento del simulatore nelle condizioni peggiori (di solito non funziona per tutta la durata della prova alla potenza di picco). Per completezza è stata svolta anche la misurazione diretta dell'assorbimento di corrente del simulatore dinamico per valutare il valore reale di corrente assorbita e quindi di potenza. È stata misurata una singola linea del sistema trifase che funziona a 380V.

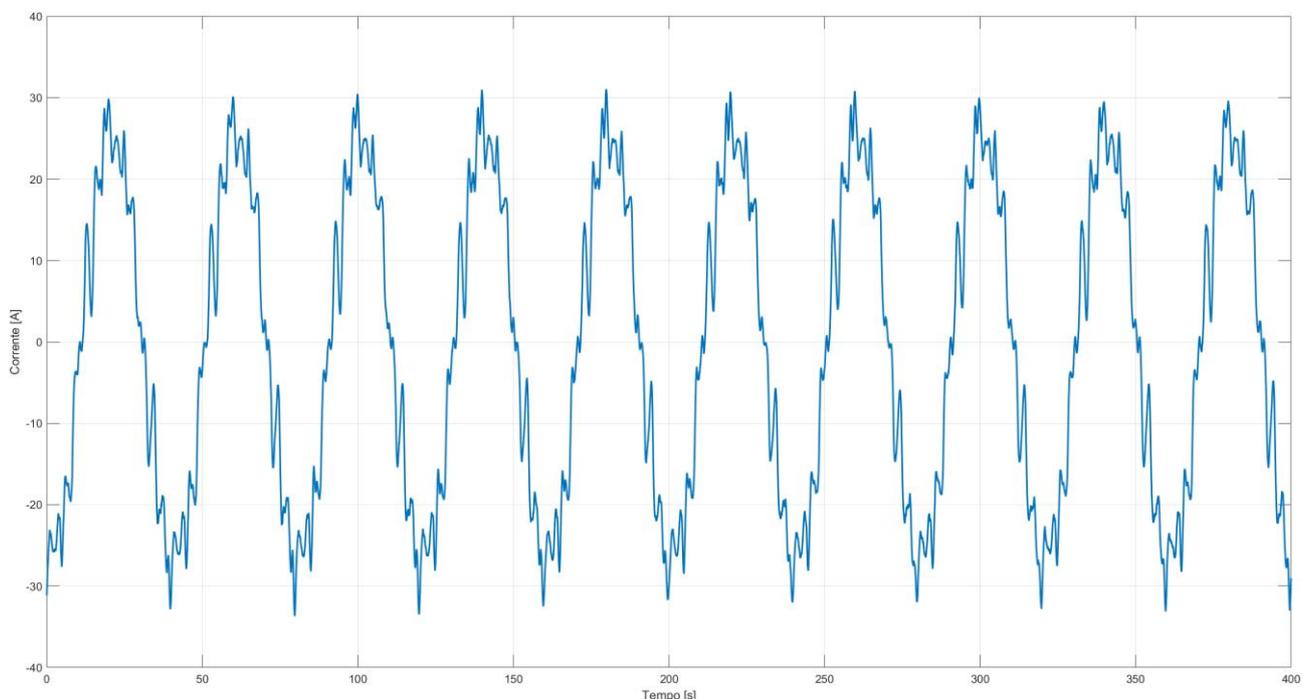


Figura 38- Andamento della corrente su una linea durante il test in pista di una vettura virtuale al simulatore dinamico

Nelle tabelle seguenti sono riportati i dati (primari e secondari) e i risultati ottenuti dall'implementazione della metodologia.

Nurburgring	Giro singolo	Vettura fisica		Simulatore			Beneficio
		Tempo [min]	gCO _{2eq} /km	Impatto ambientale kg CO _{2eq}	Potenza [kW]	Potenza assorbita [kWh]	
Vettura media a benzina	12	194	4,0	40	8	3,2	19%
Super car ibrida	7	146	3,0	75	8,75	3,5	0%
Super car benzina	7	316	6,4	75	8,75	3,5	46%

Tabella 8- Caso applicativo: test in pista al Nurburgring, reale e virtuale di tre differenti vetture

Nardò	Giro singolo	Vettura fisica		Simulatore			Beneficio
		Tempo [min]	gCO _{2eq} /km	Impatto ambientale kg CO _{2eq}	Potenza [kW]	Potenza assorbita [kWh]	
Vettura media a benzina	6	194	2,4	40	4	1,6	35%
Super car ibrida	3	146	1,8	75	3,75	1,5	18%
Super car benzina	3	316	4,0	75	3,75	1,5	62%

Tabella 9- Caso applicativo: test in pista a Nardò, reale e virtuale di tre differenti vetture

Nelle tabelle 8-9 sono stati calcolati i benefici ambientali in percentuale (riduzione di CO_{2eq} rispetto al caso fisico) ottenuti applicando la metodologia e confrontando il caso virtuale rispetto a quello fisico nelle stesse condizioni. Si procede con una descrizione della struttura delle tabelle: il tempo di un giro riportato nella seconda colonna è un dato invariante sia nel caso fisico che nel simulato (dato primario ottenibile sia dalla misura al simulatore sia con una vettura fisica in pista). Nelle colonne riferite alla vettura fisica sono riportati le emissioni al km della vettura analizzata (valori medi) e il rispettivo impatto sul singolo giro [CO_{2eq}]. Nelle colonne riferite al simulatore sono riportate le potenze di funzionamento di picco [kW], la potenza assorbita [kWh] e il rispettivo impatto ambientale [CO_{2eq}]. Andando ad analizzare i risultati, il beneficio è presente nella maggior parte delle combinazioni prese in esame. Nel caso di vetture di media gamma alimentate a benzina il beneficio è presente ma è molto contenuto a seconda della casistica (come livello medio si ha una riduzione del 27% delle emissioni di CO_{2eq}). Passando invece alle vetture di alta gamma a benzina il beneficio è elevato infatti si ottiene una riduzione media pari al 54%, mentre per quanto riguarda le vetture ibride il giro di pista secco non è sempre conveniente, dipende infatti dal tempo impiegato e dalla lunghezza del tracciato. Infine, è possibile affermare che anche per le vetture elettriche il beneficio sul singolo giro non è sempre presente poiché dipende molto dalla sorgente di energia utilizzata per la ricarica della batteria.

5.1.2 Test in pista fisico e virtuale includendo la logistica

Il secondo caso, riferito alla prova in pista, permette di ampliare il sistema in esame includendo la logistica, aumentando quindi il livello di dettaglio. A seguito dello sviluppo prodotto, una volta costruito il prototipo fisico esso deve essere testato in un circuito (è possibile affermare che lo stesso valga per il prototipo virtuale, infatti, esso viene testato (DiL) a seguito della creazione di un modello). Il test di un prototipo fisico include sempre uno spostamento di persone e di mezzi che generano un impatto ambientale.

Per quando riguarda il trasporto e la logistica è presente una varietà maggiore di fattori che possono andare ad influire nell'analisi come ad esempio: la distanza tra il circuito per i test e l'azienda, i mezzi di trasporto utilizzati, la distanza della sede del cliente e il numero di persone impiegate nel progetto. Per questa ragione si è scelto di inserire alcuni parametri fissi per diminuire la variabilità dei fattori. I fattori fissi sono:

- La vettura presa in esame: super car a benzina, per avere pari emissioni di inquinanti in pista;
- Le piste analizzate sono le stesse introdotte nel paragrafo precedente per avere tempi fissi sul giro;
- Il numero di persone per ogni test è fisso: 7 tra meccanici e ingegneri e 2 persone come clienti;
- Il prototipo è trasportato sempre con un camion max 7.5 t EURO V/VI.

Per ogni pista si ha lo stesso numero di persone impiegate nella fase di test ma il loro mezzo di trasporto può variare in base alla distanza (auto-treno-aereo). Per analizzare diverse casistiche si è scelto anche di cambiare la partenza del gruppo cliente (Londra-Stoccarda-Torino) mentre si è preso sempre come riferimento Nichelino (sede principale di Danisi engineering) come punto di partenza dei meccanici e degli ingegneri dell'azienda.

Dal punto di vista della simulazione è presente il contributo causato dal tragitto casa-lavoro di un dipendente che si occupa del corretto funzionamento del simulatore e dal consumo di energia durante la fase di utilizzo dello stesso. Non si tiene conto della creazione del modello poiché equivale alla costruzione del prototipo fisico, che in questo caso non viene analizzato (verrà trattato nel paragrafo 5.1.3). Le emissioni del dipendente che lavora al simulatore sono state svolte basandosi sulla durata dell'attività ed è stato ridotto di un 40% a causa della possibilità di Smart working per i dipendenti del reparto AVD.

Le emissioni del ICE della vettura fisica e del giro di pista al simulatore sono state calcolate nel paragrafo 5.1.1. nelle tabelle 8-9 che fanno riferimento all'impatto di un solo giro di pista reale e simulato.

Nelle tabelle 10-11-12 vengono analizzati i casi in cui il cliente provenga da Londra (utilizzando l'aereo) mentre la pista può variare, le piste analizzate sono le stesse del caso precedente e si assume una terza pista nei pressi della città di Torino (a circa 30 km) che permette di ridurre le distanze e valutare l'impatto nel caso in cui la pista non sia esageratamente distante da Nichelino (TO), ponendoci così nel caso più sfavorevole alla tesi sostenuta. Vengono riportati i mezzi di trasporto con le rispettive emissioni e le distanze per raggiungere le varie località. I valori in termini di CO_{2eq} comprendono sia l'andata che il ritorno dal punto di partenza. Per quanto riguarda il

trasporto di meccanici e ingegneri, quando possibile, si preferisce l'utilizzo del treno, poiché tra tutti i mezzi di trasporto è quello che ha meno impatto ambientale e costituisce così un caso peggiorativo per la tesi sostenuta.

Nurburgring-Team cliente: Londra	Mezzo di trasporto (T)	N di mezzi T o persone	gCO _{2eq} /Unità	Distanza [km]	CO _{2eq} [kg]
Trasporto prototipo/componenti	truck max 7.5t EURO V/VI	1	330	850	561
Trasporto meccanici/ing	treno lunga percorrenza	7	13	850	154,7
Trasporto team cliente	aereo in Europa	2	143	650	371,8
TOTALE					1087,5

Tabella 10- Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nurburgring e squadra cliente proveniente da Londra

Nardò-Team cliente: Londra	Mezzo di trasporto (T)	N di mezzi T o persone	gCO _{2eq} /Unità	Distanza [km]	CO _{2eq} [kg]
Trasporto prototipo/componenti	truck max 7.5 t EURO V/VI	1	330	1200	792
Trasporto meccanici/ing	treno lunga percorrenza	7	13	1200	218,4
Trasporto team cliente	aereo in Europa	2	143	2300	1315,6
TOTALE					2326

Tabella 11-Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nardò e squadra cliente proveniente da Londra

Terza pista -Team cliente: Londra	Mezzo di trasporto (T)	N di mezzi T o persone	gCO _{2eq} /Unità	Distanza [km]	CO _{2eq} [kg]
Trasporto prototipo/componenti	truck max 7.5 t EURO V/VI	1	330	30	19,8
Trasporto meccanici/ing	auto	3	174	30	31,3
Trasporto team cliente	aereo in Europa	2	143	1200	686,4
Totale					737,5

Tabella 12-Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: "Terza pista" e squadra cliente proveniente da Londra

Nella tabella 13 vengono riassunti i risultati dell'analisi di impatto ambientale nel caso in cui il cliente provenisse da Londra e si ha la comparazione tra il test in pista con la presenza della logistica rispetto alla simulazione. Si possono evidenziare elevati benefici ottenuti attraverso la simulazione grazie alla non necessità di trasportare un prototipo fisico e tutto il gruppo di lavoro. Il contributo di impatto maggiore è causato dalla squadra cliente proveniente da Londra (sempre in aereo), poiché utilizza il mezzo di trasporto più impattante a livello ambientale.

