

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale



**Politecnico
di Torino**

Analisi di fattibilità di una Gigafactory da 20 GWh per la produzione di celle di batterie litio-ione.

Relatrice

Prof.ssa Anna C. Cagliano

Correlatrice

Prof.ssa Silvia Bodoardo

Laureando

Antonio Amico

Anno Accademico 2020-2021

Indice

Introduzione.....	1
Capitolo 1 Analisi della letteratura-Stato dell'arte.....	6
1.1. Chimica delle celle più comuni	6
1.1.1. Cella al piombo acido.....	6
1.1.2. Celle al nichel-cadmio (NiCd)	7
1.1.3. Cella al nichel-metal-idruro (NiMH)	7
1.1.4. Celle agli ioni di litio (Li-Ion).....	7
1.1.5. Confronto tra le celle più comuni in commercio.....	9
1.2. Configurazione delle celle più comuni	9
1.3. Produzione mondiale di LIB (Lithium Ion Battery)	10
1.4. Componenti di una cella di batteria	12
1.5. Specifiche tecniche di una batteria	13
1.6. Il ciclo di produzione	14
1.6.1. Electrode Manufacturing.....	15
1.6.2. Cell Assembly	18
1.6.3. Cell Finishing	20
1.7. Capacità	22
1.8. Layout.....	23
1.8.1. Scelta del Layout.....	24
1.9. Logistica	25
1.10. Industria 4.0.....	26
1.11. Research Gap.....	28
Capitolo 2 Risorse necessarie	29
2.1. Componenti e materiali per la cella agli ioni di litio	29
2.1.1. Materiali per il catodo	29
2.1.2. Materiali per l'anodo.....	32
2.1.3. Materiali per l'elettrolita	34
2.1.4. Separatori, binder e additivi	36
2.2. Macchine del processo produttivo	38
2.2.1. Slurry Mixer.....	39
2.2.2. Coater & Dryer.....	41
2.2.3. Solvent Recovery System.....	44
2.2.4. Calender	45
2.2.5. Slitter.....	47

2.2.6.	Vacuum Oven.....	47
2.2.7.	Die Cutting Machine	49
2.2.8.	Stacking Machine.....	50
2.2.9.	Tab welder machine	52
2.2.10.	Sealing Machine.....	53
2.2.11.	Electrolyte Filling Machine.....	54
2.2.12.	Camera Climatica.....	55
2.3.	Ubicazione dell'impianto industriale.....	57
2.3.1.	L'ubicazione delle industrie	57
2.3.2.	Principali fattori ubicazionali	59
2.3.3.	Metodi di scelta dell'ubicazione fra più alternative	63
2.3.4.	Scelta finale dell'ubicazione	65

Capitolo 3 Dimensionamento del Layout..... 71

3.1.	Bill of Materials – BOM.....	71
3.2.	Informazioni tecniche	73
3.3.	Fasi di lavorazione.....	75
3.4.	Electrode Manufacturing	76
3.4.1.	Electrode Slurry Mixing.....	76
3.4.2.	Coating & Drying.....	78
3.4.3.	Solvent Recovery System.....	80
3.4.4.	Calendering	81
3.4.5.	Slitting.....	82
3.4.6.	Vacuum Drying.....	83
3.5.	Cell Assembly.....	85
3.5.1.	Electrode Shaping – Notching.....	85
3.5.2.	Stacking.....	86
3.5.3.	Tab Welding.....	87
3.5.4.	Case Insertion & Case Closure.....	88
3.6.	Cell Finishing.....	89
3.6.1.	Electrolyte Filling.....	89
3.6.2.	Rest.....	90
3.6.3.	Formation Cycling.....	92
3.6.4.	Electrolyte Re-Filling.....	93
3.6.5.	Aging.....	93
3.7.	Risultati.....	94
3.8.	Automazione e Manutenzione	99

Capitolo 4 Magazzini e Servizi di Stabilimento.....	101
4.1. Magazzino Materie Prime e Prodotti Finiti	101
4.1.1. Electrode Slurry.....	102
4.1.2. Dimensionamento Magazzini.....	103
4.2. Servizi generali di stabilimento	107
4.2.1. Parcheggio.....	108
4.2.2. Mensa, Infermeria e Servizi Igienico-Sanitari.....	110
4.2.3. Sala di monitoraggio e Sala di Manutenzione.....	111
Capitolo 5 Conclusioni e Ricerche Future	112
5.1. Benefici della tesi	112
5.2. Limitazioni riscontrate.....	114
5.3. Sviluppi Futuri	115
Bibliografia.....	118
Sitografia	122
Ringraziamenti	126

*A mia madre Idrusa
e al mio principino Thiago.*

Introduzione

Il 28 novembre 2019, visti i dati scientifici più recenti ed esaustivi sugli effetti dannosi dei cambiamenti climatici presentati nella relazione speciale del gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC) dal titolo "Riscaldamento globale di 1,5 °C", il Parlamento Europeo ha approvato una risoluzione che evidenzia gli effetti dei mutamenti climatici e ambientali e auspica che l'Europa dia una risposta concreta per trasformare l'UE in una società giusta e prospera, dotata di un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva, che nel 2050 non generi emissioni nette di gas a effetto serra e in cui la crescita economica sia dissociata dall'uso delle risorse.

Con una seconda risoluzione l'Unione Europea è stata sollecitata a inviare presso la Convenzione delle Nazioni Unite sul Cambiamento Climatico la propria strategia per raggiungere la "neutralità climatica", da concretizzarsi non oltre il 2050. Tutto ciò ha fatto sì che la Commissione pubblicasse, l'11 dicembre 2019, la **Comunicazione sul Green Deal Europeo** che ha dato il via al dibattito pubblico sulla strategia utile a fare diventare l'Europa il primo continente climaticamente neutrale entro il 2050. La strategia si prefigge anche di proteggere, conservare e migliorare il capitale naturale dell'UE, tutelare la salute e il benessere dei cittadini dai rischi di natura ambientale e dalle relative conseguenze evidenziando al contempo la necessità di condurre la transizione verso il nuovo paradigma in modo giusto ed inclusivo, non trascurando quindi i cittadini ed i territori più fragili e marginali.

Il Green Deal è organizzato secondo 10 obiettivi generali per i quali sono previste circa 50 diverse azioni chiave di *policy* e altre azioni, ad esse connesse, focalizzate su ambiti molto specifici. Tra questi, risultano rilevanti ai fini del lavoro di questo progetto di tesi quelli inerenti a "*Energia pulita, economica e sicura*", "*Mobilità sostenibile e intelligente*", "*Inquinamento zero: per un ambiente privo di sostanza tossiche*", "*Lavorare insieme: un patto europeo sul clima*", "*Strategia industriale per un'economia pulita e circolare*".

Il Green Deal Europeo si presenta quindi come una macro-strategia da cui prende forma un'agenda politica di lungo periodo che rafforza gli indirizzi di sostenibilità di Agenda 2030; contribuirà a plasmare la programmazione 2021-2027 perché i programmi operativi che saranno predisposti dovranno mostrare coerenza con i suoi obiettivi e

supportare le strategie che ne derivano. Inoltre, è evidente lo stretto collegamento tra Green Deal e la Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile.

Per raggiungere questi obiettivi prefissati l'Unione Europea ha deciso di investire in una transizione ecologica che punta su grandi investimenti nel "nuovo" paradigma dell'elettrico per il settore automotive. La Commissione Europea, insieme ai paesi dell'UE, all'industria e alla comunità scientifica, ha deciso di lanciare nel 2017 l'European Battery Alliance (EBA), prima alleanza di settore fra industria ricerca e politica. L'EBA ha dato il via libera al secondo mega-progetto comunitario a sostegno delle attività di ricerca e innovazione nella filiera delle batterie. L'iniziativa, che coinvolge 12 Stati membri, prevede finanziamenti pubblici per 2,9 miliardi di euro, che dovrebbero sbloccare altri 9 miliardi di investimenti privati. Questo servirà a far diventare il vecchio continente, l'Europa, secondo leader mondiale per la produzione di batterie litio-ionio e per essere competitiva sul mercato globale entro il 2050 contro i grandi colossi occidentali, come Cina, Giappone e Corea del Sud. In pochissimo tempo l'EBA è riuscita a creare enorme fermento all'interno del continente a tal punto che oggi sono in fase di realizzazione sul suolo europeo 15 Gigafactory, immensi impianti di produzione su scala GW dedicati alle batterie litio-ione.

L'Italia, uno dei 12 Paesi contribuenti al raggiungimento di questo traguardo, si sta preparando ad accogliere uno di questi grandi impianti industriali per la produzione di batterie di auto elettriche, la più grande in Europa e la dodicesima al mondo per dimensione. Sarà costruita da **Italvolt**, *start-up* fondata e guidata da Lars Carlstrom, già fondatore e azionista di Britishvolt; quest'ultima azienda punta a realizzare la prima Gigafactory in Gran Bretagna, con i lavori che dovrebbero partire nella prossima estate a Blyth, Northumberland. Per il progetto italiano si parla di una capacità produttiva iniziale di **45 GWh** per poi salire a 70 GWh. In sostanza, sarebbe una delle fabbriche di batterie al litio più grandi a livello mondiale, con un investimento stimato in **4 miliardi** di euro, 4.000 lavoratori impiegati e circa 10.000 nuovi posti di lavoro complessivi tra quelli diretti e indiretti.

Mantenendo il focus sugli obiettivi appena menzionati e sui quali tutte le istituzioni competenti punteranno per avere una transizione sempre più green, l'obiettivo principale della tesi è quello di redigere uno studio di fattibilità per il dimensionamento di un layout di un impianto industriale da 20 GWh per la produzione di celle di batterie litio-ione.

Uno studio di fattibilità in ambito progettuale riguarda un'analisi approfondita e dettagliata dei costi, delle caratteristiche e dei risultati di un progetto. Nella produzione

delle batterie sono ancora tanti gli ostacoli che si incontrano durante tutto il ciclo di produzione in quanto si evincono problemi molto rilevanti sull'approvvigionamento delle materie prime necessarie, sui tempi e i costi di trasporto di quest'ultime e soprattutto sul tipo di layout utilizzato nel processo.

Ottimizzare e migliorare un plant layout di un impianto industriale ha lo scopo di andare a ridurre, oltre a tempi e costi, gli sprechi che si possono generare con la lavorazione dei materiali e anche per quanto concerne il processo produttivo riguardo la disposizione dei macchinari nello stabilimento, specialmente perché per la produzione delle batterie sono richieste dettagliate e puntuali caratteristiche tecniche dei locali di utilizzo.

Una corretta predisposizione degli spazi e dei percorsi interni garantisce a rendere il lavoro molto più intuitivo e facile per gli operatori ed evidenzia inoltre eventuali inefficienze e permette quindi di ridurre i problemi sopra descritti. Dunque, un'ottima ed efficiente organizzazione del plant layout consente di ridurre l'utilizzo dello spazio utilizzato in area produttiva al fine di poter configurare al meglio le varie attività necessarie alla produzione.

L'elaborato è suddiviso in cinque capitoli.

Nel Primo capitolo si analizzeranno nel dettaglio le celle di batterie e la loro composizione attraverso uno studio approfondito della letteratura esistente. Nello specifico verranno presentate le varie componenti come il catodo, l'anodo, il separatore e l'elettrolita. In più verranno esplicitati le varie strutture di celle presenti sul mercato, evidenziando la scelta del tipo di cella pouch (a sacchetto) per lo sviluppo di questa tesi. Saranno presentati i vari tipi di celle, evidenziando le differenze con il tipo litio-ione, selezionato per la stesura dell'elaborato, mettendo l'accento sui motivi per i quali si è preferito questo tipo di cella. Verrà descritto in tutte le sue fasi e i suoi aspetti il ciclo di produzione. Infine, sarà fatta un'analisi della letteratura esistente su tema del plant layout, esponendo quanti e quali tipi di layout sono esistenti attualmente per un impianto industriale, facendo anche un accenno alla logistica interna e all'automazione e alla digitalizzazione dell'industria 4.0. Infine, sarà aggiunto il "Research gap" per evidenziare l'assenza di lavori su questi temi che la tesi contribuisce a colmare.

Nel Secondo capitolo si presenteranno le risorse necessarie utilizzate per la produzione delle batterie: i materiali necessari e le macchine richieste per tutto il processo di produzione.

Per quanto concerne i materiali adoperati, a questi saranno annesse le caratteristiche e specifiche tecniche, allegando in più i pro e i contro per ognuno di essi, avendo sempre come riferimento la sostenibilità ambientale, punto focale per questo lavoro finale.

Successivamente sarà dato il focus sulle macchine di produzione delle celle, scelte dopo un'accurata ricerca e analisi delle aziende mondiali produttrici di queste. Questo punto è di fondamentale importanza per il dimensionamento del layout dell'impianto che verrà proposto nei successivi capitoli.

Infine, verrà trattato il tema della scelta dell'ubicazione dello stabilimento. In questa parte verrà fatta un'analisi e ricerca mondiale sui fornitori principali delle materie prime e componenti per la fabbricazione e produzione di una cella di batteria, tenendo conto delle distanze tra la sede di produzione di queste aziende e l'ubicazione proposta dell'impianto, in modo tale da avere al minimo i tempi e i costi di approvvigionamento e trasporto. Questo servirà, principalmente, per motivare e giustificare la scelta della zona di costruzione dell'impianto, essendo peraltro uno dei fattori cruciali da tenere sotto la lente di ingrandimento quando si effettua un lavoro di questo tipo. Al fine di rendere più fluido e snello il lavoro svolto verranno presentate delle mappe, maggiormente europee, delle sedi dell'aziende sopra citate e la zona dell'ubicazione della fabbrica. Queste mappe verranno predisposte una per ogni componente di produzione delle celle di batterie: anodo, catodo, separatori, elettroliti, binder&additivi.

Nel Terzo capitolo sarà eseguito nello specifico il dimensionamento di un plant layout per la produzione di celle di batterie, avendo presente le nozioni apprese riguardo gli studi effettuati nella ricerca scientifica. Al termine del dimensionamento sarà proposto un layout modellato tramite software per concretizzare maggiormente l'idea del lavoro svolto.

Con il Quarto capitolo verrà dimensionato il layout esterno, cioè quello non principale di tutto il processo di produzione. Nello specifico, verrà fornita una particolare attenzione sul magazzino date le varie caratteristiche dei materiali/componenti utilizzati, che influiscono sul tempo di stoccaggio. In più, verrà identificato lo spazio dove potrebbero essere dimensionati e posizionati i vari spazi per i servizi generali di stabilimento. In particolare, si andranno a dimensionare il parcheggio, la mensa, l'infermeria e i servizi igienico-sanitari che variano a seconda dell'utenza, e quindi del personale dipendente, durante i turni lavorativi.

Nel Quinto e ultimo capitolo verranno evidenziate le conclusioni trovate e quali potranno essere gli eventuali sviluppi futuri partendo dalla tesi proposta, come ad esempio il recycling delle batterie quando queste terminano il loro ciclo di vita stimato.

Capitolo 1

Analisi della letteratura-Stato dell'arte

1.1. Chimica delle celle più comuni

In questo paragrafo si illustrano brevemente le principali batterie in utilizzo oggi. Maggiore attenzione sarà portata verso i sistemi litio-ione che sono quelli scelti per questa tesi.

Le batterie ricaricabili, o batterie secondarie o accumulatori, più comuni in commercio attualmente sono la cella al piombo acido, la cella al nichel-cadmio (NiCd), la cella al nichel-metal-idruro (NiMH) e le celle agli ioni di litio (Li-Ion).

