

Politecnico di Torino



**Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

Lancio produttivo di un veicolo elettrico a batteria Vincoli e opportunità di produzione

Relatore accademico

Prof. Alessandro Salmi

Candidato

Edoardo Vico

Relatore aziendale

Ing. Paolo Ollino

Aprile 2020

Indice

1 Introduzione.....	1
2 L’evoluzione della mobilità	3
2.1 Le architetture del veicolo	6
2.1.1 Il veicolo ibrido	7
2.1.2 Il veicolo elettrico a celle di combustibile	13
2.1.3 Il veicolo elettrico a batteria	15
2.2 La componentistica dei veicoli elettrici.....	17
2.2.1 Il motore elettrico	19
2.2.2 L’inverter.....	23
2.2.3 On Board Charger.....	25
2.2.4 Electric Vehicle Control Unit (EVCU).....	26
2.2.5 High Voltage Battery System (HVBS).....	29
3 Il processo produttivo	34
3.1 La fase di assemblaggio	36
3.1.1 Tratto di linea Trim.....	40
3.1.2 Tratto di linea Chassis	42
3.1.3 Tratto di linea Final	46
3.2 La fase di assemblaggio per un veicolo elettrico a batteria.....	49
3.2.1 La fase di decking per un veicolo elettrico a batteria	54
3.2.2 Le prove di delibera.....	57
4 Dal macrociclo ai cartellini operazione.....	62
4.1 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)	64
4.1.1 Le fasi applicative della FMEA.....	66
4.2 Occurrence and Release (O&R).....	69
4.3 Stesura del Cartellino Operazione: montaggio del supporto della sospensione sull’EDM.....	73
4.3.1 Analisi O&R: posizionamento del supporto della sospensione sull’EDM.....	76
4.3.2 Analisi O&R: prelievo viti da contenitore a lato linea	79
4.3.3 Analisi O&R: serraggio viti mediante avvitatore	81

5 Conclusioni.....	82
Bibliografia.....	84
Appendice A.....	86
Appendice B.....	96
Appendice C.....	101

Capitolo 1

Introduzione

Grazie al mio periodo di tirocinio presso FCA Italy SPA, azienda italiana leader nel settore automobilistico, ho avuto l'opportunità di occuparmi del progetto riguardante la nuova Fiat 500 BEV. Ho lavorato presso l'ente Vehicle Line Manufacturing (VLM), sezione del Manufacturing della regione EMEA, affiancando il Model Product Responsible (MPR), coordinatore di tale progetto.

Questo lavoro di tesi analizza i vincoli e le opportunità legate alla produzione di un veicolo elettrico a batteria derivanti dalla riprogettazione di una linea produttiva adibita alla realizzazione di un veicolo a combustione interna.

Il contesto sociopolitico attuale non può che sensibilizzare l'intera comunità riguardo l'inquinamento ambientale e ciò ha portato le grandi aziende automobilistiche a concentrarsi verso una trazione elettrica meno impattante a livello di emissioni. Per attuare questa transizione è necessaria una nuova concezione in termini di prodotto e con conseguente impatto sul processo.

Generalmente si procede con la progettazione di un processo riferito al prodotto finale ("green field"), tuttavia, con la politica aziendale atta a minimizzare l'esborso economico, è stato scelto di sfruttare al meglio il processo della linea preesistente, modificandone, per quanto possibile, il prodotto ("brown field").

Partendo dalla linea del modello Alfa Romeo Mito, dotata solamente di propulsione termica e ormai fuori produzione, ho valutato le variazioni necessarie al fine di completare correttamente il processo.

La fase del processo produttivo su cui ho maggiormente focalizzato la mia attenzione è stata quella dell'assemblaggio, poiché è risultata la più complessa e quindi con più variazioni.

Con l'introduzione di questo nuovo modello l'intero ciclo di lavorazione dovrà essere mutato.

Il ciclo di lavorazione è l'insieme di tutte le operazioni necessarie per poter realizzare un prodotto finito seguendo una sequenza logica e, con l'introduzione di un veicolo elettrico a batteria, risulta necessario progettare e testare nuovamente l'insieme di tutte le operazioni.

Nella parte finale del mio elaborato ho effettuato l'analisi di Occurrence and Release (O&R) applicandola alle operazioni riportate nel cartellino operazione riferito al "Montaggio del supporto della sospensione dell'EDM".

L'analisi di O&R è uno strumento che ha come obiettivo la riduzione della possibilità che un difetto si generi e/o lasci la postazione in cui si è eventualmente generato rendendo l'intero processo a prova di errore.

Capitolo 2

L'evoluzione della mobilità

La diffusione capillare e generalizzata dell'automobile come sistema di mobilità e di trasporto ha portato grandi cambiamenti nel panorama sociale ed economico della nostra civiltà. Ha condizionato lo stile di vita di milioni di individui e, ponendosi come modello di riferimento per lo sviluppo di interi continenti, ha prodotto trasformazioni di una tale portata che inizialmente nessuno avrebbe potuto prevedere. La chiave di questo fenomeno è l'enorme vantaggio in termini di libertà e di accesso al mondo che la mobilità individuale e, in particolare, il trasporto su gomma, consentono.

La richiesta e le esigenze di trasporto aumentano in modo esponenziale: se nel 1960 meno del 4% della popolazione mondiale disponeva di un'automobile, nel 1980 il valore era già salito al 9%; oggi la quota ha raggiunto il 12%. Proseguendo con l'attuale tasso di crescita, entro il 2020 il 15% della popolazione del pianeta potrebbe possedere un'auto e, siccome da qui a 15 anni la popolazione dovrebbe aumentare fino a circa 7,5 miliardi di persone, il numero totale di veicoli salirà da 850 milioni a più di 1,1 miliardi. Questa crescita dipenderà dall'enorme espansione economica in atto nei paesi in via di sviluppo, che si tradurrà in un aumento del reddito disponibile. Oggi la maggior parte delle auto circolanti è concentrata in Europa, Giappone e Stati Uniti, ma si prevede che più del 60% della vendita di nuovi veicoli, nei prossimi anni, avverrà in paesi emergenti, come, per esempio, Brasile, Cina, India e Corea del Sud.

Un aumento così repentino del numero di veicoli, però, ha un forte impatto in termini di inquinamento ambientale, che ormai non può essere più trascurato. In confronto alle automobili di venti o trent'anni fa, quelle attuali mostrano certamente un'evoluzione tecnologica che limita nettamente le emissioni nocive. Dai vecchi motori inquinanti e rumorosi si è, infatti, passati a moderni sistemi propulsivi che, sottoposti ai dovuti adeguamenti per l'impiego di nuove tecnologie e di nuovi carburanti, si possono definire

“puliti”. Oggi i motori delle nuove automobili emettono da trenta a cinquanta volte meno monossido di carbonio e ossidi di azoto rispetto ad un motore di vent’anni fa; questo costituisce un primo risultato che lascia sperare in un futuro più roseo. Per arrivare a tali risultati si è lavorato in tutte le possibili direzioni, individuando di volta in volta quelle soluzioni che sembravano più promettenti. Non è stato un percorso lineare, perché le normative non si sono sempre evolute in modo organico, ma in molte occasioni sono state frutto del compromesso tra le intenzioni dei legislatori e le condizioni poste dalle industrie automobilistiche e petrolifere. Oltre agli aggiornamenti necessari a adeguare le automobili alle esigenze sin qui esposte, si è registrato uno sviluppo parallelo dovuto alle richieste da parte del mercato di un incremento di comfort e di disponibilità di accessori, fattori che incidono sensibilmente sul costo finale.

L’industria automobilistica ha una forte presenza all’interno dell’economia globale e occupa una significativa porzione della popolazione attiva dal punto di vista lavorativo; inoltre, continua a contribuire alla crescita della moderna società soddisfacendo la mobilità quotidiana. Tuttavia, i produttori di automobili devono scontrarsi con delle normative sulle emissioni sempre più stringenti, che stanno spingendo il mondo dell’auto sempre più verso una direzione sostenibile dal punto di vista ambientale attraverso modelli di business incentrati sulla tecnologia elettrica.

In questo momento, l’automobile è l’ambito nel quale, più di altri, una grande innovazione sta prendendo corpo. La società, infatti, esprime il bisogno di nuove modalità di trasporto, l’industria dell’auto è pronta a rispondere a tale necessità e la tecnologia sta introducendo tutti gli ingredienti necessari per dare il via ad un forte cambiamento. Il più incisivo di sempre, dopo l’invenzione dell’auto.

Il settore ha piena coscienza della missione che ha di fronte ed intende pertanto abbracciarne le ambizioni per passare ad un nuovo storico capitolo dei veicoli a quattro ruote. L’innovazione nel mondo dell’auto sta effettuando un balzo impressionante: l’evoluzione ha ormai messo mano ad ogni singola componente del settore, dai motori all’intrattenimento interno, passando per carrozzerie e intelligenza di bordo.

Negli ultimi dieci anni, ad esempio, ogni singolo elemento costituente l’automobile tradizionale è stato ripensato: i sensori si sono moltiplicati, la connettività a bordo è divenuta un elemento standardizzato, il sistema informativo si è fatto sempre più ricco e completo, ed infine, iniziano a mutare i canoni di dialogo e interazione tra auto e pilota.

L’automobile odierna è, paradossalmente, in antitesi rispetto a quella che verrà, ed è ormai chiaro come il passaggio alla nuova generazione sia iniziata e i tempi siano contingentati: l’intera industria, infatti, è compatta nel dire ormai da tempo che tutto sta per cambiare.

La rivoluzione che sta iniziando è di per sé totalizzante, prova ne è l'auto a guida autonoma, oppure i nuovi modelli di mobilità intelligente che ispirano le città del futuro. Ciò perché questa volta come mai prima d'ora, lo sviluppo dei nuovi veicoli elettrici non è spinto solamente dalla normale evoluzione tecnologica di un prodotto, ma da un nuovo senso di responsabilità che tocca svariati ambiti: ambientale, sociale, demografico e politico.

Il concetto di mobilità urbana sta per mutare, portandosi dietro un profondo ripensamento degli spazi e dei viaggi. Nell'ultimo decennio il rapporto complesso fra città e mobilità ha assunto un ruolo centrale nelle strategie nazionali ed europee che hanno come obiettivo dichiarato quello di affrontare le sfide ambientali ed innalzare la qualità della vita. Ciò porterà sicuramente tra qualche anno cambiamenti significativi nel nostro modo di spostarci e di vivere le città.

L'era del mezzo privato, per un secolo simbolo di flessibilità, benessere economico e sviluppo, cederà inevitabilmente il passo a soluzioni di mobilità condivise, sostenibili e influenzate da un nuovo desiderio dei singoli verso il benessere psico-fisico. Come accade già in diverse città virtuose, spostarsi a piedi, andare in bicicletta, raggiungere la propria destinazione con sistemi di trasporto rapidi di massa a guida automatica senza lo stress di dover cercare parcheggio o dover acquistare diversi titoli di viaggio, sarà presto la normalità.

Alcuni fra i più importanti paesi al mondo puntano già oggi nei loro programmi ad una drastica riduzione dei mezzi a combustione, alla diffusione delle stazioni di ricarica per veicoli elettrici per incentivare modalità green, alla rigenerazione urbana finalizzata a promuovere forme di mobilità sostenibile e alla realizzazione di reti di metropolitane di superficie.

2.1 Le architetture del veicolo

Senza considerare il veicolo a combustione interna ICE (Internal Combustion Engine), le architetture maggiormente diffuse sono principalmente le seguenti:

- Ibrida;
- Elettrica a celle di combustibile;
- Elettrica a batteria.

Tuttavia, lo sviluppo dei veicoli elettrici e ibridi è attualmente limitato da alcuni problemi che rendono queste tecnologie poco performanti se messe a confronto con i veicoli tradizionali: l'autonomia e la gestione della ricarica.

Il primo problema è legato alla tecnologia di accumulo: attualmente, le batterie più utilizzate sono quelle con celle agli ioni di litio. La conoscenza delle celle in commercio risulta fondamentale per valutare il comportamento termico della batteria, in quanto la gestione della temperatura rappresenta uno dei problemi più difficili da affrontare durante la progettazione di un veicolo elettrificato.

Il secondo problema è legato, invece, alla rete di ricarica. Esistono varie modalità di ricarica, alcune delle quali nate appositamente per i veicoli elettrici. L'utilizzo della rete domestica, infatti, non è in grado di soddisfare le richieste del settore automobilistico, poiché il tempo necessario per effettuare una ricarica risulterebbe troppo elevato.

Un ultimo aspetto che il veicolo elettrico porta in dote è la silenziosità. Un veicolo azionato da un motore elettrico, infatti, non produce alcun rumore, poiché non ha componenti meccanici in contatto e, fino a quando l'attrito tra gli pneumatici e la strada non produce un rumore udibile, risulta completamente silenzioso. Se da un lato questo permetterà di abbattere il problema dell'inquinamento acustico nelle città, dall'altro crea dei problemi di sicurezza per i pedoni, perciò quasi tutti gli stati, stanno introducendo normative dedicate che obblighino i veicoli elettrici ad emettere suoni a bassa velocità tramite dispositivi appositamente progettati.

2.1.1 Il veicolo ibrido

Un veicolo ibrido, o più propriamente veicolo a propulsione ibrida, denominato Hybrid Electric Vehicle (HEV), è un veicolo dotato di due sistemi di propulsione: il motore elettrico e il motore termico.

Il motore a combustione interna trasforma l'energia chimica del combustibile (di notevole densità energetica e facilmente approvvigionabile dalla rete di rifornimento) in energia meccanica, mentre il motore elettrico, converte in energia meccanica l'energia elettrica immagazzinata nella batteria a bordo del veicolo. I veicoli a propulsione ibrida sono nati con l'obiettivo di sfruttare in modo ottimale il motore a combustione interna ricorrendo ad un sistema di accumulo che permette di erogare i picchi di potenza necessari nei periodi di maggior richiesta (accelerazioni, salite, partenze da fermo) o per immagazzinare l'energia prodotta durante la frenata o la discesa, altrimenti dissipata all'esterno attraverso dispositivi frenanti.

In alcuni casi, come accade con il Full Hybrid, è anche possibile marciare a motore endotermico spento, seppur per brevi tratti ed a velocità limitate.

Soprattutto per l'utilizzo nei centri urbani, questo tipo di utilizzo si è rivelato estremamente efficace, permettendo ai produttori di automobili di creare strategie di funzionamento che riducano sensibilmente i consumi e le emissioni del motore endotermico, rendendo i veicoli ibridi estremamente appetibili.

Le case automobilistiche giapponesi hanno avuto il ruolo di pionieri nello sviluppo e nella commercializzazione della tecnologia ibrida. Toyota, Honda e Nissan negli anni Novanta hanno introdotto i primi modelli ibridi, inizialmente nel mercato domestico e poi negli Stati Uniti e in Europa.

Tradizionalmente, distinguiamo due categorie fondamentali di architetture ibride:

- Ibrido serie;
- Ibrido parallelo.

Nell'ibrido serie, l'uscita meccanica del motore a combustione interna (ICE), viene convertita in energia elettrica utilizzando un generatore. Questa energia elettrica carica la batteria o oltrepassa la batteria per spingere le ruote attraverso un motore elettrico. Quest'ultimo viene anche utilizzato per recuperare l'energia dissipata durante la frenata.

Un ibrido parallelo, invece, ha sia il motore termico, sia il motore elettrico accoppiati all'asse di trasmissione finale delle ruote tramite frizioni.

Questa configurazione consente al motore termico ed elettrico di fornire energia per azionare le ruote in modalità combinata, oppure selezionandone solo uno.

Come si può vedere in figura 1, un veicolo ibrido parallelo nasce con l'idea di creare un veicolo tradizionale elettricamente assistito, mentre un ibrido serie con quella di creare un veicolo elettrico termicamente assistito. Queste architetture sono descritte specificatamente in Appendice A.

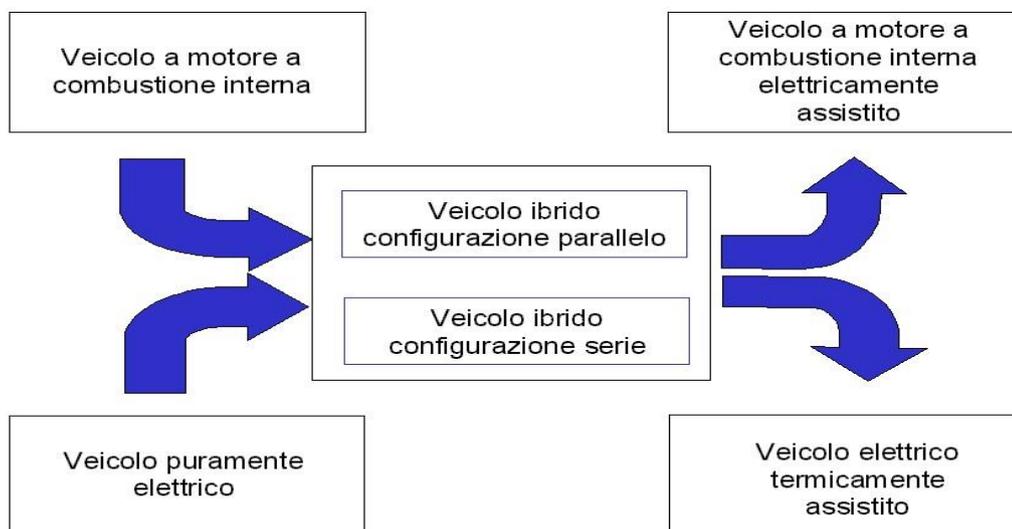


Figura 1 - Concetto di veicolo ibrido serie e parallelo

2.1.1.1 Il grado di ibridizzazione

Un'ulteriore classificazione dei veicoli ibridi, molto diffusa, soprattutto in ambito commerciale, è quella fatta in base al grado di ibridizzazione che mette in relazione la potenza del motore endotermico e quella del motore elettrico.

I livelli di ibridizzazione ormai riconosciuti e più diffusi in commercio sono:

- **Micro Hybrid (mHEV):** si tratta di un tradizionale impianto elettrico presente sulle automobili, composto da batteria di alimentazione 12 V, dotato di un motorino di avviamento da 2÷3 kW permette l'implementazione della funzionalità Start&Stop. Il motore termico viene spento nel caso di brevi fermate temporanee del mezzo, nel momento in cui il guidatore rilascia la frizione e la marcia è in folle. Una volta ripremuta la frizione il motore termico si riaccende in meno di mezzo secondo.

Come si può facilmente intuire, il principale vantaggio di questa tecnologia è il risparmio di carburante, che si attesta intorno al 5% rispetto allo stesso veicolo non dotato di Start&Stop.

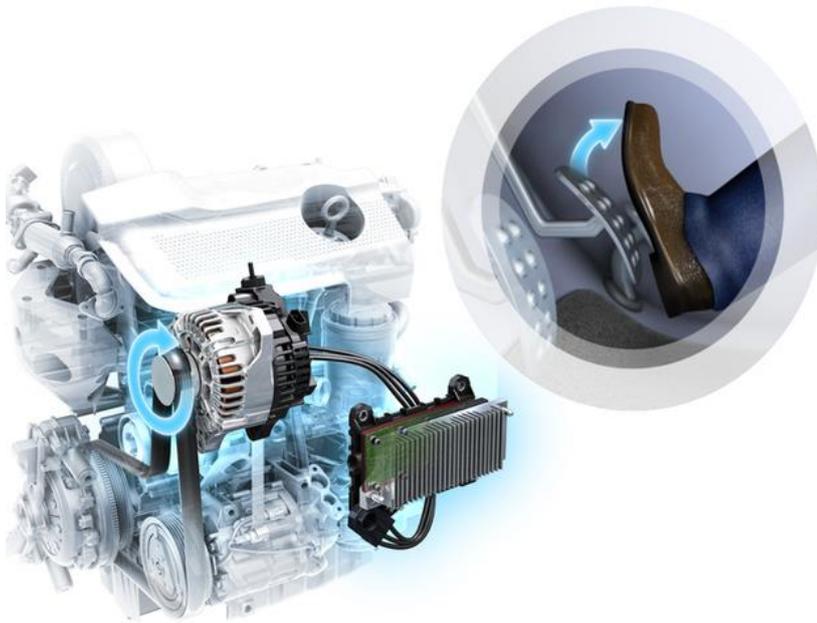


Figura 2 - Generatore elettrico montato sull'ICE

- **Mild Hybrid (MHEV):** sono veicoli con motore a combustione interna (a benzina, a gasolio, a gas) affiancato da un motore/generatore elettrico che, però, non è in grado di permettere la sola propulsione elettrica.

Il motore elettrico ricarica una batteria ausiliaria, quando esso funge da generatore, utilizzando l'energia dispersa in fase di frenata, e fornisce un certo grado di supporto al motore tradizionale nella fase di ripartenza del veicolo (funzione "boost").

Grazie al motore/generatore di maggiore potenza (intorno ai 20 kW) i veicoli Mild Hybrid permettono un certo risparmio di carburante, dell'ordine del 10%.

Tuttavia, necessitano di batterie più evolute, solitamente a ioni di litio a 48 V.

Questa tecnologia è estremamente vantaggiosa, in questo momento, poiché permette, con investimenti ridotti e impatti minimi in fase di progettazione, di convertire veicoli già in produzione, riducendone le emissioni per adeguarli velocemente alle sempre più stringenti normative.

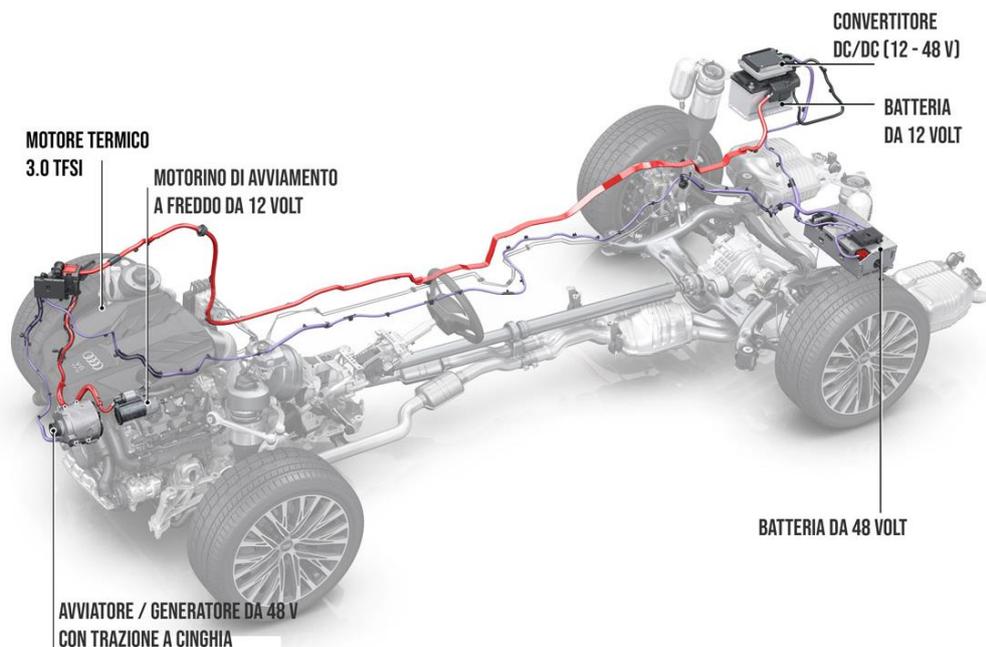


Figura 3 - Architettura elettrica Mild-Hybrid con batteria a 48V

- **Full Hybrid (HEV):** questa tipologia di veicolo permette la trazione elettrica ed è in grado di percorrere decine di chilometri in modalità puramente elettrica, grazie a motori elettrici e batterie più prestazionali. Diventano estremamente convenienti nei percorsi cittadini e urbani, ed essendo coperti da incentivi statali promossi dai governi, sono sempre più diffusi, soprattutto tra coloro che ne fanno un uso prevalentemente cittadino dell'automobile, come i taxisti.

Le auto dotate di questa tecnologia possono essere alimentate dal solo motore elettrico, dal solo motore a combustione o da entrambi, infatti, solitamente, hanno architetture ibride complesse.

All'avvio e a basse velocità la vettura è alimentata dal solo motore elettrico, quindi senza produzione di emissioni di CO₂ e senza consumo di carburante. Il motore a combustione subentra in modo fluido a velocità più elevate. Se necessario, infine, il motore elettrico incrementa, quando viene richiesto, la potenza (ad esempio in fase di accelerazione).

Il sistema Full Hybrid riesce a selezionare in modo intelligente la sorgente di alimentazione più idonea e recupera energia attraverso la frenata rigenerativa, in modo da caricare la batteria.

La gestione del consumo di carburante diventa estremamente efficiente, con un risparmio sullo stesso che può arrivare fino al 30%.

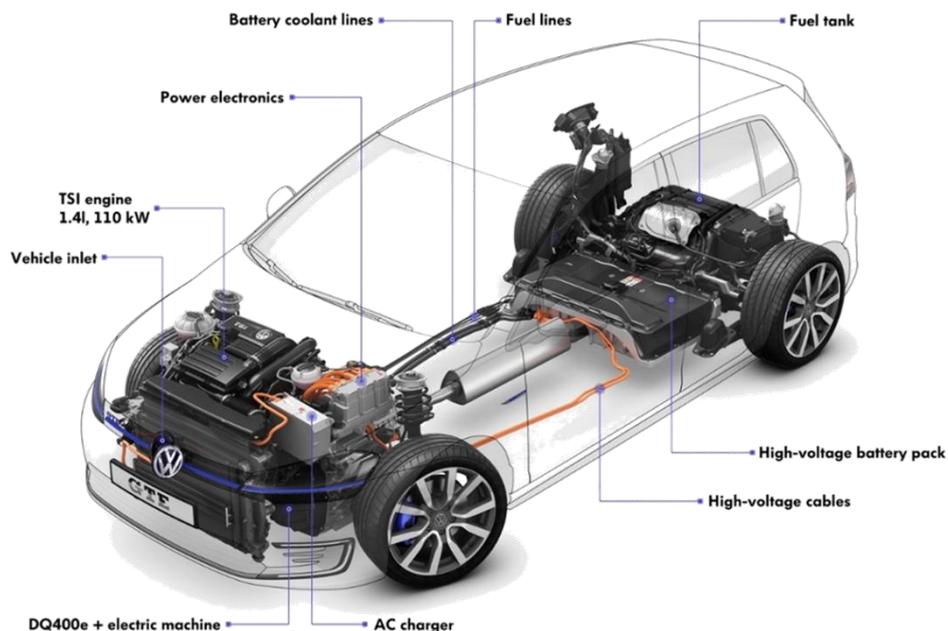


Figura 4 - Esempio di vettura Full Hybrid

- **Plug-in Hybrid (PHEV):** Sono, concettualmente, identiche alle Full Hybrid con la sola differenza che aggiungono una presa di corrente per la ricarica del pacco batterie tramite rete elettrica e un pacco batterie di maggiori capacità. Ciò consente alla vettura di poter percorrere una distanza maggiore in modalità puramente elettrica.

Le auto ibride Plug-in, infatti, sono dotate di batterie al litio più potenti rispetto a quelle utilizzate sulle auto HEV, perciò consentono un risparmio potenzialmente

molto elevato, se si pensa all'utilizzo in ambito cittadino ipotizzato prima, in quanto garantiscono autonomie elettriche che possono raggiungere anche i 70 chilometri e una trazione puramente elettrica fino a velocità di 50÷60 km/h.

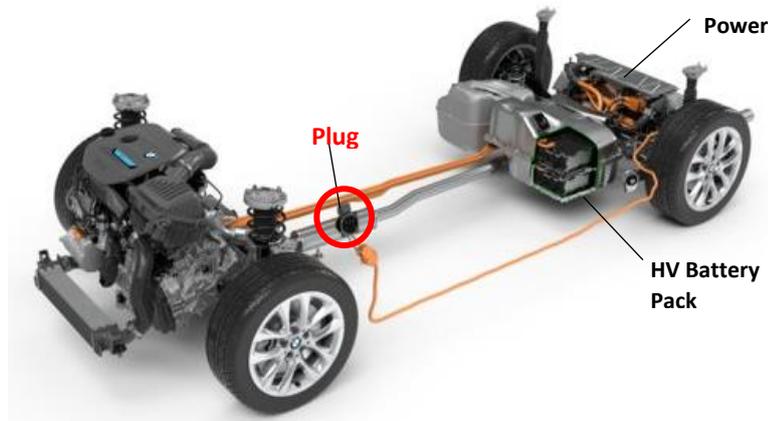


Figura 5 - Architettura Plug-in Hybrid con dettaglio presa di ricarica

In figura 6 sono schematizzate le differenti caratteristiche che si aggiungono all'aumentare del livello di ibridizzazione. Dalla semplice funzione Start&Stop di un veicolo mHEV, si passa alla possibilità di recuperare energia in frenata dei veicoli MHEV, fino ad arrivare alla trazione elettrica vera e propria dei veicoli HEV e PHEV.

Naturalmente l'aumento delle funzionalità è direttamente proporzionale all'aumento dei costi. Ciò è dovuto, in gran parte, alla necessità di installare pacchi batteria, elementi estremamente costosi, sempre più grandi.

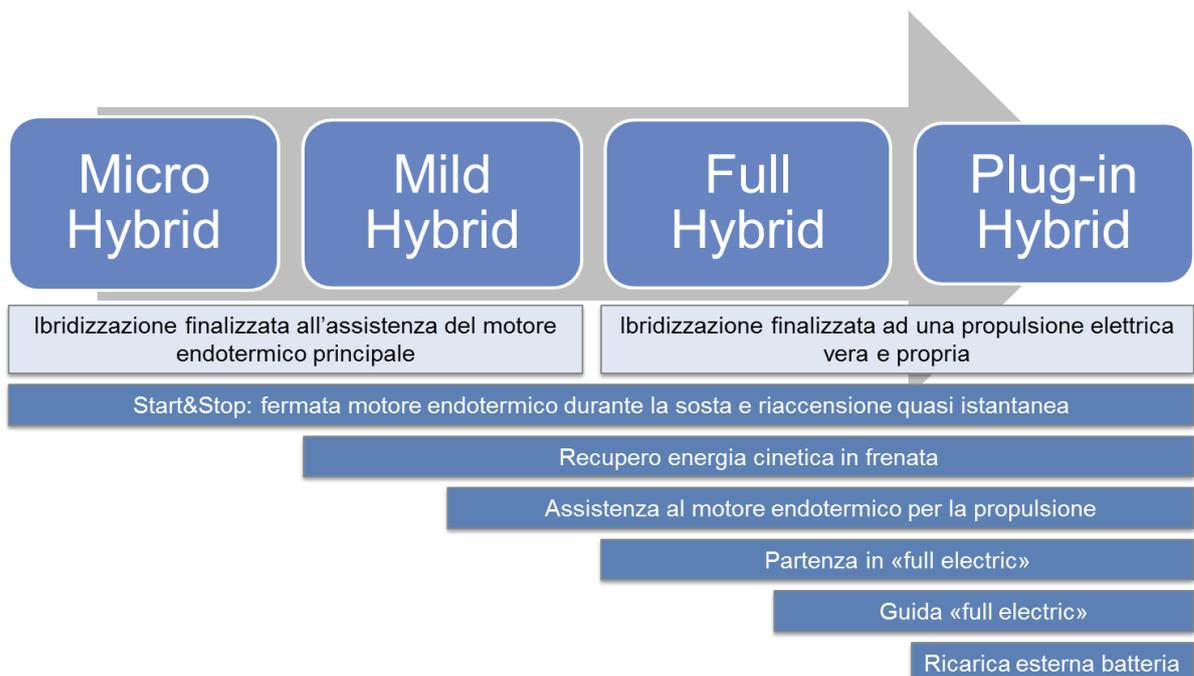


Figura 6 - Livello di integrazione in base al grado di ibridizzazione

2.1.2 Il veicolo elettrico a celle di combustibile

Un'altra alternativa green è rappresentata dalle celle a combustibile. Tali dispositivi elettrochimici sono capaci di convertire l'energia chimica di un combustibile (tipicamente idrogeno o metano) in energia elettrica, acqua e calore, senza l'ausilio di un ciclo intermedio e dei relativi sistemi meccanici di funzionamento, assicurando rendimenti di conversione energetica molto alti, oltre a garantire una notevole silenziosità dovuta essenzialmente all'assenza di organi rotanti. Tale tecnologia, però, deve essere migliorata sotto l'aspetto della durata delle celle, dello smaltimento del calore e del costo ancora troppo alto per tali dispositivi. La combinazione di idrogeno ed elettricità, però, è un'incoraggiante soluzione verso la realizzazione di un futuro a "zero emissioni" basato sull'energia sostenibile.