Pista	Vettura fisica		Simulatore			Beneficio
	ICE kgCO _{2eq}	Logistica kg CO _{2eq}	Giro in pista kg CO _{2eq}	Dipendenti kg CO _{2eq}	Tot simulatore kg CO _{2eq}	
Nurburgring	6,4	1087,5	3,5	73,1	76,6	93%
Nardò	3,9	2326	1,5	73,1	74,6	96%
Terza pista	1,8	737,5	1,2	73,1	74,3	89,9%

Tabella 13 -Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista con logistica, squadra cliente proveniente da Londra

Stesso procedimento ora viene applicato nel caso in cui il cliente provenga da Stoccarda. Le prime tre tabelle rappresentano i calcoli preliminari mentre la tabella 17 riporta i risultati con i possibili benefici.

Nurburgring-Team cliente: Stoccarda	Mezzo di trasporto (T)	N di mezzi T o persone	gCO _{2eq} /Unità	Distanza [km]	CO _{2eq} [kg]
Trasporto prototipo/componenti	truck max 7.5 t EURO V/VI	1	330	850	561
Trasporto meccanici/ing	treno lunga percorrenza	7	13	850	154,7
Trasporto team cliente	Auto	1	174	320	111,4
TOTALE					827,06

Tabella 14- Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nurburgring e squadra cliente proveniente da Stoccarda

Nardò-Team cliente: Stoccarda	Mezzo di trasporto (T)	N di mezzi T o persone	gCO _{2eq} /Unità	Distanza [km]	CO _{2eq} [kg]
Trasporto prototipo/componenti	truck max 7.5 t EURO V/VI	1	330	1200	792
Trasporto meccanici/ing	treno lunga percorrenza	7	13	1200	218,4
Trasporto team cliente	aereo in Europa	2	143	1500	858
TOTALE					1868

Tabella 15- Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nardò e squadra cliente proveniente da Stoccarda

Terza pista -Team cliente: Stoccarda	Mezzo di trasporto (T)	N di mezzi T o persone	gCO _{2eq} /Unità	Distanza [km]	CO _{2eq} [kg]
Trasporto prototipo/componenti	truck max 7.5 t EURO V/VI	1	330	30	19,5
Trasporto meccanici/ing	Auto	3	174	30	31,3
Trasporto team cliente	Auto	1	174	570	198,3
Totale					294,1

Tabella 16- Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: "Terza pista" e squadra cliente proveniente da Stoccarda

Pista	Vettura fisica		Simulatore			Beneficio
	ICE kgCO _{2eq}	Logistica kg CO _{2eq}	Giro in pista kg CO _{2eq}	Dipendenti kg CO _{2eq}	Tot simulatore kg CO _{2eq}	
Team cliente: Stoccarda						
Nurburgring	6,4	827,06	3,5	73,1	76,6	91%
Nardò	3,9	1868,4	1,5	73,1	74,6	96%
Terza pista	1,8	294	1,2	73,1	74,3	70,4%

Tabella 17 -Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista con logistica, squadra cliente proveniente da Stoccarda

Anche in questo caso si possono osservare benefici dal punto di vista ambientale, il caso con minor beneficio ma comunque considerevole (riferito alla "Terza pista") è causato dall'utilizzo di

automobili rispetto agli aerei nel caso del cliente e dalla minor distanza tra la pista e la sede di Danisi Engineering rispetto agli altri circuiti. Il maggior beneficio è ottenuto nella pista più distante, Nardò.

Come ultima casistica si è scelto il cliente proveniente da Torino (teoricamente più sfavorevole alla tesi che si vuole sostenere) per valutare comunque la presenza o meno di un beneficio ambientale.

Nurburgring-Team cliente: Torino	Mezzo di trasporto (T)	N di mezzi T o persone	gCO _{2eq} /Unità	Distanza [km]	CO _{2eq} [kg]
Trasporto prototipo/componenti	truck max 7.5 t EURO V/VI	1	330	850	561
Trasporto meccanici/ing	treno lunga percorrenza	7	13	850	154.7
Trasporto team cliente	treno lunga percorrenza	2	13	850	44.2
TOTALE					759.9

Tabella 18- Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nurburgring e squadra cliente proveniente da Torino

Nardò-Team cliente: Torino	Mezzo di trasporto (T)	N di mezzi T o persone	gCO _{2eq} /Unità	Distanza [km]	CO _{2eq} [kg]
Trasporto prototipo/componenti	truck max 7.5 t EURO V/VI	1	330	1200	792
Trasporto meccanici/ing	treno lunga percorrenza	7	13	1200	218.4
Trasporto team cliente	aereo in Europa	2	13	1200	62.4
TOTALE					1072.8

Tabella 19- Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: Nardò e squadra cliente proveniente da Torino

Terza pista-Team cliente: Torino	Mezzo di trasporto (T)	N di mezzi T o persone	gCO _{2eq} /Unità	Distanza [km]	CO _{2eq} [kg]
Trasporto prototipo/componenti	truck max 7.5 t EURO V/VI	1	330	75	26,4
Trasporto meccanici/ing	Auto	3	174	75	20,88
Trasporto team cliente	Auto	1	174	75	6,96
Totale					82

Tabella 20- Caso applicativo: dati riferiti al test in pista con logistica, pista: "Terza pista" e squadra cliente proveniente da Torino

Pista	Vettura fisica		Simulatore			Beneficio
	ICE kgCO _{2eq}	Logistica kg CO _{2eq}	Giro in pista kg CO _{2eq}	Dipendenti kg CO _{2eq}	Tot simulatore kg CO _{2eq}	
Team cliente: Torino Nurburgring	6,4	759,9	3,5	73,1	76,6	90%
Nardò	3,9	1072,8	1,5	73,1	74,6	93%
Terza pista	1,8	82	1,275	73,1	74,3	11,4%

Tabella 21- Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista con logistica, squadra cliente proveniente da Torino

I benefici ambientali, anche in questo caso, sono presenti e in due casistiche è presente una riduzione attorno al 90%. I benefici più marcati si hanno quando le distanze sono maggiori (come a

Nardò). Nel caso peggiore in cui la squadra cliente provenga da Torino e la pista sia la più vicina è presente, comunque, una riduzione di impatto ambientale di circa 10%. Nella tabella 22 sono riportati i benefici in percentuale al variare della pista e del gruppo cliente al fine di valutare i valori medi.

	Londra	Stoccarda	Torino	media:
Nurburgring	93%	91%	90%	91%
Nardo	97%	96%	93%	95%
Terza pista	90%	70%	11%	57%
media:	93%	86%	65%	81%

Tabella 22- Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista, rispetto un giro singolo di pista, includendo la logistica

Stesso calcolo è stato eseguito nel caso in cui non sia svolto un singolo giro ma che venga svolta una prova più lunga. Si sono scelti cento giri di pista che possono rappresentare una prova di durabilità. E come mostra la tabella 23 sono presenti ottimi benefici.

	Londra	Stoccarda	Torino	media:
Nurburgring	76%	71%	70%	72%
Nardo	92%	90%	85%	89%
Terza pista	78%	54%	25%	52%
media:	82%	72%	60%	71%

Tabella 23 - Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista, rispetto a cento giri di pista, includendo la logistica

Si è notato che la presenza del cliente impatta di più tra i contributi presenti nella logistica, per questo si è deciso di valutare l'impatto ambientale con le stesse caratteristiche ma non includendo nella logistica il trasporto del cliente (tenendo conto solamente del trasporto del prototipo e dei meccanici).

Pista	Vettura fisica		Simulatore			Beneficio
	ICE kgCO _{2eq}	Logistica kgCO _{2eq}	Giro in pista kgCO _{2eq}	Dipendenti kgCO _{2eq}	Tot simulatore kgCO _{2eq}	
Nurburgring	6,44	715,7	3,5	73,1	76,6	89%
Nardò	3,98	1010,4	1,5	73,1	74,6	93%
Terza pista	1,85	51,1	1,275	73,1	74,4	0%

Tabella 24- Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista, rispetto un giro singolo di pista, includendo la logistica ma senza la presenza del cliente

Pista	Vettura fisica		Simulatore			Beneficio
	ICE kgCO _{2eq}	Logistica kgCO _{2eq}	Giro in pista kgCO _{2eq}	Dipendenti kgCO _{2eq}	Tot simulatore kgCO _{2eq}	
Nurburgring	643,9	715,7	350	73,074	423,074	69%
Nardò	398,1	1010,4	150	73,074	223,074	84%
Terza pista	184,8	51,1	127,5	73,074	200,574	15%

Tabella 25- Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista, rispetto a cento giri di pista, includendo la logistica ma senza la presenza del cliente

Anche non includendo il cliente, sono presenti dei vantaggi. Nel caso più critico (però non reale), ovvero la pista più vicina (“terza pista”) il beneficio non è sempre presente, varia a seconda delle

casistiche in esame. In generale i benefici della simulazione riferiti ad un test di pista nel caso in cui si include la logistica nel caso fisico variano da un minimo pari al 15% ad un massimo pari al 93%. Il valore medio è comunque elevato, circa l'ottanta per cento (incluso il gruppo del cliente).

5.1.3 Test in pista completo

Infine, viene valutato il caso riferito al test in pista più completo. In questo caso si tiene conto di tutti i contributi presenti in una attività di prova in pista: della costruzione del prototipo fisico alla logistica del test, della creazione di un modello virtuale all'utilizzo del simulatore.

In questo caso si tiene conto della costruzione del prototipo fisico ma a causa dell'elevata variabilità di tipologie di prototipi si è scelto di eseguire l'analisi indipendentemente dal prototipo che si deve costruire, per questo si è deciso di associare un valore fisso alla costruzione del prototipo fisico. Questo valore è pari a 3000 kg di CO_{2eq}, la quantità di CO₂ equivalente è una assunzione basata sul fatto che le vetture di serie impattano 5550,86 kg di CO_{2eq} [59]. La scelta di porre il valore di impatto pari a 3 t di CO_{2eq} permette così di sottostimare il valore di costruzione ed eventualmente anche i benefici. Inoltre, la riduzione di stima è dovuta anche al fatto che, quantomeno in Danisi, quando si realizzano prototipi in genere lo si fa per parti di vettura e non per la vettura intera, così come descritto nell'altro caso applicativo.

Per quanto riguarda la creazione del modello virtuale del prototipo anch'esso ha una elevata variabilità (in base alla complessità del sistema o del sottosistema) per questo si è scelto un valore medio pari a 600 ore.

I dati riferiti alla logistica fanno riferimento ai risultati precedentemente riportati nelle tabelle 13-17-21 ed includono il trasporto del prototipo, le emissioni in pista dello stesso, il trasporto di meccanici, degli ingegneri e dei clienti. Le tabelle sono impostate al fine di avere sempre una analisi riferita alla variabilità della provenienza del cliente. Anche in questo caso si fa riferimento ad un singolo giro di pista mentre successivamente è riportata un'analisi rispetto a 100 giri di pista. Per quanto riguarda la simulazione, la costruzione del modello virtuale include il consumo dei dispositivi elettronici per la creazione dello stesso e il tragitto casa-lavoro dei dipendenti impiegati nel progetto.