1.1.1. Cella al piombo acido

La batteria al piombo acido è il più vecchio sistema di accumulo ricaricabile ideato nel 1859 dal fisico Gaston Planté (Licoccia Silvia, 2013), molto usata su automobili, motocicli e altri veicoli a motore. Sono formate da un catodo di ossido di piombo, da un anodo di piombo spugnoso e come elettrolita si ha una soluzione di acido solforico diluito in acqua distillata. Le celle al piombo sono in grado di fornire una densità di energia di circa 35 Wh/kg per circa 1200 cicli (Licoccia Silvia, 2013). Il piombo essendo un elemento pesante è pericoloso per la possibile fuoriuscita dell'acido. Il maggior vantaggio di questa chimica è il suo basso costo: una batteria grande (es. 70 Ah) è relativamente economica, se confrontata alle altre chimiche. Inoltre, a causa di possibili cortocircuiti e dell'invecchiamento dei materiali, la vita di tale cella è stimata intorno ai 200-300 cicli di carica. Il riciclaggio delle batterie al piombo esauste è di fondamentale importanza, per i vantaggi sia economici sia ambientali ad esso collegati. Se non fosse possibile il riciclo, altre soluzioni di smaltimento delle batterie, come ad esempio discariche idonee a ricevere rifiuti tossico-nocivi, risulterebbero molto onerose sia per gli eccessivi costi e sia per il mancato recupero e valorizzazione del metallo Pb e di alcune componenti plastiche, oltreché dannose per l'ambiente. Il metallo riciclato dalle batterie esaurite rappresenta oltre il 40% della produzione italiana di piombo nonché il 37% del fabbisogno nazionale di metallo. Tale produzione secondaria richiede altresì minore energia rispetto a quella necessaria per la lavorazione del minerale (Automazione Plus, 2001).

1.1.2. Celle al nichel-cadmio (NiCd)

Queste celle usano un ossido di Nichel per catodo, il cadmio come anodo ed un sale per elettrolita. Sono in grado di fornire una densità di energia di circa 45 Wh/kg per un numero di cicli che va da 1000 a 2000 (Licoccia Silvia, 2013).

Due svantaggi che questa cella presenta sono il fatto di essere più costosa e di avere densità di energia inferiore all'accumulatore Pb. Il principale problema di tale batteria è l'effetto memoria: si verifica quando si ricarica ripetutamente una batteria prima che si sia scaricata almeno del 50%. La batteria "dimentica" la sua capacità originale (Licoccia Silvia, 2013).

1.1.3. Cella al nichel-metal-idruro (NiMH)

Nelle moderne batterie al nichel-metal-idruro, NiMH, l'anodo è costituito da leghe di diversi metalli come titanio, nichel, ferro, mentre il catodo è realizzato con ossido o idrossido di nichel e come elettrolita si ha idrossido di potassio, KOH. Queste celle sono abbastanza simili a quelle nichel cadmio, ma hanno una maggiore densità di energia (70 Wh/kg) (Wikipedia - L'Enciclopedia Libera, 2021) e sono meno pericolose quando vengono smaltite in discarica (Pedrini Mario, 2007). Questo tipo di celle di batteria sono state usate a lungo nel campo automotive, nei veicoli ibridi come la *Toyota Prius* o la *Honda Insight/Civic*. Rispetto alle tipologie precedenti non sono molto più costose e soffrono molto meno dell'effetto "memoria".

1.1.4. Celle agli ioni di litio (Li-Ion)

La batteria ricaricabile agli ioni di litio (generalmente abbreviato Li-Ion) è un tipo di batteria comunemente impiegato nell'elettronica di consumo ed è costituita da un certo numero di celle aventi tale chimica. Questa tecnologia ha avuto e ha tutt'ora molto successo per via della elevata leggerezza e per l'alto potenziale elettrico del litio. Qui di seguito vengono riportate schematicamente le caratteristiche principali delle celle agli ioni di litio (Licoccia Silvia, 2013):

- ✓ alta energia specifica (fino a 250 Wh/kg);
- ✓ alta potenza specifica (fino a 500 W/kg per 20 secondi);
- ✓ alta tensione di cella (dai 3,3 ai 4,2 Volt);
- ✓ alta velocità di ricarica;

- ✓ bassa resistenza elettrica interna;
- ✓ elevato numero di cicli (vita);
- ✓ elevata disponibilità della materia prima;
- ✓ non soggette all'effetto memoria;
- ✓ bassa manutenzione;
- ✓ efficienza energetica elevata;
- ✓ celle poco pesanti.

Una delle tecnologie più diffuse usa un anodo di grafite, mentre la tecnologia per il catodo può essere molto più ampia. L'elettrolita è un sale di litio sciolto in un solvente organico anidro. Gli studi attuali si concentrano sulla struttura del catodo; la produzione di batterie si è concentrata verso il catodo a ioni di litio dispersi in una matrice cristallina di un ossido stabile, a causa di instabilità chimica, che spesso portava a surriscaldamenti ed esplosioni (ENEA, 2019).

Una batteria allo stato solido, invece, con un elettrolita solido mostra una migliore stabilità e una maggiore sicurezza in quanto, anche se l'elettrolita è danneggiato, riesce a mantenere la forma standard. Le batterie allo stato solido sono necessarie per aumentare la capacità delle celle di batteria dei veicoli elettrici; fattore molto fondamentale se si vuole che i veicoli elettrici sostituiscano i veicoli a motore a combustione interna (ICEV) mantenendo lo stesso livello di chilometraggio. Una batteria allo stato solido ha una maggiore densità di energia di una batteria agli ioni di litio che utilizza una soluzione di elettrolita liquido. Non ha un rischio di esplosione o di incendio, quindi non c'è bisogno di avere componenti per la sicurezza, risparmiando in questo modo più spazio, che potrebbe essere utile per utilizzare materiali più attivi che aumentano la capacità della batteria. Una batteria di questo tipo può aumentare la densità di energia per unità di area dal momento che è necessario un numero non eccessivo di celle di batterie. Per questo motivo, una batteria allo stato solido è perfetta per fare un sistema di batteria per EVs, che ha bisogno di un'alta capacità. Il Samsung Advanced Institute of Technology ha mostrato il risultato della ricerca di una batteria allo stato solido che può essere caricata/scaricata oltre 1.000 volte con 800 km di chilometraggio con una sola carica (Samsung SDI, 2020).

1.1.5. Confronto tra le celle più comuni in commercio

Per la progettazione dei pacchi batteria è fondamentale individuare il giusto compromesso tra la potenza specifica e l'energia, in modo tale che la cella scelta possa soddisfare le richieste di energia e potenza in particolare per quanto riguarda le applicazioni automotive. Osservando il plot di Ragone in figura 1.1 (Energyskeptic, 2015), si nota che le celle che presentano elevata potenza specifica tipicamente hanno bassi valori di energia specifica e viceversa. Inoltre, le celle agli ioni di litio presentano prestazioni migliori, rispetto alle altre celle.

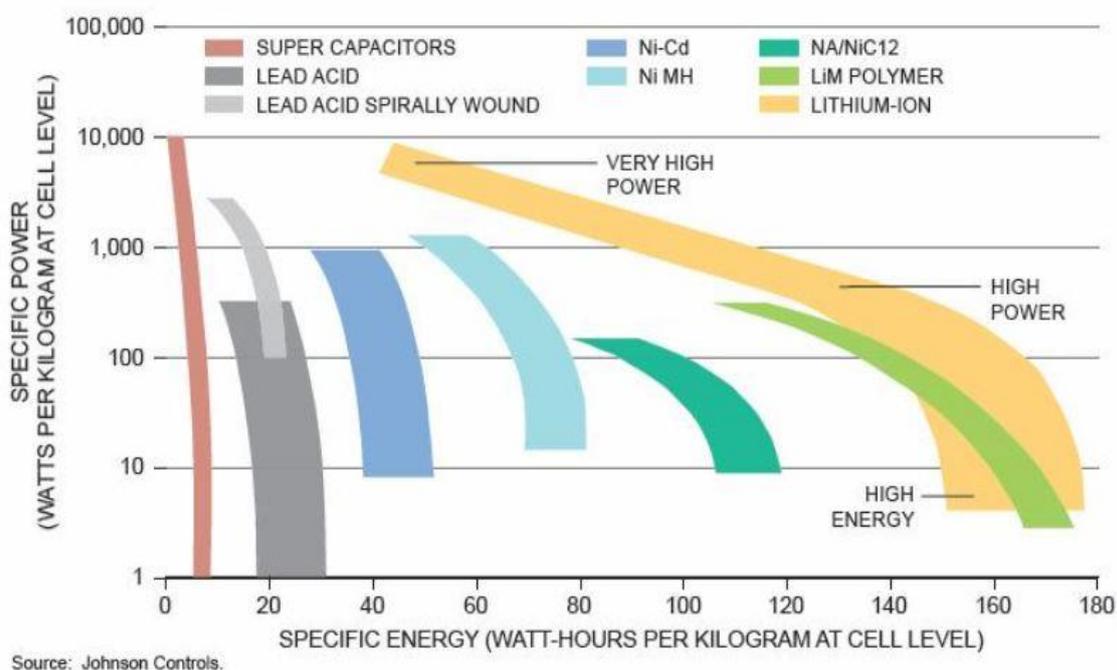


Figura 1.1 - Potenza specifica e densità di energia di alcune tipologie di celle (Energyskeptic, 2015)

Si osserva che le celle al litio possiedono prestazioni migliori rispetto alle altre chimiche: oltre ad avere un'elevata densità di energia, durano più a lungo nel tempo, non sono toccate dall'effetto memoria e hanno una contenuta auto-scarica.

1.2. Configurazione delle celle più comuni

Per i veicoli elettrici, sul mercato attuale, la tipologia di batterie maggiormente utilizzate sono quelle litio ione. I pacchi di batteria sono composti da un determinato numero di moduli costituiti a loro volta da uno specifico numero di celle. L'utilizzo dei moduli ha dei vantaggi

sia in termini costruttivi, ma anche tecnici. Da un punto di vista della produzione le batterie si adattano meglio alle piattaforme scalabili, in quanto per avere una piattaforma più grande rispetto a quella già costruita non serve riprogettare il tutto ex novo, ma basta aggiungere uno o più moduli a quella già esistente. Da un punto di vista tecnico invece, i moduli servono maggiormente per controllare meglio il comportamento delle singole celle, identificando più facilmente eventuali guasti, o riducendo le riparazioni (Zocchi Massimiliano, 2020).

Esistono tre principali formati di celle di batterie: le celle prismatiche, le cilindriche e quelle pouch, come mostrato in figura 1.2 (Flash Battery, 2020). Tipicamente le celle per le auto elettriche sono di tipo prismatico o cilindrico, e il loro numero per auto dipende dalle caratteristiche desiderate del pacco di batteria (Yuan *et al.*, 2017). Le differenze tra questi tipi di celle sono le dimensioni, il peso e naturalmente le diverse specifiche tecniche. In questo studio il focus sarà sulle celle di tipo pouch.



Figura 1.2 - Esempio di celle cilindriche (sx), prismatiche (centro), pouch (dx) Flash Battery (Flash Battery, 2020)

1.3. Produzione mondiale di LIB (Lithium Ion Battery)

Secondo quanto riportato dall'*International Energy Agency* (IEA, 2019b), la produzione di veicoli elettrici è aumentata notevolmente nel XXI secolo: nel 2005 il numero di veicoli elettrici prodotti in tutto il mondo era inferiore a 1500 unità; nel 2016 il numero totale di veicoli elettrici è aumentato arrivando a circa 3 milioni di unità. Solo 1,2 milioni di questi veicoli sono immatricolati per uso stradale e questo evidenzia il grosso problema legato principalmente ai costi di produzione, in quanto più della metà del prezzo di vendita delle auto elettriche è collegato alla batteria installata, ma anche per quanto concerne l'autonomia dato che con una sola ricarica della batteria si potevano percorrere non tantissimi chilometri. Nel 2017 la quota di mercato globale delle auto elettriche era pari all'1,1% con la situazione

in Norvegia che crea sempre più fiducia, in quanto la quota di mercato è pari al 29% tanto da rendere lo Stato il leader mondiale in questo settore.

Negli ultimi dieci anni la produzione di veicoli elettrici è aumentata di molto, con lo stock globale di autovetture elettriche che ha superato i 5 milioni nel 2018, con un aumento del 63% rispetto all'anno precedente. Circa il 45% delle auto elettriche in circolazione nel 2018 si trovava in Cina, per un totale di 2,3 milioni, rispetto al 39% del 2017. In confronto, l'Europa rappresentava il 24% della flotta globale e gli Stati Uniti il 22% (IEA, 2019b). Nel 2020, prima dell'avvento dell'emergenza sanitaria da agente biologico Coronavirus Sars-CoV-2 (CoViD-19) che ha portato ad un blocco del flusso dei trasporti a causa del blocco mondiale dei tutti i settori economici, si era previsto un aumento della produzione di EVs (Veicoli Elettrici) pari al 18% e nel 2030 le previsioni per l'aumento della produzione sono di circa il 16%. Nello scenario delle nuove politiche, che include l'impatto delle ambizioni politiche annunciate, nel 2030 le vendite globali di auto elettriche raggiungeranno i 23 milioni e lo stock supererà i 130 milioni di veicoli (esclusi quelli a due/tre ruote). Nel quadro EV30@30, che rappresenta gli impegni della campagna EVI EV30@30 a raggiungere il 30% di quota di mercato per i veicoli elettrici entro il 2030, le vendite di EVs raggiungeranno i 43 milioni e lo stock sarà più di 250 milioni. La figura 1.3 mostra la distribuzione e la crescita di auto elettriche in paesi selezionati dal 2013 al 2018 (IEA, 2019a).

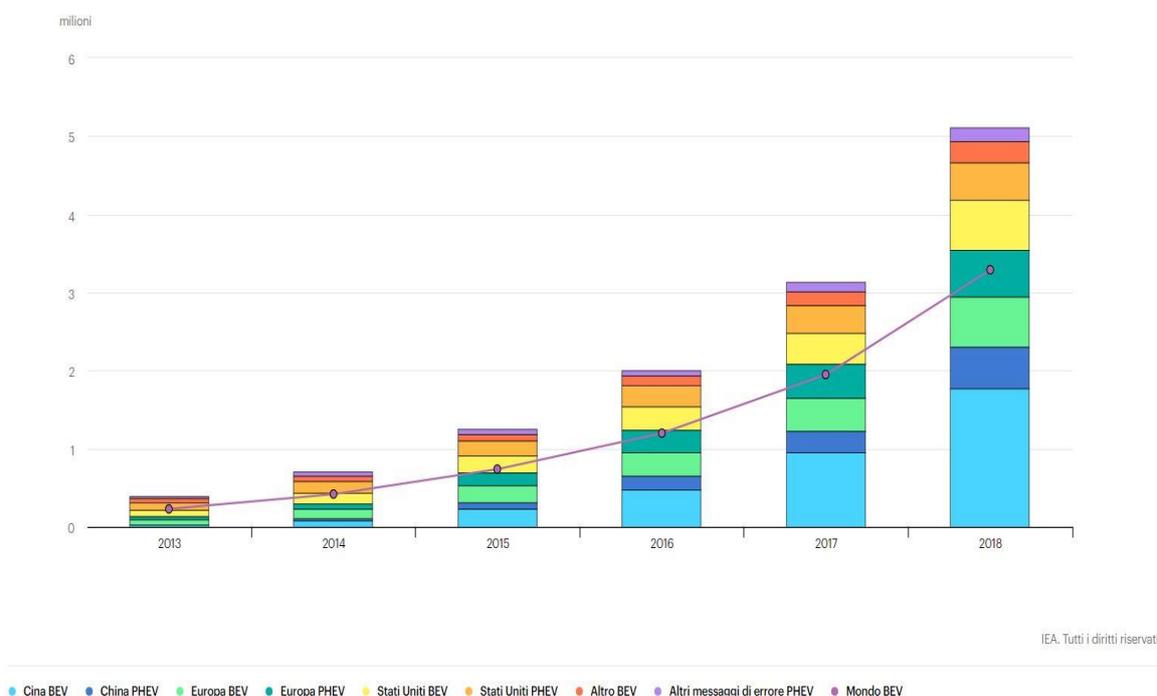


Figura 1.3 - Distribuzione auto elettriche in paesi selezionati, 2013-2018 IEA (IEA, 2019a)

Mentre la domanda di auto elettriche continua ad aumentare, anche le capacità di produzione mondiali devono essere aumentate allo stesso ritmo. Il veicolo elettrico più famoso al momento è Tesla. Tuttavia, sono presenti altre case automobilistiche che producono veicoli elettrici o veicoli elettrici ibridi. Dato che nei prossimi anni la produzione di batterie è stimata più del doppio, saranno realizzati nuovi impianti industriali dalle case automobilistiche ma anche dai governi degli Stati. Come accennato nell'introduzione, enormi progetti di impianti industriali sono pianificati in tutto il mondo, oltre agli impianti di Tesla in Nevada, Buffalo e Australia (Jason, 2017), l'azienda irlandese, Johnson Controls, ha già due gigafactory per batterie EV in Cina e il loro obiettivo è quello di crearne altre due sempre lì (Ren Daniel, 2017). Inoltre, in Svezia è prevista un impianto industriale per celle LIB (Northvolt, 2017), e un altro è stato annunciato in Italia da Italtel (Ilsole24ore, 2021).