Le auto elettriche a celle di combustibile nascono, infatti, come alternativa a quelle a batterie. I problemi principali di queste ultime consistono nell'ingombro massiccio del pacco batterie e nei lunghi tempi di ricarica. Con l'adozione delle celle di combustibile si eliminano entrambi i problemi. Solitamente l'architettura di trazione di questi veicoli è di tipo ibrida, che utilizza simultaneamente celle a combustibile e batterie. Ciò perché le celle a combustibile rendono al meglio quando funzionano in condizioni stazionarie e per questo motivo si cerca di evitare di collegarle direttamente al controllo del motore elettrico, ma si fa in modo che siano interfacciate alle batterie al fine di assicurarne la ricarica. Saranno poi le batterie a fornire la corrente necessaria per la trazione, garantendo una migliore capacità del sistema di rispondere ai transitori di funzionamento (accelerazioni, frenate) e permettendo una vita dell'accumulatore d'energia più elevata.

In figura 7 è rappresentata l'architettura tipica di un veicolo equipaggiato con fuel cells. Si possono notare i serbatoi per lo stoccaggio dell'idrogeno, la batteria (sopra il serbatoio



Figura 7 - Architettura di un veicolo elettrico FCELL

posteriore), il modulo di celle a combustibile (sottopavimento) e il modulo del propulsore elettrico (zona anteriore).

I vantaggi principali di questa tipologia di veicoli sono:

- Il tempo di ricarica: il rifornimento è del tutto simile a quello di un veicolo tradizionale, quindi bastano pochi minuti per effettuare una ricarica completa;
- L'autonomia: gli attuali serbatoi permettono di raggiungere autonomie di 400÷600 km;
- Le emissioni: il veicolo dotato di fuel cells emette esclusivamente H₂O.

Gli svantaggi maggiori sono:

- Il peso del veicolo: la presenza di grandi serbatoi comporta un aumento notevole del peso del veicolo ed una riduzione notevole del volume del bagagliaio;
- La presenza di materiali pericolosi: le celle a combustibile necessitano la presenza di platino come catalizzatore;
- La sicurezza: anche se i serbatoi più moderni sono dotati di sistemi di sicurezza, lo stoccaggio a pressioni elevatissime dell'idrogeno rappresenta un rischio;
- Il costo: attualmente è una tecnologia estremamente costosa.

L'analisi delle celle di combustibile verrà descritta in Appendice B insieme alla valutazione dell'idrogeno come vettore energetico.

2.1.3 Il veicolo elettrico a batteria

Un veicolo elettrico a batteria, Battery Electric Vehicle (BEV), è caratterizzato dall'aver un motore elettrico come unico dispositivo di trazione e una o più batterie ricaricabili per l'immagazzinamento dell'energia chimica, che alimenta il motore sotto forma di energia elettrica.

I veicoli elettrici hanno un'efficienza energetica superiore al 90%, di gran lunga maggiore rispetto ai motori a combustione interna, 30÷40%. Tuttavia, hanno una limitata autonomia e necessitano di lunghi tempi per la ricarica. La continua innovazione in questo ambito, però, sta portando nuove tipologie di batterie e nuove modalità di ricarica che rendono sempre più appetibile questo tipo di veicoli.



Figura 8 – Vista del pacco batteria e dell'unità di trazione di un veicolo BEV

L'architettura di un veicolo BEV è, a prima vista, relativamente semplice. I componenti base, infatti, sono tre: la macchina elettrica, la batteria e l'unità di gestione della potenza, formata da inverter e trasformatori.

La differenza sostanziale, rispetto ai veicoli ibridi, oltre all'assenza del motore termico, è nelle logiche di controllo e gestione degli apparati. I flussi di energia sono, infatti, ottimizzati per massimizzare l'autonomia e salvaguardare l'integrità dei componenti, in quanto non c'è una modalità di trazione alternativa in caso di batteria scarica o componente bloccato.

Altra caratteristica importante di un BEV è l'assenza di trasmissione: il motore elettrico, infatti, ha il vantaggio di fornire tutta la coppia motrice nel momento stesso in cui si mette in movimento, e potendo raggiungere regimi anche superiori ai 10000 rpm, è in grado di assicurare una gamma di velocità adeguata senza bisogno di un rapporto di trasmissione. Naturalmente, si fa a meno anche della retromarcia, perché è sufficiente invertire la fase della corrente per

azionare il motore in senso contrario, con il vantaggio teorico di poter sfruttare la stessa potenza e accelerazione anche in retromarcia.

I comandi a bordo sono in tutto e per tutto simili a quelli di un cambio automatico semplice: due pedali (acceleratore e freno) e un comando a leva per selezionare la marcia avanti o indietro, la posizione di “folle” e quella di parcheggio che blocca la trasmissione impedendo all’auto di muoversi, in aggiunta al freno di stazionamento.

L’utilizzo del motore elettrico porta con sé uno dei suoi vantaggi principali, cioè il funzionamento bidirezionale. Quando si lascia l’acceleratore, infatti, il motore inverte il suo funzionamento trasformandosi in alternatore e convertendo l’energia cinetica che riceve dal movimento delle ruote in corrente elettrica da restituire alla batteria. Questo fenomeno di generazione determina un effetto dissipativo sull’energia cinetica, che si traduce in un effetto frenante sull’auto. Le vetture elettriche di ultima generazione prevedono la possibilità di gestire questo fenomeno aumentando o diminuendo la resistenza elettromagnetica.

Questa funzione è stata ottimizzata con l’E-Pedal, in cui si ha un acceleratore più sensibile che regola la forza del freno motore, dovuto all’effetto dissipativo creato dal generatore, a seconda dell’alleggerimento della pressione sul pedale. Ciò permette di gestire in modo più graduale anche i rallentamenti e anche di ridurre al minimo la necessità di usare i freni.

Questo è un aspetto estremamente importante se si considera che nelle auto convenzionali gran parte dell’energia viene dissipata sotto forma di calore, grazie all’impianto frenante, senza possibilità di recupero e, che sulle auto elettriche, tutti quei servomeccanismi normalmente azionati dal motore termico, come appunto il servofreno, sono rimpiazzati da dispositivi anch’essi elettrici e dunque bisognosi loro stessi di energia. Ormai praticamente tutti i costruttori hanno individuato nell’elettrificazione la via da seguire e per questo i modelli BEV sul mercato stanno diventando sempre più numerosi. In tabella 1 sono riportati i dati di vendita dei modelli maggiormente di successo tra gennaio e settembre 2018.

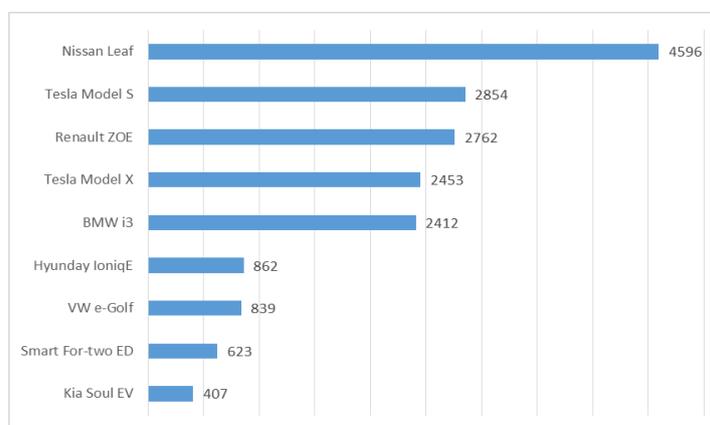


Tabella 1 - Auto elettriche più vendute in Europa nel 2018

2.2 La componentistica dei veicoli elettrici

La componentistica richiesta dall'architettura elettrica è differente rispetto a quella di un veicolo a combustione interna e risulta notevolmente impattante per la successiva fase di assemblaggio. Tutti i veicoli elettrici utilizzano l'energia chimica immagazzinata nella batteria per l'alimentazione del motore elettrico. Tra il motore e la batteria è, però, necessaria la presenza dell'elettronica di potenza, che fungendo da filtro, regola la quantità di energia fornita al motore, in base alla richiesta istantanea del conducente, determinando, la velocità istantanea del veicolo.

Da un punto di vista della componentistica, perciò, un'automobile a propulsione elettrica può essere suddivisa in tre blocchi fondamentali, indipendentemente dalla tipologia di veicolo ovvero il sistema di stoccaggio, di propulsione e ausiliario.

Il sistema di stoccaggio è costituito essenzialmente da:

- Batteria ad alto voltaggio HV in cui viene immagazzinata l'energia elettrica che servirà poi ad alimentare il motore. Diversamente da quanto si possa pensare, la batteria è, probabilmente, il sistema più complesso di un veicolo elettrico e quello che necessita di maggiore attenzione nella fase di progettazione e sviluppo di un veicolo;
- Batteria 12 V.

Il sistema di propulsione è costituito da due elementi:

- Motore elettrico;
- Inverter.

Il sistema ausiliario, invece, si compone di varie parti, che non hanno incidenza direttamente sulla propulsione, ma sono necessari al corretto funzionamento del veicolo. Molti di questi sono specifici per l'architettura elettrica:

- DC/DC Converter che serve a trasformare la corrente ad alto voltaggio proveniente dalla batteria, in corrente a 12 V necessaria ad alimentare la batteria ausiliaria e tutti i sistemi di controllo;
- On Board Charger è anch'esso un inverter AC/DC necessario per permettere di ricaricare la batteria del veicolo direttamente dalla rete. Questa è in AC mentre la batteria funziona in DC, perciò è necessario convertire la corrente prima di stoccarla. Nel caso di ricariche in corrente continua, invece, questo sistema viene scavalcato;
- Charge Port è il punto di connessione con la rete per la ricarica esterna;

- EVCU è la centralina di controllo della parte elettrica e della trazione puramente elettrica;
- HVTSM (High Voltage Testing System Module) è il sistema di sicurezza presente sui veicoli elettrici;
- High Voltage Auxiliaries è formato da tutti quei sistemi ad alto voltaggio che svolgono funzioni di servizio del veicolo, come compressori e riscaldatori per la batteria o per il sistema di condizionamento dell'aria nell'abitacolo.

2.2.1 Il motore elettrico

I motori elettrici sfruttano, come detto in precedenza, il processo di conversione elettromeccanica dell'energia elettrica fornita dal pacco batteria. Questo tipo di processo è attuabile utilizzando diverse strategie, ma tutte hanno in comune alcune caratteristiche che rendono i motori elettrici i sistemi di attuazione meccanica più diffusi. Innanzitutto, la facilità costruttiva, essi sono infatti, composti da due elementi, rotore e statore, che non venendo in contatto garantiscono una vita del componente quasi infinita. In secondo luogo, il rendimento si attesta tra il 95% e il 98%, a seconda della tipologia di motore, a fronte di un rendimento dei motori endotermici che non supera il 40% e la possibilità di funzionare in due direzioni. Infine, garantiscono una coppia elevata allo spunto, contrariamente ad un motore endotermico, come si può vedere dal confronto in figura 9.

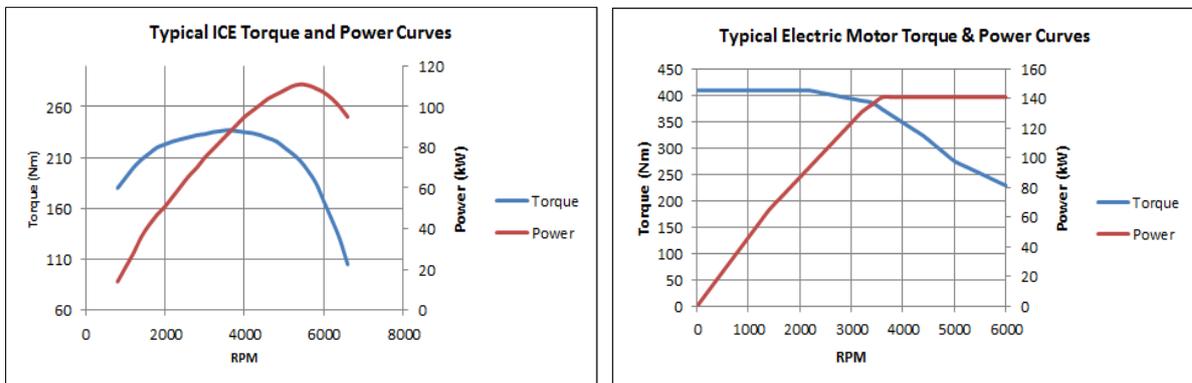


Figura 9 - Curva coppia potenza per un motore termico (a sinistra) e uno elettrico (a destra)

Durante la fase di assemblaggio vi è una notevole semplificazione dovuta al fatto che non siano più necessarie tutte le operazioni di pre-assemblaggio del propulsore a combustione interna nella linea dedicata alle meccaniche. Questa considerazione può essere fatta nel caso in cui il propulsore elettrico venga fornito completo e solamente da assemblare sul veicolo.

Le tipologie di motori elettrici industrialmente più diffusi, in questo momento sono tipicamente tre:

- **Motore a induzione**

I motori a induzione o asincroni, trifase costituiscono al momento una delle categorie con più ampio raggio di applicazioni nel settore industriale. In campo automobilistico risultano tra quelli maggiormente utilizzati per l'affidabilità e il controllo avanzato sviluppato e consolidato negli ultimi decenni.

La conversione elettromeccanica dell'energia sfrutta una diretta applicazione del campo magnetico rotante dei sistemi ad induzione. Comprende uno statore e un rotore costruiti

entrambi con materiale ferromagnetico e divisi da un traferro in aria. Gli avvolgimenti di rotore e statore, tipicamente filamenti di rame, sono contenuti nelle cave ricavate sulle superfici cilindriche.

L'avvolgimento di statore è composto da tre fasi identiche spazialmente sfasate, le quali sono collegate direttamente alla morsettiera per un'alimentazione esterna. Il circuito di rotore è solitamente a "gabbia di scoiattolo" o a rotore avvolto. Il campo magnetico rotante viene generato dalle correnti che scorrono nello statore, il quale a sua volta genera una corrente indotta nelle barre di rotore.

Le correnti che scorrono sugli avvolgimenti rotorici inseguono quelle di statore, mettendo in rotazione il rotore. Si crea una differenza di velocità tra rotore e campo rotante generato. La differenza tra queste due velocità viene definita sfasamento ed è un parametro fondamentale per determinare le performance del motore;



Figura 10 – Schema di un motore asincrono o a induzione

- **Motore a magneti permanenti o Brushless (BL)**

I motori sincroni a magneti permanenti (detti anche brushless vista l'assenza delle spazzole di collegamento che caratterizzano le prime varianti di questa tecnologia) sono motori di ampio sviluppo industriale in quanto utilizzati per servo-azionamenti e azionamenti di media e piccola taglia. I magneti permanenti risultano una tecnologia estremamente affidabile elevando la qualità e le prestazioni della macchina elettrica in questione.

Presenta varie caratteristiche che lo rendono appetibile, come la massima rapidità di ciclo: un servomotore BL (inteso come motore e generatore) può invertire il senso di rotazione in pochi millesimi di secondo. Presenta un'ottima controllabilità, un'alta

precisione nel posizionamento, marcia regolare a basse velocità, rapidissime accelerazioni o decelerazioni. Inoltre, la mancanza di contatti striscianti dovuta all'assenza delle spazzole, ne garantisce una lunga durata e annulla, quasi totalmente, la necessità di manutenzione. Il motore BL ha una buona capacità di sovraccarico, alta coppia, può sopportare una forte sollecitazione impulsiva ed è di ingombri ridotti.

Tutto questo, però, a scapito di costi abbastanza elevati e della presenza indispensabile del circuito di controllo; in quanto un BL deve sempre essere accompagnato dal relativo apparato di gestione delle potenze.

Questi svantaggi, che lo rendono poco versatile per l'uso nei piccoli elettrodomestici, non sono problematici per il settore automobilistico, dove questo tipo di motori è di gran lunga il più usato.

Lo statore ed il rotore sono entrambi a forma di corona cilindrica, di materiale ferromagnetico laminato e separati da un traferro in aria. Sul rotore trovano posto i magneti permanenti. L'avvolgimento di statore è di tipo trifase; le tre fasi sono reciprocamente sfasate nello spazio di $\frac{2\pi}{3}$ e ciascuna fa capo ad una coppia di morsetti attraverso i quali è possibile fornire loro alimentazione da una sorgente trifase esterna;



Figura 11 – Schema di un motore brushless

- **Motore a riluttanza variabile**

Il motore a riluttanza variabile consiste in uno statore con avvolgimenti di eccitazione e di un rotore privo di avvolgimenti, in quanto la generazione di coppia deriva dal fatto che il rotore tende ad allinearsi con lo statore che produce flusso: ogni avvolgimento viene alimentato sequenzialmente, così il rotore tende ad allinearsi con la parte alimentata produttore flusso, generando quindi coppia all'albero meccanico collegato al rotore.

Questi motori stanno ottenendo larghi consensi, data la facilità di controllo attuabile, possono raggiungere alte velocità, nella loro curva caratteristica coppia-velocità il tratto a potenza costante si estende su un'ampia gamma di velocità ed è per questo che sono adatti a un azionamento per trazione. Presentano alcuni svantaggi tra cui una coppia poco fluida a basse velocità, alcuni rumori acustici, ma sommariamente il rendimento è paragonabile a quello di un motore asincrono.

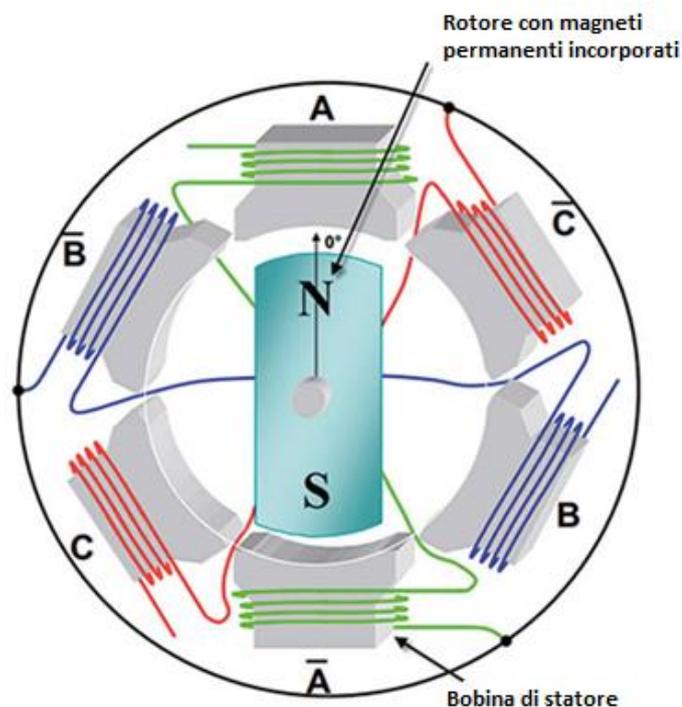


Figura 12 – Schema di un motore a riluttanza variabile

2.2.2 L'inverter

L'inverter diviene un componente imprescindibile se pensiamo ad una vettura a trazione elettrica, in quanto, motori elettrici e batterie, hanno necessità divergenti in termini di correnti. Mentre i primi necessitano di corrente alternata trifase, le batterie erogano corrente continua monofase. È evidente, come diventi fondamentale una efficiente trasformazione delle correnti da continue ad alternate e viceversa.

Lo schema di un inverter classico, mostrato in figura 13, consta di tre rami aventi due "micro switch" per ognuno di essi, cui sono collegati i conduttori di fase da riportare al motore. Le tensioni prodotte dall'inverter vengono generate mediante una modulazione di tipo vettoriale, sviluppando a loro volta le correnti che alimentano il motore trifase.

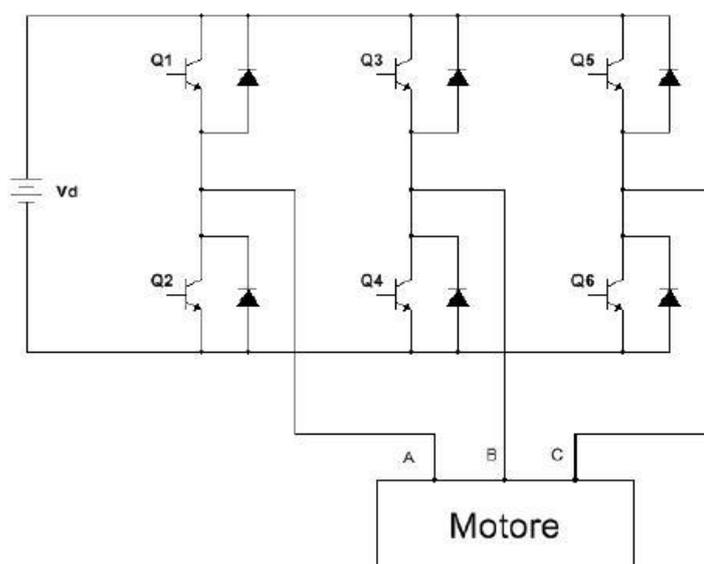


Figura 13 - Modello elettrico di un inverter trifase

I moderni inverter, adatti in particolare alla trazione di veicoli elettrici e ibridi, devono essere dotati, di alcune funzionalità che mirano alla miglior efficienza del motore in termini di risparmio energetico, come il recupero dell'energia durante la fase di frenata e una conseguente ottimizzazione della produzione di coppia. Sono necessarie, inoltre, opportune protezioni contro le sovratensioni, che potrebbero danneggiare anche i sistemi di controllo, e delle particolari protezioni contro sovraccarichi e sovratemperature, che determinerebbero il malfunzionamento dell'intero veicolo.

Per garantire la possibilità di ricaricare la batteria in fase di frenata, in particolare, nei veicoli elettrici viene usato una singola unità che ospita sia un inverter che un convertitore, un sistema più sofisticato rispetto ad un inverter classico. Grazie al convertitore, insieme a un regolatore

di carica integrato, questo apparato, permette di fornire corrente alla batteria durante la frenatura rigenerativa.

A causa dell'uso di trasformatori e semiconduttori (e della resistenza che li accompagna), questi dispositivi emettono enormi quantità di calore. Raffreddamento e ventilazione adeguati sono, perciò, fondamentali per mantenere operativi ed efficienti i componenti. Per questo motivo, le installazioni di inverter per trazione nei veicoli elettrici dispongono, quasi sempre, di sistemi di raffreddamento dedicati.

In figura 14 è rappresentato tramite uno schema a blocchi, il sistema inverter, di un veicolo elettrico che, come si può vedere, è integrato da una serie di apparati che ne aumentano la complessità. I blocchi di colore bianco rappresentano i vari sensori necessari ad ottimizzare il rilascio di corrente al motore in base alla richiesta del conducente e a tenere sotto controllo i parametri di sicurezza del sistema. Tutti questi controllori interagiscono tramite un controller dedicato.

L'inverter vero e proprio è rappresentato dai blocchi di colore blu ed è composto dai sistemi precedentemente descritti a cui si aggiunge un sistema di sicurezza, chiamato Active Discharge.

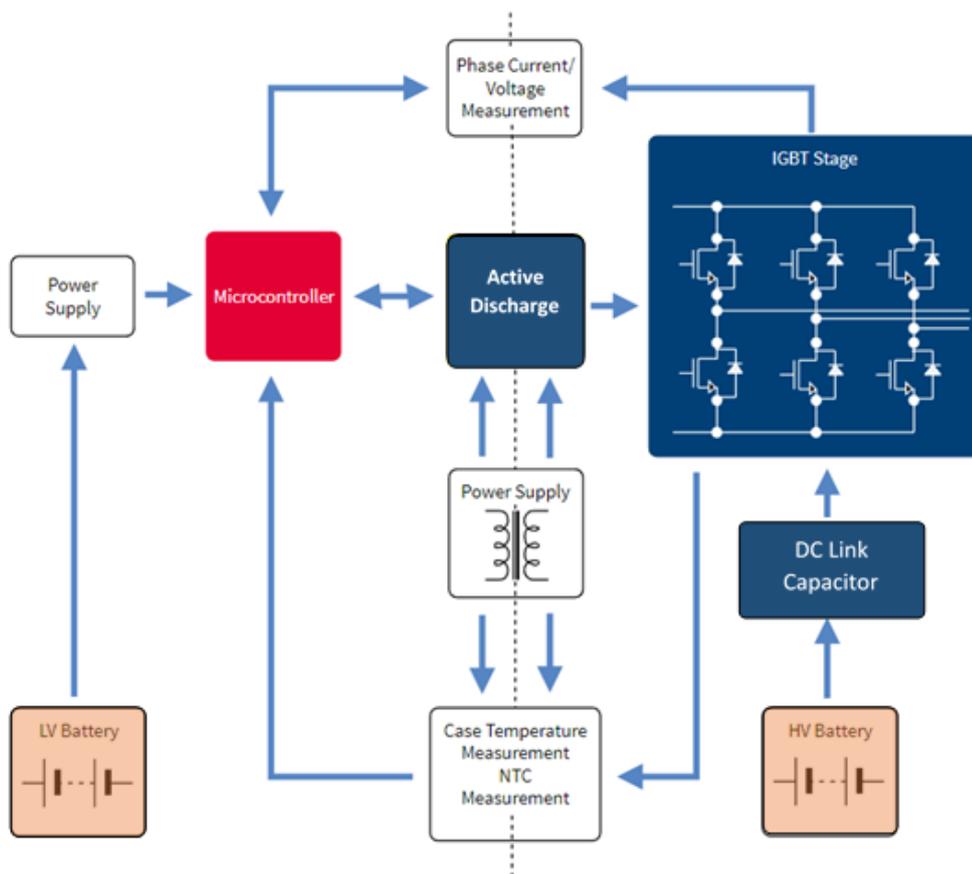


Figura 14 - Schema a blocchi del sistema inverter per un veicolo elettrico

2.2.3 On Board Charger

Nei veicoli elettrici, e negli ibridi che permettono alle batterie di essere ricaricate attraverso la rete, è necessaria l'installazione di un carica batterie.

In termini di funzionamento anche l'On Board Charger è un inverter, che trasforma la corrente alternata della rete in corrente continua da immagazzinare nel pacco batteria.

L'architettura dell'On Board Charger più comune include un convertitore AC/DC attivo-front-end e un convertitore DC/DC isolato come mostrato in figura 15.

Il convertitore AC/DC mantiene la tensione del bus DC intermedio tra 380 V e 400 V, quindi il convertitore DC/DC isolato, caricherà il pacco batteria del veicolo all'interno dell'intervallo di tensione di uscita da 200 V a 450 V.

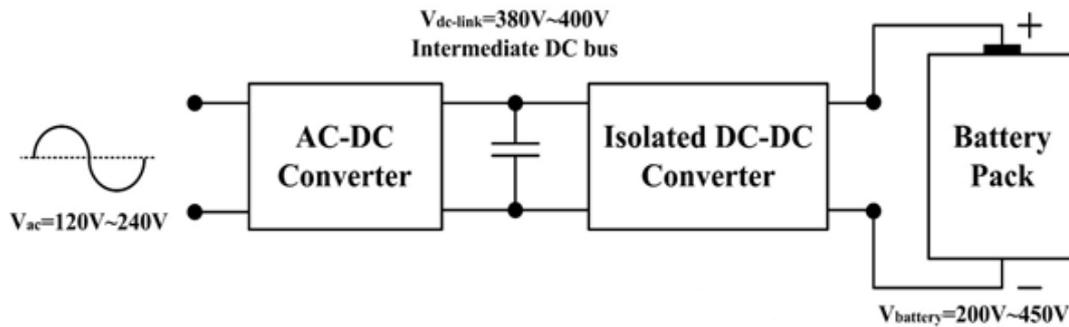


Figura 15 - Schema a blocchi di un On Board Charger

2.2.4 Electric Vehicle Control Unit (EVCU)

All'interno di un veicolo sono presenti sia attuatori (motorino del finestrino, motorino per la posizione delle luci) che sensori (stato della porta, stato della chiave). Inizialmente, prima degli anni '80, vi era una sola centralina elettronica che era connessa tramite collegamenti point-to-point a tutti i sensori e gli attuatori. Al crescere delle funzionalità offerte dal veicolo sono cresciuti il numero di elementi da connettere. Ecco dunque che un collegamento point-to-point a raggiera non era più sostenibile. Il numero di fili era troppo elevato.

Per ovviare a questo problema varie case automobilistiche iniziarono in modo indipendente a sviluppare il concetto di rete interna al veicolo. Invece di utilizzare dei semplici attuatori meccanici, si sono utilizzati attuatori mecatronici, ovvero dotati di centralina elettronica e si sono interconnessi tramite bus. Il veicolo è diventato così un insieme di microprocessori che collaborano e si scambiano informazioni andando a formare una vera e propria rete di calcolatori distribuiti in cui si necessita di allineare costantemente i dati.

Le centraline elettroniche presenti a bordo di un veicolo, Engine Control Unit (ECU), sono classificabili in base alla loro criticità, che si traduce in termini di priorità e velocità richiesta delle loro comunicazioni. Ad esempio, il motore, il cambio e i freni hanno una priorità maggiore rispetto a climatizzatore, blocca sterzo, sedili e specchietti. I primi devono reagire in tempo reale quindi devono comunicare con velocità superiori ai 200 kb/s, i secondi invece possono comunicare con velocità contenute tra i 30 kb/s e i 125 kb/s.

La centralina più importante è l'Engine Control Module (ECM), ovvero la ECU deputata alla gestione del motore. Nel caso di motore termico, attraverso sensori di temperatura del motore e composizione dei gas di scarico ha il compito di decidere la quantità di miscela da iniettare nel motore per avere una combustione ottimale e ridurre i gas di scarico. Attraverso il bus comunica le informazioni relative al motore, in particolare la velocità di rotazione e la sua temperatura.

Il Gateway (GW), invece, è la centralina deputata alla conversione dei protocolli di comunicazione per permettere l'interconnessione di reti differenti, ad esempio, in presenza di bus a diverse velocità. Le varie centraline, infatti comunicano attraverso dei protocolli diversi che, devono essere convertiti in un linguaggio univoco affinché i vari sistemi possano comunicare tra loro e rendere efficace un'analisi diagnostica.