Pista	Vettura fisica		Simulatore			Beneficio
	Costruzione vettura kgCO _{2eq}	Logistica kgCO _{2eq}	Giro in pista kgCO _{2eq}	Costruzione modello kgCO _{2eq}	Totale simulatore kgCO _{2eq}	
Team cliente: Londra						
Nurburgring	3000,00	1093,94	3,5	341,37	344,87	92%
Nardò	3000,00	2329,98	1,5	341,37	342,87	94%
Terza pista	3000,00	739,37	1,2	341,37	342,64	91%

Tabella 26 - Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista completo, squadra cliente proveniente da Londra

Pista	Vettura fisica		Simulatore			Beneficio
	Costruzione vettura kgCO _{2eq}	Logistica kgCO _{2eq}	Giro in pista kgCO _{2eq}	Costruzione modello kgCO _{2eq}	Totale simulatore kgCO _{2eq}	
Team cliente: Stoccarda						
Nurburgring	3000,00	833,50	3,5	341,37	344,87	91%
Nardò	3000,00	1872,38	1,5	341,37	342,87	93%
Terza pista	3000,00	296	1,2	341,37	342,64	89%

Tabella 27 -Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista completo, squadra cliente proveniente da Stoccarda

Pista	Vettura fisica		Simulatore			Beneficio
	Costruzione vettura kgCO _{2eq}	Logistica kgCO _{2eq}	Giro in pista kgCO _{2eq}	Costruzione modello kgCO _{2eq}	Totale simulatore kgCO _{2eq}	
Team cliente: Torino						
Nurburgring	3000,00	766,34	3,5	341,37	344,87	91%
Nardò	3000,00	1076,78	1,5	341,37	342,87	92%
Terza pista	3000,00	83,93	1,2	341,37	342,64	89%

Tabella 28-Caso applicativo: confronto tra le tre piste - dati riferiti al test in pista completo, squadra cliente proveniente da Torino

Le analisi mostrano un evidente risparmio in termini di CO₂ equivalente. È stata anche svolta un'analisi incrociata tra la pista in esame e il luogo di provenienza del gruppo del cliente ed è presente un risparmio medio del 90%.

	Londra	Stoccarda	Torino	Media:
Nurburgring	92%	91%	91%	91%
Nardò	94%	93%	92%	93%
Terza pista	91%	89%	89%	90%
Media:	92%	91%	90%	91%

Tabella 29-Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista completo, rispetto a un singolo giro di pista

Applicando la stessa analisi rispetto ai 100 giri di pista svolti sia al simulatore che in pista è possibile notare comunque un elevato risparmio di CO_{2eq}.

	Londra	Stoccarda	Torino	Media:
Nurburgring	92%	85%	84%	87%
Nardò	94%	91%	89%	91%
Terza pista	91%	87%	86%	88%
Media:	92%	87%	86%	88%

Tabella 30-Benefici ambientali riferiti al caso applicativo Test in pista completo, rispetto a cento giri di pista

È possibile notare che si ha una diminuzione dei benefici aumentando i giri in pista, questa diminuzione è causata dal fatto che l'analisi del singolo giro al simulatore è stato impostato tutto alla potenza di picco quando nella realtà lavora ad una potenza inferiore.

I risultati sono comunque ottimi poiché si ha una riduzione media delle emissioni di CO_{2eq} del 90%.

5.2 Progetto e prototipazione di una sospensione posteriore per un veicolo commerciale leggero

L'altro caso preso in esame con il fine di applicare la metodologia è il progetto e la prototipazione di una sospensione posteriore di un veicolo commerciale leggero. In questo caso la metodologia è applicata ad un sottosistema dell'automobile. Lo scopo di questo progetto è la conversione del sistema di trazione da motore a combustione interna a motore elettrico per un veicolo commerciale già in produzione presente sul mercato. Il cliente ha fornito tutti i dati e l'obiettivo desiderato oltre alla classificazione interna dei prototipi.

Il cliente suddivide i prototipi secondo questa classificazione:

- P0: prototipo iniziale che ha come fine lo studio di fattibilità,
- P1: prototipo che ha come fine la verifica delle performance,
- P2: prototipo che ha come scopo la validazione funzionale,
- AV: avan serie, che ha come fine la validazione di prodotto e l'accumulo chilometrico su strada,
- PS: preserie che permette la verifica di processo.

Possiamo notare, come citato nei capitoli precedenti, che la nomenclatura di suddivisione dei vari livelli di prototipizzazione è differente rispetto a quella presente in Danisi ma è molto facile adattarsi poiché le attività in ogni livello è molto simile.

In questo progetto l'azienda Danisi engineering si è occupata della valutazione e della progettazione con i rispettivi prototipi di livello P0. I requisiti del progetto sono stati definiti dal cliente: la modifica principale eseguita rispetto alla sospensione del veicolo in produzione è il passaggio da assale rigido a ponte De Dion con semiassi.

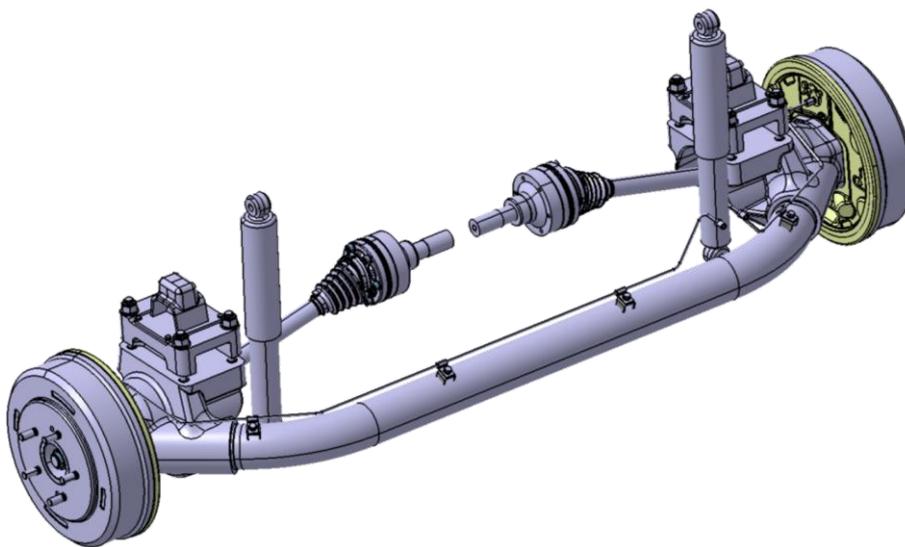


Figura 39-Rappresentazione al CAD della sottostima sospensione posteriore

Definiti i requisiti da parte del cliente l'azienda ha proceduto alla:

- Progettazione al CAD,
- Analisi Multi body che ha permesso la caratterizzazione del comportamento della balestra e dell'intera sospensione dal punto di vista cinematico e dinamico,
- Analisi FEM: analisi strutturare dei componenti (geometrica, caratteristiche del modello, variazione di camber e toe rispetto a un carico statico, variazione di convergenza rispetto al carico in curva, stress (precarichi e interferenze), carico massimo di compressione, carico opposto, carico in curva e in frenata, impatti longitudinale e laterale)
- K&C:(*Kinematics and Compliance*) eseguito per creare le prove virtuali,
- E infine, alla validazione del modello multi-body.

Definita la configurazione ottimale attraverso le analisi virtuali, successivamente sono stati costruiti due prototipi fisici (come richiesto dal cliente) per essere testati.

A seguito della parte di progetto in cui è stata definita la geometria, sono state svolte le verifiche strutturali attraverso il FEM ed è stata eseguita l'analisi Multi body: i componenti possono essere ritenuti completamente progettati e la loro quantità con il rispettivo peso è stato riportato nell'immagine 40.

Progetto Rev0.0					
		qty	peso unit [kg]	peso tot [kg]	TOT
new components	mozzo	2	2,57	5,14	47,70
	tubo	1	13,30	13,30	
	portamozzo	2	13,60	27,20	
	staffa con tampone	2	0,48	0,95	
	staffe verie	2	0,55	1,10	
	staffe blocco molle	2	4,18	8,36	56,06
commercials/carryover	perni ammortizzatore	2	0,14	0,28	15,23
	bulloni	10	0,01	0,06	
	dado ;22	2	0,09	0,19	
	semiasse	2	6,33	12,67	
	cuscinetto	2	1,00	2,00	
	seger	2	0,02	0,03	
peso totale stimato [kg]				71,28	

Figura 40- Distinta base dei componenti della sospensione

Oltre alla costruzione dei prototipi fisici delle due sospensioni, è stato costruito anche un banco che ha come scopi quello di piegare a caldo i tubi strutturali e quello di assemblare il sottosistema. Inoltre, sono stati costruiti i supporti per il simulacro di motore elettrico (in verde nella figura 41). Il simulacro di motore elettrico è stato richiesto dal cliente poiché non essendo ancora disponibile il *powertrain* elettrico, si è scelto di realizzare un prototipo che sfruttasse il motore termico già esistente per la trazione, rimanendo compatibile con la distribuzione dei pesi prevista per la versione elettrica. Dunque, Danisi ha progettato una soluzione che prevede un differenziale da collegare ai semiassi che trae la potenza dal motore termico attraverso l'albero di trasmissione originale, mantenendo la distribuzione delle masse molto simile a quelle del progetto BEV (*Battery Electric Vehicle*- veicolo elettrico a batteria). Il tutto per poter montare il prototipo della sospensione di nuova concezione ed effettuare le prime verifiche di progetto.

Reparto	Ore	Persone
Ingegneria	1000	3
FEM	205	
Officina	860	6
Simulazione	272	2

Tabella 31- Ore e persone impiegate nel progetto per ogni reparto dell'azienda

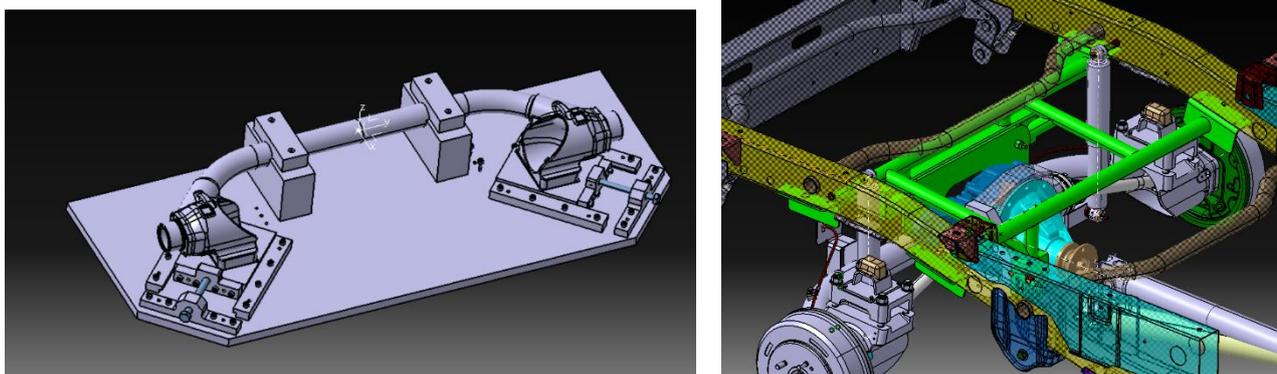


Figura 41- Rappresentazione al CAD del banco prova e dei supporti

Il progetto è durato 11 mesi (da ottobre 2021 ad inizio settembre 2022), le persone che ne hanno preso parte sono state in totale 11 di cui 6 della produzione, 3 dell'ingegneria e 2 del reparto simulazione. Nella tabella 31 sono state riportate le ore di lavoro per ogni reparto dell'azienda.