1.4. Componenti di una cella di batteria

La cella è la parte più elementare delle batterie. È il dispositivo minimo che converte l'energia chimica, presente nei materiali attivi, direttamente in energia elettrica attraverso reazioni elettrochimiche di ossidoriduzione.

Una cella è composta da due piastre, chiamati elettrodi, che vengono caricati positivamente e negativamente. Gli elettrodi sono immersi nell'elettrolita, che nei casi più comuni è liquido. Attraverso la carica le reazioni convertono l'energia elettrica fornita dall'esterno in potenziale chimico. Il processo opposto avviene durante la scarica (ENEA, 2019).

Nel dettaglio le componenti di una cella sono:

- **ANODO:** è il polo negativo. Generalmente è costituito per la maggior parte di grafite e durante la scarica fornisce gli elettroni al circuito esterno.
- **CATODO:** è il polo positivo. È composto da un ossido di litio e durante la scarica accetta elettroni dal circuito esterno.
- **ELETTROLITA:** è un conduttore di ioni, ma un isolante per gli elettroni. Separa i due elettrodi e fornisce il mezzo per il trasferimento degli ioni tra anodo e catodo. Di solito, nelle batterie al litio l'elettrolita è un solvente organico contenente sali di litio. Un separatore poroso divide elettricamente i due elettrodi, ma permette il transito degli ioni da un elettrodo all'altro.

1.5. Specifiche tecniche di una batteria

Gli accumulatori, o batterie ricaricabili, sono apparati elettrochimici in grado di accumulare carica elettrica e restituirla in fase di scarica. Per studiare, capire e dimensionare al meglio un layout di un impianto industriale che produce celle di batterie occorre conoscere nel dettaglio le specifiche tecniche delle batterie. Secondo la classificazione effettuata da *MIT Electric Vehicle Team* (MIT Electric Vehicle Team, 2008), i valori che caratterizzano una batteria sono:

- **TENSIONE NOMINALE:** indica il lavoro che può compiere l'unità di carica elettrica nel passare dal polo positivo a quello negativo. Rappresenta il valore di differenza di potenziale che non provoca danni alla cella. L'unità di misura è il Volt [V].
- **TENSIONE DI TAGLIO (CUT-OFF VOLTAGE):** è la tensione che la cella ha quando è completamente scarica. L'unità di misura è il Volt [V].
- **CAPACITÀ NOMINALE:** rappresenta la quantità di carica che una cella può erogare durante la fase di scarica, con una certa corrente di scarica, fino a raggiungere la condizione di cut-off voltage. L'unità di misura è [Ah]. In maniera semplificata, la capacità è il numero di Ampere che la batteria riesce ad erogare nell'intervallo di tempo di un'ora.
- **ENERGIA NOMINALE:** è la capacità di accumulo di energia elettrica complessiva della cella e viene calcolata moltiplicando la capacità nominale [Ah] per la tensione nominale [V]. L'unità di misura è il Watt [Wh].
- **DENSITÀ DI ENERGIA:** tale grandezza rappresenta l'energia elettrica immagazzinata per unità di peso [Wh/kg] (densità d'energia gravimetrica) o di volume [Wh/l] (densità d'energia volumetrica) di cella. Entrambe dipendono dalla chimica della cella e definiscono il suo peso e il suo volume.
- **VITA (LIFE CYCLE):** indica il numero di volte che la cella può essere scaricata e ricaricata prima che le sue prestazioni in termini di capacità nominale scendano sotto un limite prefissato (generalmente al 75-80% del valore iniziale).

Le specifiche tecniche sopramenzionate sono determinate e monitorate attraverso due processi fondamentali per il funzionamento della cella di batteria: la fase di carica e la fase di scarica.

- **FASE DI CARICA:** durante la carica l'elettrodo positivo viene ossidato. Gli ioni Li^+ sono sottratti al materiale catodico, passano attraverso l'elettrolita e la membrana e si collocano tra gli strati di grafite dell'elettrodo negativo con la reazione di riduzione di questo.
- **FASE DI SCARICA:** durante la scarica avviene una ossidazione dell'elettrodo negativo. Gli ioni Li^+ sono strappati da questo e migrano attraverso l'elettrolita, per depositarsi sull'elettrodo positivo. Un numero equivalente di elettroni viaggia attraverso il circuito esterno producendo la corrente elettrica utile.

1.6. Il ciclo di produzione

In questa sezione sarà presentato il processo di produzione delle batterie agli ioni di litio a livello teorico e generale. Il processo ha circa venti fasi di lavoro e la sequenza che verrà proposta è un ordine di esempio in cui le batterie possono essere prodotte. Inoltre, in alcuni aspetti è possibile una diversa sequenza dell'elaborazione. Generalmente, il ciclo di produzione delle celle di batteria agli ioni di litio può essere suddiviso in tre macro-fasi: electrode manufacturing, cell assembly, cell finishing.

Il processo consiste non solo nella produzione delle celle, ma anche in misure di sostenibilità, sia economica ma soprattutto ambientale, in quanto riducono l'impatto ambientale e quello economico, attraverso l'utilizzo di economie di scale. Queste misure possono essere ad esempio il sistema di recupero del solvente e la produzione delle coffee bag che riveste la pila di elettrodi. Le fasi del processo sono mostrate in figura 1.4. I passaggi di colore blu fanno parte della produzione degli elettrodi, quelli a sfondo verde indicano l'assemblaggio della cella e, infine, quelli a sfondo giallo rappresentano la formazione della cella.

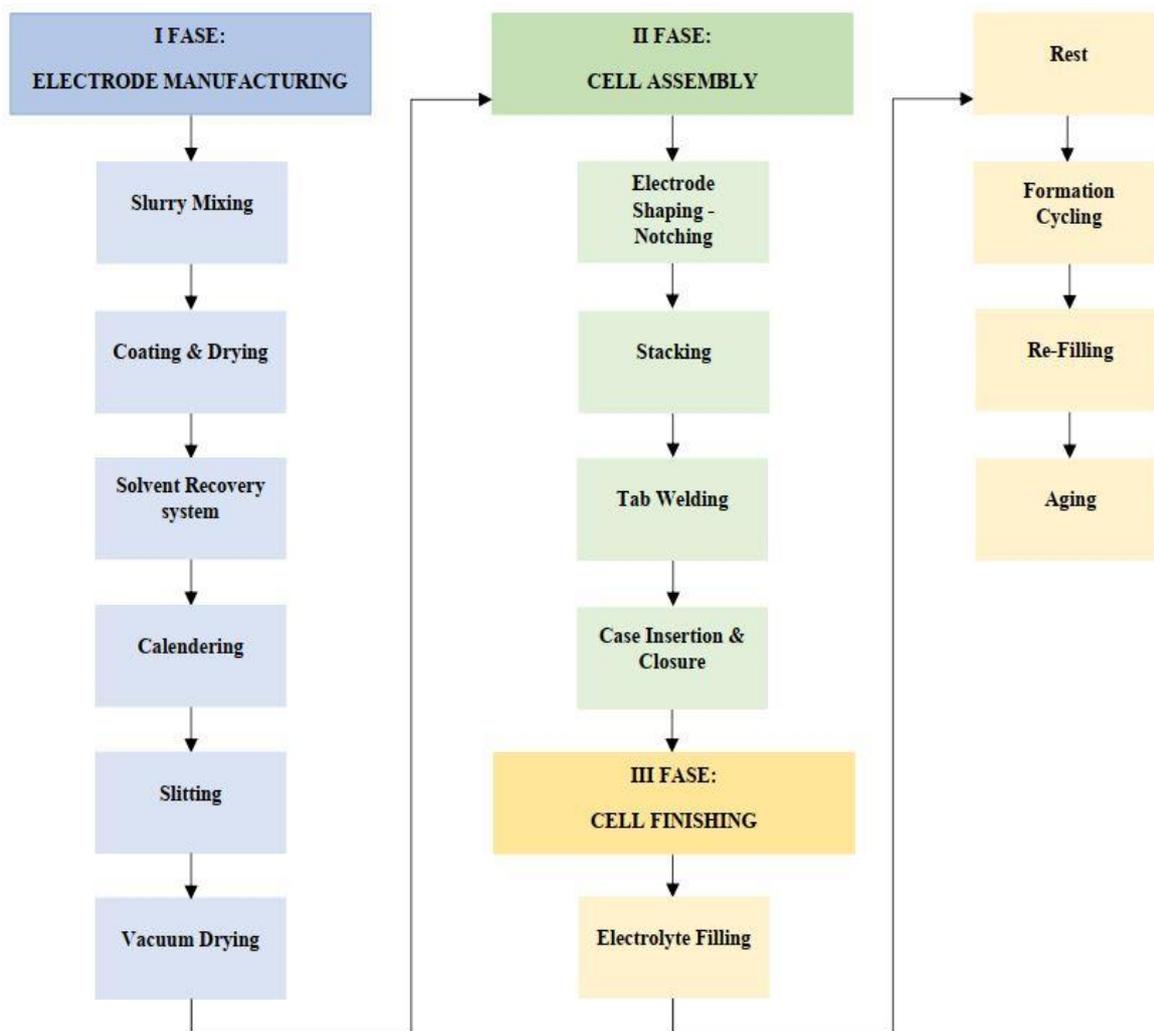


Figura 1.4 - Ciclo di produzione di una batteria agli ioni di litio

Nei paragrafi che seguono verrà trattata ogni fase ed ogni attività del ciclo produttivo a livello teorico e generale. Si rimanda al capitolo successivo, capitolo 2, per eventuali confronti e analisi su diversi metodi di alcune attività e i motivi di scelta per lo sviluppo di questo studio di una metodologia rispetto alle altre.

1.6.1. Electrode Manufacturing

La corrente elettrica scorre nel circuito elettrico esterno della cella tra gli elettrodi positivi e negativi. Ecco perché il foglio di elettrodo è uno dei componenti principali della cella di batteria agli ioni di litio. Il processo di produzione degli elettrodi comprende le fasi di mixing, coating & drying, calendering e slitting. Inoltre, il sistema di recupero del solvente deve essere implementato insieme alle fasi di mixing e coating.

1.6.1.1 Electrode Slurry Mixing

La produzione degli elettrodi è divisa in due linee parallele, in quanto i materiali anodici e catodici non devono essere in contatto tra loro, per evitare contaminazioni. Il mixing dei materiali degli elettrodi è il primo step nell'electrode manufacturing. Questa fase richiede serbatoi in cui vengono immagazzinate le materie prime, serbatoi di miscelazione e un altro serbatoio di stoccaggio per le slurries di elettrodi finiti.

Le slurries dell'anodo sono costituite da grafite, materiale conduttivo, materiale legante e solvente (Liu *et al.*, 2014). Ogni materia prima ha bisogno di contenitori per il loro stoccaggio, contenitori dai quali può essere trasportata ai serbatoi di miscelazione. Il serbatoio del mixing mescola la slurry per tre ore e successivamente questa viene trasferita al serbatoio di stoccaggio finale prima di effettuare il coating.

Il mixing dei materiali catodici è simile, e perciò paragonabile, a quello dei materiali anodici. La differenza principale tra queste due operazioni è il materiale attivo usato per la slurry del catodo che può essere NMC, LFP, LCO... (Liu *et al.*, 2014) e il solvente (Nelson *et al.*, 2012). Per altri aspetti, la slurry è costituita da materiale conduttivo e legante e solvente. Come per la slurry catodica, anche le materie prime dell'anodo richiedono serbatoi di stoccaggio di materie prima, serbatoio di miscelazione e serbatoio di stoccaggio delle slurries.

1.6.1.2 Electrode Coating & Drying

I collettori di corrente, di rame e di alluminio, vengono rivestiti dalla slurry di materia attiva con la stessa metodologia. Il materiale dell'anodo è depositato su un sottile foglio di rame, mentre un altro foglio sottile di alluminio è utilizzato per il materiale del catodo. I rotoli dei fogli sono montati nelle macchine. Man mano che i rotoli vengono aperti e srotolati, il coater li rivestirà su entrambi i lati in modo simultaneo. Il risultato finale che si ottiene sono delle strisce di rame/alluminio rivestite con delle parti nude (non rivestite). Queste ultime verranno utilizzate per creare nelle fasi successive i collettori di corrente.

Di solito, la fase di asciugatura è una fase a sé, individuale. Questa avviene, ad esempio, dopo l'attività del calendaring o dello slitting, ma un'innovazione delle più recenti macchine di coating riguarda proprio l'inserimento in serie del drying: il rotolo dopo essere stato rivestito non viene arrotolato, ma passa direttamente attraverso un forno. Qui, il solvente extra viene rimosso, facendolo evaporare, dalla slurry depositata sul rotolo e successivamente è possibile riavvolgere il rotolo (Electropedia, 2018).

1.6.1.3 Solvent Recovery system

Generalmente, le slurries anodiche e catodiche contengono un solvente organico molto pericoloso per l'ambiente. Questo è il motivo per il quale è importante rimuovere questo solvente dopo la fase di coating, durante l'asciugatura. Per questo studio verranno considerate celle di batterie nelle quali solo i materiali catodici contengono NMP (N-metil-2-pyrrolidone) come solvente, in quanto per gli anodi viene usata della acqua. Babcock & Wilcox Company, azienda tra le maggior produttrici di solvent recovery system, prevede che con un sistema chiuso di recupero del solvente è anche possibile riciclare il solvente in modo tale da non doverlo acquistare in modo continuo e in grosse quantità (Babcock & Wilcox, 2018).

In un impianto industriale di celle di batterie agli ioni di litio, il recupero del solvente è un sistema in più parti che raccoglie il solvente, attraverso l'evaporazione, dal rotolo rivestito, lo filtra e lo riporta al processo di miscelazione. Anche il calore utilizzato per l'essiccazione è riciclabile. Le parti principali nel recupero del solvente sono il filtro, il sistema di scambio termico, lo stoccaggio del solvente e il serbatoio di distillazione. Il sistema comprende anche la combustione di rifiuti non riciclabili e le emissioni (Thomas, 2017).