Il bus più utilizzato è il CAN (Controller Area Network), un protocollo seriale di tipo broadcast. I nodi non hanno un indirizzo, ma rispondono a messaggi specifici di cui loro sono competenti e riconosciuti tramite un identificativo. Per ottenere un'elevata affidabilità, la velocità massima è di 1 Mbit/s se la lunghezza del cavo è minore di 40 m.

Il protocollo CAN ha diverse classi di funzionamento:

- C-CAN è la classe di funzionamento di multiplazione veloce. Ha una velocità compresa tra i 125 kb/s e 1 Mb/s. È utilizzato per la trasmissione di informazioni ad elevata criticità, dove il tempo di risposta deve essere inferiore ai 5 ms. In particolare, mette in comunicazione il motore, l'ABS e il cambio.
- B-CAN è la classe di funzionamento di multiplazione lento. Ha una velocità compresa tra i 32,5 kb/s e 125 kb/s. È utilizzato per la trasmissione di informazioni che non necessitano di risposte in tempo reale, infatti il tempo di risposta è inferiore ai 100 ms.
- I-CAN è la classe di funzionamento di multiplazione veloce, ma adibita al trasporto di informazioni multimediali. Ha una velocità compresa tra i 125 kb/s e 1 Mb/s. È utilizzato per la trasmissione di segnali audio e video.

Un altro protocollo molto utilizzato è quello LIN. Nell'ottica di ridurre le connessioni tra le ECU e ridurre i costi di produzione, sul finire degli anni '90, grazie ad un consorzio tra aziende automobilistiche, un'azienda di semiconduttori e una di informatica, è stato sviluppato il LIN (Local Interconnection Network).

Si tratta di un bus con velocità intorno ai 20 kb/s. Il LIN è usato come rete locale per il CAN. In particolare, mette in comunicazione sedili, luci, tergicristalli, finestrini, e tutti i componenti che non richiedono di essere reattivi e che, rispetto agli altri nodi della rete, scambiano poche informazioni. Per essere integrato con il CAN necessita di un nodo di interconnessione, il gateway.

Attualmente la configurazione più utilizzata è quella di avere un bus CAN a 500 kb/s e alcuni dei nodi CAN con una sottorete locale LIN.

Nel caso di veicoli elettrici la rete deve essere, naturalmente, rielaborata, e si differenzia a seconda del tipo di veicolo elettrico.

Un veicolo BEV, per esempio, necessita di una rete estremamente rielaborata in quanto, non avendo un motore endotermico, non presenta la centralina ECM.

In questo caso la centralina controllo motore viene sostituita da due nuove centraline: la Electric Vehicle Control Unit (EVCU) una centralina che si occupa della gestione di tutta la parte di propulsione e un Motor Control Processor (MCP) ausiliario che gestisce i parametri cinematici del solo motore elettrico.

La EVCU rappresenta il cervello vero e proprio del propulsore elettrico, infatti, oltre a gestire i segnali di input/output al modulo dedicato alla propulsione e al modulo di gestione della

batteria, deve gestire tutti i parametri secondari che devono essere monitorati: la temperatura di tutti gli apparati, la gestione dei componenti ausiliari e la gestione del modulo di ricarica.

L'EVCU comunica con il modulo di trazione, con il modulo di gestione della batteria (Battery Pack Control Module, BPCM), e con tutti i sistemi ausiliari descritti prima. Per rendere il sistema di propulsione il più possibile robusto, si usa un protocollo C-CAN dedicato, mentre i moduli ausiliari vengono, solitamente, collegati tramite rete LIN.

Nel caso di veicolo ibrido, invece, la rete segue una logica diversa, in quanto sono presenti entrambi i tipi di trazione, termica ed elettrica. Si deve quindi aggiungere alla rete di un veicolo tradizionale la rete che gestisce la parte elettrica e fare in modo che queste dialoghino tra loro in modo efficiente.

Il cervello del veicolo diventa l'Hybrid Control Processor (HCP), un gateway che garantisce l'interazione tra il motore elettrico e quello endotermico, permettendo la gestione della trazione in tutte le possibili configurazioni descritte in precedenza; sia la rete CAN dedicata al sistema endotermico, sia quella dedicata all'architettura elettrica, convergono nell'HCP.

2.2.5 High Voltage Battery System (HVBS)

In un veicolo elettrico, come anche in uno ibrido, la batteria ha un ruolo fondamentale in quanto rappresenta a tutti gli effetti, una fonte primaria di alimentazione, che influenza pesantemente le caratteristiche del veicolo. Le prestazioni richieste alla batteria dipendono molto dal tipo di veicolo a cui è destinata.

In particolare, per un veicolo elettrico sono richieste: elevata energia specifica e densità di energia, elevata densità di potenza per garantire l'apporto di energia nella fase di picco, in accelerazione, e, soprattutto, lungo ciclo di vita con poca manutenzione e costi ridotti.

Invece, per un veicolo ibrido servono: elevata potenza specifica e densità di potenza poiché agisce soprattutto in accelerazione, capacità di accettare cariche ripetitive ad alta potenza dalla frenata rigenerativa, un ciclo di vita molto lungo con assenza di manutenzione sotto condizioni di ciclo normali e un costo moderato.

La scelta di una batteria per veicoli elettrici si basa sulla gestione del giusto compromesso tra sei parametri chiave che sono sicurezza, durata, energia, potenza specifica, performance e costo. L'elemento attivo della batteria è la cella, cioè la pila vera e propria che permette di immagazzinare l'energia.

Non è possibile produrre una cella con abbastanza energia e densità di potenza per soddisfare le esigenze del settore automobilistico; perciò nasce la necessità di utilizzare più celle collegate in serie/parallelo in base alle esigenze:

- Per aumentare la capacità di una batteria, bisogna collegare le celle in parallelo;
- Per aumentare la potenza di un pacco, bisogna collegare celle in serie.

Attualmente esistono tre tipologie di celle sul mercato:

1. **Cilindriche:** sono celle di piccole dimensioni. Sono molto diffuse, per esempio, in pacchi, per le batterie dei computer portatili. In ambito automobilistico vengono utilizzate, fin dalla sua nascita, da Tesla (prodotte da Panasonic). La cella cilindrica continua ad essere una geometria molto utilizzata per le batterie primarie e secondarie. I vantaggi sono la facilità di fabbricazione e la buona stabilità meccanica, può sopportare elevate pressioni interne senza deformarsi;



Figura 16 - Celle cilindriche Panasonic/Tesla

2. **A sacchetto:** sono celle in cui piuttosto che usare un cilindro metallico e un passaggio elettrico da metallo a metallo, le linguette conduttive sono state saldate agli elettrodi e portate all'esterno in modo completamente sigillato. Tali celle ottimizzano l'uso dello spazio, poiché non hanno un contenitore rigido, per cui anche il peso è molto ridotto. Utilizzano la tecnologia al litio polimero e si stanno diffondendo soprattutto nel settore automobilistico, poiché garantiscono elevata flessibilità in fase di progettazione. L'elettrolita è un polimero, per cui non ci sono perdite di liquidi. Il raffreddamento è facile in virtù delle ampie superfici. L'unica pecca è la bassa resistenza meccanica, che richiede un sistema di impacchettamento idoneo;



Figura 17 - Cella a sacchetto

3. **Prismatiche:** sono celle caratterizzate da un involucro rigido tipicamente in alluminio, e sfruttano in modo ottimale lo spazio utilizzando l'approccio a strati. Non esiste un formato universale e ogni produttore progetta il proprio. Queste celle le celle erogano portate di 20÷100 Ah. La costruzione permette alta densità di energia, ottima dissipazione del calore, ottimo impacchettamento e sfruttamento dello spazio.



Figura 18 - Celle prismatiche Samsung

Per facilitare la gestione di una batteria le celle vengono suddivise in strutture contenenti una decina di celle, chiamate moduli. I moduli sono unità indipendenti che controllano le tensioni e le temperature in modo locale e comunicano al sistema globale di gestione della batteria.



Figura 19 – Esempio di modulo contenente 4 celle a sacchetto

Più moduli, infine, sono collegati fra loro in modo da raggiungere il voltaggio desiderato (solitamente 400 V o 800 V) fino a formare il pacco batteria vero e proprio come mostrato in figura 20.

Un pacco batteria per auto elettrica è un sistema estremamente sofisticato, progettato per avere una gestione termica ottimale, per essere protetto elettricamente, e capace di comunicare con la rete del veicolo.



Figura 20 – Esempio di un pacco batteria di un veicolo BEV

Un pacco batteria è, quindi, una struttura complessa, composto oltre che dai moduli, anche da un sistema di riscaldamento/raffreddamento, dalla sensoristica necessaria a ricavare lo stato del sistema e, soprattutto dal Battery Management System (BMS), cioè il sistema di gestione e controllo dello stato di salute della batteria.

Il BMS deve gestire le singole celle, monitorandone tensione, temperatura e corrente e attuando una serie di azioni di protezione per evitare che esse escano dagli intervalli operativi con conseguente danneggiamento delle stesse.

A queste funzioni di base si aggiungono una serie di funzioni secondarie necessarie a controllare una serie di variabili di stato utili necessarie al corretto funzionamento del veicolo.

Le funzioni di un BMS generale possono essere riassunte, a questo punto, in funzioni principali e secondarie. Le principali sono:

- Monitoraggio della tensione di cella: risulta fondamentale che venga fatto per ogni cella, in quanto le tensioni delle celle si diversificano per il diverso stato di carica, per il gradiente di temperatura presente nella batteria o per una differente quantità di elementi “parassiti” della cella stessa;
- Monitoraggio della temperatura: può essere fatta sulla singola cella oppure in punti strategici della batteria per limitare il numero di sensori necessari;
- Monitoraggio della corrente: è importante conoscere la corrente che scorre nella batteria per proteggerla da valori non permessi. Inoltre, tale monitoraggio è necessario per implementare le funzioni avanzate di gestione e analisi dello stato di carica delle celle;
- Controllo delle grandezze lette: è necessario adottare una serie di misure cautelative per evitare la fuoriuscita dagli intervalli operativi delle celle che comporterebbero il danneggiamento delle stesse.

Le funzioni secondarie sono, invece:

- Stima dello State of Charge (SoC): questo parametro è direttamente legato alla carica che la batteria può ancora erogare e quindi all'autonomia residua dell'applicazione;
- Stima dello State of Health (SoH): è il parametro usato per descrivere appunto lo stato di salute della batteria; anch'esso, come il SoC, è un parametro di notevole interesse perché legato direttamente alla massima carica che la batteria può contenere e quindi all'autonomia che l'applicazione ha con la batteria totalmente carica;
- Bilanciamento: è una funzione necessaria per massimizzare la capacità utilizzabile della batteria;

- Comunicazione in rete: solitamente la batteria è inserita in sistemi più complessi, quindi il BMS deve essere in grado di comunicare con i livelli superiori fondendogli tutte le informazioni necessarie ad ottimizzare l'uso della batteria. Il protocollo di comunicazione, ovviamente, dipende fortemente dall'applicazione e dall'ambiente di utilizzo della stessa. Per i veicoli elettrici lo standard di comunicazione è il CAN-bus.

Capitolo 3

Il processo produttivo

In questa sezione sono descritti solamente i processi di produzione, ovvero le attività svolte nello stabilimento produttivo.

L'auto è un prodotto molto complesso e si compone di una quantità enorme di sottogruppi che, pre-assemblati attraverso processi produttivi specifici, consentono di ottenere il veicolo attraverso il successivo montaggio. Per questo motivo il flusso di produzione può essere diviso in diverse fasi:

- Progettazione del prodotto;
- Progettazione del processo;
- Produzione dei quantitativi previsti.

In generale le macro-fasi di produzione per la costruzione dei veicoli non dipendono dal segmento di appartenenza, volumi di produzione o requisiti del prodotto. Al fine di entrare nei dettagli delle scelte tecnologiche di prodotto, di processo e di qualità, i fattori elencati diventano i principali responsabili delle decisioni.

La produzione di automobili può iniziare dopo un periodo piuttosto lungo che include un'indagine di mercato, prodotto e processi di progettazione, studi di fattibilità accurati con l'aiuto di software avanzati e un periodo di industrializzazione per rendere lo stabilimento in grado di soddisfare la domanda stimata in termini di volumi di produzione.

Le macro-fasi di lavorazione vengono eseguite nei centri correlati dello stabilimento e sono principalmente quattro, schematizzate in figura 21:

- Stampaggio;
- Lastratura;
- Verniciatura;

- Assemblaggio.

Nei primi tre passaggi il corpo vettura viene completato e con l'ultimo passaggio viene assemblato l'intero veicolo. Elementi di trasmissione e del motore sono realizzati in stabilimenti differenti e sono collegati al corpo nella fase di montaggio attraverso l'attività di "marriage".

Con il passaggio verso una produzione di un veicolo elettrico a batteria le prime tre fasi non necessitano di modifiche importanti, poiché riguardano principalmente la scocca del veicolo che viene prodotta nello stesso modo dei veicoli a combustione interna. La linea di assemblaggio, invece, è fortemente influenzata dall'introduzione di componenti elettrici, sia in termini di attrezzamenti e attività da allocare, sia in termini di sicurezza delle mansioni, poiché si deve operare su componenti ad alto voltaggio.

Nascono delle stazioni di lavoro dedicate, altre, al contrario, vengono eliminate. Lo stesso avviene per le prove di delibera che avvengono lungo tutta la linea di montaggio.

Le fasi di stampaggio, lastratura e verniciatura verranno descritte dettagliatamente in Appendice C al fine di compiere un'analisi approfondita della fase critica, ovvero il General Assembly Shop.

La complessità del prodotto porta alla necessità di definire il livello di integrazione verticale lungo la catena di produzione più appropriato. Ne consegue che alcuni processi o componenti possono essere realizzati internamente o assegnati ai fornitori. Per queste ragioni, le decisioni prese in termini di "make" o "buy" sono fondamentali dal punto di vista economico.

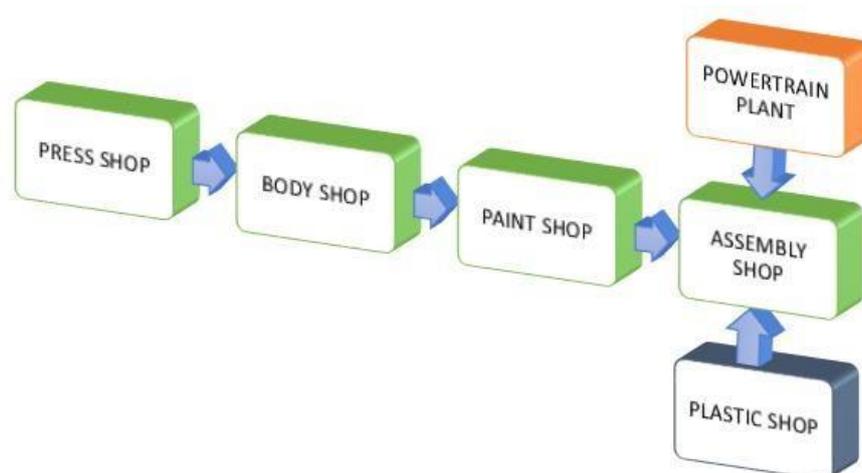


Figura 21 - Schema a blocchi di un flusso produttivo

3.1 La fase di assemblaggio

Tutti i sottogruppi che costituiscono il veicolo completo arrivano all'area di assemblaggio. Il veicolo è il risultato dell'assemblaggio di migliaia di componenti caratterizzati da varie dimensioni. La scocca è la parte principale della vettura e tutti i sottoinsiemi sono montati su di essa, fino alla completa realizzazione del prodotto finale; a questo scopo il corpo vettura attraversa la linea principale che è il nucleo dell'intero reparto.

I gruppi che non fanno parte della scocca (motore, porte, paraurti) sono montati solitamente in aree dedicate prima di essere trasportati a bordo della linea principale per il relativo assemblaggio sulla carrozzeria. Pertanto, il montaggio è generalmente costituito da un percorso principale, su cui si muove il corpo vettura, e da linee secondarie.

La linea di assemblaggio principale è seguita dal corpo auto con un'altimetria variabile e può compiere differenti rotazioni intorno al proprio asse longitudinale al fine di aiutare i lavoratori e rendere tutti i processi di assemblaggio ergonomicamente testati.



Figura 22 - Fase di assemblaggio di Jeep Renegade

Le fasi di progettazione del layout dell'impianto e le sequenze di montaggio giocano un ruolo fondamentale per i risultati ottenuti dall'azienda, al pari delle attività logistiche; lo scopo principale è quello di raggiungere un elevato livello di saturazione delle linee. Questi sono i fattori che interessano prevalentemente l'efficienza produttiva.

Molti aspetti del montaggio come il layout dell'impianto, il livello di automazione, la formazione dei lavoratori, i sistemi di trasporto utilizzati (ad esempio AGV, veicoli a guida

autonoma) dovrebbero essere fortemente influenzati dai volumi di produzione del modello specifico.

Per ottenere un'elevata efficienza produttiva attraverso la saturazione delle risorse disponibili, ogni produttore investe nella progettazione della sequenza di montaggio e del layout dell'assemblaggio. Questi due aspetti sono ovviamente collegati a vicenda, perché la disposizione delle risorse materiali influenza fortemente la sequenza di operazioni da eseguire. Al giorno d'oggi le simulazioni virtuali sono un supporto quotidiano per efficienza e valutazioni di fattibilità, esse sono certamente gli strumenti decisionali più importanti.

La fase di montaggio, schematizzata in figura 23, può essere suddivisa in differenti parti in cui viene eseguito l'assemblaggio dei sottogruppi ed in particolare è possibile distinguere:

- Trim è il tratto di linea che si occupa di montare sul veicolo le parti interne della vettura;
- Chassis è il tratto di linea che si occupa principalmente di montare la componentistica che renda il veicolo funzionante dal punto di vista meccanico;
- Final è il tratto di linea che si occupa di completare il veicolo con le parti mancanti fino ad arrivare a vettura completa. Nel tratto di Final si può distinguere la parte conclusiva in cui vengono implementati i test: questa sezione prende il nome di End of Line.

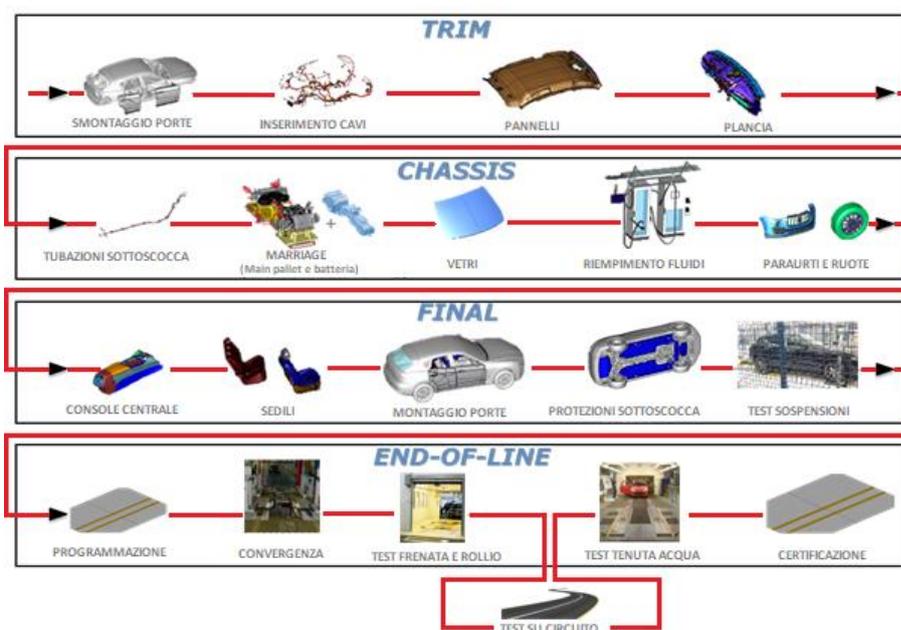


Figura 23 - Sequenziamento delle macro attività durante la fase di assemblaggio

In realtà, da questa base di partenza, si sviluppano dei tratti di linea più specifici ed altre linee di sub-assemblaggio che rendono lo schema più articolato.

La prima stazione che la scocca incontra, una volta uscita dall'unità di verniciatura, è quella che prevede il montaggio del tetto apribile: in tale area viene montato solamente sulle vetture che ne prevedono uno diverso dalla scocca. Come schematizzato in figura 24, il montaggio può essere automatizzato, semi automatico oppure completamente manuale.

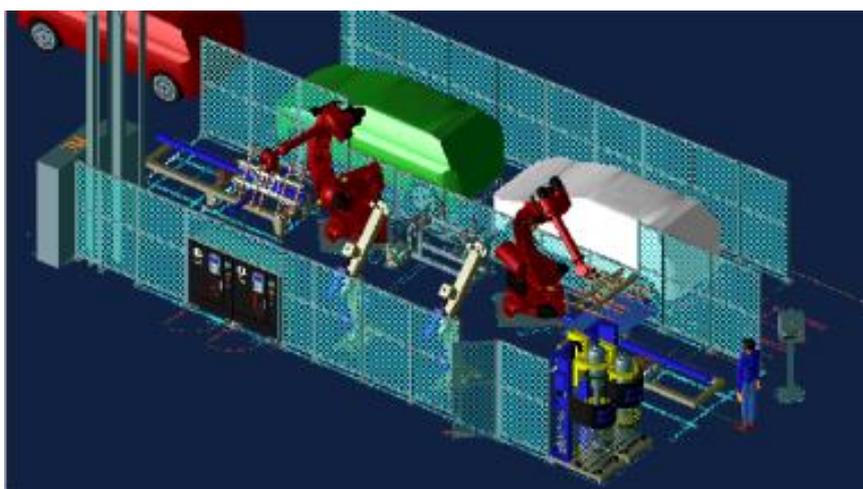


Figura 24 - Montaggio del tetto apribile automatizzata

La vettura, in questo momento, non è ancora stata diffusa al montaggio ed è destinata al Painted Body Storage (PBS).

Il PBS è un buffer di accumulo delle scocche verniciate. È un punto di raccolta di scocche pronte per il montaggio, dimensionato in modo da rendere fluido il passaggio delle vetture alla fase successiva e permettere il giusto sequenziamento dei veicoli in base alle esigenze di produzione. Il dimensionamento del magazzino dipende da numerosi fattori, tra i quali:

- Mix di produzione;
- Saturazione;
- Layout;
- Velocità della linea.

In figura 25 è schematizzato un possibile PBS che può presentare un layout a rami, in cui è possibile prelevare solamente la prima scocca della fila, o a celle, in cui risulta possibile prelevare qualsiasi tipo di scocca presente.

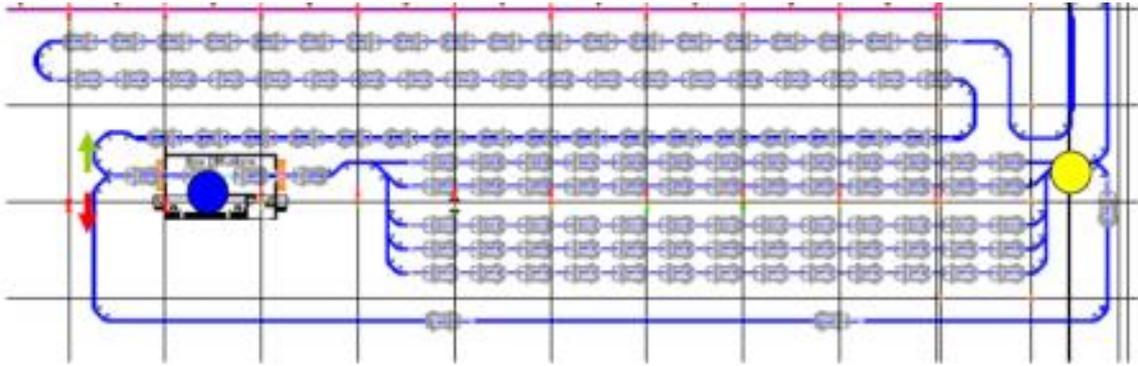


Figura 25 - PBS a rami; in giallo vi è il punto d'ingresso mentre in blu quello d'uscita

Da notare come, subito dopo il PBS, le scocche seguano un percorso “a serpentina” prima di arrivare al montaggio vero e proprio. Questo percorso è necessario per permettere il corretto arrivo sulla linea del materiale da assemblare, inviato secondo una logica Just in Sequence (JIS).

3.1.1 Tratto di linea Trim

L'ingresso vero e proprio dell'unità di montaggio è il tratto di linea Trim. In questa sezione vengono montati quasi tutti i componenti interni del veicolo.

Per prima cosa vengono disassemblate le porte, che viaggiano su una linea separata e saranno rimontate nella parte finale del flusso, nel tratto conclusivo di linea denominato End of Line. Nella linea dedicata verranno assemblate con tutti i componenti necessari ad un corretto funzionamento e successivo assemblaggio.

Successivamente, viene inserita sulla scocca la rete di cavi che collega tutti i dispositivi elettronici del veicolo: fanno parte di ciò anche le centraline e i pedali. Lungo questo tratto il veicolo è movimentato tramite un sistema con skillet, mostrato in figura 26, ovvero piattaforme calpestabili dall'operatore che permettono di tenere la scocca ad un'altezza variabile prestabilita in base all'esigenze. Il sistema skillet può essere considerato come un insieme tra uno skid e un pallet.

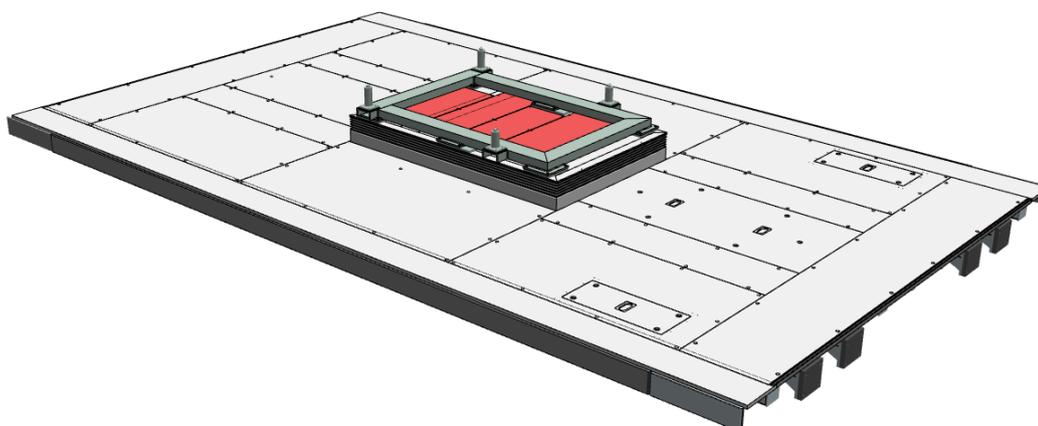


Figura 26 - Esempio di movimentazione tramite skillet

In questo modo l'operatore potrà svolgere l'operazione senza la necessità di camminare per rimanere a fianco della scocca aumentando notevolmente produttività e qualità.

In parallelo alla Trim, vi è la linea di assemblaggio della plancia, in cui il pannello viene composto con tutti i suoi componenti e, una volta assemblato, viene condotto sulla linea principale dove viene montato in vettura come componente unico. La plancia viene inserita manualmente in vettura attraverso la porta anteriore, tramite l'utilizzo di un attrezzo ausiliario, mostrato in figura 27, con lo scopo di annullare la forza peso considerevole del componente.

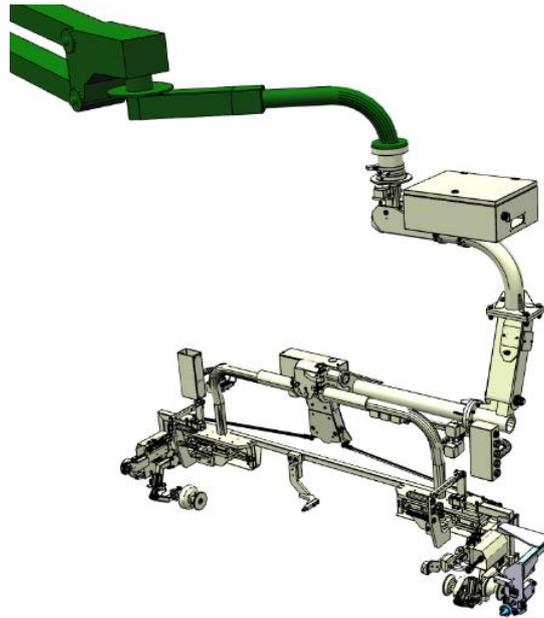


Figura 27 - Attrezzo “annulla gravità” per il montaggio della plancia

Dopo il tratto di Trim si giunge al tratto di linea Chassis-1 dove il veicolo viene preparato alla “carrozzatura”. In questo tratto vengono montati, principalmente, tubi freno, tubi carburante e ripari sottoscocca.

3.1.2 Tratto di linea Chassis

In questa fase la movimentazione del veicolo è garantita dai ganci girevoli elevati, perciò, risulta il tratto predisposto alle lavorazioni della sottoscocca. Tale configurazione permette una rotazione rispetto all'asse verticale che rende possibile il montaggio in tutti i vani della scocca. Come mostrato in figura 28, la scocca può essere ruotata di un certo angolo rispetto alla posizione orizzontale di riferimento grazie ad un opportuno sistema di slitte movimentato tramite catene.

La progettazione dell'impianto deve prendere in considerazione i benefici tratti da questo grado di libertà ulteriore valutando i costi superiori di acquisto e la successiva manutenzione.

Inoltre, la quota verticale della scocca può essere gestita con un'altezza variabile della guida dei ganci stessi; tuttavia questa variabile risulta estremamente impattante per lo stabilimento poiché una modifica posteriore richiederebbe una riprogettazione integrale del particolare tratto di linea.

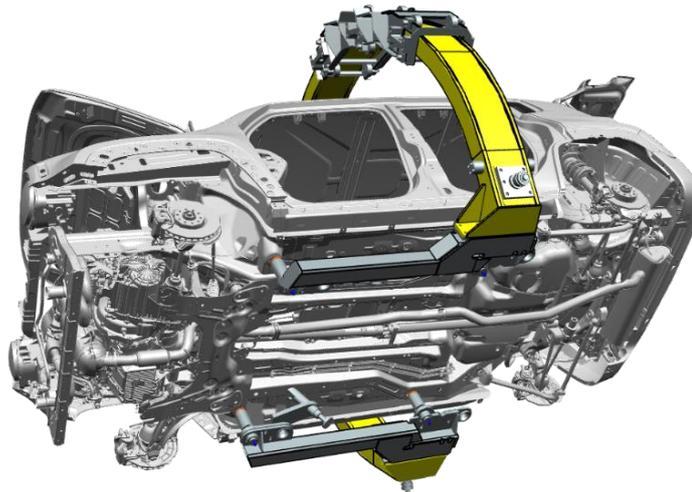


Figura 28 - Veicolo ruotato con un gancio girevole

Sempre ancorato ai ganci girevoli, il veicolo arriva alla fase di decking. Questo tratto è il centro dell'unità di montaggio e unisce la scocca con le parti meccaniche. Sicuramente risulta essere il tratto più complesso a livello progettuale, in quanto si sviluppa su due livelli.

Come si può notare in figura 29, in questa particolare configurazione, lungo il primo livello scorre il main pallet su cui è stata assemblata, in una linea parallela, tutta la meccanica del veicolo, mentre lungo il secondo livello scorrono i ganci girevoli con le scocche.