Figura 42- Sottosistema sospensione assemblato

5.2.1 Impatto ambientale del progetto con simulazione

Dopo una breve descrizione del progetto si passa ora alla valutazione dell'impatto ambientale dello stesso. Si è valutato, in primo luogo, l'impatto del tragitto casa ufficio dei dipendenti rispetto alla durata del progetto. In questo caso i giorni lavorativi negli 11 mesi di progetto sono stati 208, ma i dipendenti in questo periodo non si sono occupati unicamente di questo lavoro, per questo motivo note le ore totali del progetto (2337 ore), si è eseguita la proporzione rispetto alle ore totali dei 208 giorni, ed esse sono solo il 13%. Valutato l'impatto ambientale del tragitto casa lavoro per ogni dipende sui 208 giorni di progetto, è stato applicato un fattore di riduzione pari al 13% riferito solo alla progettazione e alla costruzione di questo prodotto.

Passando ora alla costruzione dei 2 prototipi e del banco: il materiale utilizzato è principalmente acciaio da costruzione, nelle sospensioni sono presenti anche i vari collegamenti in gomma e i fili in rame ma sono ritenuti trascurabili rispetto alle quantità di materiale in acciaio.

Materiale	Quantità [kg]	kgCO_{2eq}/kg	CO_{2eq} [kg]
Acciaio da costruzione per le 2 sospensioni (56 kg/una)	112	2,3	257,6
Acciaio per attrezzature per supporto	197	2,3	453,1
Totale peso/ CO _{2eq}	309		710,7

Tabella 32- Materiali e rispettivo peso utilizzati per la costruzione delle sospensioni delle attrezzature di supporto

Questi materiali insieme ai componenti commerciali sono stati acquistati in zone limitrofe all'azienda (come, ad esempio, Rivalta di Torino e Chieri) e trasportati in azienda attraverso camion o veicoli commerciali leggeri. La distanza e tutte le caratteristiche riferite al trasporto sono riportate nella tabella 33. I risultati sono riferiti sia all'andata sia al ritorno.

TRASPORTO – Materiale e Componenti commerciali	Mezzo	Numero di mezzi	Distanza [km]	gCO_{2eq}/km	CO_{2eq} [kg]
Acciaio da costruzione	truck	1	36	462,5	16,6
Componenti commerciali in acciaio	veicolo com.	2	39	241,6	18,8
Componenti commerciali	veicolo com.	1	46	241,6	11,1

Tabella 33- Trasporto dei materiali e dei componenti commerciali per la costruzione dei prototipi

L'impatto riferito al prototipo fisico è dato anche dal tragitto casa dipendenti del reparto ingegneria e produzione, che nel totale generano 1318,3 kg di CO_{2eq}. In questo caso, per scelta aziendale, il dipartimento di ingegneria ha la possibilità di avere un 40% di smart working, che in questo calcolo è stato già tenuto in considerazione. Mentre la produzione deve garantire un 100% di lavoro in presenza.

I materiali grezzi, una volta arrivati in stabilimento subiscono semplici lavorazioni meccaniche al fine di ottenere la forma e le caratteristiche desiderate, queste lavorazioni vengono svolte con il tornio, la fresa e la CNC. A livello di lavorazioni meccaniche l'impatto ambientale è pari a 790 kgCO_{2eq}.

Macchinario:	Ore	kg CO₂/kWh	kW	kWh	CO_{2eq} [Kg]
Tornio	40	0,4	2	80	32
Fresa	55	0,4	1	55	22
CNC	115	0,4	16	1840	736

Tabella 34- Consumi delle macchine utensili per la costruzione dei prototipi

Per quanto riguarda la costruzione dei due sottosistemi di sospensione per il veicolo commerciale l'impatto totale è dato dalla produzione dell'acciaio, dal trasporto dei materiali e dei componenti commerciali, dalle lavorazioni meccaniche eseguite in stabilimento e dal tragitto casa-lavoro dei dipendenti occupati in questo progetto. L'impatto dei vari contributi e quello totale ed è possibile osservarlo nella tabella 35.

Impatti ambientali	CO _{2eq} [kg]
Produzione	710,7
Trasporto	46,6
Lavorazioni meccaniche	790
Tragitto dipendenti	1318,3
Totale	2865,6

Tabella 35- Impatto ambientale riferito alla costruzione dei prototipi fisici



Figura 43-Grafico a torta riferita all'impatto della costruzione dei prototipi

Vengono anche riportati due grafici: il primo riguardante la costruzione del prototipo (senza includere il tragitto casa-lavoro dei dipendenti - figura 43) con il fine di evidenziare le fasi che impattano di più a livello di processo mentre il secondo, un diagramma di Pareto (figura 44), per evidenziare tutti i contributi della costruzione delle due sospensioni e delle attrezzature di supporto.

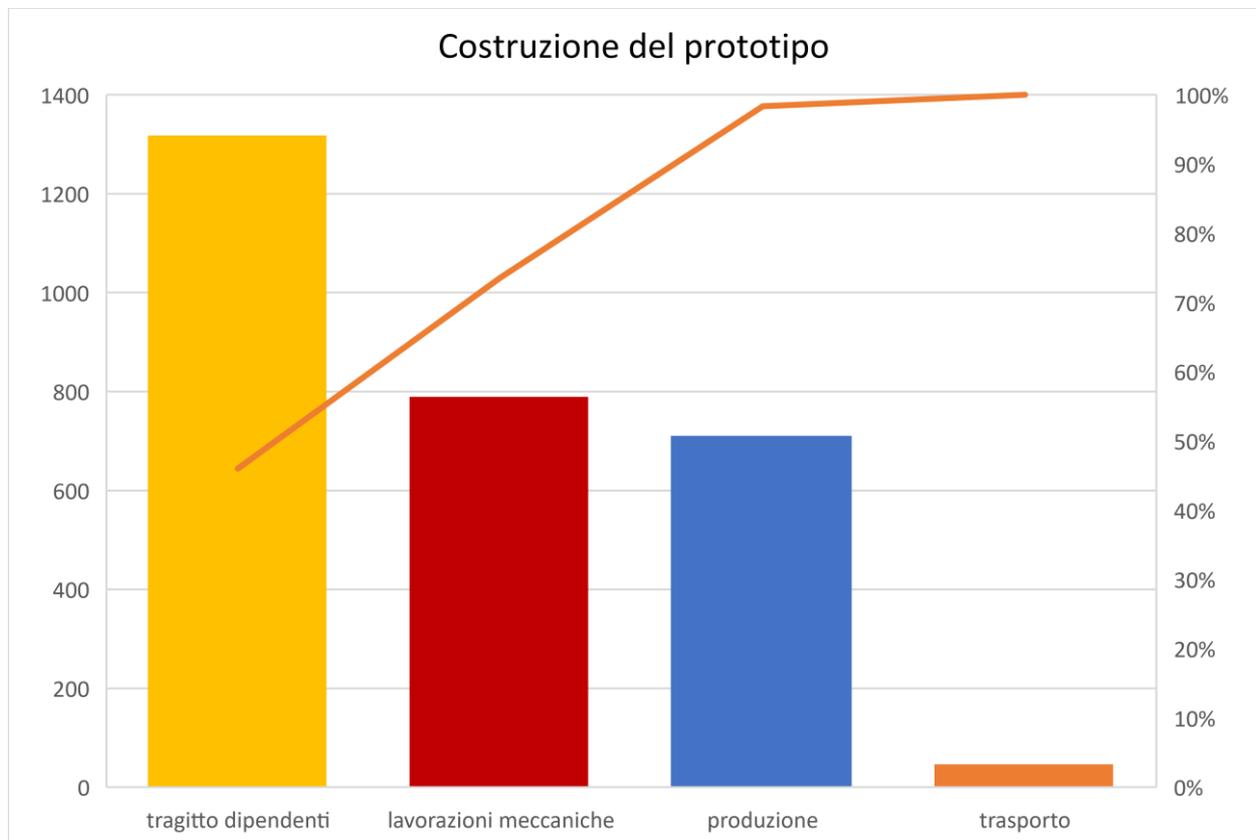


Figura 44-Diagramma di Pareto riferito all'impatto della costruzione dei prototipi

Una volta costruiti, i prototipi vengono testati, in questo progetto le vetture sono state testate al campo volo di Collegno (Torino). Le prove in pista sono durate 2 giorni per circa 15 ore di lavoro, il tracciato su cui sono state testate le vetture è lungo 2244 m (figura 45) e sono stati svolti 23 giri per raggiungere la distanza minima di 50 km. In questi giorni di prova al campo volo di Collegno sono stati eseguiti test molto generali ed iniziali in cui è stata svolta la prima messa in strada del prototipo al fine di verificare un iniziale funzionamento, prima di procedere con le fasi successive di messa a punto.



Figura 45- Immagine della pista di test con rispettiva lunghezza

	Emissione di CO _{2eq} [g/km]	N. di Giri	Lunghezza track [km]	Distanza [km]	CO _{2eq} [kg]
Emissioni ICE di 1 prototipo in pista	241	23	2,24	51,61	12,4

Tabella 36- Emissioni del motore di un prototipo in pista

Per i test in pista sono state impiegate due vetture per il trasporto di meccanici e ingegneri (6 persone in totale) oltre al camion per il trasporto dei prototipi.

Trasporto - test in pista		CO _{2eq} [kg]
Trasporto prototipo/componenti	camion	33,0
Trasporto meccanici/ingegneri	due auto	34,8

Tabella 37- Logistica per il trasporto dei prototipi e dei meccanici/ingegneri in pista

Sommando i contributi legati alla logistica in pista (67,8 kg CO_{2eq}) e le emissioni dei prototipi in pista (24,8 kg CO_{2eq}, due vetture) si ottiene un impatto totale riferito alla prova in pista pari a 93 kg CO_{2eq}.

TOTALE-test in pista	CO2eq [kg]
Logistica materiali e persone	67,8
Emissioni prototipo in pista	24,8
Totale	93

Tabella 38- Impatto totale test in pista

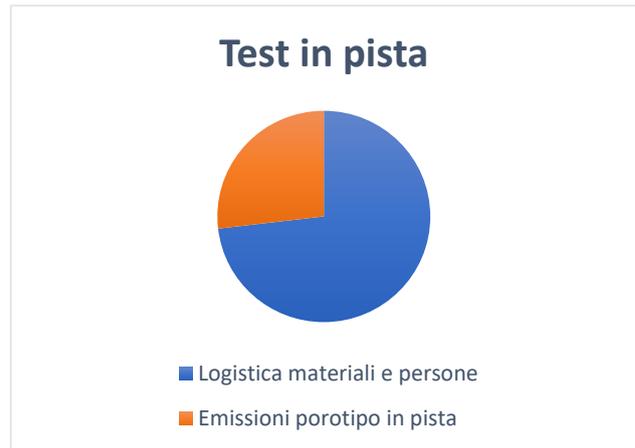


Figura 46- Grafico a torta riferito al test in pista

Come facile immaginare il contributo maggiore tra le emissioni del test in pista è la parte legata alla logistica dei materiali e delle persone poichè si ha un maggior spostamento di persone e mezzi.