1.6.1.4 Calendaring

Gli scopi principali della fase di calendaring sono l'assottigliamento degli elettrodi rivestiti e la compattazione dei materiali depositati in modo da creare la corretta porosità per permettere l'adeguato assorbimento dell'elettrolita ed evitando il distacco delle polveri attive. Meyer, Chris, Bockolt, Henrike, Haselrieder, Wolfgang e Kwade (Meyer et al., 2017) hanno dimostrato che lo spessore del rivestimento viene ridotto fino al 40% dopo aver effettuato il calendaring: questo dà importanti vantaggi nella riduzione del volume totale delle celle con conseguente crescita dell'energia volumica. Il rotolo del foglio rivestito viene

inserito nel calender, srotolato e pressato attraverso un sistema di rulli ed infine viene riavvolto nuovamente. Il processo è simile per anodo e catodo. L'unica differenza tra i due processi riguarda la compattazione dei pori: il calendering del catodo richiede più del doppio della quantità di newtonmetri (Nm) (Meyer *et al.*, 2017).

1.6.1.5 Slitting

Il largo foglio calandrato viene tagliato da macchine tagliatrici alle dimensioni richieste attraverso delle lamine. Da un rotolo madre, si generano dei rotoli figlia in base alla larghezza desiderata. È possibile scegliere le dimensioni da tagliare attraverso un monitor computerizzato. I bordi dei fogli sono tagliati ad eccezione delle piccole linguette che permettono all'elettrodo di condurre l'elettricità al momento dovuto.

1.6.1.6 Vacuum Drying

Prima dell'assemblaggio della cella, gli elettrodi devono essere asciugati riscaldandoli sottovuoto.

Questo passaggio serve per mantenere all'interno della cella una percentuale di umidità il più bassa possibile, sia grazie alla fase di asciugatura e sia per le condizioni della stanza asciutta, in modo tale da avere una lunga durata della batteria.

1.6.2. Cell Assembly

Dopo la produzione degli elettrodi, la custodia della batteria (coffee bag) deve essere riempita con gli elettrodi e l'elettrolita e questi componenti poi dovranno essere interconnessi come richiesto. Successivamente, la cella può essere chiusa e sigillata.

1.6.2.1. Electrode shaping – Notching

I "rotoli figlia" sono separati in lamine sottili tramite punzoni taglienti dalle dimensioni desiderate. Ad uno dei due estremi del lato corto il taglio è effettuato aggiungendo un'ulteriore parte, una piccola linguetta, che sarà il collettore di corrente che verrà saldato in seguito.

1.6.2.2. Stacking

In quest'attività le lamine vengono poi allineate e impilate una sopra all'altra all'interno del separatore, il quale è un lungo nastro che nelle batterie LIB è usato essenzialmente per assorbire l'elettrolita e allo stesso tempo impedire il contatto fisico tra i due elettrodi. L'operazione è automatica nei processi industriali, ma manuale in quelli pilota, e sovrappone in sequenza anodo, separatore, catodo, separatore, anodo e così via: le linguette degli elettrodi positivi sporgono da un lato e le linguette degli elettrodi negativi dall'altro. Il risultato è la "pila" che andrà a comporre la cella. Come in altre parti dell'impianto, viene fornita un eccesso di capacità per consentire il recupero dopo tempi di inattività non programmati (MOTUS, 2020).

1.6.2.3. Tab Welding

Le linguette del collettore di corrente per gli elettrodi negativi e positivi sono saldate ai rispettivi terminali, i cosiddetti poli della batteria, mediante saldatura ad ultrasuoni. Questa procedura consente di ottenere una connessione di resistenza quasi zero ed evita il surriscaldamento degli elettrodi durante il processo di saldatura (Nelson *et al.*, 2012).

1.6.2.4. Case Insertion & Case Closure

La pila di elettrodi della batteria è pronta per essere posizionata in una custodia vuota, chiamata coffee bag, che può essere costruita nell'impianto industriale stesso. I contenitori vuoti per le celle di batteria sono fatti di alluminio o polipropilene e vengono tagliati su misura. È anche possibile avere custodie vuote già pronte e, in questo caso, la fase di taglio delle coffee bag può anche essere rimossa dall'impianto industriale.

Dopo il taglio, le coffee bags vengono pressate a freddo per ottenere la forma desiderata. Come sopra, questa fase può essere evitata se si hanno già a disposizione delle custodie già costituite. Ogni cella è racchiusa in questi contenitori, che vengono quindi parzialmente sigillati prima di iniettare elettrolita. Il rivestimento viene sigillato solo su tre lati, poiché il quarto serve per l'aggiunta dell'elettrolita. Prima del riempimento dell'elettrolita, la pila di

elettrodi sarà disposta nella custodia della cella con una macchina interamente automatizzata.

1.6.3. Cell Finishing

Creata e sigillata la coffee bag che racchiude la pila degli elettrodi della cella di batteria, quest'ultima deve essere riempita con l'elettrolita e poi attivata attraverso diversi cicli di carica e di scarica per creare lo strato SEI (Solid Electrolyte Interface) sull'anodo e preparare la cella per garantire il buon funzionamento e la sicurezza della batteria, prima che venga assemblata nei vari moduli e successivamente nei pacchi che andranno ad essere installati nell'autovettura definitivamente.

1.6.3.1 Electrolyte Filling

L'elettrolita ha un ruolo importante nel trasporto degli ioni di litio all'interno della cella (Targay, 2018). La miscela, composta solitamente da solventi organici e sale elettrolitico, viene preparata in un sistema chiuso. Dei tubi trasferiscono l'elettrolita finito alla linea di assemblaggio in cui le celle sono riempite di elettrolita. *Wood, Li e Daniel* (Wood, Li and Daniel, 2015) spiegano che l'elettrolita può deteriorarsi se è a contatto con l'aria o l'umidità. Per questo motivo, una stanza sottovuoto o dry room è necessaria per le fasi dal riempimento fino alla saldatura della cella finale.

1.6.3.2 Rest

Una delle fasi più dispendiose in termini di tempo nella produzione di batterie al litio è la bagnatura dell'elettrolita, nota anche come invecchiamento (aging). Normalmente, il processo di bagnatura può richiedere 24 ore, ma anche questo non sempre garantisce un buon risultato. Un lungo tempo di bagnatura significa avere grandi quantità di celle in deposito nello stesso momento, con una necessità, quindi, di un ampio spazio (Wood, Li and Daniel, 2015). Oltre che per la fase di wetting, le celle vengono asciugate perché il solvente dell'elettrolita in eccesso deve essere recuperato prima della formazione della cella.

1.6.3.3. Formation Cycling

Lo scopo del formation cycling è quello di attivare la cella di batteria. Inoltre, *Pinson e Banzant* (Pinson and Bazant, 2013) affermano che una formation di alta qualità aumenta anche la durata delle celle. In breve, le celle vengono caricate e scaricate almeno tre volte. Pertanto, il ciclo di formazione richiede molto tempo e durante questa fase ci saranno più lotti di celle contemporaneamente. Per questo, questa fase richiede un grande spazio nella produzione di grandi volumi. Una certa quantità di carica viene lasciata all'interno della cella dopo la formation, in quanto questo consentirebbe ai moduli di batteria dell'auto, una volta assemblati e completati, di essere pronti per l'uso, già subito dopo aver lasciato l'impianto industriale.

Yuan, Deng, Li e Yang (Yuan *et al.*, 2017) spiegano nei loro articoli l'intero funzionamento della produzione di celle agli ioni di litio e, allo stesso tempo, la reazione di carica e di scarica come segue: per processo di carica delle celle si intende che il materiale catodico, nel caso di questo studio NMC, genera ioni di litio che passano attraverso il separatore nell'anodo per mezzo di un elettrolita. A loro volta, durante l'operazione di scarica, cioè quando la batteria utilizza l'elettricità, quegli ioni di litio tornano nel catodo. Il ciclo di vita delle celle di batteria dipende dalla durata di questo tipo di operazione di carica e di scarica.

1.6.3.4. Re-Filling

Questa fase, identica a quella denominata Electrolyte Filling, è utile nel momento in cui si rende necessario inoculare altro elettrolita nella cella di batteria dopo i vari cicli di carica e di scarica. Questo perché durante il formation cycling si generano dei gas che, fuoriuscendo in una zona morta della cella, vengono raccolti e poi eliminati prima dell'invecchiamento finale.

1.6.3.5. Aging

L'ultima attività del processo di produzione delle celle di batteria è l'invecchiamento (aging). Questa fase è molto importante in quanto consente di verificare che non ci siano corti circuiti interni attraverso misurazioni costanti della tensione di circuito aperto della cella. Durante questa ispezione finale si rilevano le proprietà elettrochimiche principali,

grazie a cui si definiscono capacità, resistenza e perdita di potenza della batteria. Anche qui è necessario un vasto spazio, in quanto sono grandi quantità di lotti di celle di batteria che vengono ispezionati e invecchiati simultaneamente.

1.7. Capacità

Quando si parla di capacità dell'impianto industriale ci si riferisce al volume massimo di produzione entro un dato periodo (Haverila, M. Uusi-Rauva, E., Kouri, 2009). Di solito la capacità è calcolata come produzione annuale. È influenzata da molte cose come risorse, attrezzature di produzione e spazio. Un fattore molto importante è la previsione della domanda. Nel caso di un errore di produzione di un componente, questo influenzerà immediatamente tutto l'intero ciclo produttivo e di conseguenza ridurrà la capacità massima. È per questo che la capacità netta effettiva può essere solo una frazione della capacità massima teorica (Haverila, M. Uusi-Rauva, E., Kouri, 2009).

La capacità massima corrisponde all'attività del ciclo di produzione con la capacità più basse chiamata collo di bottiglia. La teoria del miglioramento del collo di bottiglia è ampiamente nota come Theory of Constraints – TOC – (Teoria dei Vincoli). Questo strumento di miglioramento continuo mira a rafforzare il processo migliorando la fase di lavoro più debole (Dani, 2006; Jan and Ho, 2006). Quando si inizia a progettare il dimensionamento di un nuovo impianto industriale è importante concentrarsi sulle fasi con i problemi più critici perché in questo modo aumenterà la capacità effettiva.

Quando si parla di una fabbrica automatizzata con produzione continua, è più difficile migliorare la capacità in caso di problemi: la carenza di produzione non può essere colmata da turni supplementari se l'impianto lavora H24 e quindi anche durante la notte. In queste circostanze, le fasi più critiche devono avere un tasso di utilizzo inferiore o almeno non possono essere presenti colli di bottiglia. L'aumento di capacità richiede sempre molte risorse, soprattutto quando si parla di una linea di produzione automatizzata (Haverila, M. Uusi-Rauva, E., Kouri, 2009). Quindi è consigliabile pianificare attentamente la capacità per ogni fase.

Si stima che circa il 2% della produzione nella fase del “formation cycling” possa essere difettoso e quindi non conforme alle specifiche tecniche richieste. Soprattutto all’inizio della produzione, il numero reale di difetti di qualità può essere maggiore ed è per questo motivo che sulle fasi di “Electrode Manufacturing” e “Cell Assembly” bisogna prestare più attenzione.

1.8. Layout

Con il termine *layout* si indica un “*progetto della disposizione planometrica dei macchinari, degli impianti, degli addetti e dei materiali*” (Cagliano Anna Corinna, 2020), cioè significa il posizionamento di parti fisiche in un impianto industriale. Pertanto, un buon layout è quello in cui gli impianti e le attrezzature dell’impianto vengono utilizzati nel modo più efficiente possibile.

Più grande è la pianta, più cose si devono considerare. Questo è il motivo per cui la scelta del layout è sempre un compromesso (Haverila, M. Uusi-Rauva, E., Kouri, 2009). L’impianto industriale di celle di batterie pianificato sarà completamente automatizzato. Inoltre, ha un grande volume di produzione (20 GWh) ed è per questo che il flusso dei materiali è una delle priorità principali. Un’altra cosa molto importante da portare avanti sono le sedi del reparto manutenzione. Anche brevi interruzioni della produzione influenzano notevolmente il volume della produzione. Come ricordano *Tompkins, White, Bozer e Tanchoco* nel loro libro, *Facilities Planning* (Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A. & Tanchoco, 2005) il layout deve essere attentamente pianificato. Soprattutto nella fabbrica automatizzata di grandi volumi, la modifica del layout richiede molto tempo e denaro.

L’impianto mira a produrre batterie per auto elettriche nel modo più efficiente possibile. Al contrario, gli obiettivi del layout selezionato sono la riduzione al minimo dei costi di movimentazione dei materiali, degli investimenti, del tempo di produzione e dell’uso dello spazio. Ciò significa che si desidera che il tasso di utilizzo sia elevato. Pertanto, la pianificazione della capacità e la pianificazione del layout sono essenzialmente correlate tra loro.

1.8.1. Scelta del Layout

Nella sesta edizione del loro libro (Haverila, M. Uusi-Rauva, E., Kouri, 2009) elencano diversi fattori per la pianificazione del layout:

- Bill of material, BOM, (Distinta Base) è l'elenco delle parti e delle materie prime di cui è composto il prodotto;
- Determinazione e sequenza delle fasi di lavoro;
- Volume e capacità di produzione;
- Durata totale della produzione in anni;
- Funzioni di supporto: manutenzione, strutture per i dipendenti, sala di monitoraggio, ecc..

Lo stesso libro presenta diversi tipi di layout con le loro caratteristiche. I tipi di layout più comuni sono *production line*, *cellular layout* e *functional layout*. Il production line, o layout per prodotto, provoca investimenti massicci perché di solito la linea è altamente automatizzata. A causa dell'automazione, il flusso del materiale è chiaro e il tasso di utilizzo è possibile mantenerlo alto, ma in caso di guasto dell'apparecchiatura c'è il rischio che l'intera produzione si fermi. Anche la linea di produzione è inflessibile ed è per questo che si consiglia un grande volume di produzione e una gamma di prodotti bassi (Haverila, M. Uusi-Rauva, E., Kouri, 2009).

Il functional layout, o layout funzionale, prevede che le workstation sono organizzate in gruppi in base alla loro somiglianza. Ad esempio, tutte le attività di taglio si svolgono nella stessa stanza. Il numero di macchine dipende dal volume di produzione. Il layout funzionale è caratterizzato dal fatto che il materiale si muove molto in fabbrica. Inoltre, le scorte intermedie sono comuni (Haverila, M. Uusi-Rauva, E., Kouri, 2009).

Il cellular layout, o layout a isole/celle, viene utilizzato nella produzione a basso volume. Esiste un gruppo indipendente di lavoratori, utensili e macchine che producono un particolare prodotto. Nel layout a isole, un'ampia gamma di prodotti è possibile e non c'è molta produzione Work in Progress (Haverila, M. Uusi-Rauva, E., Kouri, 2009).

Quando si sceglie e si pianifica il layout, i fattori sopra menzionati devono essere letti nuovamente. Poiché ci sono più di 20 fasi di lavoro nella produzione di celle di batterie agli ioni di litio e sono sempre nello stesso ordine, il layout per prodotto (production line) pare essere la scelta più adatta. Inoltre, l'elevato volume di produzione è adatto al volume del layout per prodotto. La produzione ha lo scopo di durare a lungo e la fabbrica sarà completamente automatizzata, che sono anche caratteristiche per il production line. Per questi motivi, il layout per prodotto viene scelto come tipo di layout.

1.9. Logistica

La revisione della logistica dell'impianto industriale si concentra principalmente sulla movimentazione e sul flusso dei materiali. La logistica esterna viene affrontata solo in termini di dimensioni e frequenza di consegna. In senso più ampio la logistica comprende anche la gestione del flusso di informazioni, la gestione della catena di approvvigionamento e l'acquisto di materie prime come parte della logistica (Haverila, M. Uusi-Rauva, E., Kouri, 2009), ma ora l'obiettivo è chiarire le operazioni dell'impianto.