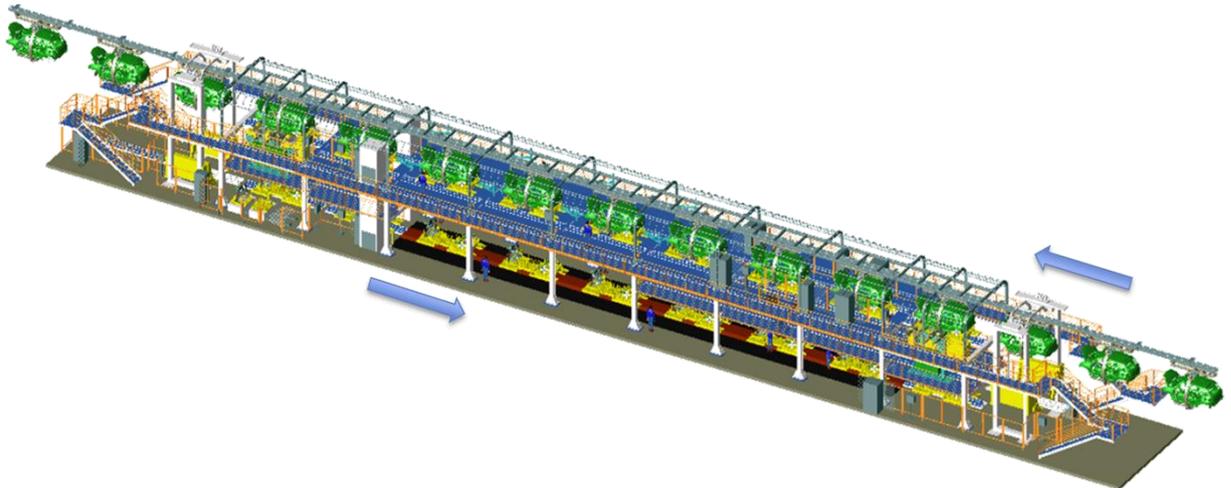


Figura 29 - Configurazione possibile del decking

Lungo la linea di decking avviene, il “marriage”, ovvero l’unione tra la scocca e tutta la componentistica meccanica.

Il main pallet è costituito da differenti sezioni come mostrato in figura 30: il G.O.M.A., che è il gruppo degli organi meccanici anteriore, la parte centrale e il G.O.M.P., che si riferisce al gruppo posteriore.

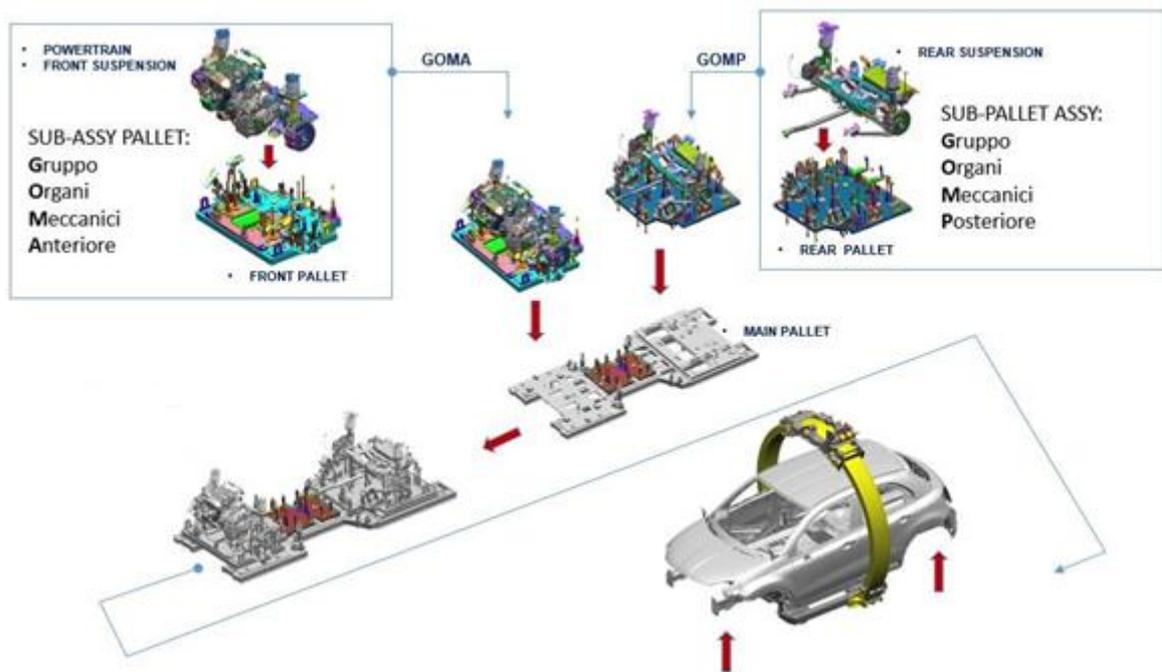


Figura 30 - Operazioni durante la fase di decking

Il decking può essere completamente automatizzato, nel caso in cui il fissaggio sia realizzato tramite robot, o più generalmente semi-automatizzato, in cui gli operai eseguono manualmente il fissaggio.

Il main pallet così costituito prosegue fino alla sottoscocca e le meccaniche vengono fissate e imbullonate alla vettura. Questa è l'operazione più importante dell'intero ciclo di montaggio.

Dopo la "carrozzatura" il veicolo entra nel tratto di linea Chassis-2 in cui si completano la sottoscocca e le parti funzionali del veicolo, prima dell'inserimento finale dei fluidi; inoltre, vengono inseriti il modulo frontale, contenente il radiatore, e il tappeto interno del veicolo.

Tra il secondo e il terzo tratto di Chassis ci sono le postazioni di glazing, in cui vengono applicati i cristalli e di filling, in cui vengono inseriti i fluidi. La posizione del tratto di linea di glazing non è vincolata all'interno del macrociclo poiché l'unica necessità è poter garantire la posizione dei cristalli incollati.

L'incollaggio avviene attraverso l'utilizzo di robot antropomorfi in grado di prelevare i cristalli, tramite un sistema di tenuta pneumatico avanzato e uno visivo per appoggiarli sulla sede prestabilita. Durante questa fase un secondo robot si occupa della deposizione del materiale adesivo che garantisca la tenuta tra due superfici con caratteristiche differenti.

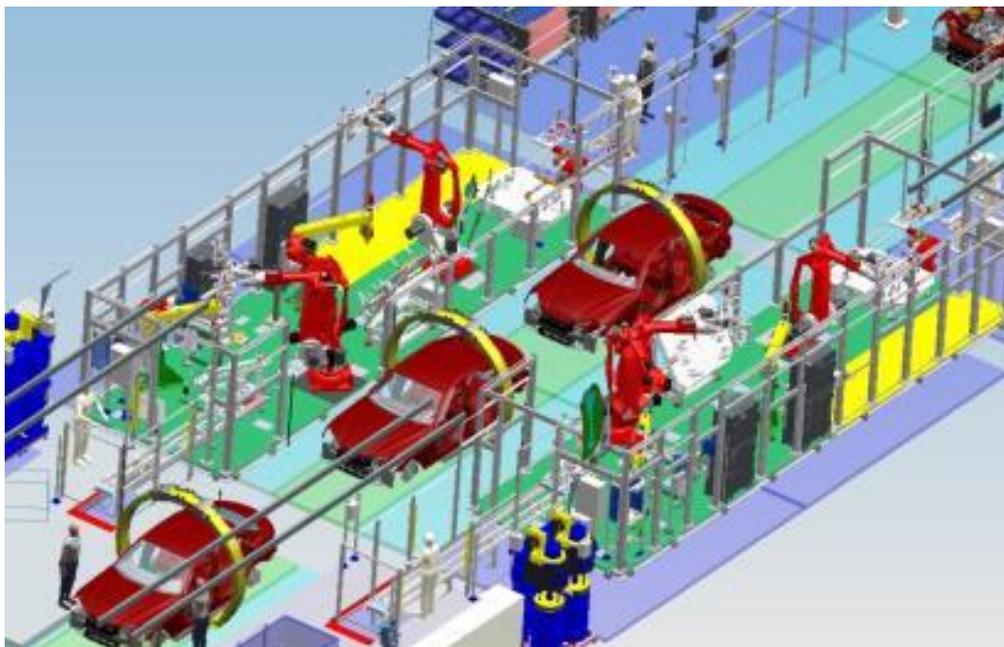


Figura 31 - Tratto di linea di glazing

Nel tratto di linea di filling, invece, si eseguono le erogazioni dei fluidi sul veicolo. Questo tratto può essere traslato all'interno della linea, a patto che, i serbatoi da riempire siano assemblati prima che venga effettuata l'erogazione.

Per quest'operazione è necessaria la presenza della batteria 12V installata e collegata. Infatti, l'installazione della batteria avviene proprio all'inizio di questo tratto e solo successivamente verranno inseriti l'olio dell'impianto idraulico frenante, il refrigerante, l'acqua utile ai tergicristalli, il carburante e l'olio motore.

L'ultimo tratto è quello denominato Chassis-3 ed è l'ultima zona in cui la vettura è movimentata senza la presenza delle proprie ruote. In questa area si eseguono le ultime attività sulla parte bassa della scocca e vengono montati i fari anteriori e il paraurti anteriore. Infine, si provvede al montaggio delle ruote, come mostrato in figura 32, così da poter appoggiare a terra il veicolo dato che tutte le operazioni nella sottoscocca sono state concluse.

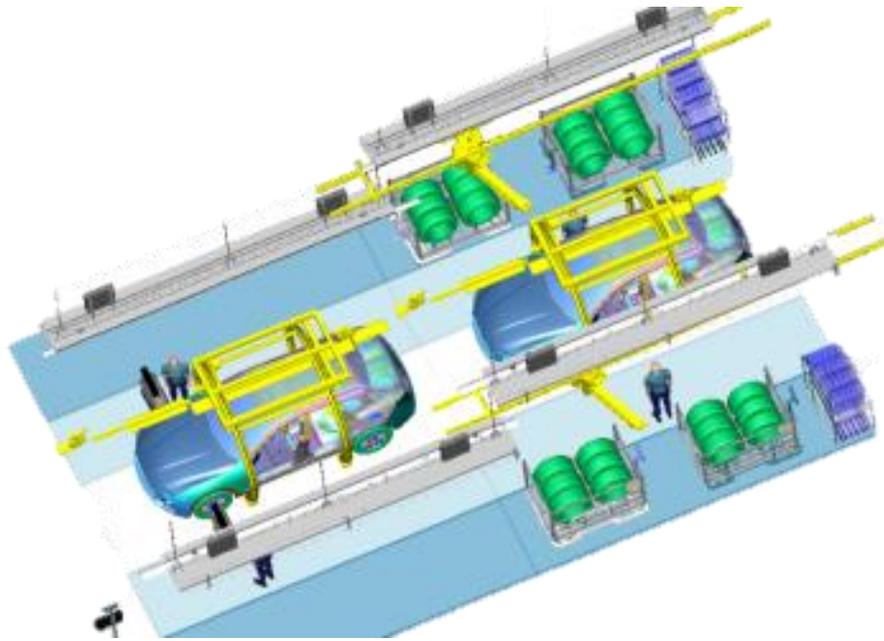


Figura 32 - Assemblaggio del paraurti e delle ruote in Chassis-3

3.1.3 Tratto di linea Final

L'ultimo tratto di linea dove si applicano i componenti finali del veicolo è il tratto Final.

Tale tratto è la parte terminale dove si completa e si comincia a collaudare la vettura. La scocca viene liberata dai ganci e poggia per la prima volta le ruote a terra. Infatti, la movimentazione è garantita dal sistema a tapparella scorrevole.

Gli ultimi componenti installati in questo tratto sono la console centrale, i sedili e, per ultime, le porte che, dopo essere state smontate ad inizio ciclo, vengono completate con i particolari necessari lungo una linea parallela.

Dal tratto di linea Final esce la vettura completa che, prima di essere assegnata, deve essere sottoposta a numerose verifiche e prove di delibera.

In questo tratto, definito End of Line (EoL) vengono effettuate le seguenti prove e collaudi:

- Convergenza;
- Controllo del sistema elettrico;
- Test dinamici (coppia e potenza);
- Verifica di frenata;
- Verifica a rollio;
- Verifica di tenuta dell'acqua;
- Delibera estetica.

Una volta collaudato, il veicolo viene assegnato e dato in carico alla logistica.

Alla linea principale, descritta precedentemente, le linee secondarie necessarie alla preparazione di sottogruppi complessi sono principalmente:

- Plancia;
- Gruppi meccanici anteriori e posteriori (G.O.M.A. e G.O.M.P.);
- Traverse anteriori e posteriori;
- Unione motore e cambio (area Powertrain).

Infine, potrebbe essere applicata una protezione sul corpo vettura per un successivo immagazzinamento o una spedizione.

Durante tutte le fasi, vi sono aree di convalida (test di delibera) tra una stazione e quella successiva, dove vengono effettuati controlli accurati per trovare e risolvere eventuali difetti creati o non identificati nelle stazioni precedenti; ciò è di vitale importanza poiché l'entità di un difetto aumenta con il progredire del flusso produttivo, oltre al fatto che alcuni difetti potrebbero essere visibili solamente in una determinata fase, risultando invisibili in quelle successive.

L'intero processo è estremamente standardizzato tanto che, se si confrontano le linee di assemblaggio di varie case automobilistiche, le differenze sono minime e impercettibili ad un occhio poco esperto. L'introduzione dei veicoli elettrici ha costretto i produttori ad intervenire su questi processi in modo più o meno importante. Bisogna, infatti, considerare alcuni casi diversi che si possono presentare. Se si analizzano i veicoli elettrici presenti sul mercato, al momento sono tre le strade intraprese dai produttori. In figura 33 sono state schematizzate le strategie dei differenti produttori in base alla scelta di progettazione di piattaforma e progetto.

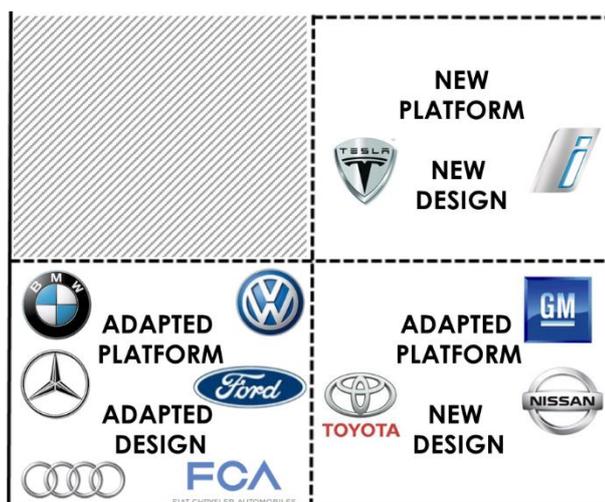


Figura 33 - Casi di sviluppo di piattaforma e progetto sui veicoli sul mercato

Tesla e BMW, con la linea dedicata, hanno sviluppato i loro veicoli BEV progettando sia il veicolo che la piattaforma ex novo. Questa è la strada più probabile per lo sviluppo dei veicoli completamente elettrici poiché garantisce maggiore flessibilità in fase di progettazione. In questo caso la linea di assemblaggio è riprogettata completamente permettendo di portare al minimo i vincoli in fase di definizione del ciclo.

Tuttavia, la gran parte dei veicoli, per lo più ibridi, è stata sviluppata partendo da modelli già esistenti o comunque adattando piattaforme sviluppate per veicoli a combustione interna. In figura 34 si possono notare le modifiche tra le architetture progettate per un veicolo ICE e per uno BEV.

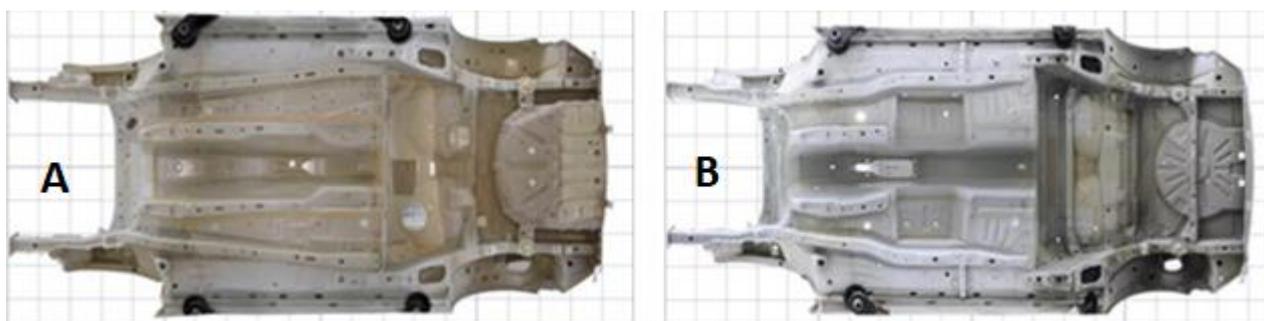


Figura 34 - A) Architettura VW Golf B) Architettura VW eGolf

È facile intuire che, utilizzare una piattaforma o un modello già esistente, coincide quasi sempre con la necessità di produrre la variante elettrificata sulla stessa linea di quella prevista per una trazione termica. Una logica di questo tipo si attua al fine di minimizzare i costi e si parla di progetto “brown field” mentre, quando la progettazione è svolta al fine di massimizzare l’efficienza impiantistica, si parla di progetto “green field” in cui si parte da una cubatura allestibile da zero.

La definizione del ciclo di produzione, quindi, deve garantire l’assemblaggio di due veicoli molto diversi nel caso di veicolo elettrico a batteria (BEV), mentre nel caso di veicoli ibridi devono essere considerate le operazioni aggiuntive che sono necessarie ad implementare i componenti elettrici a quelli tradizionali.

L’analisi delle attività che maggiormente impattano sulla linea è stata fatta, perciò, considerando la necessità di assemblare un veicolo BEV su una linea già esistente (“brown field”) adibita precedentemente per la produzione di un veicolo a trazione termica.

3.2 La fase di assemblaggio per un veicolo elettrico a batteria

Per definire l'impatto di un veicolo elettrico a batteria (BEV) sulla linea di assemblaggio sono state fatte alcune assunzioni iniziali. Innanzitutto, i componenti specifici come motore elettrico e pacco batteria sono considerati componenti già completi, tralasciando le eventuali linee di assemblaggio specifiche. Inoltre, prendendo come riferimento l'introduzione della versione BEV, utilizzando il più possibile la vecchia linea adibita per un veicolo ICE, si è cercato di integrare il processo già esistente. Quindi, l'analisi è stata svolta valutando un "brown field".

Il primo tratto di linea che subisce delle modifiche sostanziali risulta essere la Trim.

Con l'introduzione di un veicolo elettrico è necessario aggiungere, eliminare e modificare delle operazioni. La prima operazione impattante risulta essere il montaggio del charge port e, in seguito, la predisposizione del cablaggio specifico per l'alto voltaggio (HV). Questa operazione può sembrare banale, ma in realtà, influenza pesantemente tutte le operazioni successive relative alla sottoscocca.

I cavi HV (di colore arancione) hanno diametri non trascurabili e una rigidità piuttosto elevata. Una predisposizione errata comporterebbe interferenze con i successivi montaggi, difficilmente sanabili lungo la linea.

Bisogna predisporre durante questa fase anche i cablaggi che dalla parte frontale collegheranno la batteria al propulsore, la centralina dedicata alla gestione del pacco batteria e il Battery Management System (BMS) se non incorporato nel pacco.

Nel primo tratto della linea Chassis-1 il veicolo è movimentato tramite ganci girevoli, ma sostanzialmente le attività da svolgere sono nettamente inferiori rispetto ad un veicolo ICE. Non avendo più tubi addetti al combustibile, bocchettoni e filtri, le uniche attività da svolgere riguardano la predisposizione dei tubi di raffreddamento del pacco batteria e del motore. In figura 35 sono state inserite in arancione le attività emergenti per una linea BEV rispetto ad una ICE; inoltre, nella stessa figura sono riportate le nuove quote, misurate a partire dal terreno in millimetri, necessarie per lo svolgimento di tali operazioni. Queste altezze sono sostanzialmente identiche rispetto a quelle fissate per la linea ICE pur dovendo prevedere operazioni differenti.

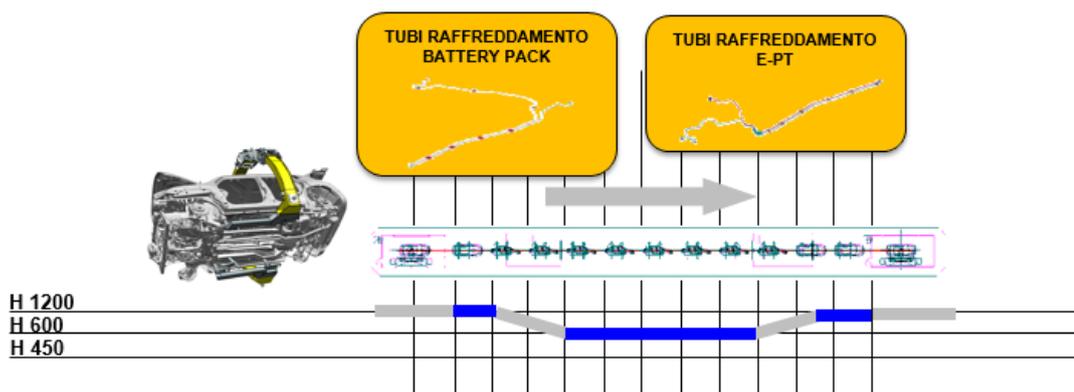


Figura 35 - Attività emergenti in Chassis-1

Seguendo lo schema descritto in precedenza, si arriva alla fase di decking dove, come descritto precedentemente, vengono montate le meccaniche. Questo è il tratto di linea che, per motivi evidenti, subisce maggiormente l'impatto dell'elettrificazione. Ciò non riguarda solo la parte di linea principale, ma, soprattutto, le linee parallele di preparazione delle stesse meccaniche. Non essendo più necessaria una trasmissione che gestisca i rapporti di trasmissione più adatti, grazie all'utilizzo dell'inverter che riesce a gestire la coppia ottimamente, non è più prevista una linea apposita per l'unione di motore e cambio. Il propulsore elettrico è montato direttamente sulla traversa (anteriore, posteriore o entrambe nel caso di doppio motore e trazione integrale), quindi, a seconda dei casi, la traversa dovrà essere modificata (figura 36) e la linea di assemblaggio dovrà prevedere le operazioni di installazione del motore.

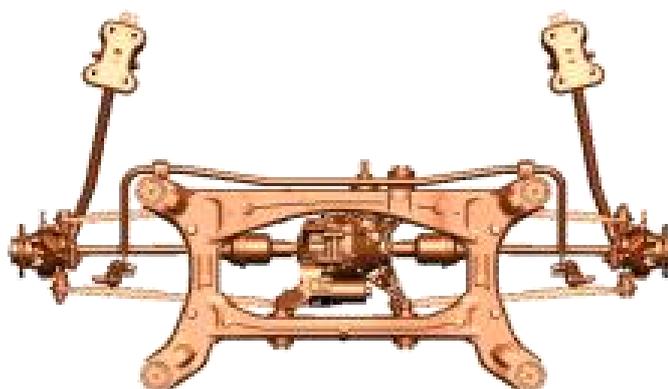


Figura 36 - Traversa modificata per alloggiare il motore elettrico

La nuova sub-linea presenta un'altezza rispetto il suolo di 1200 mm costante lungo tutto il tratto: ciò è garantito per permettere all'operatore di lavorare rispettando le normative ergonomiche.

Analizzando le vetture elettriche presenti sul mercato, si vede che il gruppo motore e inverter è collocato nella parte anteriore del veicolo per sfruttare lo spazio nel vano motore. Si può pensare, perciò, di utilizzare la linea di montaggio del motore per l'assemblaggio di questi componenti in un unico sistema da montare successivamente sul veicolo. In figura 37 è mostrato il sistema e-PT (motore e inverter) di un modello Nissan prima di essere montato su vettura.

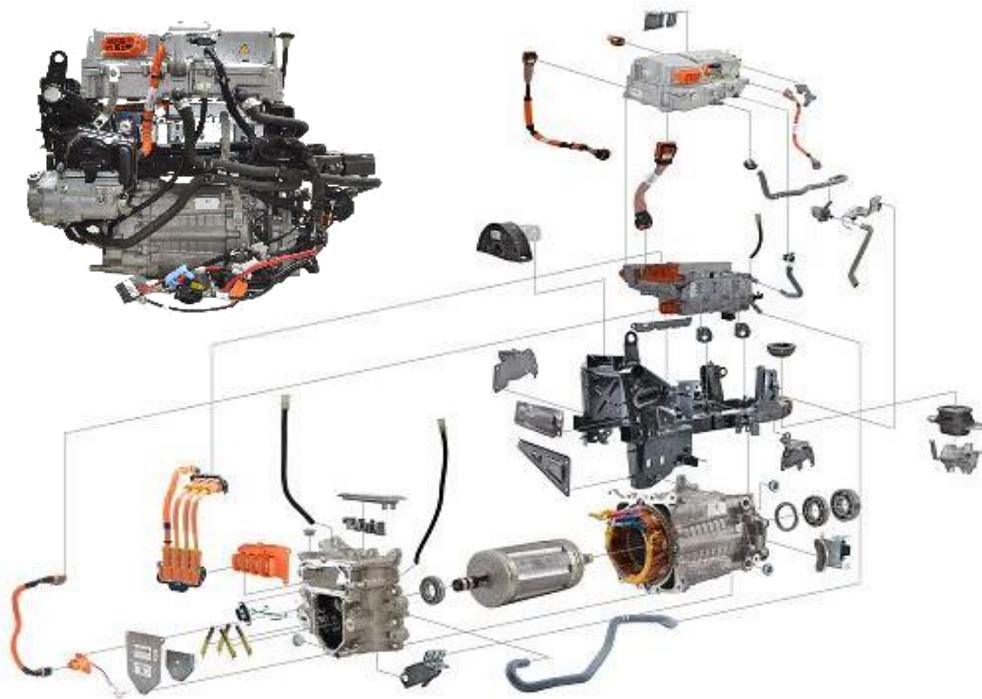


Figura 37 - Sistema e-PT Nissan

In questo tratto vengono, inoltre, predisposti i test di delibera da effettuare sui singoli componenti ad alto voltaggio.

Il componente critico rimane, comunque, il pacco batteria sia per le dimensioni che per il peso. Confrontando i differenti produttori di autoveicoli si può constatare un approccio variegato a tale problematica. L'assemblaggio della batteria sul veicolo viene effettuato, principalmente, tramite:

- Sistemi automatici;
- Sistemi semi-automatici;
- Manipolatori.

L'assemblaggio batteria con sistemi automatici avviene attraverso AGV quando la posizione della batteria sul veicolo si trova nella sottoscocca, oppure tramite sistemi di movimentazione e posizionamento automatici (nastri trasportatori) quando la batteria si trova a dover essere

installata sull'autotelaio. Gli AGV utilizzati per l'assemblaggio batteria sono dotati di ripiano di trasporto per poter sollevare la batteria a livello del veicolo e di avvitatori per il suo fissaggio. Anche l'assemblaggio con sistemi semi-automatici vede la presenza di AGV e degli apparati sopra menzionati. È prevista, tuttavia, la presenza di operatori per il posizionamento della batteria sul veicolo e per le operazioni di avvitatura con apposita strumentazione. Un esempio di sistema semi-automatico è mostrato in figura 38 in cui l'operatore controlla e gestisce il corretto posizionamento del componente.



Figura 38 - Assemblaggio semi-automatico del pacco batteria

Invece, nell'assemblaggio con manipolatori la presenza umana è preponderante: gli operatori conducono, con opportuni strumenti, la batteria sul veicolo, le avvitature ed il collegamento dei cablaggi sono completamente manuali.



Figura 39 - Assemblaggio manuale del pacco batteria

In tabella 2 sotto riportata sono state inserite le informazioni riguardo modalità e mezzi di assemblaggio dei pacchi batteria adottati dai principali costruttori di autovetture elettriche a batteria.

Le linee progettate appositamente per la produzione del veicolo elettrico presentano una maggiore automazione per quanto riguarda l'assemblaggio del pacco batteria; tuttavia, la scelta del livello di automazione generale dell'impianto produttivo dipende principalmente da altri fattori (volumi di produzione, costo orario della manodopera).

Veicolo	Movimentazione/Assemblaggio	Avvitature
BMW i3	Sollevatore teleguidato	Manuali
BMW i8	Paranco teleguidato	Manuali
Ford Focus	Manipolatori	Manuali
Kia Soul	Linea automatica	Automatiche
Nissan Leaf	AGV	Automatiche
Renault Zoe	AGV	Automatiche
Smart Fortwo	Carrello elettrico su binari	Manuali
Tesla Model S	AGV	Manuali

Tabella 2 - Confronto tra le principali linee produttive per la produzione di veicoli elettrici a batteria

3.2.1 La fase di decking per un veicolo elettrico a batteria

Avendo ipotizzato di utilizzare una linea già progettata per l'assemblaggio di veicoli ICE, si è cercato di mantenere l'impostazione tradizionale della linea di decking. In questo caso la modifica progettuale impatta interamente il main pallet, o meglio, le tre parti di cui è composto. In figura 40 è visibile il main pallet di un veicolo tradizionale.

Questo è formato da tre sub-pallet: G.O.M.A. (gruppo organi meccanici anteriori), G.O.M.P. (gruppo organi meccanici posteriori) e parte centrale. Nel caso di assemblaggio di un veicolo BEV tutti e tre i sub pallet subiscono delle modifiche andando a modificare integralmente quello principale. Il G.O.M.A. non subisce grosse modifiche a livello di forma e la traversa anteriore, opportunamente progettata, dovrà ospitare il propulsore elettrico; il G.O.M.P., invece, viene ridotto sensibilmente (in figura la modifica è indicata con una linea rossa tratteggiata) poiché viene rimosso lo spazio dedicato al serbatoio del carburante. Tuttavia, questo spazio recuperato viene utilizzato dalla parte centrale del pallet, che cresce di dimensione per poter ospitare il pacco batteria di notevole ingombro (la linea viola tratteggiata indica lo spazio utilizzato dalla nuova parte centrale).



Figura 40 - Main pallet modificato per il veicolo BEV

Con queste modifiche il flusso attraverso il tratto di linea di decking deve essere riprogettato. Come prima operazione viene adagiato sul pallet il G.O.M.A. è ciò non comporta una differenza considerevole rispetto al flusso dell'ICE; successivamente, l'operazione che impatta maggiormente è il posizionamento del pacco batteria. Dopo quest'ultimo è necessaria la stesura dei cavi dell'alto voltaggio di collegamento tra la batteria e gli utilizzatori e l'intero sistema di refrigerazione.

L'ultima operazione è rappresentata dalla predisposizione dei fissaggi e dal caricamento del G.O.M.P.; il main pallet così composto risulta concluso.

Una volta predisposto il main pallet viene effettuato il marriage, che dovrà essere completato con l'avvitatura del pacco batteria alla scocca. L'operazione di marriage non si scosta notevolmente da quella progettata per un veicolo ICE; la vera e propria fase impattante risulta l'assemblaggio del main pallet.

Nel tratto di linea Chassis-2 non ci sono grandi variazioni rispetto all'assemblaggio di un veicolo a combustione interna. L'unica attività rilevante è il montaggio, durante il fissaggio del modulo frontale, dello speaker di allerta pedone, obbligatorio sui veicoli elettrici, in modo da generare un avviso sonoro durante la marcia del veicolo.