La fase di simulazione è stata utilizzata in questo progetto nel momento iniziale di progettazione delle sospensioni. In particolare, non sono state eseguite prove al simulatore statico o a quello dinamico ma è stato creato un modello di vettura virtuale attraverso Adams car ed è stata eseguita la validazione virtuale attraverso il FEM (questo contributo rientra nella fase di progettazione ingegneristica del prototipo fisico). L'impatto della simulazione è dato dal contributo del tragitto casa-ufficio dei dipendenti e dal consumo dei computer impiegati nella creazione del modello Adams. La fase di validazione virtuale, eseguita con il FEM, rientra per ormai per consuetudine nella fase di progettazione fisica del prodotto.

Simulatore	CO _{2eq} [Kg]
Tragitto casa ufficio dipendenti	220,2
Consumo dispositivi- Creazione Modello	16,3
Validazione Virtuale	12,2
Totale (Sim- NO Val. Virt.):	236,5

Tabella 39-Impatto ambientale della simulazione nel progetto

Anche in questo caso pur inserendo una riduzione del 40% dei giorni di smart working, l'impatto ambientale del tragitto dei dipendenti presso la sede di lavoro è quello più consistente.

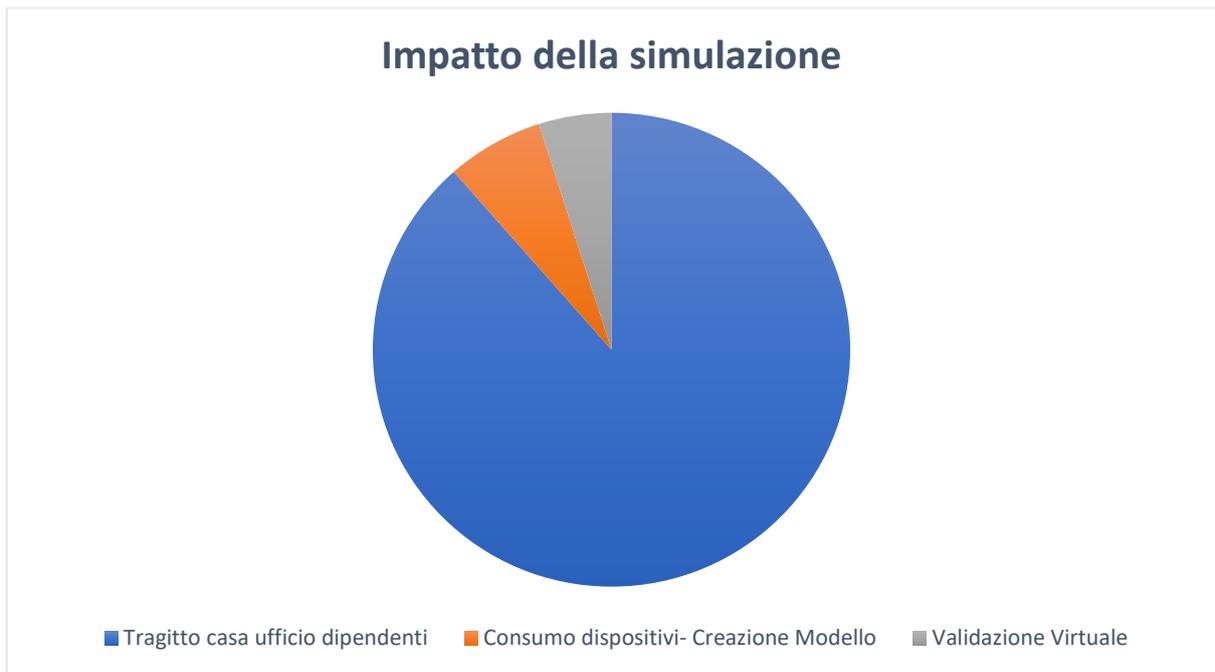


Figura 47-Grafico a torta riferito alla simulazione nel progetto

Sommando la CO_{2eq} causata dalla produzione di oggetti fisici (2958) e quella generata dalla simulazione (249) l’impatto totale è pari a 3207 kgCO_{2eq}. L’effetto dei prototipi fisici ha un valore estremo più elevato rispetto alla simulazione a causa delle poche ore impiegate nella simulazione.

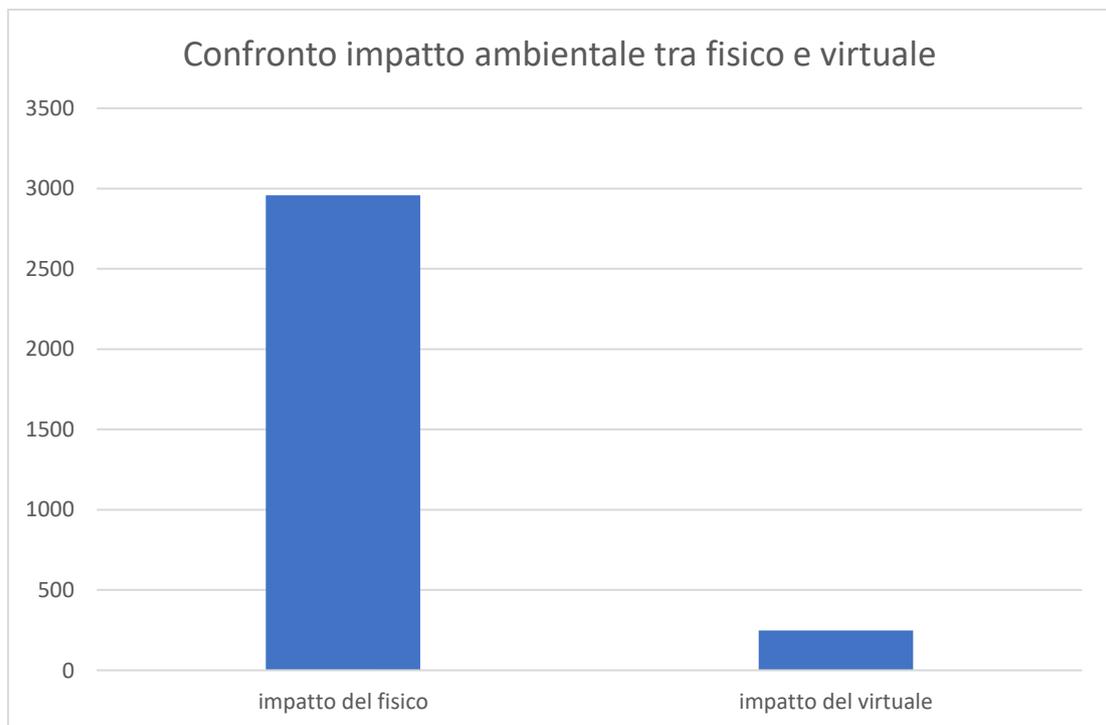


Figura 48-Confronto dell’impatto ambientale riferito alla prototipizzazione fisica e virtuale durante il progetto

5.2.2 Impatto ambientale del progetto senza simulazione

Andando ora a ricostruire il progetto analizzando tutte le variazioni di configurazione e di materiali utilizzati è possibile valutare se sono stati presenti dei benefici applicando la simulazione a tutto il processo di sviluppo prodotto. Infatti, se non si fossero svolte tutte le simulazioni, si sarebbero dovuti costruire un numero più elevato di componenti della sospensione e questi si sarebbero dovuti testare in pista per trovare la configurazione ottimale. L'analisi Multi body e le simulazioni hanno permesso di caratterizzare il comportamento della balestra evitando così la costruzione di circa 30 diverse configurazioni che si sarebbero dovute successivamente testare (per circa 30 giorni). I valori riferiti al numero di configurazioni e di giorni di test sono ottenuti tramite i dati e alcune considerazioni fatte in base all'esperienza dei collaudatori presenti in azienda. Ciascuna balestra ha un peso di 12,4 kq ed è costruita in acciaio.

Andando ora ad analizzare l'impatto della costruzione, si ha un aumento della produzione del materiale e dell'utilizzo della CNC per le lavorazioni meccaniche. Il trasporto dei materiali è invariato ipotizzando che la consegna dell'acciaio sia stata effettuata una sola volta. La produzione comprende quindi: la costruzione del banco prova, la costruzione di due prototipi di sospensioni complete e la costruzione delle 30 balestre.

Impatto ambientale	CO _{2eq} [kg]
Produzione	1566
Trasporto	46,6
Lavorazioni meccaniche	918
Tragitto dipendenti	1318,3
Totale	3849

Tabella 40-Impatto ambientale della costruzione dei prototipi fisici nel caso in cui non è presente la simulazione



Figura 49- Grafico a torta riferito alla costruzione dei prototipi fisici nel caso in cui non è presente la simulazione

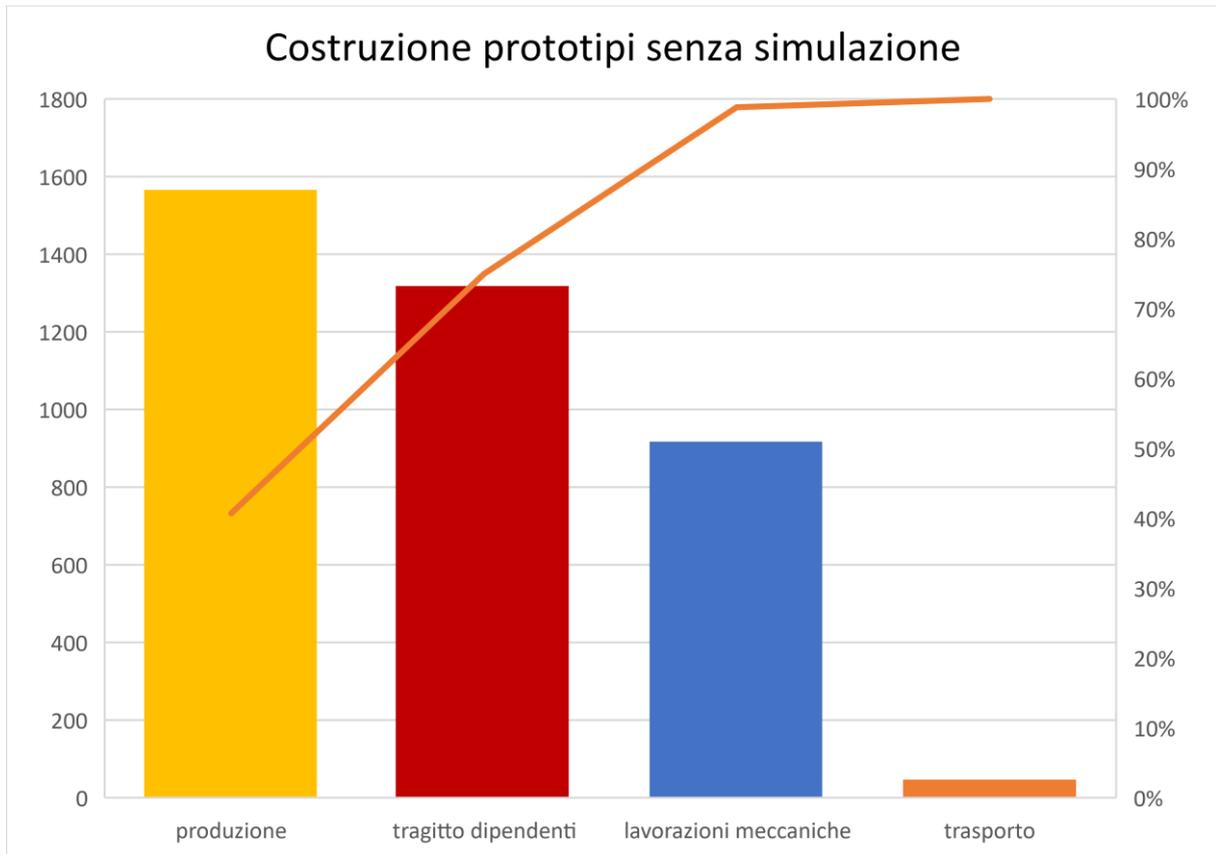


Figura 50-Diagramma di Pareto riferito all'impatto della costruzione dei prototipi nel caso in cui non è presente la simulazione

Aumentando il numero balestre aumenta proporzionalmente il numero di configurazioni che devono essere testate. Per questo la fase di test in pista si amplia consistentemente poiché devo essere testare le 30 balestre per un totale di 30 giorni lavorativi.