La movimentazione dei materiali, che è un concetto subordinato di logistica interna, è una delle cose più importanti da ben pianificare in un impianto industriale. Con una migliore movimentazione dei materiali, sia lo spazio di fabbrica che il tempo di produzione possono essere significativamente ridotti. In altre parole, la movimentazione dei materiali mira a migliorare il flusso del materiale (Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A. & Tanchoco, 2005).

Tompkins (Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A. & Tanchoco, 2005) elenca diversi punti da concentrare sulla movimentazione dei materiali. I più importanti sono la giusta quantità, la giusta sequenza, l'orientamento, lo spazio e il metodo adatto.

Per giusta quantità si intende la filosofia scelta per le dimensioni di stoccaggio del materiale. In conformità con il principio JIT, Just in Time, attualmente popolare, il controllo pull è pensato per essere una scelta migliore rispetto al controllo push di grandi stock. Il controllo pull comporta inventari essenzialmente piccoli, ma in grandi volumi e produzione stabile

sono anche possibili grandi stoccaggi. La sequenza corretta è associata alla giusta quantità perché entrambi determinano le dimensioni del lotto nell'acquisto, produzione e consegna.

L'orientamento e lo spazio aiutano a pianificare il posizionamento e la conservazione del materiale. L'orientamento è importante in particolare nello stabilimento automatizzato in cui robot e trasportatori automatizzati sono responsabili della produzione e del flusso dei materiali. Il posizionamento delle materie prime e delle attrezzature deve essere pianificato bene perché i robot precedentemente menzionati e i carrelli elevatori automatici sono programmati per funzionare secondo la formula che non tollera i cambiamenti.

L'ultima cosa da considerare sulla movimentazione dei materiali è il metodo adatto. Se esiste un metodo giusto per prodotti e materiali di gestione, significa che ci deve essere più di un modo per farlo. Per ottenere il modo migliore, è necessario pianificare e trovare metodi molto diversi.

1.10. Industria 4.0

Come accennato, l'impianto sarà completamente automatizzato. L'automazione è una nuova tendenza nella produzione e in Germania ha persino ottenuto il nome di "4° rivoluzione industriale". *Lasi, Heiner, Fettke, Kemper, Feld e Hoffmann* (Lasi *et al.*, 2014) illustrano le sue caratteristiche nel loro articolo *Industria 4.0 (2014)*. Il termine Industria 4.0 descrive i cambiamenti, principalmente nella tecnologia dell'informazione, e i suoi impatti sull'industria futura. Secondo l'articolo, questa rivoluzione ha un impatto importante su tutta la struttura organizzativa.

L'automazione consente di utilizzare le risorse finanziarie in modo più efficiente e allo stesso tempo di risparmiare risorse naturali. Questo può essere fatto attraverso la digitalizzazione. La digitalizzazione porta a che tutte le macchine possono raccogliere e registrare dati su affidabilità, difetti e problemi di manutenzione. Un'altra cosa significativa legata all'Industria 4.0 è lo sviluppo e la miniaturizzazione delle apparecchiature; al giorno d'oggi e soprattutto in futuro, la macchina efficiente richiede meno spazio di prima (Lasi *et al.*, 2014).

Nella migliore delle ipotesi, il sistema di automazione è che la produzione inizia grazie all'ordine del cliente e l'intera produzione viene implementata senza un essere umano (Jason, 2017). La pianificazione, lo sviluppo, l'implementazione e la manutenzione di fabbriche automatizzate sono impegnative e complesse (Lasi *et al.*, 2014). In particolare, con questo sistema di automazione integrato si possono notare le esigenze di manutenzione e raccogliere dati dalle apparecchiature. La versione avanzata di questo si chiama Jidoka. Anche se fa parte del pensiero Lean di Toyota, può essere utilizzato in una varietà di produzione moderna (Ma, Wang and Zhao, 2017).

Un termine essenziale nel moderno sistema di automazione è Internet of Things (IoT). Significa che macchine e attrezzature sono connesse a Internet e possono comunicare e sincronizzare i dati tra loro senza il lavoro umano. Il successo della produzione completamente automatizzata richiede un'attenta identificazione per ogni materiale e macchina nell'impianto. I modi moderni per raggiungerlo sono, ad esempio, codici a barre, codici QR (Quick Response) o tag RFID (Radio Frequency Identification), ma sono possibili anche altri sensori (Ma, Wang and Zhao, 2017).

Ma *et al.* (Ma, Wang and Zhao, 2017) introducono l'architettura del moderno sistema Jidoka. Il sistema è più di un semplice sistema Andon che ferma la linea quando si verifica il guasto. L'intero sistema si basa sulla sincronizzazione del sistema e dell'apparecchiatura tra loro, ma la raccolta e l'analisi dei dati garantisce la funzionalità e la continuità del sistema. La figura 1.5 che segue illustra l'interrelazione tra le varie parti del sistema di automazione.

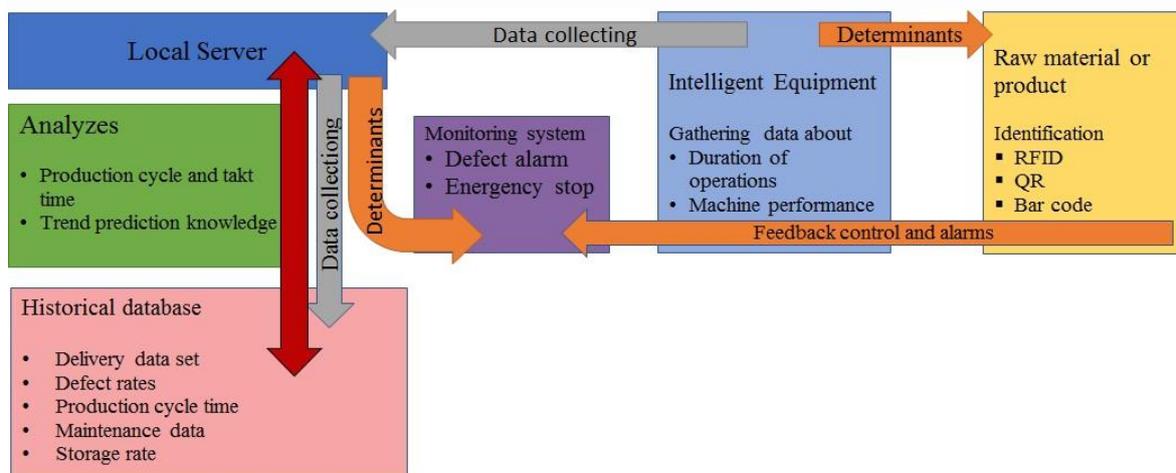


Figura 1.5 - Smart Jidoka System (Ma *et al.* 2017)

1.11. Research Gap

Dagli studi della letteratura dei paragrafi precedenti, è emersa l'importanza e la necessità di realizzare un dimensionamento di un layout di un impianto industriale per la produzione di celle di batterie al litio.

Nella ricerca degli articoli scientifici inerenti alla produzione delle celle di batterie agli ioni di litio sono state trovate per lo più metodi di produzione delle celle a livello chimico. Scarseggiano gli articoli o report attinenti ad impianti industriali e ai loro relativi plant layout che producono questo prodotto di fondamentale importanza nel piano mondiale attuale, visti soprattutto gli obiettivi e le sfide che l'Unione Europea, ma non solo, si è fissata di raggiungere. Dal momento che lo studio di questa tesi si concentra sulla produzione delle celle di batteria di tipo pouch (a sacchetto), le applicazioni inerenti riguarderanno esclusivamente il processo produttivo ad esse legato, consapevoli che per le celle di tipo prismatico, ma soprattutto per quelle di tipo cilindrico, alcune fasi del processo differiscono.

L'elaborato, quindi, cerca di colmare questo gap di ricerca e pone l'attenzione su come un layout per un impianto industriale con queste caratteristiche deve essere dimensionato al fine di soddisfare le esigenze tecnico-economiche complessive dell'azienda produttrice. Gli obiettivi che si vogliono conseguire riguardano la semplificazione del processo produttivo (grado di utilizzo, ritardi di produzione, scorte, manutenzione), la riduzione dei costi di trasporto dei materiali, la riduzione al minimo delle scorte di produzione ed i materiali immagazzinati, l'utilizzo dello spazio disponibile nel modo più efficace anche per evitare eccessivi sprechi soprattutto in termini di manodopera e capitale, la possibilità di concedere ai dipendenti un clima di lavoro non estenuante e soddisfacente.

Capitolo 2

Risorse necessarie

2.1. Componenti e materiali per la cella agli ioni di litio

Negli ultimi anni le richieste, sempre più crescenti, di maggiore potenza e densità di energia hanno portato a sviluppare nuovi dispositivi sempre più efficienti ed efficaci tanto da innovare i materiali utilizzati per la realizzazione degli elettrodi di una cella agli ioni di litio.

I materiali utilizzati per la costruzione delle batterie devono rispondere a dei requisiti, ritenuti fondamentali per avere le prestazioni richieste: in primis, i materiali devono permettere l'inserzione del maggior numero possibile di ioni per raggiungere l'obiettivo di massimizzare la densità di energia della batteria (questo processo reversibile è anche utile in quanto non deve provocare una distorsione notevole del reticolo cristallino). Inoltre, i materiali utilizzati devono essere eccellenti conduttori elettrici e ionici, devono essere stabili strutturalmente e chimicamente per elevate densità di correnti e grandi intervalli di potenziale. Naturalmente, non devono essere solubili nell'elettrolita, e con quest'ultimo non devono dar vita a reazioni secondarie che possano alterare il giusto funzionamento dei processi chimici della cella. Infine, è richiesta una buon risultato sia ad alte ma anche a basse temperature, una cinetica di intercalazione il più veloce possibile e una lunga shelf life (Zolin, 2017).

Esplicitate queste premesse, di seguito sarò presentata una descrizione specifica dei materiali che costituiscono il catodo, l'anodo e infine l'elettrolita in dispositivi di accumulo dell'energia a ioni di litio.

2.1.1. Materiali per il catodo

La composizione chimica e la struttura cristallina sono parametri fondamentali per la scelta del materiale che costituisce l'elettrodo positivo in modo da poter massimizzare la densità energetica, minimizzare l'area di contatto tra elettrodo ed elettrolita e ridurre la resistenza all'intercalazione degli ioni.

Le batterie litio-ione commercializzate su larga scala hanno catodi a base di ossidi di alcuni metalli di transizione ($M = \text{Co}, \text{Mn}, \text{Ni}$) e la cobaltite, ossia ossido di litio e cobalto (LiCoO_2), è la più utilizzata. In tali ossidi la reazione redox nel processo di intercalazione implica la coppia M^{3+}/M^{4+} che si posiziona intorno a 4 V rispetto al litio e questo ha reso possibile lo sviluppo di batterie litio-ione di alto voltaggio all'interno della finestra di stabilità degli elettroliti organici convenzionali basati su miscele di carbonati. Gli ossidi di ferro, economici e non tossici, non possono essere utilizzati in quanto il potenziale di intercalazione della coppia $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ risulta troppo vicino al litio (attualmente studiato come anodo) mentre la coppia $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{4+}$ risulta metastabile e di scarse prestazioni (C. Arbizzani, L. Damen, F. De Giorgio, S. Monaco e M. Mastragostino, 2011).

LiCoO_2 ha una struttura cristallina simile al NaFeO_2 , esagonale e stratificata, in cui si alternano piani di CoO_2 e di Li secondo una configurazione ABCABC. I piani O-Co-O sono caratterizzati dal forte legame tra ossigeno e cobalto che garantisce stabilità alla struttura mentre la buona conducibilità elettrica sul piano è data dalla ridotta distanza tra i cationi di cobalto.

L'ossido di litio e cobalto presenta ottime proprietà elettrochimiche: una capacità specifica di 150 mAh/g, facilmente ottenibile per potenziali di lavoro compresi tra 3.5 e 4.2 V vs Li/Li^+ e una durabilità superiore a 1000 cicli. Non manca, però, di alcuni svantaggi, tra cui l'elevato costo, essendo il cobalto meno abbondante in natura rispetto ad altri metalli di transizione, la tossicità e, in ultimo, l'eventuale reazione tra l'ossigeno e l'elettrolita per fasi troppo de-litiate (Zolin, 2017). Inoltre, tende a degradarsi a temperature superiori ai 150 °C con rottura del legame Co-O e conseguente rilascio di gas che può creare notevoli problemi di sicurezza.

Un'alternativa al LiCoO_2 è costituita dal simile LiMnO_2 . Identico dal punto di vista strutturale e con una capacità specifica di 200 mAh/g, non è tuttavia sufficientemente stabile durante la ciclazione per la sua tendenza a cambiare struttura divenendo uno spinello, $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$ (Zolin, 2017). Il manganito di litio (spinello) LiMn_2O_4 presenta un potenziale operativo fino a 4.1 V vs Li^+/Li ed è definito “*green material*” per la sua non tossicità; ha inoltre un basso costo, essendo il manganese maggiormente abbondante in natura rispetto al cobalto o al nichel. Come il LiCoO_2 , non è però sufficientemente stabile a seguito di ripetuti cicli di carica e scarica a temperature superiori a 50 °C (Xia, Zhou and Yoshio, 1997). Per moderare questi fenomeni si sono seguite diverse strategie, tra cui la sostituzione parziale di

Mn^{4+} con ioni Li^+ o con altri ioni (Ni, Cr, Co o Al), in alternativa, si è modificata la chimica superficiale del materiale per creare un effetto barriera (Scrosati and Garche, 2010).

Un'evoluzione del litio manganito spinello è il $\text{LiNi}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$ (con $0 < x < 0.5$). Tale materiale in corrispondenza di $x = 0.5$ presenta una capacità teorica di 146.7 mAh/g. Al potenziale di 4.7 - 4.75 V vs Li^+/Li , si ha l'ossidazione di Ni^{2+} a Ni^{4+} e questo alto valore del potenziale porta ad una densità di energia specifica di 700 Wh/kg di massa attiva, riferita a Li metallico (Patoux *et al.*, 2009).

Alla luce di questi risultati, la ricerca si è focalizzata verso questo materiale con eventuali modifiche della stechiometria e della chimica superficiale, arrivando a studiare la stechiometria $\text{LiNi}_{0.4}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$, rispetto alla stechiometria $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$. Questo nuovo composto è in grado di raggiungere valori ancora più elevati di capacità a seguito di ripetuti cicli di carica e scarica. Inoltre, è stato evidenziato che nel caso di $\text{LiNi}_{0.4}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$, a differenza del LiMn_2O_4 , la presenza di Mn^{3+} non è causa di instabilità dell'elettrodo per distorsione Jahn-Teller del reticolo (Patoux *et al.*, 2009).

Attualmente, il litio ferro fosfato LiFePO_4 , è uno dei materiali maggiormente studiati e sviluppati a livello industriale. Tale materiale ha un meccanismo di inserzione/de-inserzione degli ioni litio a due fasi, infatti durante la carica si trasforma da LiFePO_4 a FePO_4 , e viceversa in scarica. A parte questo particolare fenomeno, che si traduce in una perdita permanente di capacità al primo ciclo, questo materiale è molto stabile anche alle alte temperature, è ecocompatibile e poco costoso, in quanto si trova in natura sotto forma di minerale e i singoli elementi che lo compongono sono piuttosto abbondanti. Inoltre, il litio ferro fosfato, considerato il suo potenziale di inserzione/de-inserzione di litio, è un materiale catodico termodinamicamente stabile a contatto con gli elettroliti convenzionali usati nelle LIB (miscele di carbonati organici) e proprio per questo motivo, è il materiale catodico ideale per l'utilizzo in batterie LIB per applicazioni nel campo del trasporto elettrico (Ellis, Lee and Nazar, 2010). Una limitazione all'utilizzo di questo materiale è la bassa conducibilità elettrica ($1 \cdot 10^{-9}$ S/cm a temperatura ambiente).