Questo componente, Audible Vehicle Alert System (AVAS), è stato reso obbligatorio dal 1° luglio 2019 e prevede che le auto elettriche debbano emettere un suono artificiale di minimo 56 decibel quando il veicolo procede sotto i 20 km/h.

Durante il tratto di Chassis-3, invece, devono essere svolte attività di elevata importanza, prima che il veicolo lasci i ganci girevoli.

Per prima cosa deve essere installata la batteria da 12 V, di fondamentale importanza anche per i veicoli elettrici.

Successivamente vengono effettuati i seguenti collegamenti:

- Fissaggio delle masse;
- Connessione charge port e inverter;
- Connessione motore e batteria;
- Connessione inverter e batteria;
- Collegamenti elettrici della centralina controllo motore;
- Connessione tra rete basso voltaggio (LV) e rete alto voltaggio (HV).

Infine, vengono montati i ripari della batteria che rendono inaccessibile la sottoscocca.

Il tratto di linea Final non subisce grandi variazioni, poiché riguarda l'installazione di finiture, mentre la zona di test, End of Line, vede l'implementazione di una serie di test specifici che si aggiungono a quelli già presenti che, sicuramente, hanno un impatto sul tempo ciclo.

In figura 41 è stato schematizzato l'intero processo. I blocchi con sfondo bianco rappresentano le attività comuni ai veicoli ICE e BEV con una valutazione dell'impatto di eventuali modifiche agli attrezzamenti, i blocchi con sfondo verde rappresentano le attività specifiche dell'elettrificazione, mentre quelli rossi le attività specifiche dei veicoli a combustione, eliminabili in caso di linea specifica BEV.

Come si può notare, la necessità di sdoppiare le operazioni si ha solo nella parte delle meccaniche, con la linea di preparazione del pallet che si complica leggermente. La seconda attività che può impattare pesantemente sul tempo di attraversamento è la mappatura (più correntemente flash) delle varie centraline, perciò questa deve essere programmata in modo parallelo per non penalizzare in modo eccessivo il ciclo.

I blocchi con sfondo bianco e riquadri di colore rosso tratteggiato rappresentano le operazioni comuni al ciclo ICE e BEV, ma vengono pesantemente modificati nel caso di produzione di veicolo elettrico. Invece, i blocchi con riquadro giallo tratteggiato subiscono un impatto leggero.

Un esempio di blocco d'operazione che subisce una leggera modifica è l'installazione della plancia a causa della predisposizione dei cavi per l'alto voltaggio, mentre, l'operazione di riempimento dei liquidi (filling) viene modificata profondamente non dovendo più prevedere il riempimento del serbatoio di combustibile e dell'olio motore.

Nel caso di linea promiscua, ovvero una produzione di veicoli differenti come nel caso di ICE e BEV, si devono considerare tutti i blocchi e ciò può condurre ad una linea di notevole lunghezza.

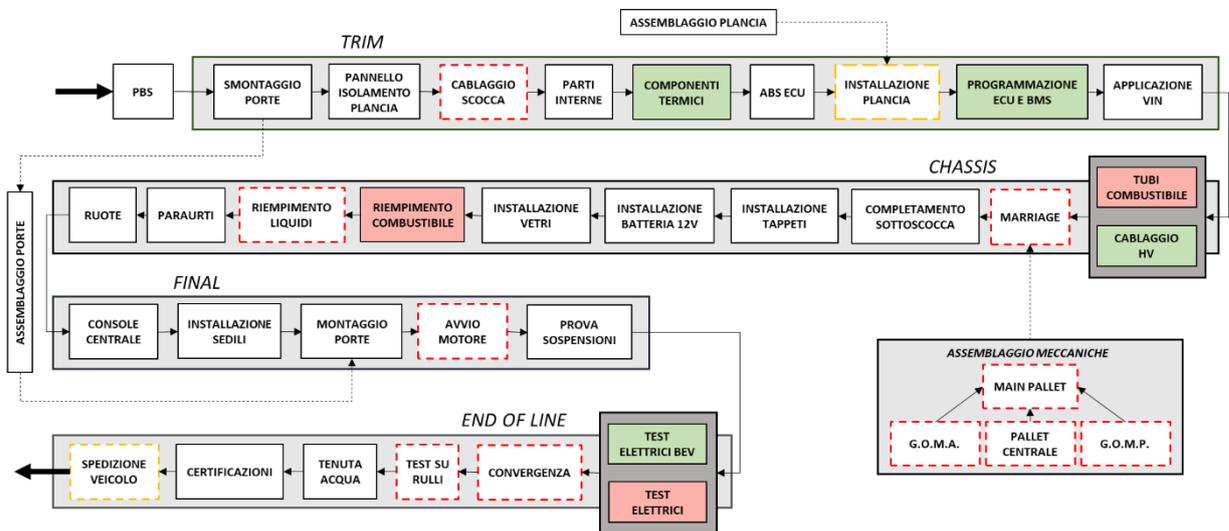


Figura 41 - Schema a blocchi della fase di assemblaggio

3.2.2 Le prove di delibera

I veicoli elettrici hanno un impatto rilevante sulle prove di delibera dell'autoveicolo.

Per prova di delibera si intende il processo di validazione di determinati processi durante le diverse fasi di sviluppo attraverso la gestione di protocolli specifici.

Le fasi di controllo sono relative a tutte le unità operative come lo stampaggio, la lastratura, la verniciatura e l'assemblaggio.

All'interno di ogni fase del processo di produzione del veicolo sono definiti i "tratti" in corrispondenza dei quali si effettuano le prove di delibera al 100%, previsti a control plan, che attestano la conformità del prodotto ai requisiti richiesti, per autorizzarne il passaggio alla successiva fase del processo produttivo. Nel caso di processo non conforme, rilevato dall'unità produttiva o dalla qualità, si opera secondo una norma che spiega le linee guida da attuare per contenere il difetto ed eliminarne le cause origine.

Oltre ai controlli di delibera al 100%, durante il processo di produzione sono impostati controlli statistici, stabiliti secondo criteri tecnologici, mirati a controllare le prestazioni del processo con riferimento alle caratteristiche soggette a vincoli legislativi oppure a caratteristiche significative in ottica cliente.

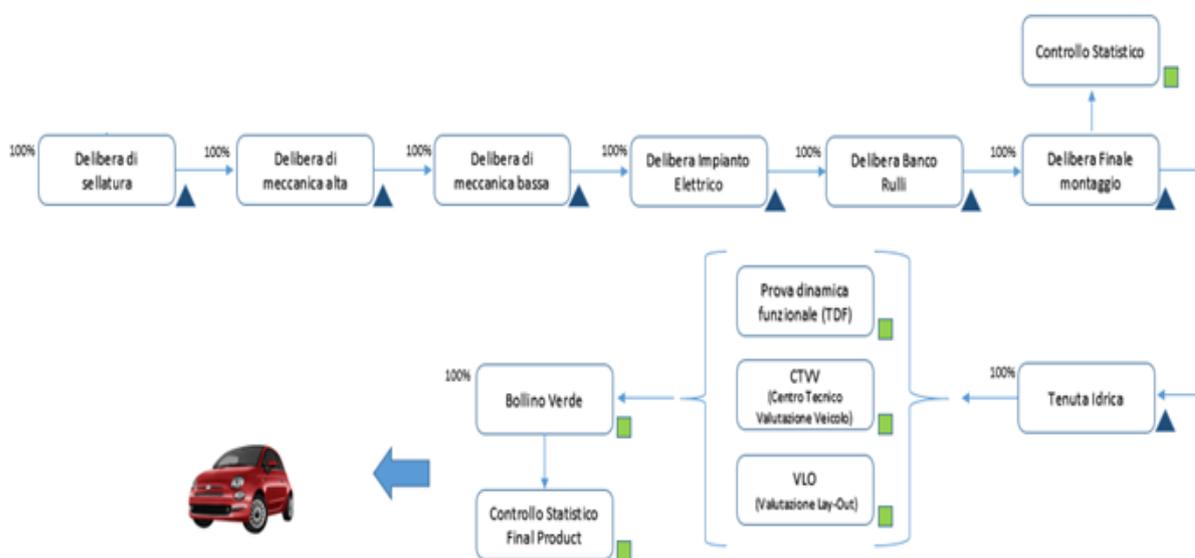


Figura 42 - Schema delle fasi di delibera e controllo statistico del processo di assemblaggio

Tutti gli esiti dei controlli sono registrati su modulistica cartacea oppure su sistema informatico ed in particolare sono registrati sulla scheda di raccolta dei dati di qualità. Colui che esegue il controllo ha anche la responsabilità dell'archiviazione delle registrazioni ottenute.

Il prodotto all'uscita di ogni fase di lavorazione subisce un controllo statistico di qualità, nel quale vengono valutate le conformità in funzione alle norme interne di processo.

Facendo un focus sulla linea di assemblaggio, in figura 42, e come prescritto a control plan gli stadi di delibera sono i seguenti:

- La delibera di sellatura prevede un controllo al 100% degli interni vettura per verificare la conformità degli standard qualitativi;
- La delibera di meccanica alta e bassa regola un controllo al 100% della meccanica sottoscocca per verificare la rispondenza agli standard qualitativi e la conformità del prodotto ai requisiti richiesti;
- La delibera dell'impianto elettrico prescrive un controllo al 100% della conformità dell'impianto elettrico attraverso la misura e la verifica degli assorbimenti di corrente valutando le curve caratteristiche di assorbimento;
- La delibera su banco a rulli prevede un controllo al 100% della funzionalità dell'autovettura a motore acceso per verificare la conformità degli standard qualitativi;
- La delibera finale di montaggio prescrive un controllo al 100% dell'autovettura verifica che vengano rispettati gli standard qualitativi;
- La delibera di tenuta idrica prevede una verifica al 100% dell'assenza d'infiltrazioni di acqua all'interno del veicolo;
- I controlli statistici per la ricerca, in ottica cliente, di difettosità estetiche e funzionali su vetture dopo la delibera finale di montaggio. Questi controlli statistici sono i seguenti:
 - Il Test Dinamico Funzionale (TDF) prevede una prova dinamica, in una determinata percentuale, della vettura al fine di verificarne il corretto funzionamento su strada;
 - Il Complete Technical Vehicle Validation (CTVV) prevede dei controlli statistici per la ricerca della conformità, con verifica strumentale, ai requisiti omologativi e di sicurezza delle vetture pronte per la spedizione;
 - La Valutazione Lay-Out (VLO) prevede controlli statistici per la ricerca di non conformità del layout del vano motore e della sottoscocca su vetture pronte per una successiva spedizione.
- Il bollino verde prevede una verifica al 100% della conformità del veicolo finito ai requisiti estetici, funzionali statici e di allestimento richiesti dal cliente.

Queste procedure di delibera e test qualità sono standard per un veicolo a combustione interna. Nel momento in cui si intende inserire la produzione di un veicolo elettrico, è necessario capire

le nuove esigenze della linea di assemblaggio in termini di procedure di delibera, dovute ai componenti che necessitano di alcuni test prima di poter essere montati, ed altri dopo il loro montaggio su vettura.

I componenti elettrici prima di poter essere montati sul veicolo necessitano di alcuni test per verificarne il corretto funzionamento. Il motore elettrico, il pacco batteria e la scocca necessitano di una verifica che permetta di misurare la resistenza di isolamento, denominato Insulation Test.

Questo test è uno dei parametri il cui valore deve risultare al di sopra di una certa soglia, stabilita dalle normative di sicurezza elettriche. Questi parametri sono riferiti a tutte le apparecchiature e dispositivi elettrici costruiti con un isolamento in classe 1, ovvero tutti gli apparecchi che presentano una misura di protezione supplementare costituita dalla connessione tra le parti conduttrici accessibili e un conduttore di protezione (messa a terra di sicurezza) in modo che, in caso di guasto dell'isolamento principale, le parti conduttrici non possano andare in tensione. La resistenza di isolamento serve ad accettare che vi sia un adeguato isolamento tra i due poli del sistema e le parti metalliche (telaio), accessibili all'utilizzatore. La procedura consiste nell'applicare una tensione continua di circa 500 V e rilevare dopo 60 secondi, tramite un megohmetro, il valore di resistenza che deve essere superiore a 2 Mohm.

Questo è un test che viene effettuato quando i componenti elettrici non sono ancora montati sul veicolo. Tuttavia, è necessario predisporre i test sulla vettura da effettuare dopo la fase di decking e, soprattutto, quelli in End of Line (EoL).

Risulta di fondamentale importanza capire l'integrità ed il corretto funzionamento del pacco batteria prima ancora di essere montato sul veicolo, e nel caso di esito negativo della prova, è necessario condurre il componente in un'area di quarantena dedicata, che permetta di effettuare ulteriori analisi da parte di operatori specializzati.

Prima di giungere in End of Line, devono essere effettuati alcuni test sul veicolo:

- Il Filling Test controlla il riempimento dei fluidi; non vi è alcuna differenza tra il test riservato ad un veicolo ICE piuttosto che ad un BEV, con l'unica differenza che nel caso di propulsione elettrica a batteria non sarà presente il combustibile liquido;
- L'Insulation Test si differenzia rispetto a quello effettuato sui singoli componenti e viene effettuato su tutta la rete attraverso la presa OBD (On-Board Diagnostics) per circa 50 secondi una volta montati tutti i componenti ad alto voltaggio.

In seguito al test di isolamento, una volta installati e collegati tutti i componenti ad alto voltaggio, si procede con la mappatura, o flash, di tutte le centraline presenti sul veicolo.

Con il termine flash si intende la revisione di tutti i parametri originali della centralina, apportando determinate correzioni laddove si notino vuoti o irregolarità presenti sin dalla nascita della centralina stessa.

In generale, una centralina è un dispositivo per la gestione elettronica del veicolo che controlla alimentazione, accensione e distribuzione in base ad una serie di parametri rilevati con appositi sensori. Tra questi, per un veicolo ICE, troviamo: la temperatura motore, la velocità del veicolo, la fase, la pressione dell'aria nei condotti di aspirazione, la temperatura dell'aria aspirata e i giri del motore.

È evidente l'importanza di questi dispositivi, e la complessità delle informazioni che devono gestire. Ovviamente la complessità di un veicolo ICE rispetto ad un veicolo elettrico è differente: come architettura il secondo è decisamente più semplice, ma il numero di centraline aumenta per permettere la gestione di tutti i componenti elettronici. Il maggior impatto sulla linea di assemblaggio si traduce in un aumento del tempo ciclo di lavorazione per permettere il flash delle centraline aggiuntive.

Per cercare di quantificare l'impatto sulla linea del montaggio, sono proposti i test necessari, eseguiti durante l'avanzamento della vettura:

- La diagnosi in Trim prevede una lettura e controllo delle centraline della plancia dell'intrattenimento (comune a tutte le tipologie);
- Il Tyre Pressure Monitoring System (TPMS) effettua un controllo della centralina che monitora la pressione degli pneumatici. Ha una grande importanza in termini di sicurezza alla guida, in quanto una pressione errata degli pneumatici può causare il prolungamento dello spazio di frenata e può avere una ripercussione sulla posizione del veicolo in fase di sterzata, comune al veicolo BEV;
- La diagnosi dei fluidi viene effettuata interfacciando la centralina ABS e controllando la programmazione della centralina del controllo motore; inoltre, viene programmata, controllata e deliberata la centralina del cambio (nel veicolo BEV non è presente un cambio meccanico, per cui la programmazione sarà semplificata e ciò si traduce in un recupero del tempo ciclo). Infine, viene verificato il livello di carburante nel caso si tratti di un veicolo a combustione interna;
- La diagnosi dell'impianto elettrico prevede un controllo e la successiva delibera di tutte le centraline, un collaudo dei sensori di parcheggio, degli specchi elettrici, del tetto apribile, dell'allarme e dell'assorbimento (nei veicoli elettrici il numero di componenti da verificare aumenta notevolmente).

A questo punto, il veicolo, dopo il tratto di glazing e filling, e dopo aver svolto i test di diagnosi descritti precedentemente, si trova alla fine della linea del montaggio, precisamente in Final. L'auto, una volta montate le ruote, necessita di ulteriori test per poter passare alla logistica e successivamente al piazzale:

- Test a rollo;
- Test statistici;
- Test di tenuta dell'acqua;
- Test di ricarica applicato al termine dei test di fine linea in cui è necessario portare il veicolo alla stazione di ricarica e aumentare del 7%, raggiungendo almeno il 35%, del State of Charge.

Mentre i primi tre sono già presenti per i veicoli a combustione interna, il test di ricarica è specifico per i veicoli elettrici che prevedono la ricarica esterna.

Il test sui rulli, nei veicoli elettrici, serve per effettuare le seguenti verifiche aggiuntive:

- Convalida dei dati di stato di carica e di temperatura provenienti dal Battery Pack Control Module (BPCM);
- Controllare eventuali guasti su BPCM e su On Board Charger Module (OBCM);
- Funzionamento frenata rigenerativa.

Dopo aver completato tutti i test in EoL, e in seguito alla verifica al 100% della conformità del veicolo finito nei requisiti estetici e funzionali, il veicolo ottiene il bollino verde ed è pronto per andare sui piazzali logistici e, successivamente, per essere consegnato al cliente.

Capitolo 4

Dal macrociclo ai cartellini operazione

Il ciclo di lavorazione è l'insieme di tutte le operazioni necessarie per poter realizzare un prodotto finito seguendo una sequenza logica. Con l'introduzione di un veicolo elettrico a batteria risulta necessario progettare e testare nuovamente l'insieme di tutte le operazioni.

La creazione del macrociclo rappresenta il cuore del progetto: in questa fase vengono create le operazioni che concorrono al montaggio del veicolo e, calcolati i relativi tempi, verranno definite stazioni necessarie e gli operatori utili al corretto funzionamento di ogni singola postazione, nonché la strumentazione adatta per ogni operazione, tutto in funzione del tempo ciclo.

L'ente incaricato della creazione del macrociclo è l'Advanced Manufacturing Engineering (AME), in particolare l'ente AME Process, che ha il compito di impostare il ciclo fondamentale al fine di giungere ad un corretto montaggio. In figura 43 sono mostrati i blocchi fondamentali tra la stesura del macrociclo e l'analisi di Occurrence and Release applicata alla fase di assemblaggio.

Solitamente, il ciclo prevede una linea Trim, una Chassis e una Final che insieme danno forma alla linea principale (TCF) su cui si movimenterà il veicolo da assemblare. La scelta della suddivisione in tre sotto linee è giustificata dal fatto che le operazioni svolte siano differenti rispetto agli altri tratti, come discusso nel capitolo precedente; per le linee di produzione a bassa cadenza questo tipo di ragionamento non viene considerato poiché il tempo ciclo è decisamente meno vincolante.

La stesura del macrociclo comporta la definizione delle stazioni di lavoro in un ordine preciso nelle quali sono previste delle specifiche operazioni. Raggruppando queste per operazioni simili, si giunge all'Unità Tecnologica Elementare (UTE) che è un dominio controllato da

figure presenti nello stabilimento (Team Leader, Supervisor, Shift Manager). Grazie alla suddivisione in più UTE si riesce ad avere un controllo rigoroso della fase di montaggio.

Dopo aver impostato le stazioni vengono allocate le matricole con le quali viene stabilito il luogo in cui montare il componente considerato: questa fase risulta comune in quanto le matricole indicano il montaggio del componente senza alcuna specifica.

In seguito alla fase di allocazione delle matricole e dell'analisi FMEA, in particolare la P-FMEA che valuta il processo, si compone il cartellino operazione (C.OP.) per ogni stazione.

Le operazioni sono descritte tramite i cartellini operazione nei quali vengono descritte le attività, i mezzi ed i numeri di disegno degli elementi che costituiscono il veicolo da documentare.

Ogni operazione è suddivisa in fasi; esse sono in pratica tante piccole istruzioni ordinate in sequenza e spiegano le modalità e gli attrezzi da utilizzare in modo corretto per poter montare un particolare.

I cartellini operazione devono tenere conto sia dei vincoli ergonomici dati dalla normativa vigente, sia del tempo ciclo.

Con la definizione del macrociclo, delle matricole e dei cartellini operazione è possibile assemblare una scocca, indentificata con il relativo codice, secondo le caratteristiche richieste dal cliente, le quali vengono inserite in linea tramite i numeri di disegno (part number).

Il numero di disegno indica il prodotto specifico da assemblare nella stazione in cui è stata allocata la matricola relativa al componente stesso. Infine, si applica l'analisi di Occurrence and Release (O&R) a ciascuna operazione descritta in ogni C.OP. per un eventuale miglioramento nel caso non fossero rispettati gli indici preventivati.

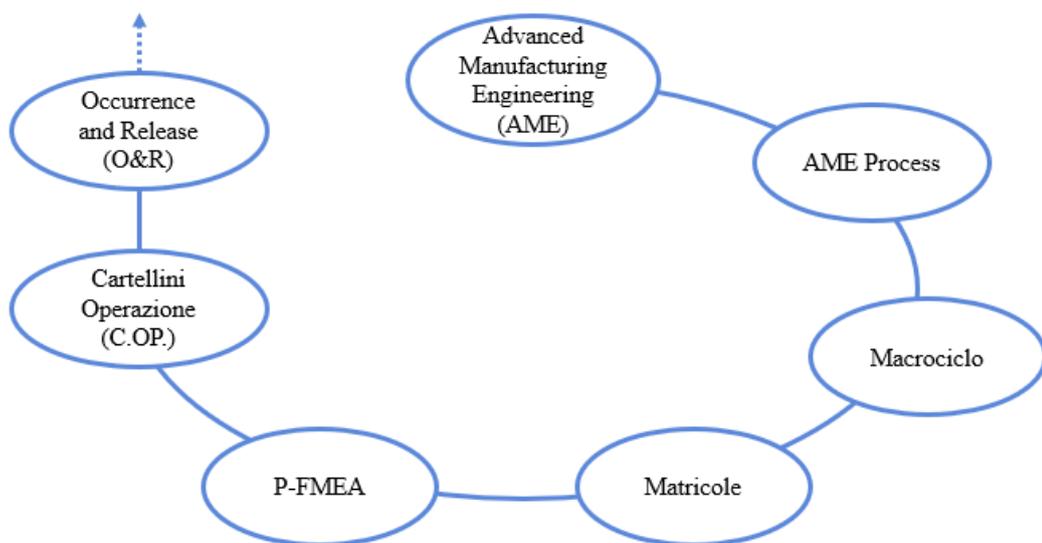


Figura 43 – Macro fasi antecedenti all'analisi O&R

4.1 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

L'analisi FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) è una metodologia utilizzata per analizzare le modalità di guasto o di difetto di un processo, prodotto o sistema. È il modo per migliorare la qualità dei prodotti e dei processi e puntare allo “zero difetti e zero guasti”. Viene applicata successivamente all'applicazione delle matricole e risulta fondamentale per una corretta progettazione dei cartellini operazione.

L'analisi dei modi e degli effetti dei guasti ed è una tecnica di analisi preventiva che aiuta la gestione di un qualunque prodotto o processo, permettendo:

- La ricerca di difetti e di potenziali problemi;
- La valutazione dei possibili effetti generati da tali difetti;
- La ricerca e l'identificazione nel processo delle cause possibili di ogni difetto.

La tecnica è applicabile a tutti i piani di studio di un nuovo prodotto e processo o ai piani di miglioramento di prodotti e processi già esistenti.

Le prime applicazioni dell'analisi FMEA sono state durante gli anni '60 nell'ambito delle missioni spaziali Apollo. Successivamente, dall'inizio degli anni '70, l'industria automobilistica americana e a seguire quella giapponese, hanno iniziato ad applicare questo metodo al fine di prevenire difetti ed evitare campagne di richiamo.

Negli anni '80 fu utilizzata dalla casa automobilistica Ford per ridurre i rischi dato che un modello di automobile presentava una problematica ripetitiva di rottura del serbatoio che causava incendi in caso di urti importanti. Nel settore automobilistico la FMEA è una delle metodologie portanti del Production Part Approval Process (PPAP). Il PPAP ha lo scopo di verificare che il processo produttivo del fornitore sia in grado di mantenere determinati requisiti, sia di prodotto che di processo, in una linea di produzione di serie.

Oggigiorno la FMEA è applicata in differenti settori manifatturieri per la sua dimostrata validità e applicabilità; i vantaggi derivanti dalla sua applicazione risultano elevati poiché è possibile:

- Individuare preventivamente i potenziali modi di guasto che possono verificarsi durante la produzione, la consegna o l'utilizzo del prodotto;
- Determinare le cause dei modi di guasto riferite sia al processo di progettazione che di produzione e consegna del prodotto;
- Valutare gli effetti dei modi di guasto al fine di soddisfare le esigenze del cliente;
- Quantificare gli indici di rischio e stabilire le priorità di intervento per eliminare alla radice le cause dei modi di guasto individuati e migliorare i sistemi di controllo;

- Identificare le opportune azioni preventive e valutarne l'impatto complessivo sugli indici di rischio.

L'applicazione sistematica e completa della metodologia FMEA consente anche di disporre di una mappatura sempre aggiornata del prodotto e delle criticità nei confronti del cliente, dei relativi modi di guasto e delle fasi del processo nella quali intervenire e migliorare i sistemi di controllo; inoltre, permette di documentare e storicizzare i miglioramenti attuati contribuendo alla costruzione di una memoria tecnica.

L'analisi FMEA permette due tipologie di applicazione:

- La FMEA di progetto (D-FMEA) viene utilizzata per evidenziare e correggere eventuali debolezze di progetto che possono generare guasti e malfunzionamenti in fase di impiego e applicazione del prodotto. È un approccio preventivo utilizzato per prodotti complessi e beni durevoli;
- La FMEA di processo (P-FMEA) viene utilizzata per evidenziare e correggere eventuali debolezze del sistema logistico-produttivo, che possono inficiare la qualità del prodotto. È un approccio correttivo utilizzato per prodotti semplici e di consumo.

Queste due applicazioni possono essere considerate complementari e permettono di sintetizzare tutte le valutazioni effettuate.

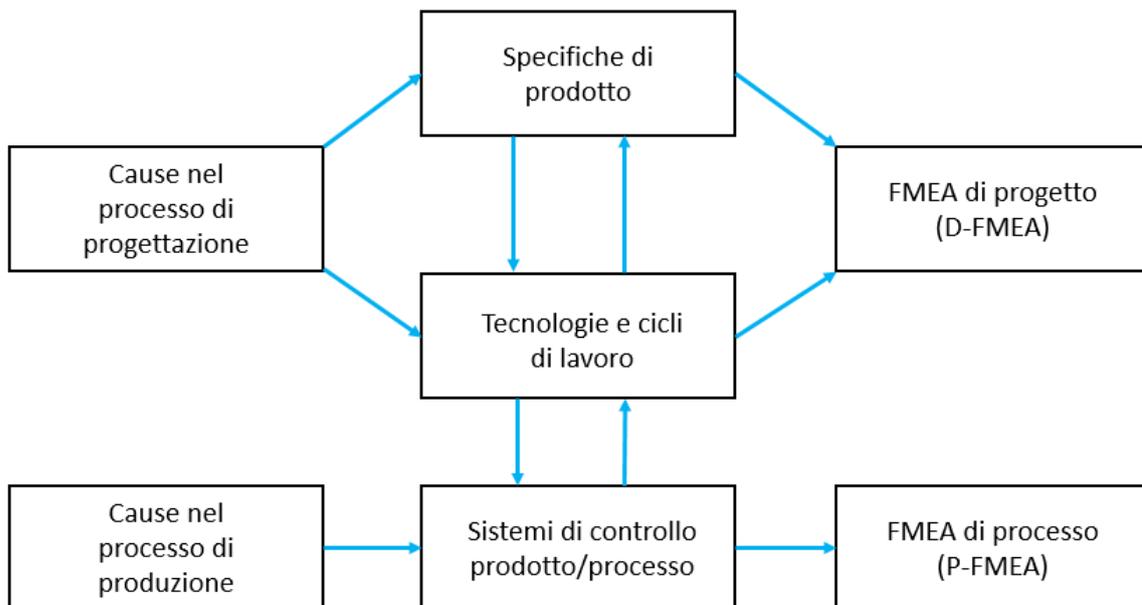


Figura 44 - Tipologie di analisi FMEA

4.1.1 Le fasi applicative della FMEA

La tecnica d'analisi può essere suddivisa in nove tappe fondamentali che conducono, grazie ad un controllo rigoroso, ad un miglioramento della produzione:

- Scomposizione dell'oggetto d'analisi in fasi nel caso di un processo o in componenti elementari nel caso di un prodotto;
- Identificazione delle risorse coinvolte (persone, materiali, attrezzature, informazioni);
- Ricerca dei potenziali difetti;
- Analisi quantitativa dei difetti rilevati e associazione degli indici di difettosità;
- Ricerca delle possibili cause, dei possibili effetti e della criticità di ogni difetto;
- Definizione di un piano di revisione che preveda una lista di azioni correttive ed un responsabile per ciascuna di esse;
- Attuazione e controllo delle azioni correttive;
- Nuova valutazione della criticità e ricalcolo degli indici;
- Aggiornamento del piano di sviluppo.

Per ciascun difetto effettivo o potenziale bisogna arrivare a stabilire le possibili cause che lo generino ed i possibili effetti che il difetto stesso possa indurre sul cliente.

L'analisi può essere condotta valutando prodotti similari inseriti mercato e il comportamento di processi simili già esistenti.

Può essere utile effettuare un'analisi comparativa con processi certificati secondo le norme UNI e ISO, come la valutazione dei rischi secondo la UNI EN 1050, con le migliori tecniche utilizzate nelle aziende di maggior successo.

I difetti sono valutati sulla base di tre indici di criticità mostrati in tabella 3.

Indice	Simbolo	Descrizione indice
Probabilità	P	Misura la probabilità che il difetto si manifesti per una determinata causa
Gravità	G	Misura la gravità del difetto sul processo
Rilevabilità	R	Probabilità che il difetto sia rilevato durante le fasi di validazione del progetto

Tabella 3 - Indici di criticità

Ognuna delle grandezze Probabilità, Gravità e Rilevabilità, deve essere espressa in una scala da 1 a 10 che esprime il valore massimo di tale suddivisione.

L'Indice di Criticità complessivo associato ad ogni singolo difetto, in questo caso indicato con la lettera C, è definito come la moltiplicazione tra i tre indici riportati in tabella 4:

$$C = P \times G \times R$$

Prima dell'esecuzione dei calcoli deve essere definito un limite numerico oltre il quale la criticità del difetto è tale da avviare azioni correttive. La criticità deve essere più bassa possibile per avere successo.

In linea di massima possiamo considerare:

- Ottimi valori tra 1 e 10;
- Discreti valori tra 10 e 100;
- Scarsi valori tra 100 e 1000.

Terminate le azioni correttive scaturite dall'analisi preliminare di cui al punto precedente, sui difetti critici viene effettuata una nuova valutazione dell'indice di criticità come già visto in precedenza, ovviamente al netto degli effetti delle azioni correttive introdotte. Se la criticità risultante dal nuovo calcolo dovesse essere ancora superiore al limite massimo ammesso, dovranno essere programmate ulteriori azioni correttive.

La seguente tabella 4 fornisce un'indicazione su come attribuire un valore al livello di probabilità che il difetto si manifesti (P).