Impatto ambientale del test in pista	CO _{2eq} [kg]
Logistica materiali e persone	1017
Emissioni prototipo in pista	373
Totale	1390

Tabella 41-Impatto ambientale del test in pista nel caso in cui non è presente la simulazione

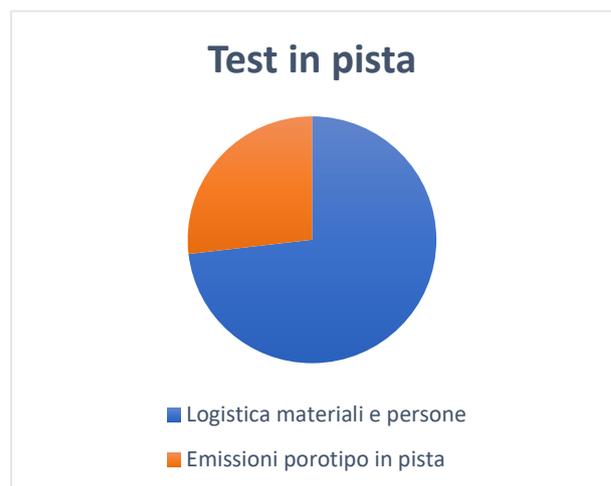


Figura 51-Grafico a torta nel caso in cui non è presente la simulazione

Per quanto riguarda la simulazione attraverso modelli Adams essa è nulla poiché non viene sviluppato il modello virtuale di cinematica e dinamica della sospensione. In questo caso nessuna persona è impiegata nella fase di simulazione.

5.2.3 Risultati

In questo paragrafo vengono riportati i risultati riassuntivi del progetto riguardante la prototipazione di una sospensione posteriore per un veicolo commerciale leggero già in produzione. Nella seguente tabella 42 e nel grafico nella figura 54 sono riportati i risultati dell'analisi con e senza l'ausilio della simulazione nella fase di sviluppo prodotto.

Risultati kg CO _{2eq}	CON Simulazione	SENZA Simulazione
Fisico	2970	5239
Virtuale	237	0
TOTALE	3207	5239

Tabella 42- Risultati e confronto dell'impatto ambientale con e senza simulazione

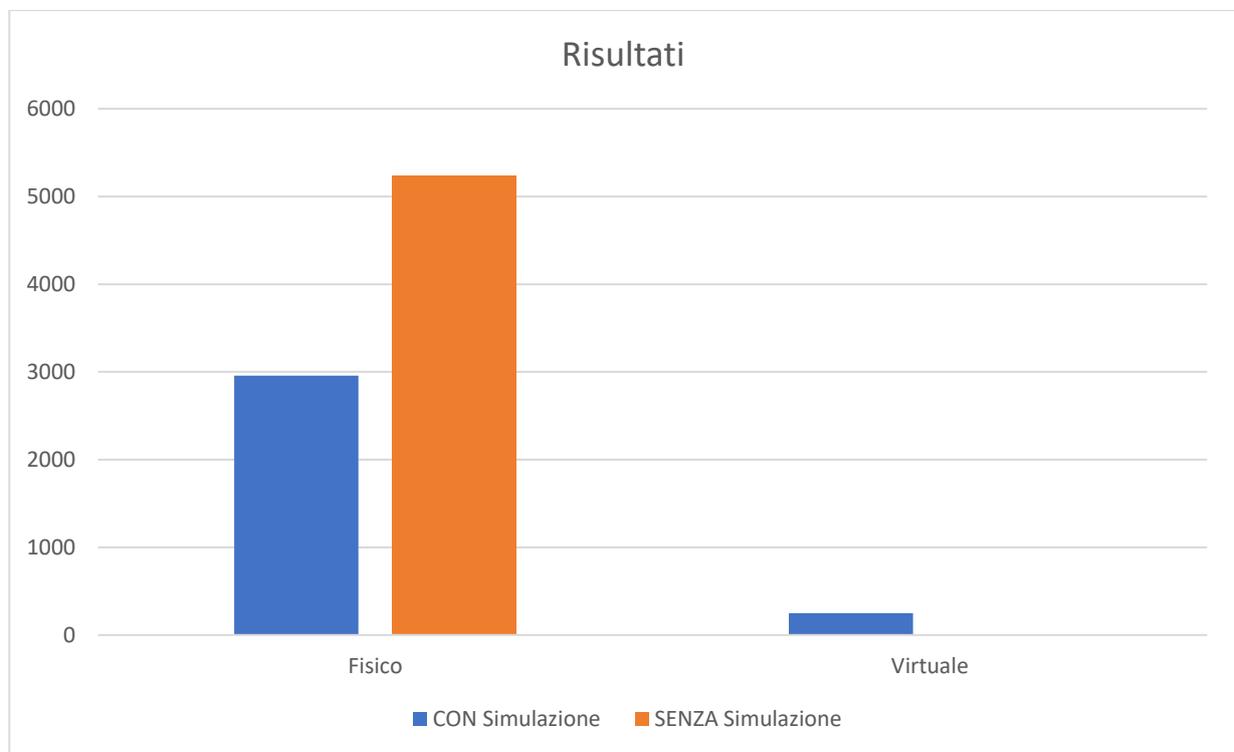


Figura 52- Risultati e confronto dell'impatto ambientale con e senza simulazione

Applicando la simulazione si ha un risparmio di 2032 kg di CO_{2eq} e quindi una riduzione del **38,8%** rispetto al caso completamente fisico. Questo è il vantaggio ottenuto solo a livello ambientale ovviamente è presente anche un risparmio di tempo (e di costo) causato dalla non necessita di produrre più componenti e testarli per un mese e mezzo.

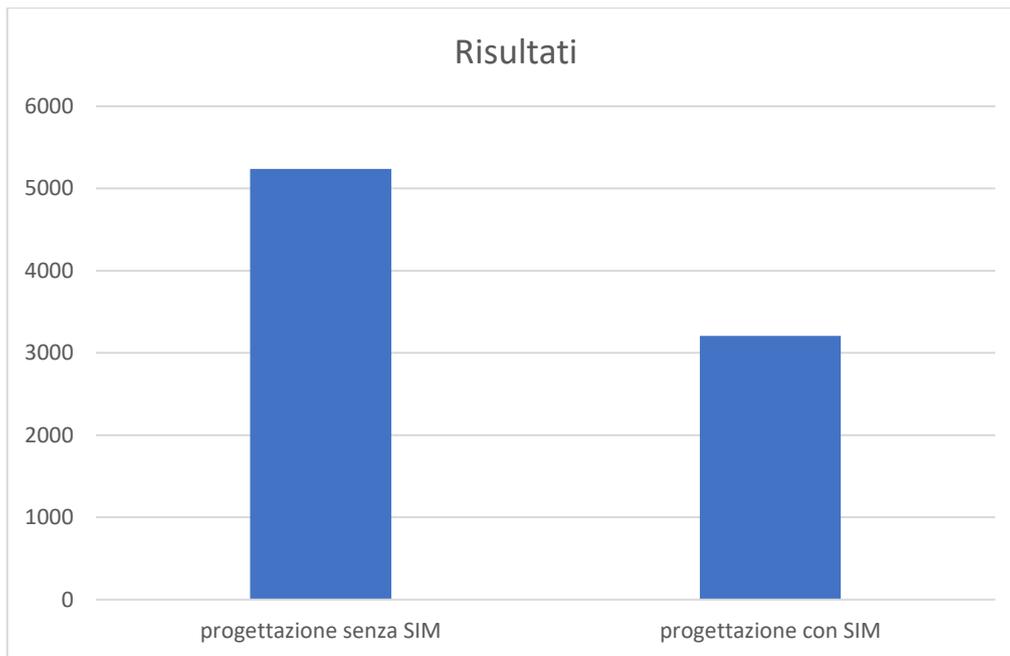


Figura 53-confronto dell'impatto ambientale con e senza simulazione

Bisogna specificare però che in questo progetto le ore di prototipazione virtuale sono molto poche rispetto alle ore di prototipizzazione fisica. Pur essendo poche però il vantaggio che generano queste simulazioni ha portato una riduzione elevata delle emissioni di CO₂ equivalente. Aumentando le ore di simulazione è possibile avere un maggiore vantaggio qualora il prototipo fisico prodotto fosse solamente uno. Confrontano invece il caso in cui la simulazione sia presente ma abbia permesso solo una scrematura delle configurazioni di molle per la sospensione, è stato necessario costruire 8 balestre e testarle per circa 10 giorni. Questo genera un impatto pari a 3895 kg CO₂eq (costruzione 3221 kg CO₂eq, di test 438 kg CO₂eq e di simulazione 236 kg CO₂eq) che confrontati al caso delle 30 molle generano una riduzione del **25,7%** dell'impatto ambientale.

5.2.4 Smart working

Andando ad analizzare le casistiche precedenti l'impatto del tragitto casa-lavoro dei dipendenti ricopre sempre un impatto maggiore rispetto alle altre categorie. Per questo si è scelto di applicare parte della metodologia sviluppata per valutare l'impatto totale sull'anno a livello di intera azienda di questa tratta con e senza la presenza di smart working.

Lo smart working dopo il periodo covid è diventato a livello aziendale una possibilità per tutti i dipendenti dei dipartimenti di ingegneria e AVD. Il reparto di produzione invece deve garantire il 100% di lavoro in presenza. Il totale dei dipendenti è pari a 110 è coloro che possono beneficiare dello smart working sono 66. I giorni lavorativi presi in esame sono 200.

L'impatto ambientale totale senza smart working è stato calcolato nel paragrafo 2.4.