Allo scopo di aumentare notevolmente la capacità specifica, sono stati recentemente studiati composti in grado di intercalare più di uno ione di litio contemporaneamente come gli LiMO_2 (con $M = \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}$); tali materiali sono in grado di assicurare una capacità specifica variabile tra 140-350 mAh/g. Il più conosciuto è il LiNiMnCoO_2 (o LiNMC), proposto per sostituire il tradizionale LiCoO_2 , in virtù della migliore stabilità anche ad alte temperature e della maggiore capacità specifica reversibile, compresa tra 160-200 mAh/g. Il problema principale di questo materiale è l'occupazione parte degli ioni di nichel dei siti

destinati agli ioni di litio, essendo il raggio ionico del Ni (0.69 Å) prossimo a quello del Li (0.76 Å); tale fenomeno, infatti, è noto per peggiorare le prestazioni elettrochimiche del materiale (Julien *et al.*, 2014).

Per lo sviluppo di questo studio di ricerca verranno considerati catodi di celle di batterie composti da LiNMC hanno un rapporto di capacità unico per kg di peso, che è uno dei migliori indicatori attuali. Date le caratteristiche di LiNMC, gli indicatori di capacità, anche con le stesse dimensioni della batteria, possono differire in modo significativo. Tuttavia, per avere un'idea delle caratteristiche di questa batteria, vale la pena fornire i parametri principali di questo tipo di batteria:

- Voltaggio: 3,7 V
- Capacità: 3000 mAh o più.
- Numero di cicli di carica-scarica: almeno 1000
- Disaggregazione termica: + 210°C.

Il valore di tensione indicato è nominale. La massima carica della batteria è possibile fino a un valore di 4,3 V.

Il vantaggio principale delle batterie LiNMC è la sua elevata capacità elettrica. Questo indicatore può raggiungere 220 Wh/kg. Di conseguenza, in qualsiasi dispositivo portatile, questa qualità riduce il peso delle batterie (Technoluxpro.com, 2019).

2.1.2. Materiali per l'anodo

Il primo materiale ad essere impiegato come anodo nelle batterie ricaricabili al litio è stato proprio il litio metallico, in quanto risultava essere il materiale con la più alta capacità specifica. È stato tuttavia accantonato data la sua pericolosa tendenza alla formazione di dendriti. Ad oggi, sembra essere stato rivalutato come possibile materiale anodico per batterie con elettroliti polimerici, ma per quanto riguarda le batterie con elettroliti liquidi, il materiale maggiormente utilizzato è la grafite (Zolin, 2017).

La grafite possiede, infatti, proprietà uniche in termini di capacità specifica, conducibilità ionica ed elettronica, durata di cicli e basso potenziale operativo, compreso tra 0.2 e 0.01 V vs Li/Li⁺. La sua struttura cristallina è un reticolo esagonale caratterizzato da piani di grafene posti l'uno sull'altro secondo una sequenza ABAB (Winter *et al.*, 1998).

La grafite è in grado di intercalare reversibilmente uno ione Li⁺ ogni 6 atomi di Carbonio, ciò equivale ad una capacità specifica teorica di 372 mAh/g. Dal punto di vista operativo

invece, la capacità della grafite varia tra 280-330 mAh/g, poiché vi è perdita irreversibile di capacità intorno al 10% al primo ciclo, conseguente alla formazione dello strato di SEI (Solid Electrolyte Interface), ovvero il film di passivazione che si deposita sulla superficie dell'elettrodo. Il SEI è il risultato di reazioni di decomposizione e di riduzione dell'elettrolita e la sua deposizione può essere considerata come un fenomeno secondario alla prima fase di riduzione della grafite. Sebbene possa sembrare un effetto negativo, la formazione di questo film è essenziale per proteggere l'elettrodo da eventuali inserzioni di Li^+ . Dal punto di vista della conducibilità, il SEI rimane un conduttore ionico, infatti permette l'inserzione/de-inserzione reversibile degli ioni litio; inoltre, è un isolante elettrico e questo fa sì che non avvengano fenomeni ulteriori di riduzione dell'elettrolita, quando il SEI raggiunge uno spessore limite (questo limite è pari alla distanza massima oltre la quale gli elettroni non riescono più a passare per effetto tunnel dalla grafite all'elettrolita). In conclusione, si può dire che questo film è estremamente importante per l'operatività, la service e shelf life e la sicurezza della cella (Heiskanen, Kim and Lucht, 2019).

Negli ultimi anni, molte ricerche sono state volte a sviluppare materiali alternativi alla grafite in grado di garantire maggiore densità di energia e potenza. Le leghe di litio, Li_yM ($\text{M} = \text{Sn}, \text{Pb}, \text{Si}, \text{etc.}$) possiedono capacità dell'ordine di 900-4000 mAh/g; tuttavia, ne perdono irreversibilmente una grande parte già dai primi cicli di carica/scarica a causa della notevole variazione di volume, superiore al 300%, in seguito all'inserzione del litio nella struttura. Questa espansione non è certamente un punto a favore per quanto riguarda la sicurezza, infatti può portare alla formazione di cricche e, nel peggiore dei casi, a polverizzazione del materiale attivo con progressiva perdita di contatto interparticellare. Per ovviare a tale problema si è proposto di ridurre le dimensioni delle particelle, ma ad oggi non sono ancora stati ottenuti miglioramenti sufficienti a permetterne l'utilizzo pratico (Zolin, 2017).

La ricerca della sicurezza intrinseca delle batterie litio-ione spinge nella direzione di sostituire l'anodo carbonioso con materiali il cui processo d'intercalazione del Li^+ avvenga a potenziali di sicurezza. Gli svantaggi degli elettrodi carboniosi sono, oltre ad una elevata perdita della capacità iniziale, soprattutto un problema di sicurezza legato al potenziale d'intercalazione dello ione Li^+ , che nella grafite, è prossimo a quello di riduzione dell' Li^+ a litio metallico. Questo fatto comporta che, in una carica veloce della batteria litio ione, ci sia la possibilità che del litio metallico venga a formarsi sull'anodo carbonioso con possibilità di reazioni indesiderate tra il metallo alcalino e la soluzione elettrolitica o peggio ancora dei cortocircuiti interni. Tale problema diventa serio soprattutto quando si intenda produrre

batterie litio ione di grossa taglia dove molte batterie sono collegate in serie (Mauro Pasquali, Gabriele Tarquini, Francesca Scaramuzzo, 2015).

Come possibile alternativa alla grafite, dunque, sono stati studiati materiali a base di ossido di titanio, in particolare il biossido di titanio TiO_2 (Deng *et al.*, 2009) e il titanato di litio $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (Ohzuku, Ueda and Yamamoto, 1995).

Il TiO_2 ha una capacità specifica di 335 mAh/g e un potenziale operativo compreso tra 1.5-1.8 V vs Li^+/Li ; è economico, sicuro e non tossico. Nonostante tale materiale sia significativamente più economico del corrispettivo spinello $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, la sua attività elettrochimica è influenzata negativamente dalla bassa conducibilità elettronica. Al fine di migliorare la conducibilità è stato recentemente sviluppato un materiale nanostrutturato a base di TiO_2 e grafene, mediante un processo che sfrutta tensioattivi anionici per stabilizzare il grafene in soluzione acquosa e permettere la crescita in situ di nano cristalli di TiO_2 . Tale materiale, inoltre possiede una capacità specifica di 110 mAh/g a 30C, più che raddoppiata rispetto al TiO_2 puro (Wang *et al.*, 2009). La realizzazione di nanotubi di TiO_2 è un'altra soluzione molto studiata che permette di ottenere alte correnti di carica e scarica, nonché una durata di vita di svariate migliaia di cicli (Lamberti *et al.*, 2015). Per confronto, il titanato di litio $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ha una capacità specifica teorica di 175 mAh/g e un potenziale operativo di 1.55 V vs Li^+/Li . In conclusione, presenta buona ciclabilità, nessuna perdita di capacità in seguito a reazioni con l'elettrolita ed elevato potenziale operativo, il che lo rende un materiale più sicuro rispetto alla grafite e particolarmente adatto per applicazioni che richiedono un alto numero di cicli (Ohzuku, Ueda and Yamamoto, 1995).

Per lo studio di questa tesi si tratterà la grafite come materiale utilizzato per la composizione dell'anodo delle celle di batteria gli ioni di litio, in quanto i materiali carboniosi ed in particolar la grafite hanno un'alta capacità specifica reversibile, un'ottima conducibilità elettrica e dei potenziali prossimi al litio metallico, oltre che un basso costo e una buona resistenza alla ciclazione. I materiali carboniosi favoriscono inoltre la diffusività del litio al loro interno, compresa tra 10^{-12} e 10^{-6} cm^2/s (per la grafite tra 10^{-9} e 10^{-7} cm^2/s), il che pone un limite alla densità di potenza (Kashchikar and Maier, 2009).

2.1.3. Materiali per l'elettrolita

Oltre all'anodo e al catodo, che sono elementi fondamentali per il funzionamento di una batteria, un compito altrettanto importante viene svolto dall'elettrolita, tramite il quale si ha

il trasferimento di carica ionica. Ne esistono di diverse tipologie e, a seconda del loro stato fisico, vengono distinti in elettroliti liquidi, elettroliti gel ed elettroliti polimerici. Indipendentemente dalla tipologia di appartenenza, il compito di un elettrolita è quello di facilitare la formazione del SEI, una patina che ha l'indispensabile obiettivo di protezione del catodo dalla dissoluzione e da condizioni di sovraccarica; e di essere stabile per numerosi cicli di carica e scarica. L'elettrolita deve rispettare determinate proprietà fisiche adeguate come una elevata conducibilità ionica ($> 10^{-3}$ S/cm) ed una bassa viscosità, deve possedere un'ampia finestra elettrochimica (ovvero non si deve verificare degradazione ai potenziali di lavoro degli elettrodi), e deve essere inerte nei confronti dei materiali che compongono gli elettrodi (Zolin, 2017).

Le batterie Li-ione attualmente sul mercato utilizzano elettroliti liquidi basati su miscele di soluzioni di carbonati organici quali etilencarbonato (EC), dimetilcarbonato (DMC), dietilcarbonato (DEC), etc., in cui viene disciolto un sale di litio. EC oltre ad avere un'elevata costante dielettrica, è in grado di formare uno strato passivante (SEI) spesso e stabile sulla superficie della grafite, ma essendo allo stato solido a temperatura ambiente, deve essere necessariamente disciolto in un altro solvente, motivo per il quale si utilizza il DMC o il DEC.

Il sale presente nelle batterie commerciali è l'esaffluorofosfato di litio, LiPF_6 , che presenta una buona conducibilità ($>10^{-3}$ S/cm), bassa tossicità ed è solubile in diversi solventi organici. Tuttavia, è poco stabile termicamente, infatti anche a temperatura ambiente tende a decomporsi in LiF e PF_5 . Per ovviare a questo inconveniente, si sono studiati altri tipi di sali, in grado di lavorare da soli o come additivo allo scopo di migliorare le prestazioni. In particolare, il litio bis(ossalato) borato LiBOB , che migliora la stabilità dell'elettrolita ad alta temperatura e riduce la perdita di capacità, ma possiede una minore conducibilità rispetto a LiPF_6 , oppure una sua versione migliorata il litiodifluorobis(ossalato) borato LiDFOB , il quale mostra una più alta solubilità e minore viscosità. Questo genere di sali non dà luogo a decomposizioni in prodotti tossici e esplosivi e presentano migliore stabilità nei confronti di impurità, in aggiunta le condizioni di sintesi sono meno esigenti rispetto a LiPF_6 (Meutzner and de Vivanco, 2014).

In conclusione, vengono descritti brevemente gli elettroliti polimerici, che si possono suddividere in tre principali tipologie (Zolin, 2017):

- Gli elettroliti polimerici solidi o SPEs (*Solid Polymer Electrolytes*) sono membrane completamente prive di solventi organici in cui il polimero svolge la duplice funzione di solvente e matrice di supporto (es. polietilenoossido PEO, polipropilenoossido PPO).
- Gli elettroliti gel polimerici o GPEs (*Gel Polymer Electrolytes*) si ottengono incorporando una soluzione elettrolitica liquida che contiene opportuni solventi altobollenti e/o plasticizzanti ed un sale disciolto in una matrice polimerica. La particolarità di questi sistemi è quella di essere quasi solidi ma con una mobilità ionica tipica dei sistemi allo stato liquido (es. EC, DMC, DEC per la fase liquida e un composto a base di polivinilidenefluoruro PVDF più il 5-25% di esafluoropropilene HFP per la matrice polimerica (Quartarone and Mustarelli, 2011)).
- Gli elettroliti compositi sono membrane polimeriche all'interno delle quali vengono inclusi additivi di vario tipo (nella maggior parte dei casi ceramici) per migliorarne le proprietà meccaniche e la conducibilità ionica. Gli additivi ceramici vengono distinti in attivi e passivi sulla base del loro comportamento nei confronti degli ioni di litio, in particolare i materiali attivi (es. Li_2N e LiAlO_3) partecipano al trasporto degli ioni durante le fasi di intercalazione/de-intercalazione, al contrario, i materiali passivi (es. Al_2O_3 , SiO_2 , MgO) sono inerti.

2.1.4. Separatori, binder e additivi

Il separatore è una sottile membrana porosa che fisicamente separa l'anodo dal catodo; la sua funzione infatti è quella di impedire il contatto tra gli elettrodi per prevenire un cortocircuito e permettere il trasporto libero degli ioni isolando il flusso elettronico (Zhang, 2007).

Un buon separatore deve rispettare una serie di requisiti: deve essere chimicamente ed elettrochimicamente stabile verso l'elettrolita e i materiali elettrodici, deve possedere una resistenza meccanica sufficiente a sopportare le elevate sollecitazioni che si hanno durante l'assemblaggio della batteria; inoltre, deve avere una porosità sufficiente ad assorbire l'elettrolita liquido per conseguire alte conduttività ioniche. Per quanto riguarda la sicurezza, il separatore deve essere in grado di chiudere i propri pori quando nella batteria si hanno dei surriscaldamenti, per esempio durante un cortocircuito allo scopo di prevenire il brusco incremento termico che si ha quando questo avviene (questo fenomeno è noto come *shutdown*).

Lo spessore ideale di un separatore deve tenere conto sia delle performance che della resistenza meccanica che si vogliono ottenere: più è spesso, maggiore sarà la resistenza meccanica e inferiori saranno le prestazioni in termini di densità d'energia. Al contrario, scegliere un separatore molto sottile significherebbe avere una membrana estremamente fragile. Un buon compromesso tra le due proprietà è uno spessore compreso tra 20-25 μm . Il separatore deve essere inerte rispetto alle condizioni di riduzione e ossidazione che si creano all'interno della batteria quando è totalmente carica, dunque non deve degradarsi e deve essere sufficientemente resistente meccanicamente per non deformarsi o rompersi. Infine, è necessario che il separatore sia stabile termicamente, anche quando è sottoposto a temperature più elevate di quelle di lavoro della batteria, infatti non devono verificarsi fenomeni di contrazione (ad esempio, quando prima dell'assemblaggio di una cella la membrana viene essiccata sottovuoto a temperature comprese fra gli 80-100 °C). In generale, il requisito per un separatore è che non abbia una contrazione superiore al 5% dopo l'esposizione per 60 minuti ad una temperatura di 90 °C (Zhang, 2007).