Criterio	Valore	Frequenza
Difetto inesistente sui prodotti già realizzati ed utilizzati per funzioni analoghe	1	0,001%
Nessun incidente noto alla clientela	2	0,01%
Alcuni difetti esistenti su prodotti simili	3	0,05%
Pochi incidenti noti alla clientela	4	0,1%
Difetti apparsi occasionalmente su prodotti simili	5	0,2%
Qualche incidente noto alla clientela	6	0,5%
Difetti apparsi frequentemente su prodotti simili	7	1%
Numerosi incidenti conosciuti alla clientela	8	2%
Apparizione frequente del difetto	9	5%
Rischio di guasto con riparazione del prodotto	10	10%

Tabella 4 - Valori di probabilità assegnabili

Le esigenze di miglioramento dell'affidabilità dei prodotti e delle capacità qualitative dei processi rende sempre più necessaria l'applicazione di tecniche e metodologie efficaci ai fini di eliminare il più possibile a monte, in ottica preventiva, eventuali rischi e cause di difettosità del prodotto e anomalie nel processo. La FMEA è sicuramente tra gli strumenti più immediati ed efficaci in tal senso, in grado di integrare anche le conoscenze presenti in azienda, canalizzandole nell'azione di miglioramento.

4.2 Occurrence and Release (O&R)

L'analisi Occurrence and Release (O&R) è uno strumento che ha come obiettivo la riduzione della possibilità che un difetto si generi e/o lasci la postazione in cui si è eventualmente generato.

Questo studio viene applicato a tutte le operazioni descritte all'interno del cartellino operazione al fine di valutare preventivamente possibili criticità della linea. Più in particolare è attuata su tutti i processi di ciascuna unità e per ogni fase elementare di ogni postazione coinvolgendo l'intero team di UTE (team leader, supervisors, specialisti della qualità).

Le due voci presenti, sistemate opportunamente, generano una matrice: la voce Occurrence, inserita come riga nella matrice finale, indica la probabilità che il difetto venga generato nella postazione; la voce Release, introdotta come colonna, segnala la probabilità che il difetto lasci la postazione senza essere intercettato.

L'analisi O&R è finalizzata al miglioramento della capacità dei processi di non generare difetti e di bloccare gli eventuali difetti in uscita verso i processi successivi. Viene applicata in fase di definizione dei nuovi processi seguendo queste principali fasi:

- Identificare per tutte le postazioni e domini dell'unità operativa le operazioni elementari di ciascuna postazione;
- Per ciascuna operazione classificare i potenziali modi di difetto;
- Attribuire a ciascun modo di difetto la relativa classe di gravità;
- Attribuire per ciascun modo di difetto i relativi livelli di Occurrence e Release;
- Definire le azioni migliorative per abbassare i livelli di Occurrence e Release laddove i requisiti di robustezza non siano stati rispettati.

I difetti potenziali da considerare, denominati tecnicamente modi di difetto, sono fondamentalmente sei con i quali vengono valutate integralmente le possibili problematiche:

- Errato prelievo;
- Mancato prelievo o montaggio;
- Errato montaggio;
- Fissaggio non corretto o incompleto;
- Mancato fissaggio;
- Connessione eseguita non correttamente.

Ad ogni modo di difetto va associata una classe di gravità in virtù degli effetti sul cliente: gli impatti associati alla classe sono mostrati in tabella 5.

Con l'introduzione della componentistica elettrica è stata creata un'ulteriore classe (classe HV) legata alla pericolosità dell'elettrificazione; tuttavia, viene considerata come una classe AA con apposite limitazioni sui livelli delle voci.

Impatto	Classe
Sicurezza, Normativa, Omologazione	AA
Funzionalità, Rumorosità, Comfort	A
Estetica	B
Lavorabilità, Difetto non rilevabile dal cliente	C

Tabella 5 - Classi di gravità assegnabili

Questo studio è svolto in modo da assicurare la qualità del prodotto, stabilendo condizioni robuste in ogni fase di processo al fine di non generare e rilasciare difetti: per fare ciò viene utilizzato un sistema composto da due scale di misura differenti.

La prima scala fornisce una classificazione relativa al livello assegnabile alla voce Occurrence: la suddivisione è svolta fornendo quattro possibili livelli. Come mostrato in tabella 6, il livello 1 indica un'operazione in cui l'operatore non possa sbagliare; incrementando l'indice fino al valore 4 si può notare come l'attività descritta risulti difficilmente comprensibile sul cartellino operazione e si basi principalmente sull'abilità dell'operatore.

Occurrence	Livelli
L'operazione non può essere svolta in maniera errata poiché è reso impossibile dal processo o dalla progettazione	1
L'operatore è guidato in maniera attiva e dinamica nella corretta esecuzione del ciclo. Non è necessario avere una profonda conoscenza, abilità o elevati livelli di attenzione per eseguire correttamente il ciclo	2
La corretta esecuzione del ciclo si basa sulle abilità, sull'esperienza e sull'attenzione dell'operatore. Il cartellino operazione è chiaro e può essere seguito	3
La corretta esecuzione del ciclo si basa largamente sulle abilità, sull'esperienza e sull'attenzione dell'operatore. Il cartellino operazione non è chiaro o è difficilmente seguibile	4

Tabella 6 - Livelli di occorrenza

La seconda scala, invece, fornisce una graduatoria del livello legato alla voce Release. Come per l'Occurrence, vengono assegnati quattro livelli differenti.

Il livello 1, come mostrato in tabella 7, indica che il difetto non venga esportato alle stazioni successive grazie alla presenza di un blocco attivo (ad esempio un sensore ottico); incrementando il livello aumenta la probabilità che il difetto venga rilasciato fino ad un valore massimo, livello 4, per cui il difetto è di difficile identificazione e solo un'elevata esperienza

dell'operatore potrà sopperire tale problematica. Essendo difficilmente rilevabile ci sarà un'altissima probabilità che il difetto prosegua il suo cammino nelle stazioni successive.

Release	Livelli
Non è possibile esportare il difetto dalla stazione perché è presente un blocco attivo/dinamico	1
Nella stazione è presente un dispositivo che segnala all'operatore quando viene generato un difetto. È tuttavia compito dell'operatore reagire alla segnalazione	2
Un difetto prodotto durante l'operazione è possibile da identificare, ma dipende dall'esperienza dell'operatore e dal livello d'attenzione	3
Durante un'operazione manuale il difetto può essere identificato, ma è difficile farlo. Il rilascio del difetto dipende fortemente dalle abilità dell'operatore	4

Tabella 7 - Livelli di rilascio

L'Indice di Criticità associato ad ogni singolo difetto, come descritto precedentemente nell'analisi FMEA, è definito come la moltiplicazione tra i livelli della due voci (livelli di Occurrence, O, e Release, R):

$$C = O \times R$$

Prima dell'esecuzione dei calcoli deve essere definito un limite numerico oltre il quale la criticità del difetto è tale da avviare azioni correttive.

Come riportato in tabella 8, si calcola facilmente il limite numerico relativo ad ogni classe di gravità ed in particolare si può valutare che per la classe HV, regione evidenziata all'interno della matrice, il limite richiesto sia pari a 2. Avendo svolto un prodotto, per rientrare nella regione della matrice richiesta è possibile agire su tutti e due i livelli oppure solamente su uno specifico.

In fase di progettazione l'esperienza permette di comprendere in che modo agire a seconda del caso di studio proposto.

		Release			
		1	2	3	4
Occurrence	1	HV	HV	AA	A
	2	HV	A	B&C	
	3	AA	B&C		
	4	A			

Tabella 8 - Matrice degli indici di gravità

Un possibile metodo di soluzione dell'analisi risulta essere la ricerca di un "poka-yoke". Con questo termine giapponese, che letteralmente significa "a prova di errore", si identifica una scelta progettuale che permetta di compiere all'operatore una corretta esecuzione dell'attività. Tale metodo basa il suo successo sull'identificazione di un limite al modo in cui un'operazione possa essere compiuta. L'analisi stessa O&R cerca di ricondursi ad una progettazione a "prova di errore" sfruttando i dettami della pratica adottata inizialmente nell'azienda giapponese Toyota.

I casi descritti nel paragrafo successivo sono stati selezionati tra tutti quelli analizzati e con più alto impatto a livello di componentistica legata all'elettrificazione.

Inoltre, sono stati scartati i casi che necessitavano della stessa soluzione progettuale in modo da evitare ripetizioni.

4.3 Stesura del Cartellino Operazione: montaggio del supporto della sospensione sull'EDM

Il Cartellino Operazione (C.OP.) riporta una specifica attività descrivendo la successione delle operazioni, raggruppate in fasi, da compiere per giungere al montaggio finale del componente. La redazione di questo documento deve essere svolta in modo da individuare la corretta successione al fine di ottenere il minor tempo e costo.

La stesura del C.OP. in questione riguarda il montaggio del supporto della sospensione sull'Electric Drivetrain Module (EDM). Tale componente viene montato nel tratto di linea dedicato alle meccaniche elettriche che risulta la sezione più critica in seguito al passaggio all'elettrificazione. Questo tratto di ciclo risulta notevolmente impattato dal passaggio all'elettrificazione.

Nel cartellino operazione viene riportata l'attrezzatura che in questo caso comprende un avvitatore elettronico a braccio articolato (peso pari a 4 kg, braccio di lunghezza pari a 300 mm e coppia di chiusura pari a 95 Nm) e la normativa che ne regola l'utilizzo.

In figura 45 è mostrata la postazione di lavoro e i relativi componenti di montaggio: si può notare la presenza dei simboli DPI (Dispositivi di Protezione Individuale), legati al rischio di folgorazione, che indicano la necessità di indossare calzature di sicurezza e guanti protettivi.

L'altezza del componente da assemblare rimane costante, pari a 800 mm da terra, per tutte le fasi descritte e non presenta modifiche di montaggio al variare delle specifiche richieste dal modello in produzione.

Le operazioni studiate e riportate nel C.OP. sono state raggruppate in tre fasi.

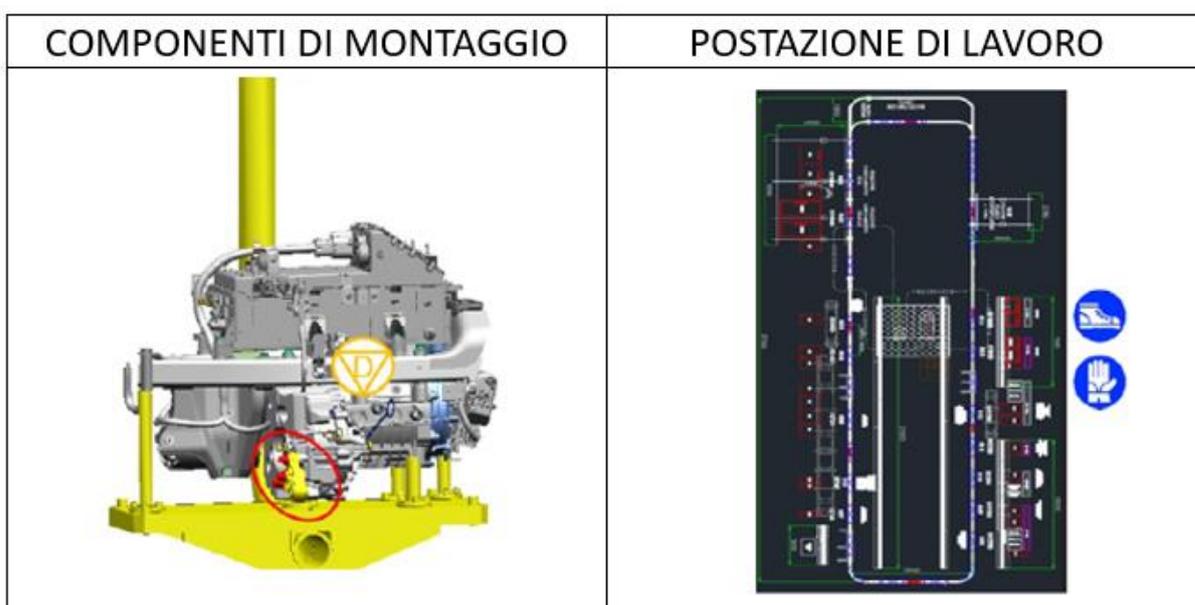


Figura 45 - Postazione di lavoro e componentistica di montaggio

Per la prima, fase 010, sono previste le seguenti attività, mostrate in figura 46:

- 1) Prelevare dal contenitore 1 a lato linea il supporto della sospensione (riferimento a) e da contenitore 2 a lato linea n° 3 viti (riferimento b);
- 2) Disporsi a fianco dell'EDM sul lato del differenziale;
- 3) Posizionare il supporto della sospensione sull'EDM (riferimento 1 e 2);
- 4) Trattenere il supporto con una mano ed eseguire imbastitura manuale di n° 3 viti nell'apposita sede sull'EDM (riferimento 3).

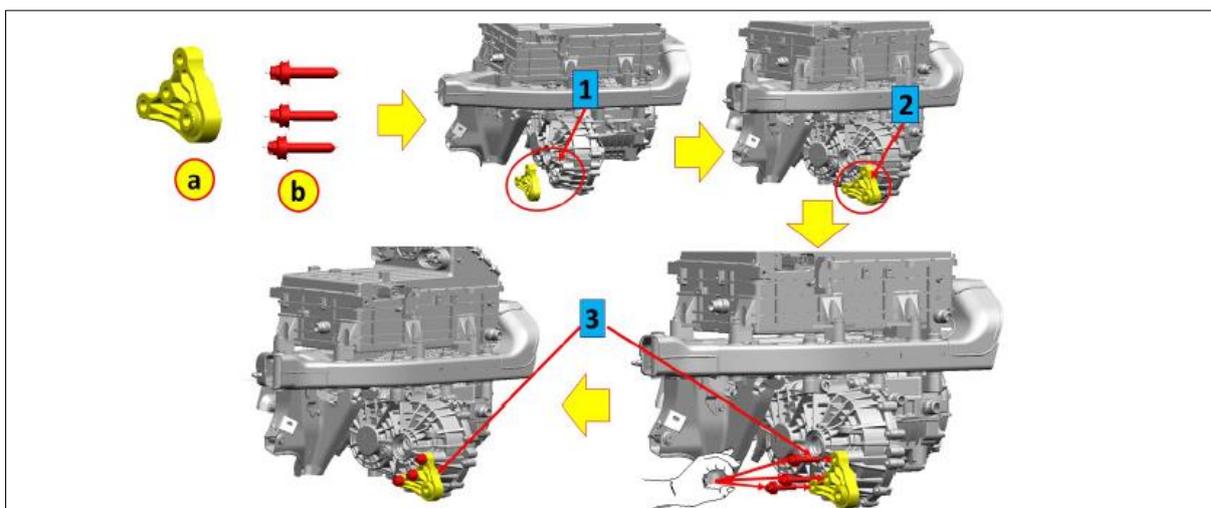


Figura 46 - Operazioni prevista per la fase 010

Le matricole presenti sono il supporto della sospensione e la vite: tali componenti presentano il numero di disegno (part number), la quantità e la caratterizzazione con la quale viene indicato il tipo di vettura sulla quale è previsto il montaggio.

La fase 020, conclusa la 010, prevede di svolgere le seguenti operazioni, sintetizzate in figura 47:

- 1) Disporsi a lato linea;
- 2) Avvicinarsi e prelevare l'avvitatore elettronico a braccio articolato;
- 3) Azionare manualmente il pulsante sulla pulsantiera dell'avvitatore per avviare la rotazione dell'avvitatore e attendere l'accensione del led di colore verde per azione avvenuta correttamente;
- 4) Disporsi a fianco dell'EDM con l'avvitatore elettronico a braccio articolato;
- 5) Eseguire il serraggio mediante l'avvitatore di n° 3 viti di fissaggio del supporto della sospensione sull'EDM, precedentemente imbastite, alla coppia nominale di 95 Nm;
- 6) Verificare l'accensione del led di colore verde per l'avvenuto e corretto fissaggio;
- 7) Portare l'avvitatore elettronico a braccio articolato fuori ingombro;

8) Bloccare l'avvitatore elettronico a fine utilizzo.

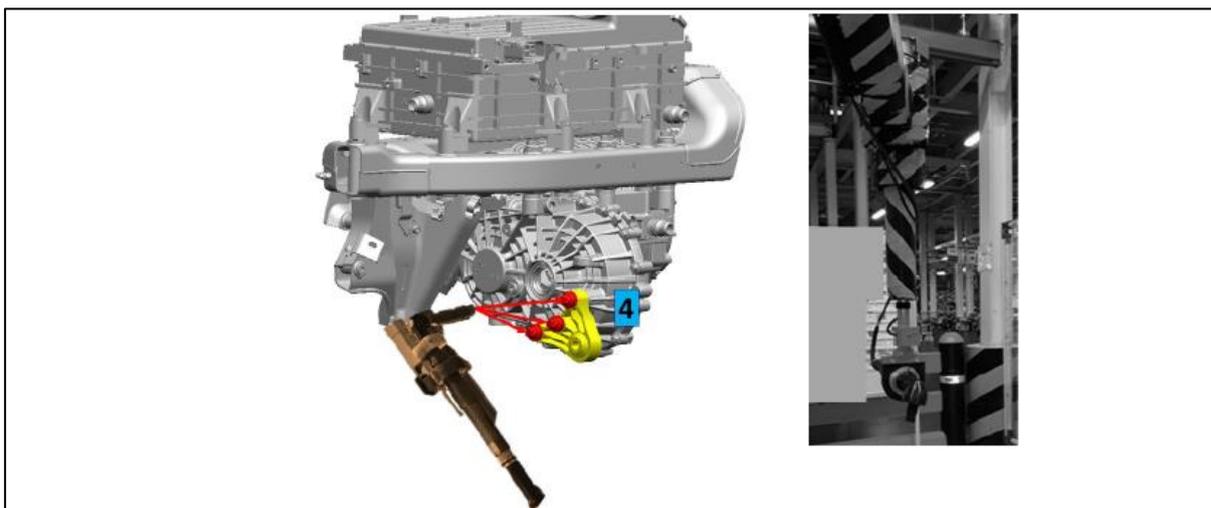


Figura 47 - Operazione di serraggio prevista durante la fase 020

L'ultima fase analizzata, la 030 del C.OP., riguarda l'operazione di backup nella quale sono riportati i possibili output dell'avvitatore a controllo coppia/angolo:

- Segnalazione luminosa tramite led di colore giallo (coppia o angolo bassi): procedere con l'avvitatura;
- Segnalazione luminosa tramite led di colore rosso (coppia o angolo elevati): spostare il cursore dell'avvitatore sulla posizione atta alla "svitatura":
 - Verificare l'integrità della vite: nel caso fosse fallata svitarla, smontarla e rottamarla;
 - Verificare l'integrità della filettatura: nel caso non fosse danneggiata sostituire la vite e fissarla parzialmente, altrimenti segnalare il numero di fissaggio da riprendere;
 - Procedere nuovamente con l'avvitatura;
- Apporre il timbro identificativo per l'avvenuta corretta operazione di serraggio nell'apposito spazio.

In seguito, dopo aver definito il cartellino operazione, è necessario svolgere l'analisi O&R ad ogni operazione prescritta in precedenza. Nella sezione successiva è stata applicata solamente a determinate operazioni per non riportare casi differenti che hanno bisogno della medesima soluzione.

4.3.1 Analisi O&R: posizionamento del supporto della sospensione sull'EDM

La prima operazione considerata tramite l'analisi O&R, collocata in fase 010 del cartellino operazione descritto precedentemente, è stata il posizionamento del supporto della sospensione sull'EDM.

In figura 48, sotto forma di disegno 3D sul software Siemens NX, è mostrato il supporto della sospensione che assume un ruolo di fondamentale importanza in quanto collega la sospensione con l'EDM.

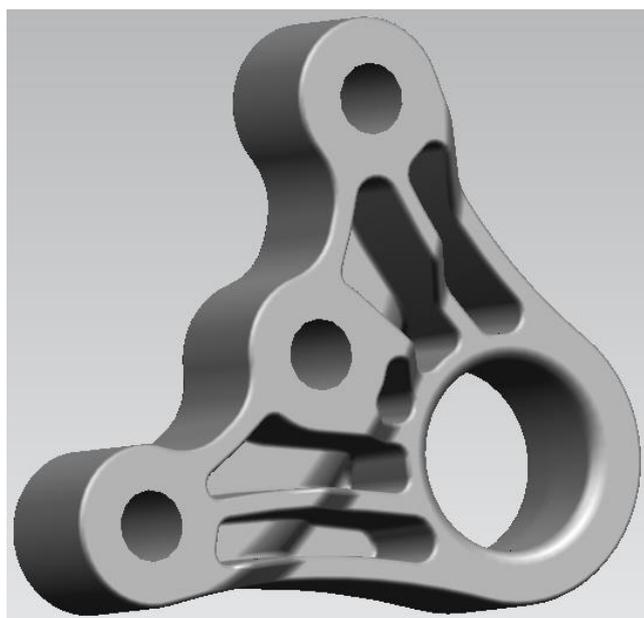


Figura 48 - Supporto della sospensione

Il modo di difetto di tale operazione è il montaggio irregolare rappresentato dal possibile posizionamento scorretto: presenta la possibilità di una disposizione errata in cui venga messa a contatto indistintamente una delle due facce del componente e l'EDM.

Questo comporta un errato utilizzo e una successiva impossibilità nel proseguimento dell'assemblaggio con conseguente fermo linea. Nel caso di produzione ad alta cadenza non è contemplato un blocco della linea.

Per valutare questa criticità è necessario stimare una classe di gravità in virtù degli effetti: per questo componente che risulta impattante sulla funzionalità, oltre che sulla sicurezza, è stata attribuita la classe più restrigente AA.

Inoltre, essendo il supporto a diretto contatto con il propulsore elettrico risulta un componente collegato all'alto voltaggio; ciò comporta un altissimo grado di pericolosità che lo proietta in qualsiasi caso nella classe maggiormente impattante HV, appositamente dedicata.

La classe HV presenta un valore massimo del prodotto $O \times R$ pari a 2 oltre al quale l'attività dovrà essere modificata e rivalutata.

In seguito ad un'approfondita analisi è stato valutato un livello di Occurrence pari a 3 poiché la corretta esecuzione del ciclo si basa sulle abilità, sull'esperienza e sull'attenzione dell'operatore. Tuttavia, il livello rimane contenuto poiché il cartellino operazione risulta chiaro e può essere eseguito dall'utente senza particolari difficoltà.

Il livello di Release, invece, è stato fissato pari a 2 poiché il difetto prodotto durante l'operazione è identificabile, ma ciò dipende dall'esperienza e dal livello d'attenzione dell'operatore.

Avendo tali livelli si può calcolare il prodotto $O \times R$ pari a 6 che, come mostrato graficamente in tabella 9, si colloca in un'area non consentita dalla classe di gravità HV.

HV		Release			
		1	2	3	4
Occurrence	1				
	2				
	3		✘		
	4				

Tabella 9 - Matrice di O&R applicata all'operazione prima della correzione funzionale

Le possibili soluzioni possono essere applicate agendo sul livello di un solo parametro (Occurrence o Release) oppure su entrambi. L'obiettivo finale è ricondurre l'attività analizzata ad un valore della matrice consentito.

Una possibile soluzione per abbattere il livello di Release è rappresentata dall'inserimento di sensori in grado di individuare automaticamente le possibili criticità e, tramite un indicatore, avvisare l'operatore al fine di non far avanzare il difetto.

Per quanto riguarda il livello di Occurrence risulta utile applicare una modifica progettuale, lavorando direttamente sul prodotto, che renda l'operazione a "prova di errore" come descritto precedentemente con la definizione di poka-yoke (mistake proof design).

La scelta migliore per il caso considerato è stata una modifica progettuale del prodotto al fine di rendere il montaggio del componente più robusto. La configurazione originale del supporto è rimasta la medesima con l'aggiunta di una protuberanza che permetta all'operatore di allineare correttamente il componente all'EDM. In figura 49 è mostrato il componente a seguito della modifica.

Con tale soluzione il livello di Release non viene modificato e tutto lo studio si concentra sull'abbattimento del valore di Occurrence.

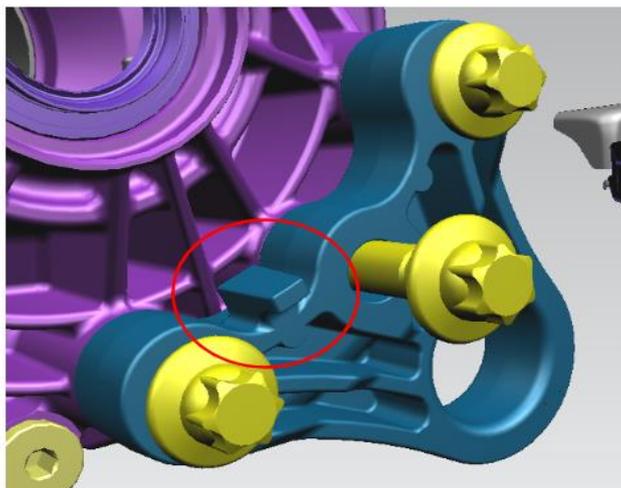


Figura 49 - Supporto della sospensione modificato

La variazione progettuale del prodotto, grazie all'inserimento di questa protuberanza, non consente all'operatore di disporre in maniera scorretta il supporto; grazie a ciò il livello di Occurrence si assesta al valore minimo.

Tuttavia, la sede su cui viene posizionato il supporto non risulta piana e ciò appare come un vincolo sulla disposizione di questo poka-yoke; infatti, per irrigidire la struttura dell'EDM, senza appesantirla eccessivamente, sono state inserite delle nervature. La disposizione del poka-yoke è stata studiata in modo che fosse garantita l'interferenza con la nervatura centrale, grazie alla quale l'operatore si accorgesse dell'errato montaggio, eliminando ogni possibilità errore.

In seguito a questa modifica, l'operazione non può più essere svolta erroneamente poiché ciò è reso impossibile dalla progettazione.

Avendo mantenuto un livello di Release pari a 2 e variato il valore di Occurrence a 1, il nuovo prodotto O × R fornisce un valore pari a 2 e si posiziona in una zona sicura per la classe di gravità imposta, come mostrato in tabella 11.

HV		Release			
		1	2	3	4
Occurrence	1		✘		
	2				
	3		✘		
	4				

Tabella 10 - Matrice di O&R aggiornata dopo il miglioramento progettuale

4.3.2 Analisi O&R: prelievo viti da contenitore a lato linea

Un'altra operazione analizzata è stato il prelievo viti dal contenitore a lato linea, descritta in fase 010 del cartellino operazione riportato nella sezione precedente.

In questo caso il modo di difetto risulta essere l'errato prelievo che potrebbe conseguentemente comportare un'impossibilità di montaggio. Valutando il fatto che vi è una criticità a livello omologativo la classe di gravità assegnabile è la AA.

Per questa categoria, il valore massimo è rappresentato dal prodotto $O \times R$ e risulta pari a 3.

Per la valutazione del livello di Release è necessario tenere conto che il particolare, selezionato in maniera errata, è possibile da rilevare se l'operatore è correttamente formato e attento: con queste caratteristiche il valore imposto è pari a 3.

D'altra parte, per quanto riguarda il livello di Occurrence è fissato a 3 poiché la scelta viene eseguita a memoria dall'operatore, ma la scelta può essere svolta tra un massimo di due componenti.

Il prodotto risultante $O \times R$ è pari a 9 e si colloca in una regione che necessita una rivalutazione. Per ovviare la criticità è stato scelto un miglioramento del livello di Occurrence: le possibili soluzioni sono rappresentate da sistemi dinamici che identifichino il particolare da prelevare affinché non siano richieste particolari abilità da parte dell'operatore.

Per migliorare la logistica esistono sistemi dinamici che supportino l'operazione: si parla di sistema "pick to light", mostrato in figura 50, il quale tramite un led colorato posizionato sul contenitore richiamano l'attenzione verso il box da cui prelevare, i puntatori laser da posizione remota, i quali indicano la corretta sezione in cui prelevare il componente, oppure i dispositivi sonori opportunamente posizionati vicino al componente da prelevare. Inoltre, vi è un ulteriore sistema "pick to open" il quale garantisce l'apertura dello sportello del contenitore corretto solamente nel momento opportuno.



Figura 50 - Sistema logistico "pick to light"

Queste soluzioni richiedono un ingente investimento economico, tuttavia oltre ad imporre solamente un livello di Occurrence pari a 2, non è detto che possano essere installati in ogni tratto di linea. L'analisi finale ha condotto verso una soluzione più semplice ed efficace andando a porre a lato linea solamente il contenitore utile per tale operazione.

Tramite questa soluzione il livello di Occurrence è stato abbattuto al valore 1 tale per cui esiste un unico particolare di quella tipologia in postazione e una sola parte è disponibile per essere prelevata.

Ricalcolando il prodotto $O \times R$, anche non agendo sul livello di Release, si ha un valore pari a 3 che risulta accettabile per la classe di gravità prevista come si evince in tabella 11.

Questo metodo permette di attuare un controllo di tipo "mistake proof process" rendendo l'intera attività a prova di errore.

AA		Release			
		1	2	3	4
Occurrence	1			✘	
	2				
	3			✘	
	4				

Tabella 11 - Matrice di O&R aggiornata dopo l'abbattimento del livello di Occurrence

4.3.3 Analisi O&R: serraggio viti mediante avvitatore

L'operazione studiata in questo paragrafo è il serraggio delle viti tramite l'avvitatore elettronico a braccio articolato che permette il collegamento tra il supporto della sospensione e l'EDM. Questa attività è inserita in fase 020 del CO.P. riportato nella sezione precedente.

Il modo di difetto collegato all'operazione è il possibile fissaggio incompleto che comporterebbe un successivo fermo linea.

Valutando il fatto che vi è una criticità a livello di sicurezza è assegnabile una classe di gravità AA e per questa categoria il valore massimo del prodotto $O \times R$ risulta pari a 3.

Il livello iniziale di Occurrence è fissato pari a 2 poiché l'operatore può svolgere in maniera semplice il compito assegnato; inoltre, dato che le parti si accoppiano facilmente, non è necessaria una formazione specifica.

Sfruttando la possibilità di collegare l'avvitatore al Manufacturing Execution Systems (MES) si rende possibile un controllo rigoroso della coppia e dell'angolo di serraggio.

In questo modo è presente un sistema automatico che verifica la correttezza dei parametri e, in caso di criticità ulteriori, attua un fermo linea. Il sistema MES lavora in tempo reale per consentire il controllo di più elementi del processo e analizza il modo in cui le attuali condizioni a livello impiantistico possano essere ottimizzate per migliorare la produzione.

Il livello di Release raggiunge un valore minimo pari a 1: questo metodo permette di attuare un controllo di tipo "error proof in station" rendendo identificabile l'errore.

Calcolando il prodotto $O \times R$ risulta pari a 2 e, come mostrato in tabella 12, si dispone in un'area consentita dalla classe di gravità scelta.

L'attività analizzata non necessita di una rivalutazione dei livelli successiva ad una modifica: per la classe di gravità considerata l'operazione risulta a prova di errore.

AA		Release			
		1	2	3	4
Occurrence	1				
	2	✘			
	3				
	4				

Tabella 12 - Matrice di O&R per la classe di gravità AA

Capitolo 5

Conclusioni

Le problematiche ambientali impongono vincoli sempre più stringenti e costringono il settore dell'automobile a sviluppare tecnologie innovative a ridotte emissioni. In questo contesto il veicolo elettrico è, sicuramente, quello che più facilmente risponde a queste esigenze.

L'introduzione dei veicoli elettrici può diventare una grossa opportunità per un mercato saturo e con margini sempre più stretti, poiché costringe alla revisione di alcuni processi ormai radicati.