Reparto Azienda	N persone	km medi al giorno	km *N	kg CO _{2eq} al giorno	kg CO _{2eq} anno (40%)
Produzione	44	39,2	1725,5	300,2	60046,8
AVD+ Ing	66	39,2	2588,2	450,4	54042,1

Tabella 43- Impatto ambientale dello Smart working

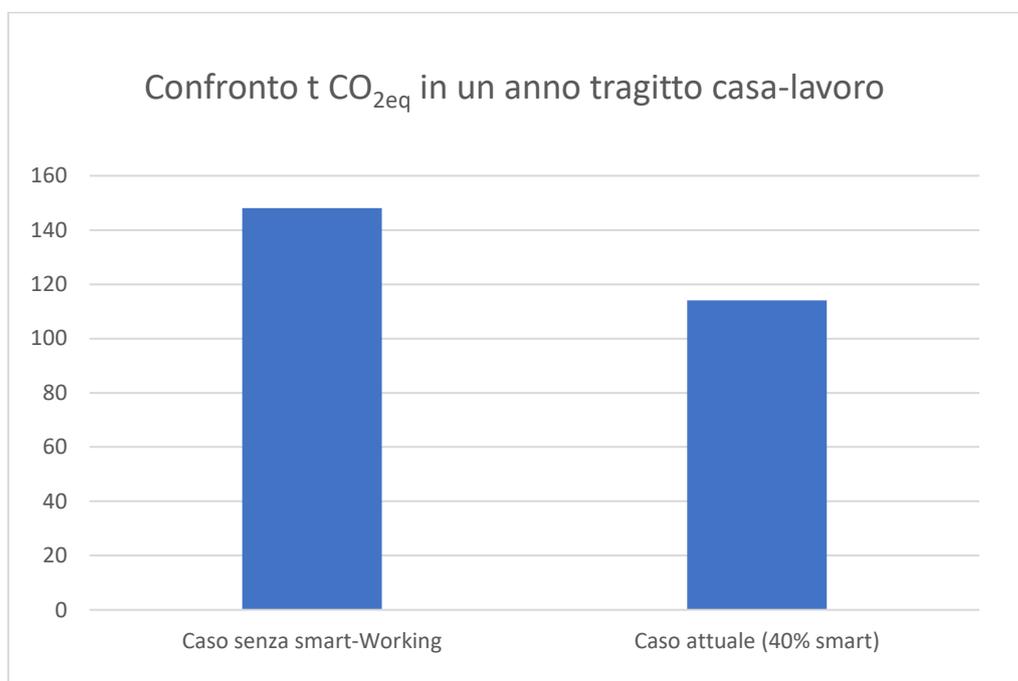


Figura 54-Confronto caso senza smart working e con il 40%

Se l'azienda scegliesse di aumentare lo smart working i benefici dal punto di vista ambientale sarebbero ancora maggiori. Lo stesso processo di calcolo è stato utilizzato per percentuali pari al 60 e 100 per la parte AVD e Ingegneria.

Casistica	t CO _{2eq}
Caso senza smart-Working	148
Caso attuale (40% smart)	114
Caso futuro (60% smart)	96
Caso ideale (100% smart)	60

Tabella 44- Impatto ambientale in base alla percentuale di Smart working

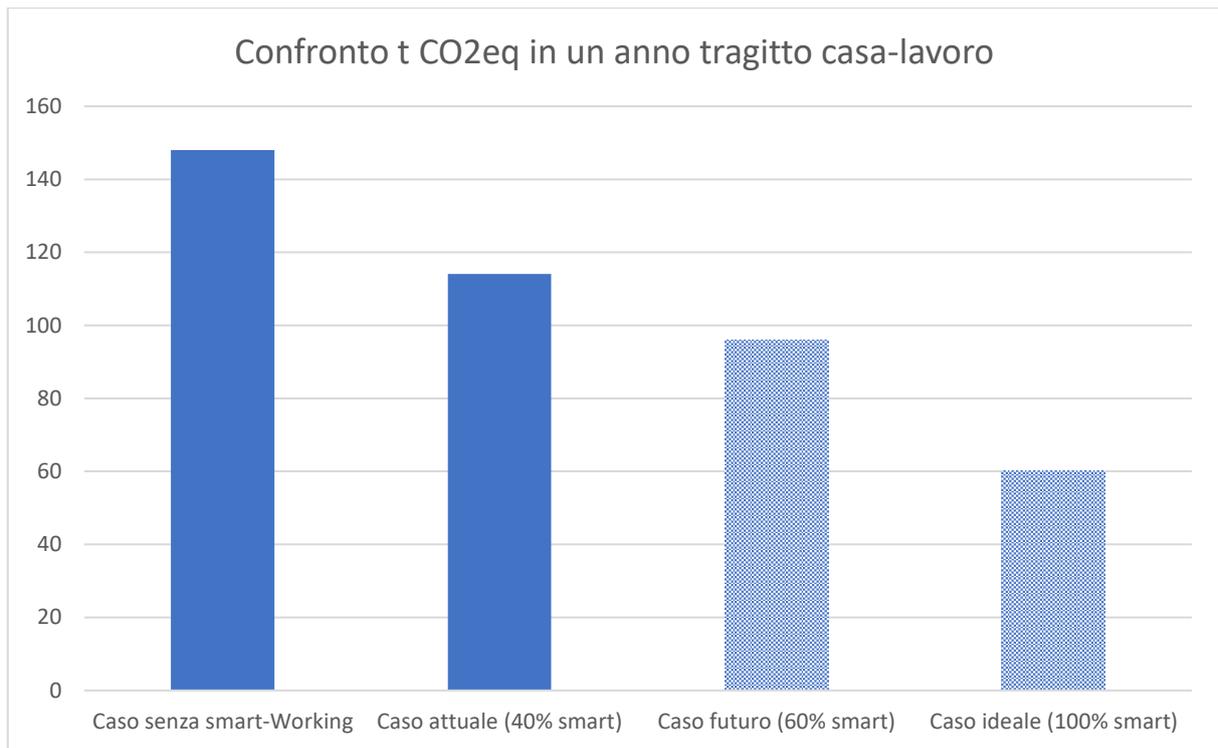


Figura 55-Confronto t CO2eq in un anno tragitto casa-lavoro con differenti percentuali di smart working

In generale l'impatto ambientale del tragitto casa lavoro è elevato per l'azienda, infatti, è maggiore di quello causato dal consumo di elettricità sempre in un singolo anno. Che è pari a 96 t CO_{2eq}.

Capitolo 6 – Conclusioni e prospettive future

In questo lavoro di tesi, a seguito della descrizione dello stato dell'arte delle tecnologie trattate, è stata sviluppata e implementata una metodologia di calcolo che ha come fine la valutazione dei benefici ambientali delle tecnologie *Hardware-in-the-Loop* durante la fase di sviluppo prodotto in ambito veicolistico. La metodologia implementata è modulabile e permette di valutare l'impatto di un sistema vettura, di un sottosistema o di un componente.

La metodologia è stata applicata ad alcuni casi aziendali ed ha mostrato i benefici dal punto di vista ambientale quando, durante lo sviluppo prodotto, è presente la simulazione. Questa metodologia è stata sviluppata nell'azienda Danisi engineering e verrà utilizzata per valutare l'impatto ambientale di progetti futuri. Inoltre, è possibile applicarla durante una fase iniziale di progetto in cui si vuole stimare il possibile beneficio prima dell'inizio dello stesso.

I risultati della metodologia applicata ad alcuni casi aziendali mostrano un elevato beneficio dal punto di vista ambientale (a seconda della casistica) generato dalla non necessità di costruire e testare i prototipi fisici ma sostituirli attraverso la simulazione. Questo beneficio è presente anche dal punto di vista economico e di tempo risparmiato, non valutati in questa tesi poiché non direttamente collegati al tema trattato.

Infine, è possibile eseguire alcune considerazioni riguardanti i possibili miglioramenti di questa analisi. Un possibile miglioramento dell'indagine è ottenibile implementando un sistema di gestione dell'energia inserito su tutte le linee di produzione e sui simulatori garantendo così una acquisizione dei dati più precisa e in tempo reale. Inoltre, introducendo un'analisi puntuale sui componenti commerciali e l'inserimento nella metodologia dell'analisi del riciclo e dello smaltimento dei prototipi, si avrebbe un ulteriore affinamento del calcolo. Applicando la valutazione sviluppata in questo lavoro si possono ottimizzare le lavorazioni meccaniche e gestire in modo più accurato le risorse durante la costruzione del prototipo.

Un aspetto che invece è già ottimizzato a livello di costruzione del prototipo fisico è la scelta dei fornitori di materiali e dei componenti commerciali da parte dell'azienda: infatti, prediligono fornitori di zona che permettono così una minor impatto a livello di trasporto. Un aspetto caratteristico dell'azienda è la possibilità di eseguire lo *smart-working* che permette di ridurre l'impatto ambientale riferito al tragitto casa-ufficio dei dipendenti. L'analisi riferita allo *smart-working* può essere migliorata andando a valutare la distanza di ogni dipendente con le rispettive emissioni della propria vettura e suddividere l'analisi rispetto ad ogni reparto. Questa analisi è possibile eseguirla solo se i dipendenti forniscono questi dati liberamente poiché queste informazioni sono ritenute sensibili.

Attualmente non è possibile realizzare il 100% della vettura attraverso la simulazione, però i prevedibili miglioramenti tecnologici potranno portare alla generazione di *digital twins* di vetture sempre più accurate, ottenendo così una maggiore riduzione dell'impatto ambientale durante lo sviluppo prodotto.

Bibliografia

- [1] **Karl t. Ulrich, Steven D. Eppinger**, Product design and development, 6 ed., New York, McGrawHill Education
- [2] **A Kulkarni, A Kapoor, M Iyer, V Kosse**, “Virtual prototyping used as validation tool in automotive design”, Atti del 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12–16 December 2011
- [3] **Krzysztof Lukaszewicz**, “Use of CAD Software in the Process of Virtual Prototyping of Machinery”, Procedia Engineering 182 (2017), 425 – 433, Doi: [10.1016/j.proeng.2017.03.127](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.127)
- [4] **Do Young Kim**, “A Design Methodology Using Prototyping Based on the Digital-Physical Models in the Architectural Design Process”, Sustainability (2019), 11(16), 4416; Doi: [10.3390/su11164416](https://doi.org/10.3390/su11164416)
- [5] **Andrea Amolaro**, “ESP system design process”, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Automotive, Politecnico di Torino, 2023
- [6] **Drivet A., Ramírez-Mendoza R. A., Flores L., Sename O., Pousot Vassal C., Dugard L.**, “Virtual prototyping for vehicle dynamic modelling”, IFAC Proceedings Volumes 39, Issue 16, 2006, Pages 986-991, Doi: <https://doi.org/10.3182/20060912-3-DE-2911.00169>
- [7] **Mohsen Attaran, Bilge Gokhan Celik**, “Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities”, Decision Analytics Journal, Volume 6, Marzo 2023, 100162, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>
- [8] **Angira Sharma, Edward Kosasih, Jie Zhang, Alexandra Brintrup, Anisoara Calinescu**, “Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions ”, Journal of Industrial Information Integration 30, Novembre 2022, 100383, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383>
- [9] **Fabian Laukotka, Michael Hanna, Dieter Krause**, “Digital twins of product families in aviation based on an MBSE-assisted approach”, Procedia CIRP, Volume 100, 2021, Pages 684-689, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.144>
- [10] **Yübo Wang, Tanja Steinbach, Jonathan Klein, Reiner Anderl**, “Integration of model based system engineering into the digital twin concept”, Procedia CIRP, Volume 100, 2021, Pages 19-24, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.003>
- [11] **T.Bergs, S. Gierlings, T. Auerbach, A. Klink, D. Schraknepper, T. Augspurger**, “The Concept of Digital Twin and Digital Shadow in Manufacturing”, Procedia CIRP, Volume 101, 2021, Pages 81-84, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.010>