Il binder (o legante) è una sostanza di natura organica utilizzata nella preparazione degli elettrodi, la sua funzione è infatti quella di tenere insieme le particelle di materia attiva sul collettore di corrente. Tra le caratteristiche che un buon binder deve avere vi sono un'elevata stabilità chimica ed elettrochimica nei confronti dei materiali che costituiscono gli elettrodi e l'elettrolita, e la capacità di accomodare considerevoli variazioni dimensionali in seguito all'inserzione/de-inserzione degli ioni di litio nell'elettrodo, o a sbalzi in temperatura. In aggiunta, dal punto di vista della densità di energia ottenibile è desiderabile avere quanto meno binder possibile al pari delle stesse proprietà leganti. Infine, il ruolo del binder diviene sempre più importante al diminuire della dimensione delle particelle di materia attiva (Zolin, 2017).

In questo progetto di tesi verranno utilizzati due binder diversi: uno è il polivinilidene fluoruro PVDF e l'altro la carbossimetilcellulosa, CMC.

Il PVdF è largamente utilizzato come binder in entrambi gli elettrodi di batterie commerciali, in virtù dell'elevata stabilità elettrochimica e della capacità dimostrata nel tenere assieme le particelle di materia attiva, tuttavia è estremamente costoso, non semplice da riciclare, e richiede, durante il processo di realizzazione degli elettrodi, di utilizzare come solvente il N-metil-2-pirrolidone, NMP, il quale è noto essere tossico nei confronti dell'ambiente e

dell'uomo. Per tali ragioni, si è cercato di sostituire il PVDF con la CMC, sicuramente meno costosa, ed eco-friendly, poiché utilizzabile in sistemi a base acqua.

La CMC viene sintetizzata a partire dalla cellulosa naturale mediante l'inserzione di gruppi carbossimetilici anionici legati ad un catione, tipicamente sodio; dal punto di vista del comportamento meccanico è un polimero abbastanza rigido, con un basso allungamento a rottura, dunque non è sicuramente un binder con comportamento elastomerico (Qiu *et al.*, 2014).

Nonostante l'intrinseca fragilità, la CMC sembra essere una valida alternativa al PVDF, anche se il suo impiego come legante è ancora ad oggi oggetto di studio.

Per quanto concerne gli additivi, questi sono ulteriori elementi necessari per la preparazione degli elettrodi, che hanno il compito di aumentare la conducibilità elettronica. Il loro utilizzo è infatti indispensabile, soprattutto se si considerano alcuni dei materiali che possono costituire il catodo, ovvero ossidi come LiFePO_4 .

Tra i più utilizzati vi è il carbon black, data l'elevata conducibilità e il basso costo, ma non si escludono materiali alternativi; in entrambi i casi, il compito dell'additivo è quello di disporsi sulla superficie delle particelle di materia attiva in modo uniforme allo scopo di massimizzare la densità di corrente e ridurre al minimo eventuali stress locali dovuti al trasporto elettrico (Zolin, 2017).

2.2. Macchine del processo produttivo

Le tecnologie attualmente esistenti al mondo per la produzione delle celle di batteria giocano un ruolo importante nello sviluppo continuo della tecnologia delle batterie agli ioni di litio. Tutti i concetti di sistema si distinguono per l'elevata velocità di produzione, l'alta precisione e l'affidabilità

Le macchine utilizzate durante il processo produttivo sono conosciute per velocità di produzione e una vasta gamma di dimensioni delle batterie da produrre. Precisione, affidabilità, durata, disponibilità e bassi costi operativi complessivi (TCO) sono le caratteristiche principali dei sistemi di produzione high-tech. Il singolo sistema o la linea di produzione possono essere adattati in modo univoco su richiesta utilizzando grazie al design modulare delle varie macchine. In questo modo gli effetti sui parametri di prestazione della batteria sono di conseguenza positivi. Oltre all'elevata precisione di processo, i moderni

sistemi di automazione per aumentare la produttività hanno anche ridotto significativamente i costi di produzione.

Oltre ai macchinari caratteristici della produzione, sono presenti nel processo produttivo anche altri sistemi integrati utili per il controllo e l'ispezione, al fine di ridurre sprechi e non conformità delle caratteristiche finali. Con un adeguato sistema di misurazione e ispezione, è possibile monitorare il processo di produzione in corso, mantenere sempre il controllo e regolare i parametri di processo anche durante la produzione. I sistemi di ispezione integrati garantiscono un'elevata sicurezza del prodotto.

Di seguito si procederà a illustrare metodi e utilizzi di ogni macchina necessaria per ognuna delle attività del ciclo di produzione.

2.2.1. Slurry Mixer

La produzione della slurry è un passaggio critico che può influenzare irrevocabilmente i passaggi successivi nella produzione delle batterie. Molti parametri sperimentali, inclusa la sequenza di miscelazione, devono essere presi in considerazione nella preparazione della slurry. *Ming Wang et al.* (Ming Wang, Dingying Dang, Andrew Meyer, Renata Arsenault, Yang-Tse Cheng, 2020), hanno studiato gli effetti delle due principali sequenze di miscelazione utilizzate dall'industria sul comportamento reologico del liquame e la relazione tra la reologia del liquame e le prestazioni strutturali, meccaniche ed elettrochimiche degli elettrodi di $\text{LiNi}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{O}_2$ (NMC). Si è dimostrato che: (1) la miscelazione di carbon black (CB) con soluzione di fluoruro di polivinilidene (PVDF) prima di aggiungere NMC può facilitare la formazione di una sospensione gelatinosa; (2) cluster porosi di CB/PVDF possono formarsi attorno a NMC dopo l'essiccazione della sospensione gelatinosa, fornendo un'elevata capacità di C-rate; (3) la miscelazione a polvere secca di CB e NMC può facilitare il legame del CB alle superfici NMC, riducendo la quantità di CB nel PVDF e producendo un impasto liquido; (4) dopo l'essiccazione della sospensione liquida, sulle superfici NMC può formarsi uno strato denso di CB/PVDF; e (5) questo strato denso può fornire un'elevata forza di legame ma può bloccare il trasporto ionico e indebolire la connessione elettronica, riducendo la capacità di velocità C. Pertanto, è di fondamentale importanza comprendere gli effetti della sequenza di miscelazione nella produzione di elettrodi.

Un'accurata miscelazione delle slurries rappresenta una sfida importante nel processo di produzione delle batterie. Liu D. et al. (Liu et al., 2014) hanno esaminato diversi tipi di dispositivi di miscelazione e metodi di miscelazione. Gli agitatori a turbina convenzionali o i miscelatori con mulino a palle potrebbero essere adeguatamente utilizzati per la preparazione di slurries anodiche, ma non adatti per quelle catodiche. In questo studio è stato proposto un nuovo miscelatore tridimensionale, in combinazione con una sequenza di miscelazione multistadio. L'efficacia della miscelazione è stata esaminata mediante misurazioni reologiche e tecniche di visualizzazione del flusso.

Il dispositivo consisteva in una turbina a girante Rushton, agitatori elicoidali decentrati situati all'interno del recipiente di miscelazione e una base rotante. Il dispositivo è stato in grado di generare una miscelazione fluida in tutte le direzioni.

La miscelazione della slurry anodica era relativamente facile e poteva essere ottenuta utilizzando una normale procedura di miscelazione in un miscelatore convenzionale come un miscelatore a turbina singola. La miscelazione della slurry catodica era più difficile. Il modo più efficace per miscelare la slurry catodica consisteva nell'utilizzare uno specifico schema di miscelazione multistadio in un miscelatore tridimensionale. Le prestazioni elettriche preliminari sulle batterie fabbricate hanno anche indicato la superiorità del miscelatore 3D proposto e dello schema di miscelazione a più stadi rispetto ai metodi convenzionali di preparazione della sospensione di elettrodi (Liu et al., 2014).

Una macchina di slurry mixing che risponde a queste caratteristiche potrebbe essere quella dell'azienda NETZSCH. La *Planetary Mixing e Kneading Machine*, mostrata in figura 2.1 (NETZSCH), permette di avere un dosaggio dei componenti solidi che inizia automaticamente dopo un breve tempo di miscelazione. Il processo chiuso inibisce la formazione di polveri, specialmente nella lavorazione di solidi a bassa densità. Una caratteristica distintiva del miscelatore planetario è il suo design in sottovuoto, che consente lo sfiato di gas del prodotto durante il processo di miscelazione e impastatura. La nuova generazione di mescolatori planetari NETZSCH con elementi di agitazione ottimizzati riduce i tempi di produzione fino al 50% rispetto ai miscelatori planetari convenzionali - e ad un livello qualitativo costantemente elevato.



Figura 2.1 - PMH Planetary Mixing e Kneading Machine - NETZSCH (NETZSCH)

2.2.2. Coater & Dryer

Durante la fase di coating, il liquame viene depositato sul collettore corrente per formare un film sottile che viene essiccato e riavvolto in una bobina.

Le macchine di coating potrebbero utilizzare tecniche e tecnologie diverse per effettuare la deposizione della slurry sulla testa di rivestimento, come lo slot die, comma roll, gravure. La figura 2.2 raffigura i diversi metodi di deposizione della slurry sul collettore di corrente di alluminio per il catodo, e di rame per l'anodo (Carlo Novarese - FAAM).

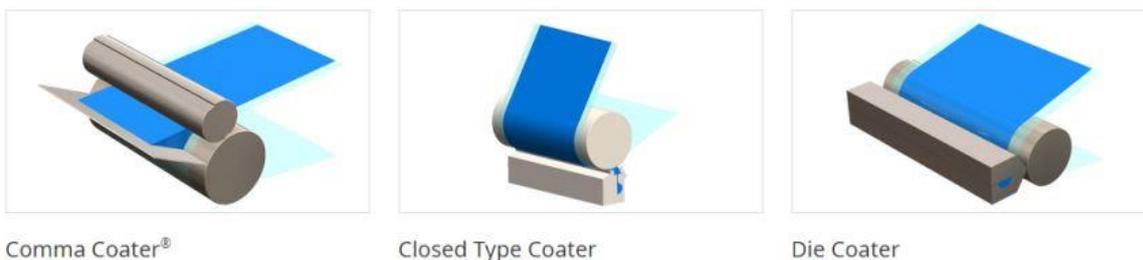


Figura 2.2 - Diversi metodi di coating della slurry sul collettore di corrente – FAAM (Carlo Novarese - FAAM)

Entrambi i lati del collettore di corrente vengono rivestiti e a seconda delle attrezzature i due lati potrebbero essere rivestiti contemporaneamente o separatamente. Lo spessore del film

varia a seconda del materiale attivo utilizzato e del tipo di cella (potenza vs energia), tipicamente da 50 a 150 micron per lato dopo il drying. Inoltre, il rivestimento della slurry può essere continuo o discontinuo. Nel primo caso si avrebbe una deposizione del materiale attivo omogenea che porta ad avere una percentuale di scarti di collettore di corrente più ridotta rispetto al secondo caso, con il quale il rivestimento sarebbe a strisce. La figura 2.3 mostra il metodo di deposizione simultaneo di entrambi i lati con la tecnica dello slot die e un esempio di coating discontinuo a tre strisce, mentre la figura 4 raffigura un reale coating continuo e uno discontinuo (Carlo Novarese - FAAM).

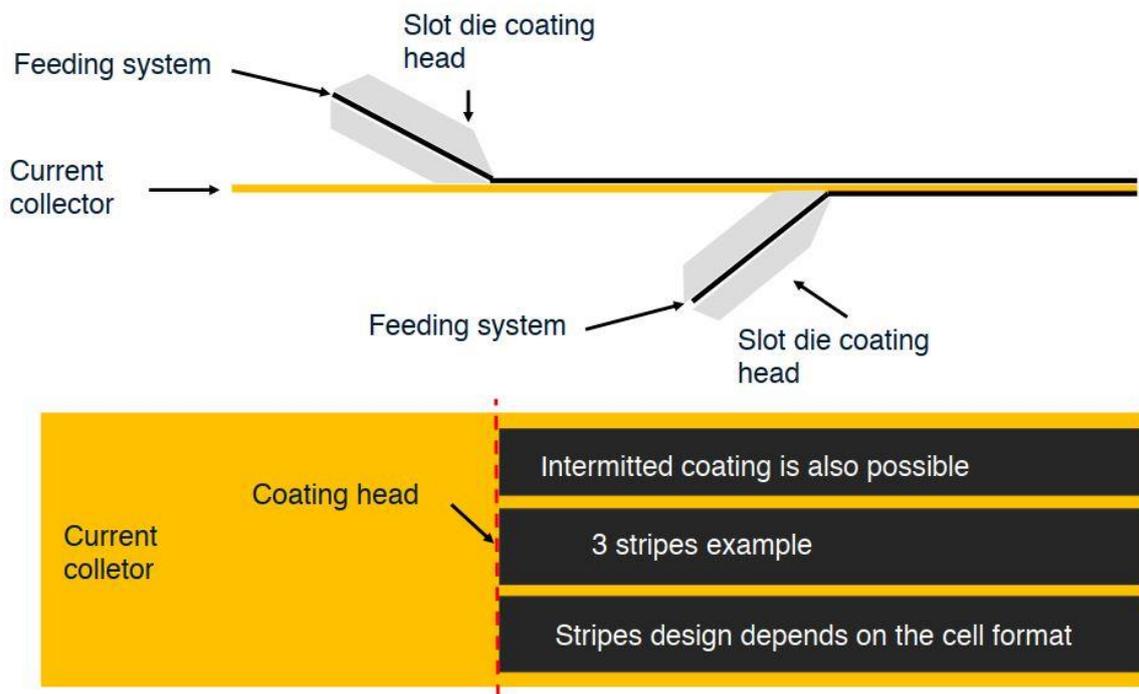


Figura 2.3 - Coating simultaneo (in alto) e coating discontinuo (in basso) – FAAM (Carlo Novarese - FAAM)



Figura 2.4 - Coating continuo (sx) e coating discontinuo (dx) (Carlo Novarese - FAAM)

Durante la fase del drying, il film di elettrodo rivestito passa attraverso diverse zone di essiccazione, collegata in serie nella stessa macchina del coating, dove i solventi e il contenuto di acqua vengono evaporati.

All'interno delle camere a secco, diversi ugelli potrebbero essere utilizzati per iniettare aria calda sulla superficie del film dell'elettrodo, ad esempio jet nozzle (ugello a getto), floating nozzle (ugello fluttuante) e airfoil nozzle (ugello a profilo alare), come dimostra la figura 5 (Carlo Novarese - FAAM).

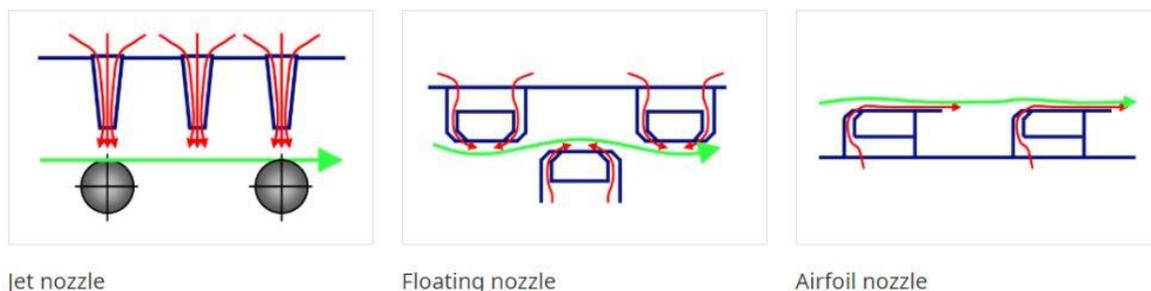


Figura 2.5 - Jet nozzle (sx), floating nozzle (centro), airfoil nozzle (dx) – FAAM (Carlo Novarese - FAAM)

L'azienda Dürr Megtec ha sviluppato un processo di rivestimento a bobina tesa utilizzando una scanalatura montata in un orientamento verticale per rivestire simultaneamente entrambi i lati di un foglio di elettrodo che viaggia orizzontalmente.