Le caratteristiche delle auto elettriche, infatti, spingono verso lo sviluppo di architetture modulari che permettano di standardizzare i componenti principali per ridurre il costo. Ciò garantisce, anche, la possibilità di creare processi sempre più snelli e ridurre il tempo di sviluppo dei vari veicoli.

Il lavoro svolto, effettuato su progetti di modelli elettrici che nasceranno su architetture già esistenti, ha evidenziato differenze sostanziali nel processo di costruzione dei veicoli elettrici, rispetto a quelli tradizionali. Anche se questi progetti sono in una fase prematura, che non ha permesso di quantificarne l'impatto, risulta evidente come l'introduzione di un veicolo elettrico comporti un investimento non indifferente, sia in termini economici che di risorse umane, per l'adeguamento e l'efficientamento dei processi e delle strutture.

Il rischio di folgorazione è un parametro di fondamentale importanza ed è necessario prevedere un percorso di formazione per il personale al fine di prevenire, per quanto possibile, infortuni dovuti alla nuova tecnologia.

Il risultato dell'analisi O&R applicata ai nuovi cartellini operazione ha dato la possibilità di migliorare il flusso produttivo avvicinandosi ad un processo a prova di errore.

Valutando complessivamente il General Assembly Shop, la fase maggiormente colpita è sicuramente il decking che subisce variazioni sostanziali e, scegliendo una fornitura esterna del motore elettrico e del pacco batteria (politica "buy"), risulta notevolmente semplificata a causa

della parziale soppressione della linea parallela dedicata al montaggio delle meccaniche. Invece, la mappatura delle centraline impone un aumento del tempo ciclo al fine di garantire la connessione tra numerosi e differenti protocolli di comunicazione.

Inoltre, va rivisto tutto il processo logistico legato al veicolo elettrico e ai suoi componenti.

Infatti, è noto come il trasporto e la gestione delle batterie siano operazioni non banali che necessitano di infrastrutture dedicate. Lo stesso veicolo, una volta completato, costringe a rivedere le politiche di gestione delle vetture a piazzale, poiché il decadimento delle prestazioni del pacco batteria diventa un fattore di primaria importanza.

Un ultimo aspetto che non può essere trascurato è quello del fine vita dei veicoli. Il numero di batterie da dover smaltire, fra qualche anno, sarà abbastanza elevato da rappresentare un vincolo per i costruttori. Vista, quindi, la quantità di materiali costosi di cui è composto il pacco batteria è possibile immaginare importanti occasioni di business.

Bibliografia

- S. Modi, M. Stevens, M. Chess, Mixed Material Joining Advancements and Challenges, Center for Automotive Research, Milano, 2017
- G. Grea, I vantaggi dei veicoli a trazione elettrica rispetto ai I vantaggi dei veicoli a trazione elettrica rispetto ai sistemi di propulsione tradizionale La metodologia WTW per l'analisi delle alternative, potenzialità e limiti delle tecnologie disponibili, CERTeT, Università Bocconi, 2010
- T. Kimio, A. Salazar, K. Saito, Automotive Painting Technology: A Monozukuri-Hitozukuri Perspective, Springer Science & Business Media, 2012
- C.C. Chan, An Overview of Electric Vehicle Technology, 1993
- D. D'Asaro, Method for the production of Low Volume Vehicles and application criteria or Technological Choices, Politecnico di Torino, Tesi di II livello, Ottobre 2018
- C. D.Anderson, J. Anderson, Electric and Hybrid Cars a History, 2004
- Perujo, B. Ciuffo, The introduction of electric vehicles in the private fleet: Potential impact on the electric supply system and on the environment. A case study for the Province of Milan, Italy, 2010
- J. M.German, Hybrid Powered Vehicles, SAE International, 2003
- D. Adams, Adhesive Bonds: Science and Technology, Cambridge: CRC Press, 2005
- T. Netland, The World Class Manufacturing programme at Chrysler, Fiat & Co, 22 Maggio 2013
- Regolamento n. 138 della UNECE — Disposizioni uniformi relative all'omologazione dei veicoli silenziosi adibiti al trasporto su strada in relazione alla loro ridotta udibilità, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 2017
- M&IT consulting, La metodologia PFMEA, <https://www.mitconsulting.it/la-metodologia-fmea-failure-mode-and-effects-analysis/>
- N. Roobol, Industrial Painting and Powder-coating; Principles and Practices, Cincinnati, OH: Hanser Gardner, 2003
- E. Morano, G. Rispoli, Motivazioni ed effetti del piano industriale su Prodotto e Processo, Università della Calabria, Tesi di II livello, Aprile 2019
- Avid Technology, Battery Electric Vehicle, <https://www.avidtp.com/what-is-the-best-cooling-system-for-electric-vehicle-battery-packs/>

- G. Archer, Target al 2025 per le emissioni di CO₂ delle automobili. Un passo in avanti per affrontare le emissioni nel settore trasporti, Giugno 2015
- CONCAWE, EUCAR, Joint Research Center, Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context, 2007
- FCA, Pernambuco, Brasile https://www.fcagroup.com/it-IT/media_center/pernambuco
- F. Gabrielli, R. Ippolito, F. Micari, *Analisi e Tecnologia delle Lavorazioni Meccaniche*, II edizione, McGraw-Hill, 2012
- M. Brocco, F. Di Mario, M. Ronchetti, *Idrogeno e celle a combustibile: applicazioni attuali e prospettive future*, 2010
- European Commission, Climate Action, Road transport: Reducing CO₂ emissions from vehicles

Capitolo 6

Appendice A

Architettura ibrida di tipo serie

Gli ibridi serie comportano un'ibridizzazione a livello di sorgente energetica a bordo veicolo, l'uscita meccanica dell'ICE viene convertita in elettricità utilizzando un generatore ed il moto è ottenuto con un unico attuatore di coppia, un motore elettrico, come mostrato in figura 51. Concettualmente, è un veicolo elettrico assistito da un ICE che mira ad estendere la gamma di guida per renderla paragonabile a quella del veicolo convenzionale. Sebbene abbia un grande vantaggio nella semplicità della trasmissione, necessita di tre dispositivi di conversione: l'ICE, il generatore e il motore elettrico; ne consegue che l'efficienza sia generalmente inferiore rispetto ad un veicolo elettrico puro.

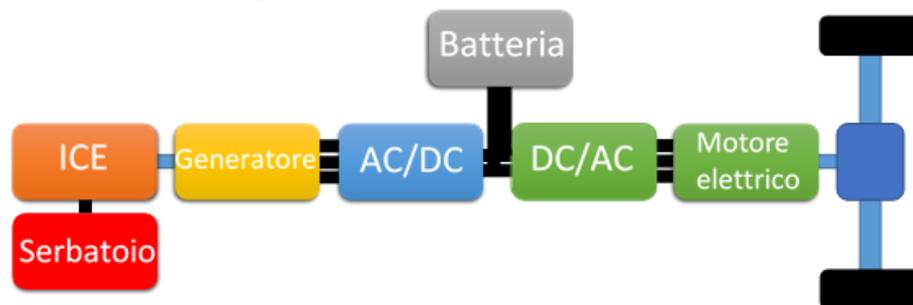


Figura 51 - Schema a blocchi ibrido serie

In figura 52 è possibile vedere la disposizione tipica dei componenti elettrici di un veicolo ibrido serie nel quale in verde sono descritti i collegamenti elettrici, in rosso quelli meccanici.

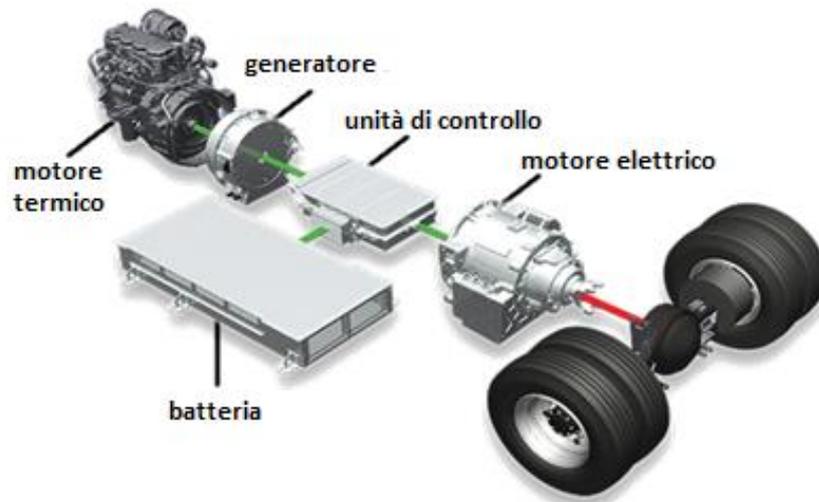


Figura 52 - Disposizione dei componenti elettrici in un veicolo ibrido serie

Esistono differenti modalità operative in un ibrido serie:

- Modalità solo batteria: il motore termico è spento mentre il veicolo è alimentato solo dalla batteria;
- Modalità solo motore: la potenza deriva esclusivamente dal propulsore termico tramite la conversione del generatore;
- Modalità combinata: sia il motore termico che la batteria forniscono energia al motore di trazione;
- Modalità “split power”: il motore termico fornisce sia l’energia per il moto del veicolo sia per caricare la batteria;
- Modalità di ricarica stazionaria;
- Modalità di frenata rigenerativa.

Il grado d'ibridizzazione per il veicolo ibrido serie

Un altro parametro valutabile per la classificazione dei veicoli ibridi serie è il grado di ibridizzazione, figura 53, definito tramite la seguente relazione:

$$R_{h\ serie} = \frac{P_{gen_el}}{P_{eng_el}}$$

dove P_{gen_el} è la potenza del generatore elettrico montato sul motore endotermico, mentre P_{eng_el} è la potenza del motore elettrico di trazione. In base al grado di ibridizzazione scelto nel dimensionamento delle due sorgenti di energia elettrica, si delineano differenti configurazioni di ibrido serie, destinate a taglie di veicolo diverse.

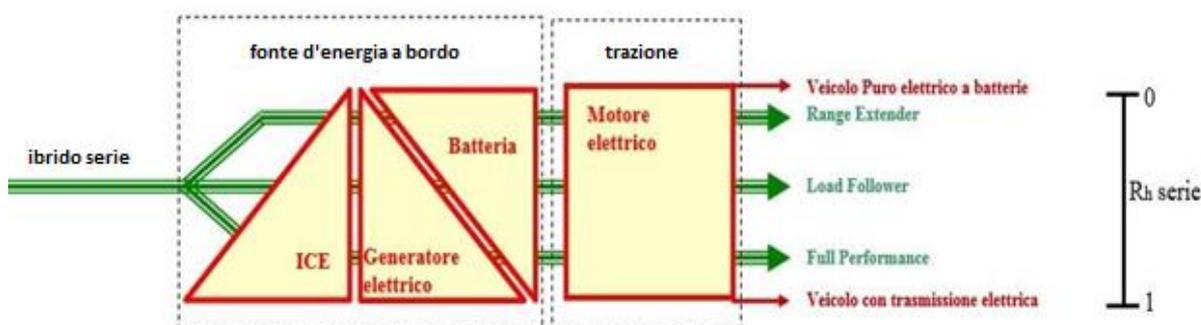


Figura 53 - Tipologie di ibrido serie in base al grado di ibridizzazione

Per bassi gradi di ibridizzazione, quindi con $R_{h,serie}$ prossimo a zero, non vi è la presenza del generatore, poiché la trazione è dovuta direttamente al motore elettrico; in questo caso siamo di fronte ad un veicolo elettrico a batteria con assistenza termica definito “range extender”.

Il motore termico assicura l'estensione dell'autonomia del veicolo rispetto a quello puramente elettrico (pur accettando una piccola quota di emissioni) e la possibilità di eliminare la necessità di ricaricare la batteria dalla rete. Ciò permette di andare ad attuare una riduzione del pacco batterie in termini di peso e costi. A questo livello di ibridizzazione, comunque, il motore termico diventa, per la sua compattezza, quasi un optional di un veicolo elettrico. Ciò si traduce in evidenti vantaggi a livello di ICE, come, per esempio, farlo lavorare quasi a punto fisso, massimizzandone il rendimento e riducendo le emissioni e le rumorosità.

Man mano che la potenza del gruppo ibridizzante aumenta, l'ICE non lavora più a punto fisso ma segue il ciclo coprendo interamente le esigenze di trazione fino alla sua potenza massima. Questo tipo di gestione viene definita “load follower”.

Per potenze ancora superiori il sistema risponde alla richiesta energetica sommando la potenza del gruppo ibridizzante e del motore elettrico. La batteria diventa quasi inesistente e l'energia elettrica è fornita esclusivamente dal motore endotermico. Questa tipologia di veicolo è progettata quasi esclusivamente per massimizzare le prestazioni, infatti, il funzionamento viene definito "full performance".

Architettura ibrida di tipo parallelo

Diversamente dall'ibrido serie, l'architettura parallelo consente sia al propulsore termico che all'elettrico di fornire potenza contemporaneamente per azionare le ruote. Poiché sia l'ICE che il motore elettrico sono generalmente accoppiati all'albero di trasmissione delle ruote tramite due frizioni e la potenza di propulsione può essere fornita dal solo ICE, dal motore elettrico o da entrambi, come mostrato schematicamente in figura 54.

Concettualmente, è un veicolo elettro-assistito, al fine di ridurre emissioni e consumo di carburante.

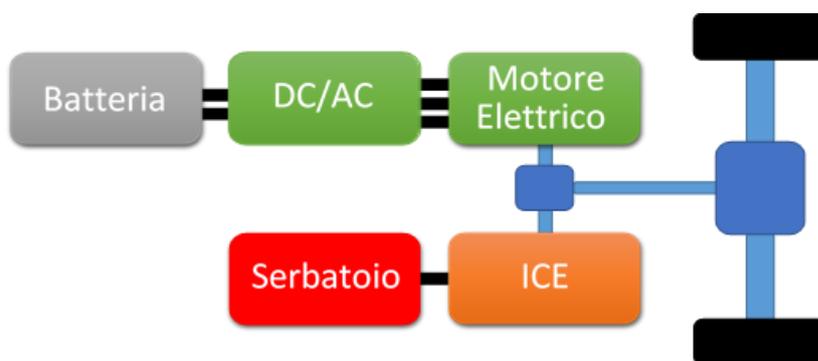


Figura 54 - Schema a blocchi di architettura ibrida parallela

Il motore elettrico può essere utilizzato come generatore per caricare la batteria mediante la frenata rigenerativa o assorbendo la potenza dall'ICE quando la sua uscita è maggiore di quella richiesta per guidare le ruote.

Come si può vedere nella figura 55, l'architettura di un veicolo ibrido parallelo è più articolata di quella serie. Oltre ai classici collegamenti meccanici ed elettrici, infatti, è necessaria l'implementazione di una adeguata logica di controllo (collegamento di colore giallo) che comunicando con la trasmissione permetta di passare da una modalità di trazione e l'altra.

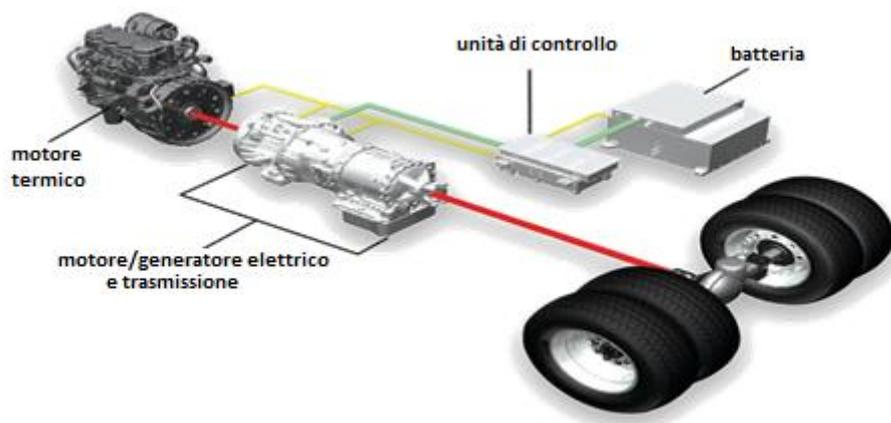


Figura 55 - Architettura ibrida parallela

Di seguito sono riportate le possibili modalità operative dell'ibrido parallelo:

- Modalità solo ICE: il motore elettrico è spento e il veicolo è alimentato in modo tradizionale;
- Modalità solo elettrico: il veicolo è azionato solo dal motore elettrico, ma per brevi tratti;
- Modalità combinata: sia il propulsore termico che l'elettrico forniscono potenza al veicolo;
- Modalità "split power": l'alimentazione derivante dall'ICE viene suddivisa per guidare il veicolo e caricare la batteria (il motore elettrico diventa generatore);
- Modalità di frenata rigenerativa.

Il grado d'ibridizzazione per il veicolo ibrido parallelo

Nel caso degli ibridi paralleli il grado di ibridizzazione, figura 56, è definito dalla relazione:

$$R_{h,parallelo} = \frac{P_{ICE}}{P_{ICE} + P_{el}}$$

dove P_{ICE} è la potenza del motore endotermico e P_{el} è la potenza del motore elettrico.

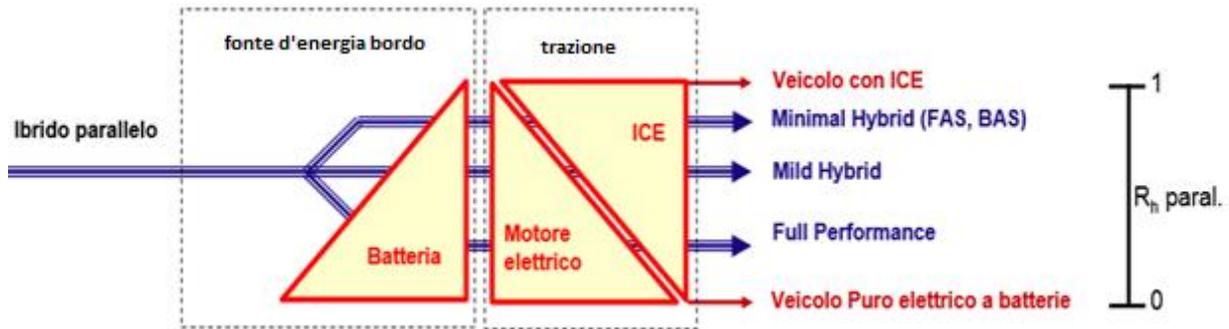


Figura 56 - Tipologie di veicoli ibridi parallelo rispetto al grado di ibridizzazione

Il concetto di grado di ibridizzazione è inverso, rispetto al caso serie, in quanto partiamo da un veicolo termico con $R_{h,parallelo}=1$ che man mano viene elettrificato. Un grado di ibridizzazione uguale a 0 equivale ad un veicolo puramente elettrico. Al diminuire del rapporto di ibridizzazione, muovendosi dal veicolo mono-sorgente con ICE fino a quello mono-sorgente a batterie, si hanno differenti soluzioni. All'aumentare della potenza elettrica installata vengono abilitate via via maggiori funzioni elettriche.

Un componente fondamentale in questo tipo di architetture è la frizione. La presenza o meno di una frizione dedicata al collegamento motore elettrico-motore termico ha un impatto su numerose funzioni del sistema.

L'assenza di questa frizione, infatti, non permette l'avviamento del motore ad inerzia, cioè accelerando il rotore della macchina elettrica con le frizioni lato ICE aperte. In assenza di frizione lato ICE, l'unico metodo di avviamento possibile è quello diretto, che avviene trascinando con il rotore della macchina elettrica l'albero motore dell'ICE, con entrambi gli elementi inizialmente fermi. Questa scelta è molto gravosa in termini di prestazioni sia per la batteria, sia per la coppia di scollamento del motore da vincere, per questo motivo in caso di assenza di frizione lato ICE si mantiene il motorino di avviamento.

Nel grafico, figura 57, si può vedere un confronto tra vari tipi di avviamento. In rosso abbiamo l'avviamento a freddo con riduzione, metodo di avviamento dei veicoli in cui non è possibile

avviare ad inerzia. L'avviamento, in questo caso, avviene a basse velocità dell'ICE, circa $150 \div 200$ rpm, non ideali in termini di emissioni.

L'avviamento diretto, ibrido parallelo coassiale senza frizione lato ICE, non avendo un accoppiamento con moltiplicazione, deve sviluppare una coppia pari a quella necessaria a mettere in movimento l'ICE. Ne consegue un sovradimensionamento che può essere limitato agendo attraverso l'elettronica di potenza. In ogni caso questo tipo di azionamento elettrico è giustificato solo su architetture ibride nelle quali i livelli di tensione disponibile siano elevate.

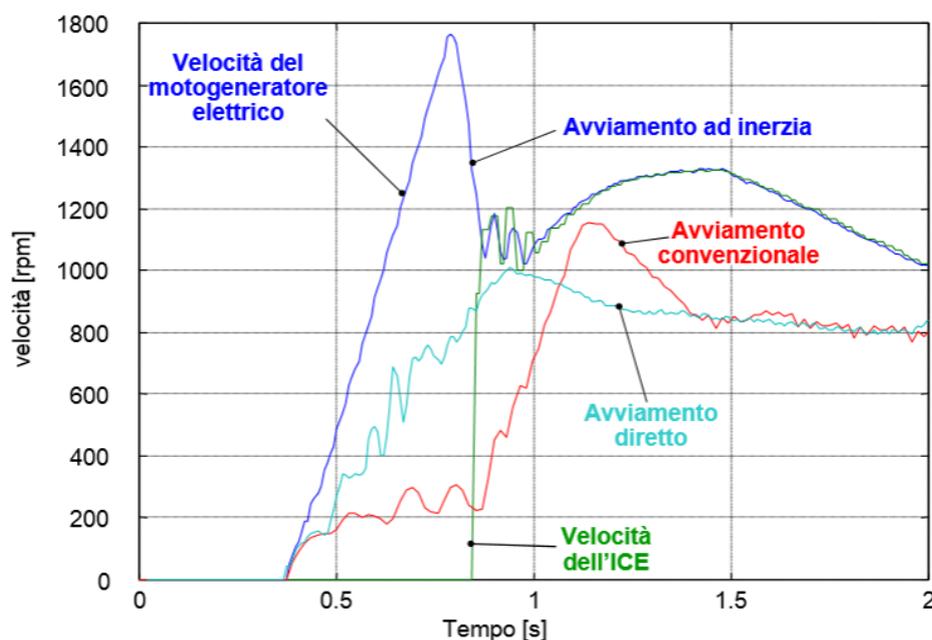


Figura 57 - Modalità di avviamento di un motore ICE

L'avviamento ad inerzia, invece, può avvenire a velocità dell'ICE elevate, superiori a 800 rpm, più favorevoli in termini di emissioni. La curva blu del grafico mostra questo tipo di avviamento. Il motore elettrico raggiunge velocità elevate e, solo a questo punto, il motore endotermico viene collegato (curva verde) raggiungendo istantaneamente velocità intorno ai 1000 rpm. Questo tipo di avviamento permette una gestione di tipo stop&start. La funzionalità stop&start diventa efficace, però, se si riescono a garantire: affidabilità del corretto avviamento ad ogni fermata, prontezza e comfort in termini di impatto acustico e vibrazioni.

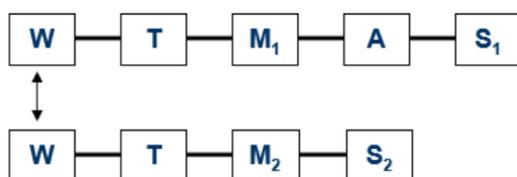
La soluzione a questi problemi è data dalla possibilità di mettere in movimento il veicolo in puro elettrico, poiché garantisce una elevata prontezza al riavvio unitamente alla silenziosità tipica dei motori elettrici. Potendo avviare in puro elettrico, inoltre, diventa possibile

selezionare il momento e la velocità a cui far partire il motore endotermico andando, così, a minimizzare le emissioni.

Punto di collegamento

Una ulteriore classificazione, per i veicoli ibridi paralleli, è fatta in base al punto di collegamento tra i due sistemi di trazione:

1. Double drive in cui i due sistemi di trazione sono realizzati separatamente sui due assali. Quando operano in combinazione, le potenze trasmesse si accoppiano attraverso la strada, infatti questo tipo di ibrido viene definito “through the road” (TTR) e garantisce al veicolo la possibilità di avere trazione integrale, come mostrato in figura 58. Questo tipo di architettura favorisce l’ibridizzazione di veicoli convenzionali, a discapito, però, della possibilità di integrare e ottimizzare le due fonti.



Simbolo	Descrizione
W	Ruote
T	Trasmissione
M ₁	Motore elettrico
M ₂	Motore termico
S ₁	Sistema di accumulo di energia (batteria)
S ₂	Sistema di accumulo di energia (carburante)
A	Sistema di conversione o adattamento dell'energia

Figura 58 - Collegamento TTR, ibrido double drive

2. Single e double shaft in cui i due sistemi di trazione sono montati sullo stesso assale. Nella variante double shaft, figura 59a ci sono due trasmissioni che devono essere integrate, ne conseguono problemi di installabilità nel vano motore, unitamente ad un aumento di costi e complessità, perciò la soluzione più utilizzata è quella single shaft, cioè con un’unica trasmissione meccanica, figura 59b.

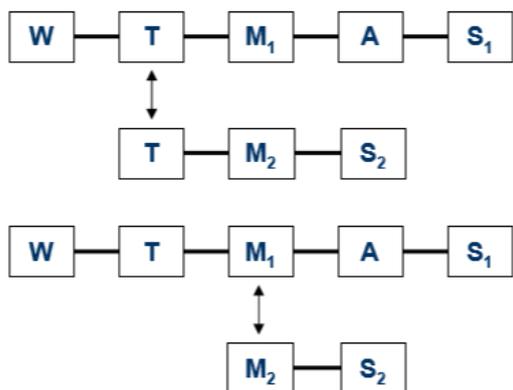


Figura 59 - a) Single shaft b) Double shaft

Quest'ultimo tipo di soluzione ha, a sua volta, due varianti:

- Il motore elettrico è montato sullo stesso albero dell'ICE in maniera coassiale, tra motore e trasmissione. Richiedono una progettazione che a priori tenga conto della necessità d'integrazione dei due sistemi;

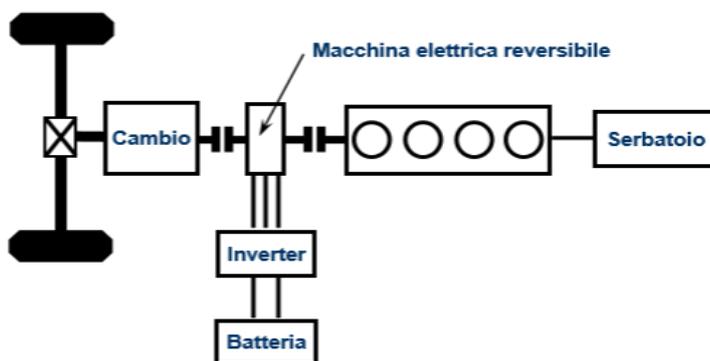


Figura 60 - Architettura single shaft coassiale

- Il motore elettrico è montato su un albero diverso da quello dell'ICE. Permettono l'utilizzo di motori nati per applicazioni diverse, ma richiedono un'interfaccia meccanica tra i due sistemi che comporta maggiori dispersioni di energia.

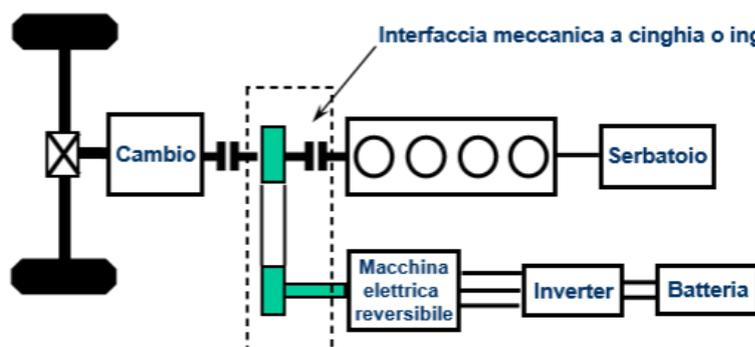


Figura 61- Architettura single shaft non coassiale

Capitolo 7

Appendice B

L'idrogeno

L'idrogeno è un vettore energetico che possiede elevata energia specifica per unità di massa; l'energia contenuta in 9.5 kg di idrogeno è equivalente a quella di 25 kg di benzina.

Infatti, relativamente alla massa, ha il più alto contenuto energetico rispetto agli altri combustibili.

Verrebbe dunque da chiedersi il motivo per cui non si possano rimpiazzare immediatamente i comuni combustibili con l'idrogeno. La risposta è in se semplice, ma allo stesso tempo complessa.

Semplice perché basta fare riferimento alle densità di energia dei diversi composti. Complessa perché le tecniche per rendere utilizzabile l'idrogeno come combustibile non sono ancora, "economicamente" parlando, convenienti rispetto a quelle per estrarre i comuni combustibili. La quantità di energia specifica che è possibile produrre da un combustibile può essere valutata considerando il loro valore in peso o in ingombro alla stessa pressione e temperatura. Nella tabella seguente sono stati analizzati e messi a confronto i differenti combustibili utilizzati.

	Idrogeno	Metano	Benzina	Gasolio	GPL	Metanolo
Contenuto di energia per unità di massa [MJ/kg]	119.90	49.89	44.48	42.6	46.44	19.85
Contenuto di energia per unità di volume [MJ/l]	8.47 (liq.)	20.88 (liq.)	31.15	35.7	25.5	15.88

Tabella 12 - Valori energetici dell'idrogeno

Da questa tabella è semplice fare alcune considerazioni:

- Considerando l'energia effettivamente utilizzabile da un chilogrammo di combustibile l'idrogeno risulta nettamente superiore avendo un contenuto energetico significativamente maggiore rispetto a quello della benzina (e di tutti gli altri combustibili);
- Valutando la densità d'energia utilizzabile considerando una quantità di materiale presente in un volume pari a un metro cubo a temperatura ambiente e pressione atmosferica, osserviamo come l'idrogeno non possa competere con la benzina.

Da questo risultato appare chiaro quale sia uno dei problemi che pregiudicano l'uso dell'idrogeno come combustibile per le vetture, ma anche per gli impieghi stazionari ovvero lo stoccaggio: attualmente può essere immagazzinato allo stato gassoso compresso o allo stato liquido.

L'idrogeno allo stato gassoso può essere stoccato all'interno di bombole. Il gas, portato in pressione con un compressore, viene immesso in bombole cilindriche di tipo speciale, molto resistenti. Dopo la fase di compressione, normalmente, la pressione dell'idrogeno si trova tra i 250÷350 bar.

I moderni serbatoi, tuttavia, possono sopportare pressioni da 350 a 700 bar. Sono serbatoi speciali la cui struttura di base è l'alluminio (materiale particolarmente leggero e quindi adatto all'autotrazione) che viene rinforzato con fibre di carbonio o kevlar per garantire una resistenza molto elevata alla pressione.

In generale il problema dell'accumulo dei gas a bordo veicolo è rappresentato dal loro basso valore di energia per unità di volume. Una quantità di idrogeno pari a 4 kg alla pressione di 700 bar può essere contenuta in un serbatoio da 100 litri di volume geometrico.