- [12] Sito Web, “Digital twins for the Twin Transitions: costruire “gemelli digitali” della realtà per una società più competitiva efficiente ed inclusiva”, febbraio 2023, The European House-Ambrosetti, https://acadmin.ambrosetti.eu/dompdf/crea_wmark.php?doc=L2F0dGFjaG1lbnRzL3BkZi9hbWJyb3NldHRpLTIwMjMtbHV0ZWNoLWRpZ2l0YWwtdHdpbi0yMDIzMDQyMDEzLnBkZg%3D%3D&id=17430&muid=corporate , consultato il 09/07/2023
- [13] **Eugenio Brusa, Ambra Calà, Davide Ferretto**, Systems Engineering and Its Applications to Industrial Product, Studies in Systems, Decision and Control-Volume 134, Warsaw, Poland, Springer
- [14] **D. Ward, M. Rossi, B. P. Sullivan and H. V. Pichika**, "The Metamorphosis of Systems Engineering through the evolution of today’s standards," 2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE), Rome, Italy, 2018, pp. 1-8, Doi: [10.1109/SysEng.2018.8544426](https://doi.org/10.1109/SysEng.2018.8544426).
- [15] **Eugenio Brusa**, "Digital Twin: Toward the Integration Between System Design and RAMS Assessment Through the Model-Based Systems Engineering," in IEEE Systems Journal, vol. 15, no. 3, pp. 3549-3560, Sept. 2021, Doi: [10.1109/JSYST.2020.3010379](https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3010379)
- [16] **Eugenio Brusa**, “Integrazione tra MBSE- circular design -RAMS nello sviluppo del prodotto industriale”, Seminario sul MBSE, 6/12/2022, Seminari a cura dell’Ordine degli Ingegneri della provincia di Torino, 6 dicembre 2022
- [17] Normativa ISO/IEC/IEEE 15288:2023, “Systems and software engineering — System life cycle processes”, 2nd ed.
- [18] **S. Riedmaier, J. Nesensohn, C. Gutenkunst, T. D’user, B. Schick, H. Abdellatif**, “Validation of X-in-the-Loop Approaches for Virtual Homologation of Automated Driving Functions”, Atti del 11th Graz Symposium Virtual Vehicle, Graz (Austria), Maggio 2018
- [19] **Anna Vogt, Philipp Heiner Schmidt, Sebastian Mayer, Rainer Stark**, “Production in the Loop - the interoperability of digital twins of the product and the production system”, Procedia CiRP, 2021, pag. 561-566, Doi: [10.1016/j.procir.2021.03.077](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.077)
- [20] **Changwoo Park, Seunghwan Chung, Hyeongcheol Lee**, “Vehicle-in-the-Loop in Global Coordinates for Advanced Driver Assistance System”, Appl. Sci. 2020, 10, 2645; Doi: [10.3390/app10082645](https://doi.org/10.3390/app10082645)
- [21] **Amir Soltani, Francis Assadian**, “A Hardware-in-the-Loop Facility for Integrated Vehicle Dynamics Control System Design and Validation”, IFAC-Papers OnLine 49-21 (2016), 032–038, Doi: [10.1016/j.ifacol.2016.10.507](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.507)
- [22] **P.C. Nissimagoudar, Venkatesh Mane, Giresha H M, Nalini C. Iyer**, “Hardware-in-the-loop (HIL) Simulation Technique for an Automotive Electronics Course”, Procedia Computer Science 172 (2020), 1047–1052, Doi: [10.1016/j.procs.2020.05.153](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.05.153)
- [23] **G. Gao, J. Jungblut, S. Rinderknecht**, “Performance-driven closed-loop model learning with Bayesian optimization for the Car-in-the-Loop test bench control with unknown input”, IFAC Papers OnLine 55-27 (2022), 436–441, Doi: [10.1016/j.ifacol.2022.10.551](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.551)

- [24] **P. Citti, M. Delogu, M. Pierini, F. Schiavone**, “Integrazione sistematica di criteri ambientali nel processo di sviluppo prodotto: dall’LCA all’ECO-DESIGN”, atti del XXXIV CONVEGNO NAZIONALE AIAS, 14–17 settembre 2005
- [25] Normativa ISO 14040:2006, “Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework”
- [26] Normativa ISO 14044:2006, “Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines”
- [27] Normativa ISO 14067:2018, “Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification”
- [28] **Daniel Beockin, Anne-Marie Tillman**, “Environmental Sustainability Awareness in Product Design Practices: A Survey of Italian Companies”, *Journal of Cleaner Production* 226 (2019), 977-987, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.086>
- [29] **H.E. Otto, F. Kimura, F. Mandorli, M. Germani**, "Integration of CAD models with LCA," 2003 EcoDesign Atti del 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan, 2003, pp. 155-162, Doi: [10.1109/ECODIM.2003.1322655](https://doi.org/10.1109/ECODIM.2003.1322655)
- [30] **Felipe Bitencourt de Oliveira, Anders Nordelof, Björn A. Sandén, Anna Widerberg, Anne-Marie Tillman**, “Exploring automotive supplier data in life cycle assessment – Precision versus workload”, *Transportation Research Part D* 105 (2022), 103247. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103247>
- [31] **S. Caserini, P. Baglione, D. Cottafava, M. Gallo, F. Laio, Giacomo Magatti, V. Maggi, M. Maugeri, L. Moreschi, E. Perotto, L. Pizzol, E. Semenzin, A. Senese**, “Fattori di emissione di CO2 per consumi energetici e trasporti per gli inventari di gas serra degli atenei italiani”, *Ingegneria dell’Ambiente* Vol. 6 n. 1/2019, Doi: [dx.doi.org/10.32024/ida.v6i1.207](https://doi.org/10.32024/ida.v6i1.207)
- [32] **Shiva Abdoli, Sami Kara, Michael Hauschild**, “An Investigation Into Environmental Impact of System of Systems”, *Procedia CIRP*, Volume 80 (2019), Pages 584-589, doi: [10.1016/j.procir.2018.12.006](https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.006)
- [33] **M. Delogu, S. Maltese, F. Del Pero, L. Zanchi, M. Pierini, A. Bonoli**, “Challenges for Modelling and Integrating Environmental Performances in Concept Design: The Case of an Automotive Component Lightweighting”, *International Journal of Sustainable Engineering*, January 2018, DOI: [10.1080/19397038.2017.1420110](https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1420110)
- [34] Sito web, “Circular economy: definition, importance and benefits”, Parlamento Europeo, <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits> , consultato il 09/07/2023

- [35] Sito Web, “TOWARDS THE CIRCULAR ECONOMY - Economic and business rationale for an accelerated transition”, Ellen MacArthur Foundation, link: https://www.werktrends.nl/app/uploads/2015/06/Rapport_McKinsey-Towards_A_Circular_Economy.pdf , consultato il 09/07/2023
- [36] **I. Mergel, N. Edelmann, N. Haug**, “Defining digital transformation: Results from expert interviews”, Government Information Quarterly 36 (2019) 101385, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.giq.2019.06.002>
- [37] Note personali, Corso di “Sistemi integrati di produzione”
- [38] **D. Piromalis, A. Kantaros**, “Digital Twins in the Automotive Industry: The Road toward Physical-Digital”, Convergence, Appl. Syst. Innov., (2022), 5, 65. Doi: <https://doi.org/10.3390/asi5040065>
- [39] Sito web, ONU, <https://unric.org/it/agenda-2030/> , consultato il 09/07/2023
- [40] Sito web, UE, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it , consultato il 09/07/2023
- [41] Sito web, UE, <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/#council> , consultato il 09/07/2023
- [42] Sito web, DANISI ENGINEERING, <https://www.danisieng.com/> , consultato il 09/07/2023
- [43] Sito web, VI-GRADE, <https://www.vi-grade.com/> , consultato il 09/07/2023
- [44] Sito web, parlamento europeo, <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20230316STO77629/cambiamento-climatico-gas-a-effetto-serra-che-causano-il-riscaldamento-globale> , consultato il 09/07/2023
- [45] Sito web, <https://www.autoappassionati.it/telaio-scocca-cosa-sono-differenze/> , consultato il 09/07/2023
- [46] Sito web, <https://dd-tuning.com/tyuning-podveski-avtomobilya.html> , consultato il 09/07/2023
- [47] Note personali, Corso di “Motor vehicle mechanics”
- [48] Sito Web, <https://www.pc-crash.it/blog/alcune-considerazioni-sui-sistemi-di-sterzo-negli-autoveicoli> , consultato il 09/07/2023
- [49] REGOLAMENTO DI ESECUZIONE (UE) 2022/1426 DELLA COMMISSIONE del 5 agosto 2022, recante modalità di applicazione del regolamento (UE) 2019/2144 del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda procedure e specifiche tecniche uniformi per l’omologazione del sistema di guida automatizzata di veicoli completamente automatizzati, allegato III, parte 2, punti 4.2 e 4.3 Gazzetta ufficiale dell’Unione europea L 221/1, 26.8.2022

- [50] UN ECE R21, Regolamento n. 21 della Commissione Economica dell'Europa e delle Nazioni Unite (UN/ECE) —Disposizioni uniformi relative all'omologazione di veicoli relativamente alle loro, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 188/32 ,16.7.2008
- [51] Sito web, tutorial OpenLCA, https://www.youtube.com/watch?v=DI_Pe3ZEzrY , consultato il 09/07/2023
- [52] Sito web, tutorial OpenLCA, <https://www.youtube.com/watch?v=eQtliOtSYuw> , consultato il 09/07/2023
- [53] **Jacopo Famiglietti, Stefano Caserini**, Convenzione tra il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ed il Politecnico di Milano del 24 marzo 2014 per l'attuazione delle metodologie di calcolo dell'impronta di carbonio e di compensazione delle emissioni di CO2 di EXPO 2015- D.1.2 Approfondimento metodologico: viaggi, Politenico di Milano
- [54] **T.E. Norgate, S. Jahanshahi, W.J. Rankin**, “Assessing the environmental impact of metal production processes”, Journal of CleAner Production 15 (2007), 838-848. doi: [10.1016/j.jclepro.2006.06.018](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.018)
- [55] Sito web, https://www.worldstainless.org/files/issf/Education/Italian/Capitolo_11_Sostenibilita_degli_acciai_inossidabili.pdf , consultato il 09/07/2023
- [56] Sito web, “Circular Aluminium action plan – a strategy for achieving aluminium’s full potential for circulat economy by 2030”, European aluminium , https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/08/2020-05-13_european-aluminium_circular-aluminium-action-plan_executive-summary.pdf , consultato il 09/07/2023
- [57] **Callum Hill, Andrew Norton**, “LCA database of environmental impacts to inform material selection process”, JCH Industrial Ecology Ltd, Ref. Ares, (2019), 2067744.
- [58] **Harald Pilz, Bernd Brandt, Roland Fehringer**, “L’impatto delle materie plastiche sul consumo energetico e sulle emissioni di gas serra lungo il loro ciclo di vita in Europa, Relazione sintetica”, Giugno 2010, sito web: https://plasticseurope.org/it/wp-content/uploads/sites/5/2021/10/FINAL_111028_IT_Denkstatt_NS_AM081111.pdf , consultato il 09/07/2023
- [59] Sito Web, Renault Kadjar-2015, Life cycle assessment results, Renault LCA methodology, https://www.renaultgroup.com/wp-content/uploads/2017/02/final_en_rapport-kadjar_nonconf.pdf
- [60] Analisi di mercato dell'ANFIA, “Elettrificazione- le sfide dell'industria automotive”