La robustezza dei serbatoi, l'introduzione di fusibili antiscoppio in caso di incendio e l'adozione di speciali valvole di interruzione del circuito in caso di urto rendono ormai sufficientemente sicuro lo stoccaggio dell'idrogeno compresso a bordo veicolo, ma tali sistemi risultano ancora estremamente costosi.

L'idrogeno allo stato liquido, invece, è disponibile alla temperatura di -253 °C.

Per poter essere mantenuto in questo stato fisico deve essere contenuto in serbatoi di tipo speciale che vengono definiti criogenici. Accumulare l'idrogeno allo stato liquido permette, a parità di ingombro geometrico del serbatoio, di trasportare un quantitativo di energia nettamente superiore rispetto allo stato gassoso. Diversi motivi frenano ancora questa tipologia di stoccaggio. Innanzitutto, la complessità tecnologica della gestione dell'idrogeno liquido

(impianti per il raffreddamento e fasi di distribuzione rimangono delicate dal punto di vista della sicurezza).

In secondo luogo, i costi complessivi per portare e mantenere l'idrogeno a tale temperatura risultano nettamente superiori rispetto al caso del gas in compressione.

Le celle a combustibile

Le celle a combustibile (fuel cells) sono essenzialmente delle celle primarie nelle quali l'agente riducente (combustibile gassoso) e quello ossidante (aria o ossigeno) sono continuamente immessi rispettivamente nel comparto anodico (-) e in quello catodico (+).

Tutte le celle a combustibile di base sono costituite da un elettrolita interposto tra due strati porosi chiamati anodo e catodo come mostrato in figura 62. L'anodo viene alimentato dal combustibile mentre il catodo viene alimentato dal comburente. Il combustibile e comburente, rispettivamente più utilizzati, sono idrogeno e ossigeno allo stato gassoso.

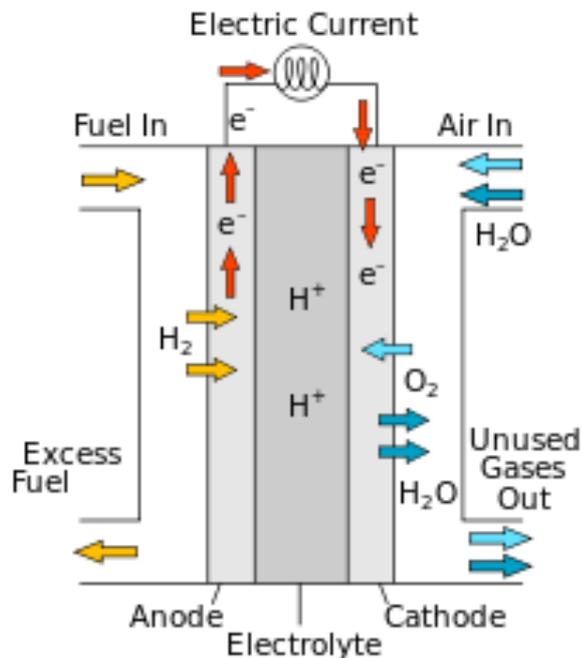


Figura 62 - Processo elettro-chimico di una cella a combustibile

Come per le pile tradizionali, per ottenere delle sorgenti di potenza apprezzabile, anche le singole fuel cells devono essere collegate in serie o in parallelo. Il collegamento avviene attraverso opportuni connettori che assicurino il contatto elettrico e, in alcuni casi, servono anche come separatori per i reagenti gassosi (piastre bipolari).

Una fuel cell è generalmente caratterizzata da una struttura a strati, come mostrato in figura 63. Ciò favorisce la possibilità di installare più celle con ingombri relativamente ridotti.

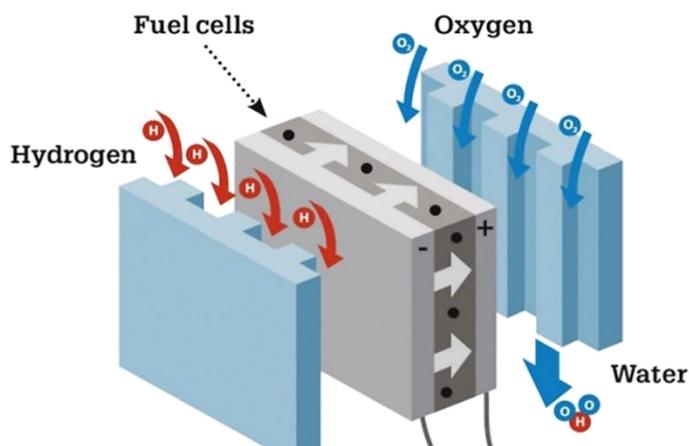


Figura 63 - Struttura a strati di una cella a combustibile

Semplificando si tratta di due superfici piane (la prima composta dalla compattazione degli strati catalizzatore-anodo, la seconda da quella catalizzatore-catodo) fabbricate con materiali conduttori a struttura porosa separati da una lamina di materiale che può presentarsi allo stato liquido (acido) o allo stato solido. Nelle applicazioni automobilistiche si tratta principalmente di una membrana di materiale polimerico. Tale materiale deve possedere proprietà elettrolitiche, ovvero essere facilmente attraversabile da alcuni tipi di ioni e impermeabile alle cariche elettriche.

Ogni singola cella produce mediamente una tensione di 0,7 volt, una densità di corrente compresa tra $300\div 800 \frac{mA}{cm^2}$ e una potenza tra $15\div 20$ W. Questi valori essendo troppo bassi per l'utilizzo pratico, per ottenere le prestazioni desiderate, si collegano in serie più celle mediante piatti bipolari per formare una catasta.

Ogni catasta è, quindi, assemblata in moduli collegati in parallelo affinché sia possibile ottenere la potenza desiderata.

Nonostante possa sembrare estremamente differente dal veicolo elettrico descritto in precedenza, un sistema a celle combustibile riceve in input il combustibile (idrogeno) e fornisce in output energia elettrica, perciò viene considerato un veicolo elettrico a tutti gli effetti.

Il mercato di questo tipo di veicolo è in rapida ascesa, poiché con una rete di rifornimento adeguata rappresenterebbe la più semplice forma di mobilità alternativa possibile.

Nel 2017 le vendite sono raddoppiate rispetto a quelle di tutti gli anni precedenti.

Capitolo 8

Appendice C

La fase di stampaggio

Nella fase di stampaggio vengono elaborate tutte le parti metalliche, caratterizzate da grande superficie, che completeranno il corpo vettura attraverso la loro unione con il telaio.

I prodotti di stampaggio sono ottenuti a partire da bobine di lamiera in acciaio o alluminio, a seconda le scelte effettuate in fase di progettazione del prodotto.

Gli spazi vuoti, di dimensioni ben definite, vengono effettuati tramite macchine specializzate nel taglio di lamiera. Le fasi di progettazione di processi sono integrate con simulazioni virtuali per valutare carichi e requisiti dimensionali richiesti.

Dopo essere estrapolati dalle bobine, i fogli vengono portati vicino alla linea di stampaggio che si compone di un certo numero di presse: durante il processo vi sono dei robot che manipolano le lamiere tra le presse per consentire una graduale deformazione plastica.

La linea potrebbe essere completamente automatica, in tal caso l'operatore si occupa solamente della manutenzione durante l'arresto della produzione.

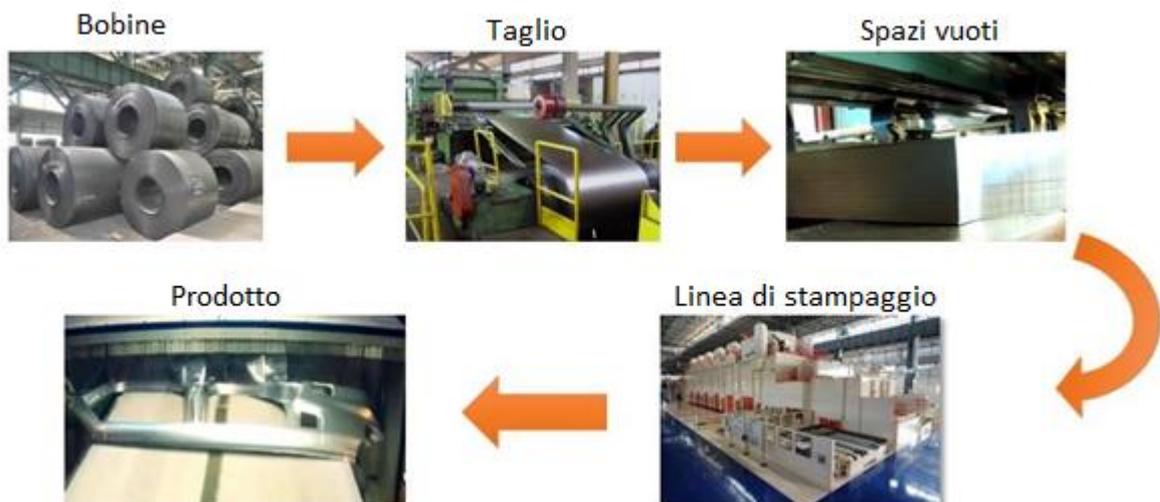


Figura 64 - Schema riepilogativo del processo di stampaggio

La tranciatura è effettuata per ottenere gli spazi vuoti nel caso dell'acciaio, mentre l'alluminio arriva già con gli spazi vuoti presenti.

L'utilizzo di un determinato materiale è una scelta strategica basata su aspetti tecnologici, infatti il taglio dell'alluminio o dell'acciaio comporta la definizione dei parametri di processo molto diversi a causa delle diverse caratteristiche dei due materiali in termini di forze di taglio.

Il processo di stampaggio coinvolge componenti con elevato rapporto superficie/volume di materiale.

Questo processo, riassunto in figura 65, ha diversi problemi critici, pertanto la fase di progettazione deve essere molto accurata. Il materiale di partenza è il primo soggetto per il processo di laminazione, attraverso il quale la lamiera acquisisce piccolo spessore e notevole isotropia lungo la direzione di laminazione come mostrato in figura con il processo di rullatura.

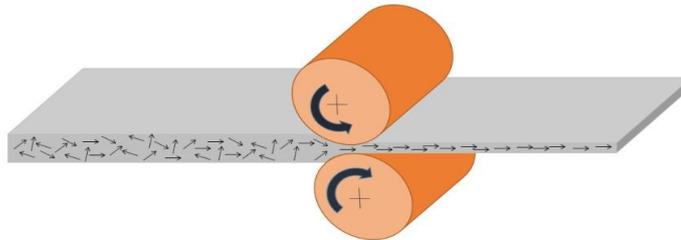


Figura 65 – Schematizzazione di un processo di rullatura

Il foglio di metallo è manipolato per formare una bobina al fine di rendere più facile per trasportarla verso lo stampaggio.

In ingresso alla macchina, la bobina è srotolata e raddrizzata per annullare gli effetti di curvatura residua nel materiale.

Con il processo di stampaggio è possibile ottenere prodotti di varie forme grazie all'effetto di deformazione plastica; per questo motivo le deformazioni che il materiale deve subire sono rilevanti e devono superare la caratteristica del limite elastico del materiale (snervamento) senza tuttavia raggiungere il limite di rottura.

La curva sforzo-deformazione è lo strumento più comune utilizzato per caratterizzare i materiali in cui si cerca di caratterizzare l'area utile per tale processo, figura 66.

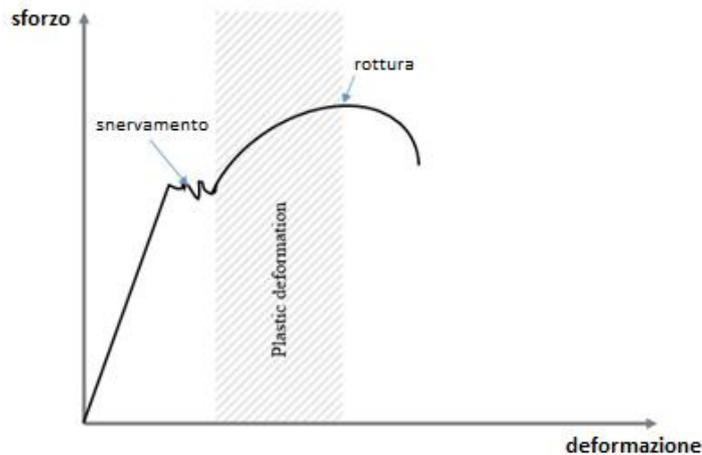


Figura 66 - Area di deformazione plastica dei materiali

L'area campita finemente mostra il dominio, dato dalle coppie di valori sforzo-deformazione, che consente la deformazione plastica voluta del materiale; perciò si può mantenere la forma ottenuta deformando e valutando il residuo dovuto al ritorno elastico.

Solo il ritorno elastico è un limite del processo che non è stato completamente superato. Al giorno d'oggi, i software, basati sui metodi agli elementi finiti e utilizzati per le simulazioni virtuali, non sono in grado di fornire valori affidabili del ritorno elastico che seguirà la deformazione reale.

La formabilità delle lamiere è uno dei parametri più importanti da prendere in considerazione per la produzione automobilistica. La formabilità è una caratteristica del materiale e influenza:

- Stile;
- Geometria (forma e finitura);
- Prestazioni (rumorosità, tolleranze).

Per questi motivi è essenziale una buona fase di progettazione del processo di stampaggio.

Il processo richiede molto dettagliati studi preliminari di fattibilità che implicano l'uso di diagrammi, ad esempio della curva limite di formatura (Forming Limit Curve), mostrata in figura 67, che consentono di caratterizzare il materiale relativo al prodotto e al processo.

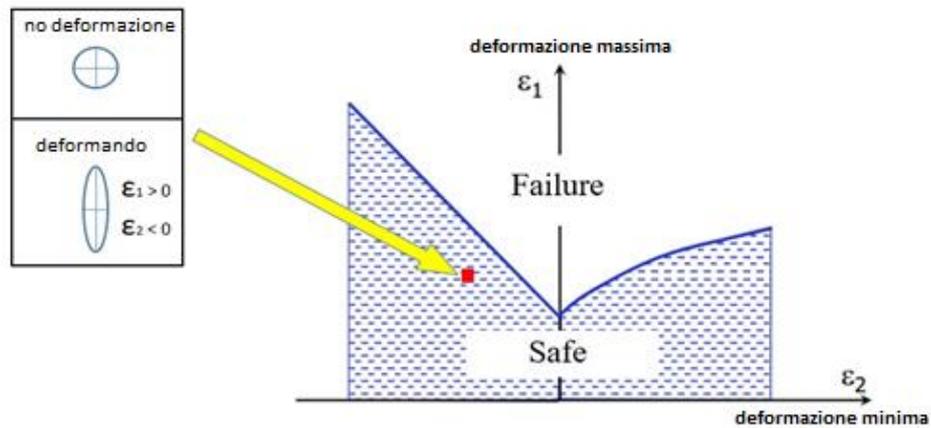


Figura 67 - Forming Limit Curve (FLC)

Il diagramma FLC è costruito rappresentando la deformazione minore principale sull'asse delle ascisse e la deformazione massima sull'asse delle ordinate. I due valori sono ottenuti sperimentalmente seguendo questi tre passaggi:

1. Rappresentando dei cerchi sul componente, nelle aree statisticamente critiche;
2. Deformando il componente fino alla rottura meccanica;
3. Misurando le deformazioni dei cerchi lungo gli assi principali di misura.

Il grafico permette immediatamente di stimare la formabilità dei componenti utilizzando le deformazioni massime e minime come dati di input.

In prima analisi, un processo è fattibile quando provoca deformazioni sul componente che portano a punti al di sotto della curva limite. In figura 68 sono mostrati i risultati dei test di formabilità svolti su un autoveicolo.

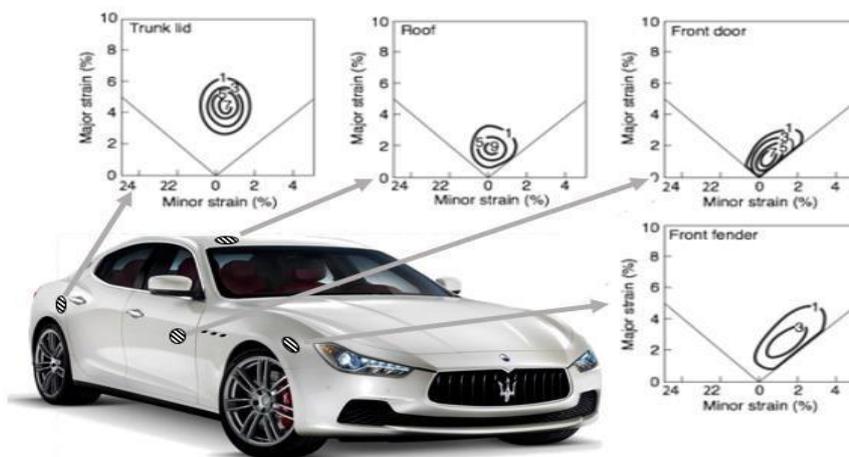


Figura 68 – Test di formabilità per un autoveicolo

Gli strumenti utilizzati nell'effettivo processo di stampaggio sono due stampi (punzone e matrice) e sono guidati da presse; gli accessori completano la macchina e garantiscono che il processo sia effettuato in modo efficace.

Le presse possono essere meccaniche o idrauliche, a seconda del tipo di azionamento; le prime sono in grado di eseguire un numero maggiore di colpi al minuto rispetto alle presse idrauliche, che sono invece in grado di gestire carichi più elevati.

La fase di lastratura

I processi di assemblaggio meccanico dei vari componenti, per lo più lavorati durante la fase di stampaggio, che permettono di creare la struttura portante della vettura sono eseguiti in lastratura.

I componenti da assemblare consistono principalmente di pezzi stampati e travi.

Vengono ottenuti sottogruppi di maggiori dimensioni sono gradualmente partendo da gruppi di componenti più piccoli. Possono essere identificate tre parti principali:

- Sottoscozza;
- Corpo;
- Chiusure.

Come mostrato in figura 69, tali parti sono costruite individualmente mettendo insieme i vari sottogruppi e, successivamente, verranno collegate per formare la scocca completa che verrà spedita al reparto verniciatura.

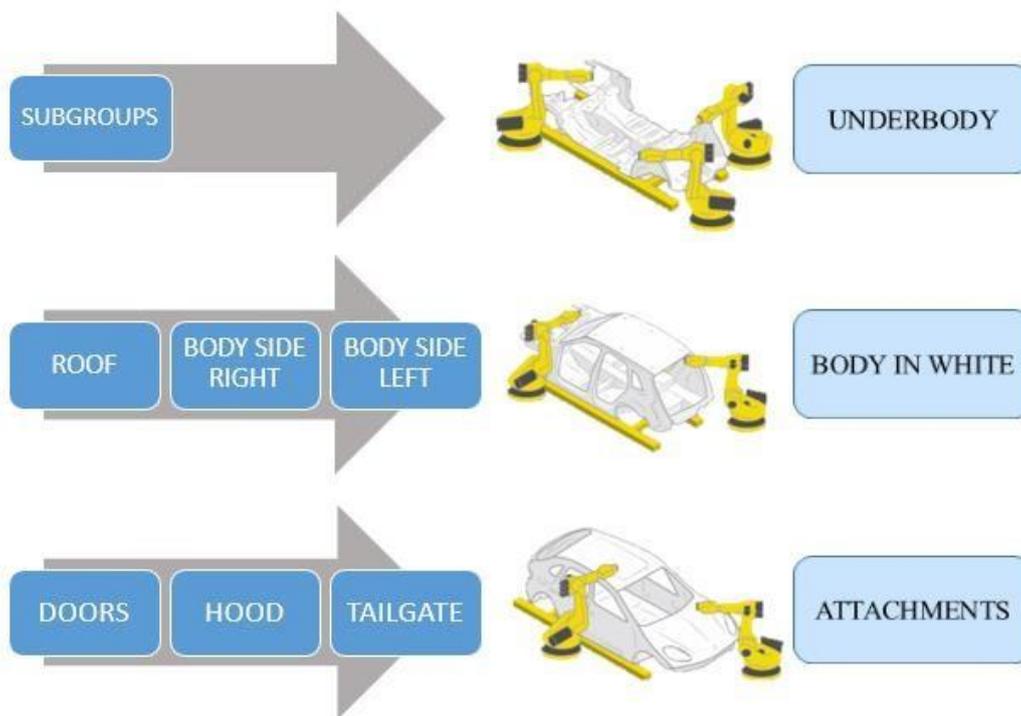


Figura 69 – Sottogruppi del corpo vettura

Il corpo vettura, che risulta essere la struttura portante della vettura, comprende: un telaio o “underbody” costituito da una parte anteriore e una posteriore collegati tramite una piattaforma centrale; un “upperbody” che viene creato direttamente sul sottoscocca, su cui vengono unite le parti interne ed esterne dei lati in relazione allo stile e alle prestazioni del modello specifico; infine vi sono le chiusure che sono assemblate nella fase definita come “ferratura”, per completare il montaggio del corpo.

Il collo di bottiglia può essere rappresentato dalla costruzione dell’upperbody sulla sottoscocca, a partire dalla saldatura dei lati. In questa fase, numerosi robot funzionano in parallelo in una stazione chiamata “Robogate”.

La saldatura, la rivettatura e l’incollaggio sono i processi principali con cui si eseguono solitamente i collegamenti meccanici e possono essere eseguiti automaticamente, semi-automaticamente o manualmente.

Le tecnologie utilizzate in carrozzeria per unire i componenti al fine di ottenere i sottogruppi possono essere molteplici, le principali sono mostrate in figura 70.

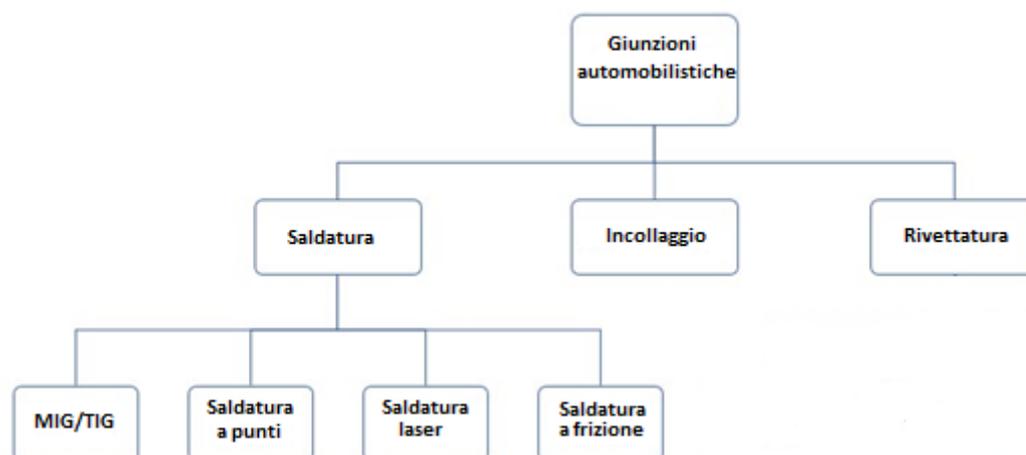


Figura 70 – Le giunture più comuni nell’ambito dell’autoveicolo

È chiaro che il processo implica un più elevato livello di automazione in alcuni casi, soprattutto per quanto riguarda le più recenti tecnologie, come la saldatura laser e a frizione (FRW, Friction Welding).

La saldatura è un processo di giunzione meccanico basato sulla fusione dei materiali e può essere eseguita seguendo differenti metodi.

I principali processi di saldatura adottati sono:

- Il processo MIG/TIG che prevede una saldatura ad arco elettrico in cui la creazione del cordone di saldatura è protetta da gas inerte (argon o elio) in entrambi i casi, al fine di prevenire fenomeni corrosivi che causerebbero una scarsa qualità del giunto; i due processi differiscono poiché il metodo TIG utilizza un elettrodo in tungsteno non consumabile;
- La saldatura a punti sfrutta la maggiore resistenza al flusso di corrente elettrica nella zona di separazione tra i componenti da saldare; infatti, in tale zona la conduttività è molto più bassa rispetto al materiale di cui sono costituite le due parti. Questa resistenza converte l'energia elettrica in calore che condurrà alla fusione locale dei materiali. Il corpo vettura contiene centinaia di punti di saldatura ottenute attraverso questa tecnologia;
- La saldatura laser è una tecnologia che permette di unire i componenti mediante l'utilizzo di un fascio di energia generata da una sorgente laser. Il fascio comporta alti livelli di energia concentrati in un'area ridotta in grado di vaporizzare i materiali quasi istantaneamente; questo processo assicura una saldatura continua con tempi ciclo molto bassi;
- Il processo di fusione a frizione (FSW) utilizza un perno sagomato con una spalla, al fine di aumentare la superficie di contatto e tenere il materiale fuso: questo strumento ruota per produrre calore sfruttando l'effetto di attrito e mescolando il materiale dei due materiali.

Tra le tecnologie di giunzione che non prevedono la fusione del materiale c'è l'applicazione di un materiale adesivo intermedio; tale processo presenta caratteristiche profondamente diverse dagli altri tipi di giunti:

- Assenza di concentrazione degli sforzi dovuta alla continuità venuta a crearsi tra i materiali;
- Pre-trattamento necessario al fine di aumentare la rugosità superficiale nell'area del giunto.

L'incollaggio è una tecnica di giunzione comune nel settore dell'autoveicolo e particolarmente vantaggiosa quando i materiali da assemblare sono differenti come nel caso di materie plastiche e alluminio, tuttavia questa tecnica rende il componente resistente alle sollecitazioni di taglio e discretamente a trazione.

La fase di verniciatura

Conclusa la fase di lastratura la scocca viene mandata in verniciatura.

Al giorno d'oggi i processi di verniciatura sono molto avanzati ed efficaci, anche se hanno grandi opportunità di miglioramento e per tale motivo sono in fase di continuo sviluppo. La verniciatura è una tappa molto importante nel processo di produzione delle vetture poiché copre due ruoli fondamentali che determinano il livello di qualità finale del prodotto:

- Proteggere il substrato dei materiali come acciaio, alluminio o plastica da azioni corrosive causate da agenti esterni;
- Migliorare e caratterizzare l'aspetto estetico della vettura.

È essenziale che la verniciatura venga progettata per ridurre al minimo il consumo di risorse energetiche, di acqua e di emissioni inquinanti. Seguendo tali caratteristiche si ottiene un flusso di produzione con un'alta efficienza.

In questa sezione sono descritte le macro-fasi svolte nel reparto verniciatura, figura 71, al fine di fornire una panoramica del processo generalmente utilizzato nel settore automobilistico.

I primi passi vengono effettuati per rendere le scocche resistenti alla corrosione, mentre le fasi successive garantiscono le caratteristiche estetiche finali del prodotto.

Prima di iniziare la pittura, è necessario che tutte le scocche subiscano un pretrattamento di pulizia e rivestimento chimico utile per le fasi successive.

Il corpo vettura viene movimentato in aria tramite ganci e catene e procede lungo un percorso prestabilito all'interno dello stabilimento; successivamente la scocca è immersa in vasche di fosfato, in cui avviene l'elettrodeposizione di una resina epossidica o acrilica sull'intero corpo grazie al processo di cataforesi. Il corpo viene ruotato all'interno del serbatoio in modo che la resina possa raggiungere anche le zone meno accessibili.

La resina depositata elettro staticamente ha un duplice ruolo, infatti, protegge le parti da agenti chimici e atmosferici e migliora l'adesione degli strati successivi di vernice.

Il bagno in cui si svolge il processo di cataforesi è chiamato "bagno di fosfato", perché un piccolo strato di ferro viene convertito in un fosfato di ferro o uno strato inorganico di fosfato di zinco, attraverso reazioni chimiche. Il fosfato di ferro o di zinco rende la superficie della scocca resistente alla corrosione.

Dopo il "bagno di fosfato" è necessario cuocere e asciugare gli strati superficiali e la conoscenza dei parametri corretti in termini di temperatura e umidità risulta fondamentale per ottenere un buon risultato finale.

Dopo la cottura e l'asciugatura, si attua il deposito di vernici in diversi strati. Il numero di strati può variare a seconda delle scelte effettuate dai dipartimenti sul singolo modello.

Durante la verniciatura a spruzzo, l'ambiente è strettamente controllato in termini di temperatura, umidità relativa, pulizia e portata di vernice; il controllo di processo è molto importante per creare strati con spessore e qualità finali necessari.

Valori ottimi per le condizioni di verniciatura possono essere: velocità di flusso dell'aria pari a 30÷60 cm/s, temperatura intorno a 22÷24 °C e un'umidità relativa dell'aria intorno al 40÷60%.

Tra le varie stazioni vi sono i forni che permettono l'indurimento delle resine.

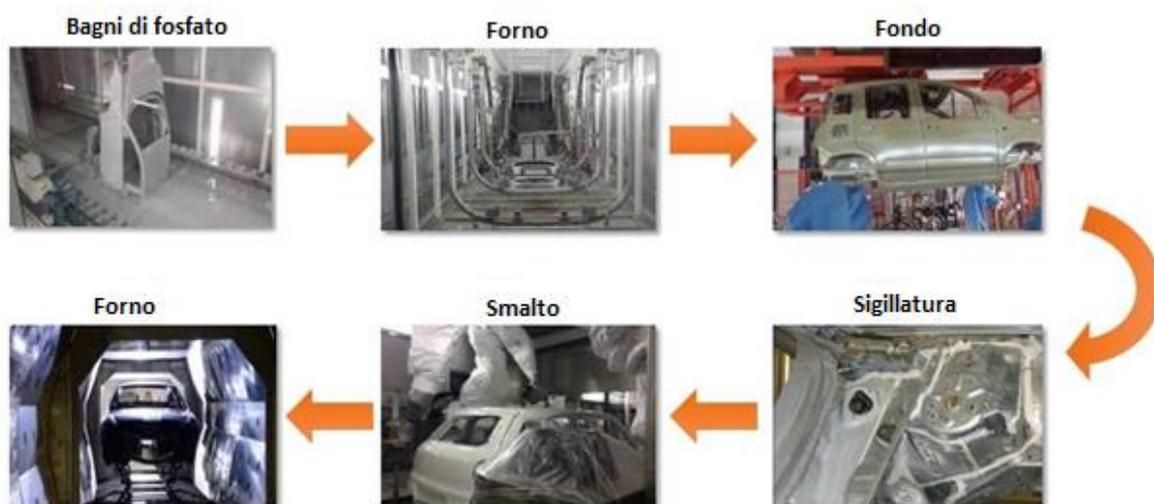


Figura 71 - Flusso durante il processo di verniciatura

La sigillatura delle parti del corpo durante la verniciatura è essenziale per la qualità finale del prodotto e, per questo motivo, deve essere effettuato con estrema precisione; generalmente il sigillante viene applicato manualmente attivando e spostando gli applicatori appositi.

Le parti più importanti da isolare sono i giunti saldati che presentano il più alto potenziale corrosivo.

Per quanto riguarda molti componenti realizzati con materiali non metallici, quali plastica e fibra di carbonio, il processo di verniciatura è generalmente effettuato sul singolo componente nel momento in cui non è ancora stato montato sul corpo metallico: questo modo di operare è dovuto principalmente ai differenti effetti termici dei materiali.

Tale processo è in continuo sviluppo, infatti alcuni produttori stanno cominciando a testare e utilizzare processi a bassa temperatura per dipingere la scocca comprendente anche i componenti in plastica. La verniciatura, come pure le altre fasi di produzione, presenta alcuni problemi di processo che devono essere superati al fine di ottenere un prodotto finale senza

difetti, pertanto, una rielaborazione manuale potrebbe essere necessaria anche dopo stazioni completamente automatiche.