Per ottimizzare le prestazioni della batteria, ogni fase del processo di rivestimento deve essere strettamente controllata. Il rivestimento simultaneo su due lati con il processo a bobina tesa consente ai produttori di batterie di essere più conveniente, e quindi più competitivo. Questa macchina innovativa evidenzia enormi vantaggi rispetto alle solite macchine tradizionali. Nello specifico il Gigacoater di Durr Megtec, in figura 2.6, raggiunge il doppio della produttività rispetto ai rivestimenti single-side, richiede un solo passaggio attraverso l'essiccatore, garantendo un'asciugatura uniforme di entrambi i lati rivestiti e riduce il capitale necessario e i costi operativi (DURR Megtec, 2020a).



Figura 2.6 - Coater e Dryer DURR Megtec (DURR Megtec, 2020a)

2.2.3. Solvent Recovery System

Questi sistemi si basano sulle più avanzate e affidabili tecnologie di assorbimento e distillazione. Sono specifici per il sito e aggiungono valore a lungo termine all'attività di produzione, consentendo di produrre prodotti a base di solventi di alta qualità. Questi chiari vantaggi si riscontrano con i sistemi di recupero solvente DURR Megtec, mostrato in figura 2.7 (DURR Megtec, 2020b).

Un tipico processo di recupero del solvente è costituito da un'unità di assorbimento del carbonio attivo con due, ma anche fino a ben sette, contenitori adsorber e, se necessario, uno sverniciatore d'aria o un'unità di distillazione. L'aria carica di solvente passa in parallelo attraverso un certo numero di recipienti adsorber, dove i vapori di solvente sono assorbiti da carbone attivo appositamente selezionato. Una volta che il carbonio in un adsorber è saturo e il solvente inizia a scivolare, come rilevato da un analizzatore di gas opzionale, l'aria carica di solvente viene convogliata verso un adsorber di riserva e l'adsorber saturo viene rigenerato. Gli obiettivi che si raggiungono con un sistema di recupero del solvente sono: ripristino fino al 99% di tutti i solventi che possono essere riutilizzati; rimozione dei composti organici volatili (VOC) o gli inquinanti atmosferici pericolosi (HAP) dalle emissioni di processo prodotte per contribuire a soddisfare o superare i requisiti normativi e aumento della redditività riducendo i costi di acquisto per solventi.



Figura 2.7 - Solvent Recovery System - DURR Megtec (DURR Megtec, 2020b)

2.2.4. Calender

Il calendaring è il processo di compattazione comune per gli elettrodi delle batterie agli ioni di litio e ha un impatto sostanziale sulla struttura dei pori e quindi sulle prestazioni elettrochimiche delle celle di batterie agli ioni di litio. Per una determinazione mirata della struttura dei pori ottimizzata per le prestazioni, è di importanza decisiva essere in grado di controllare in modo completo il processo di compattazione. Pertanto, durante il calendaring continuo di anodi di grafite e catodi di litio nichel cobalto manganese (NCM), il carico di linea applicato viene tracciato e variato a velocità diverse per compattare l'elettrodo a diverse densità di rivestimento. Le strutture dei pori generate vengono misurate tramite l'intrusione di mercurio, con conseguente porosità abbastanza simili, mentre le densità di grafite e NCM divergono notevolmente (Meyer *et al.*, 2017).

L'obiettivo principale è quello di ridurre il volume dell'elettrodo per aumentare la densità volumetrica e appiattare la sua superficie. Comprimendo troppo l'elettrodo potrebbe ridurre la sua porosità ad un livello che l'elettrolita non può penetrare nella sua struttura. In figura 2.8 viene presentata la macchina prodotta da FAAM per l'attività del calendaring che utilizza, inoltre, il processo roll-to-roll (R2R). La tecnica roll-to-roll, figura 2.9, consiste in genere di diversi rulli che avvolge il materiale attraverso questi rulli mentre esegue una serie di operazioni. La tecnica applica i materiali additivi o sottrattivi sul substrato mentre si muove lungo il fotoricettore per generare o produrre un prodotto o una parte (Carlo Novarese - FAAM).



Figura 2.8 - Calender FAAM (Carlo Novarese - FAAM)



Figura 2.9 - Roll-to-roll process FAAM (Carlo Novarese - FAAM)

2.2.5. Slitter

Partendo da un rotolo principale (detto anche rotolo jumbo), tagliandolo si ottengono diversi rotoli più piccoli. Durante il taglio si possono creare polveri di alluminio e di rame, e per questo motivo è obbligatorio aspirarle ed evitare qualsiasi contaminazione sulla superficie dell'elettrodo, che potrebbe compromettere il giusto funzionamento della cella finale assemblata.

Auto slitting machine GN-S060A-50, figura 2.10, dell'azienda Gelon LIB Group (Gelon LIB Group, a) rispecchia la soluzione ideale per questo tipo di attività. La macchina fornisce soluzioni al dettaglio in quanto può essere utilizzata per normali e semplici elettrodi per batterie agli ioni di litio e per elettrodi di batterie per veicoli elettrici. Inoltre, è possibile avere una precisione di taglio fino a $\pm 0,05$ mm con una larghezza minima di taglio di 35 mm, una velocità di lavoro da 0 a 50 m/min modificabile durante il processo e in più dispone di una spazzola che pulisce e raccoglie la polvere che viene generata durante il taglio.

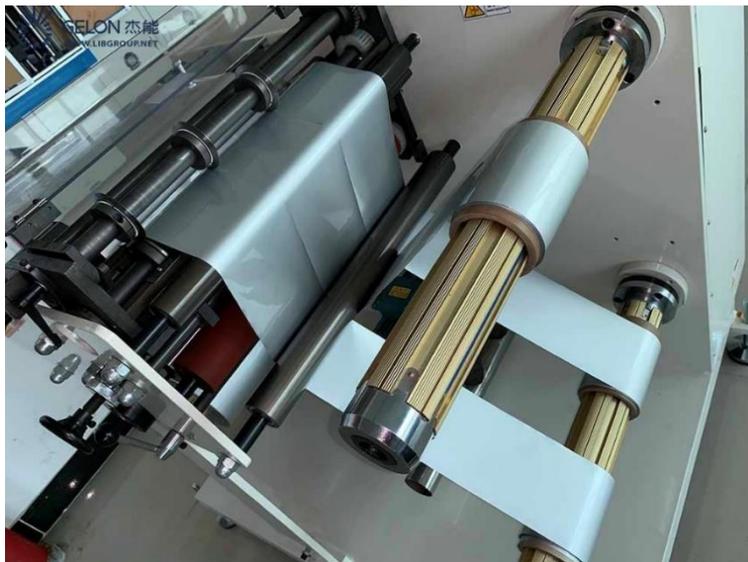


Figura 2.10 - Auto Slitting Machine GN-S060A-50 Gelon LIB Group (Gelon LIB Group)

2.2.6. Vacuum Oven

L'asciugatura degli elettrodi è necessaria per far evaporare tutta l'acqua rimanente dall'interno della loro struttura. La presenza di acqua all'interno di una cella sigillata potrebbe causare malfunzionamento e ridurre il suo life cycle. L'essiccazione potrebbe essere eseguita in modi diversi e potrebbe richiedere fino a 24 ore, anche se il sistema più utilizzato e che sarà preso in considerazione in questo lavoro è quello dei forni di asciugatura sottovuoto.

Gli essiccatori a camera della serie KTR, dell'azienda produttrice Nabertherm, possono essere impiegati per vari processi di asciugatura e per trattamenti termici di cariche fino ad una temperatura di utilizzo di 260 °C. La potente circolazione d'aria, consente un'ottimale uniformità della temperatura nello spazio utile. Grazie ad un'ampia gamma di accessori, gli essiccatori a camera possono essere adattati a esigenze di processo individuali. Figura 2.11 (Nabertherm). Questi forni sottovuoto predispongono inoltre di binari per l'accesso a livello terra con i carrelli di caricamento, basamento per il caricamento dell'essiccatore a mezzo di carrello elevatore, una porta supplementare nella parete posteriore per il caricamento da entrambi i lati o per l'utilizzo come chiusa tra due camere, sistemi di ventilazione per il raffreddamento rapido con regolazione manuale o automatica delle valvole di scarico aria, carrelli di caricamento con e senza scaffali e controllo dei processi e documentazione mediante pacchetto software VCD o Nabertherm Control-Center NCC per il monitoraggio, la documentazione e la gestione, come viene mostrato in figura 2.12 (Nabertherm).



Figura 2.11 - Essiccatore a camera KTR 22500/S con illuminazione interna e binari guida con tappi di isolamento per un'ottimale uniformità della temperatura (Nabertherm)



Binari d'accesso con tappi di isolamento

Carrello di caricamento con lamiere estraibili

Basi di caricamento estraibili su rulli

Figura 2.12 - Binari di accesso (sx), carrello di caricamento (centro), basi di caricamento (dx) (Nabertherm)

2.2.7. Die Cutting Machine

Durante il notching, l'elettrodo a fessura viene modellato a seconda della posizione del collettore di corrente di contatto e, inoltre, viene esportato il materiale in eccesso. Il notching è preferibile prima di asciugare gli elettrodi e all'esterno della Dry Room in quanto durante il taglio di ogni singolo elettrodo si crea una polvere metallica che potrebbe compromettere il funzionamento finale della batteria. Un esempio schematico di come viene effettuato il notching è mostrato in figura 2.13 (Carlo Novarese - FAAM).

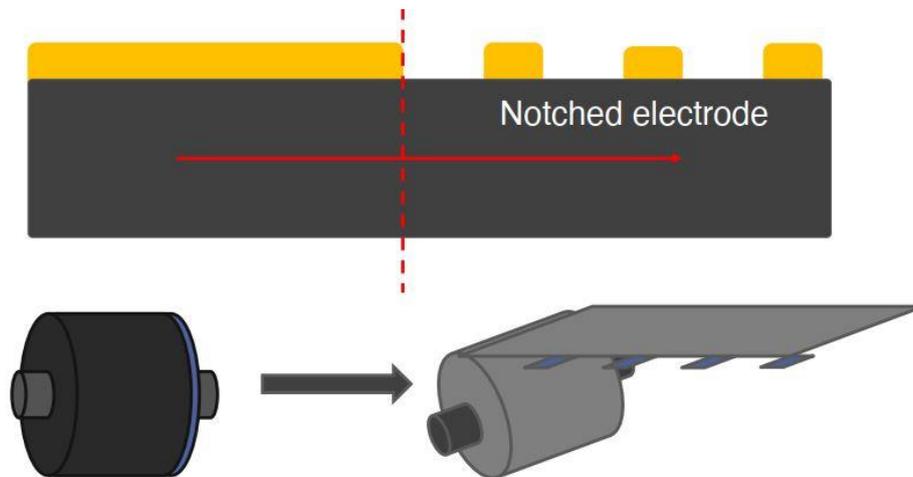


Figura 2.13 - Electrode Notching FAAM (Carlo Novarese - FAAM)

La die cutting machine per celle pouch TMAX-A-006, dell'azienda produttrice TMAX lavora con caratteristiche innovative e in modo tale da avere dimensioni varie di elettrodi per celle di batteria. Questa macchina, in figura 2.14 (TMAX BATTERY EQUIPMENTS, d), adotta un motore di conversione della frequenza automaticamente in base al volume di produzione con funzioni di rettifica durante il processo lavorativo. Inoltre, ha incorporato un test ottico a colori di alta precisione per effettuare misure di controllo durante la lavorazione e, infine, riesce a tagliare l'elettrodo dal rotolo rivestito e stamparlo in una sola volta.



Figura 2.14 - Electrode Die Cutting Macchine TMAX-A-006 (TMAX BATTERY EQUIPMENTS, d)

2.2.8. Stacking Machine

Gli elettrodi dentellati ed essiccati (catodo e anodo) sono tagliati e poi assemblati alternativamente con il separatore per formare una pila. Durante l'impilamento il separatore può essere inserito in più modi, dal flat winding (avvolgimento piatto) e single sheet stacking (impilamento di fogli singoli) al Z-folding (piegatura a Z). Questi metodi presentano però alcuni svantaggi. Da un lato, la gestione di strutture di tipo foglio non rigido sono problemi complicati nel processo di impilamento di fogli singoli. D'altra parte, il processo di avvolgimento piatto influisce negativamente sulla qualità della cella a causa dei carichi di processo applicati. Di conseguenza, il processo la piegatura a Z, grazie alla maggiore velocità di impilamento e alla gestione ottimizzata del separatore, mostra una maggiore efficienza operativa rispetto ai processi di impilamento convenzionali. Il processo di piegatura a Z con alimentazione continua del separatore e la movimentazione del singolo foglio degli elettrodi, che combina i vantaggi della piegatura a Z convenzionale e impilamento, assicura una lavorazione rapida del materiale e una manipolazione delicata e

senza flessioni degli elettrodi (Reinhart *et al.*, 2013). In figura 2.15 vengono mostrati i vari metodi di impilamento degli elettrodi di una cella di batteria.

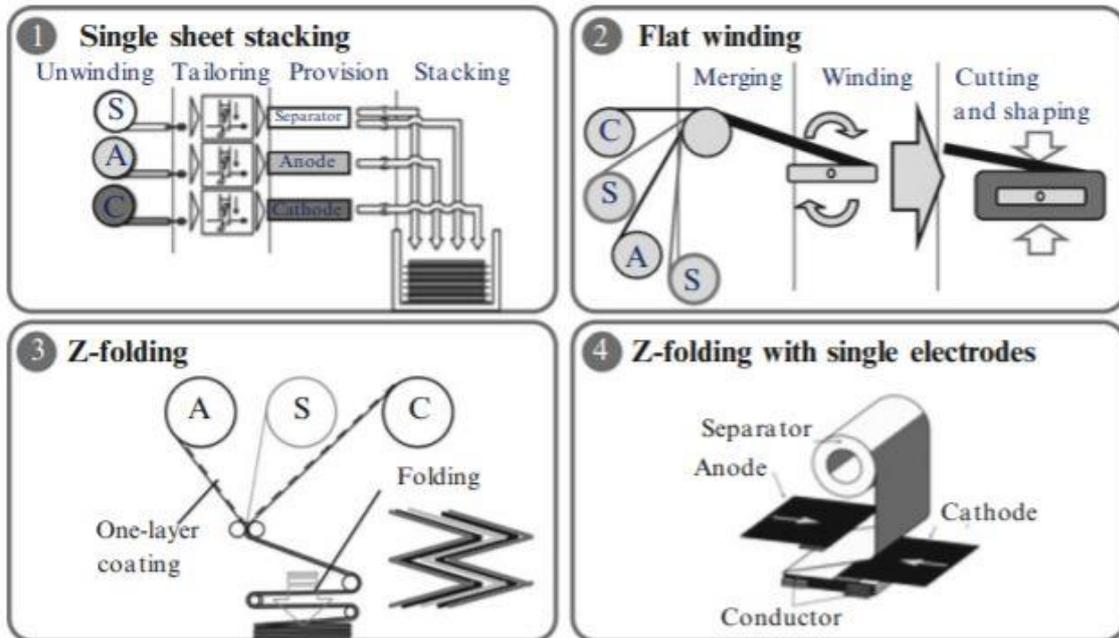


Figura 2.15 - Cell stacking for lithium ion batteries (Reinhart *et al.*, 2013)

Nella macchina impilatrice automatica, prodotta dall'azienda Gelon LIB Group, quando il braccio meccanico si muove da sinistra a destra, i fogli degli elettrodi anodici e catodici vengono prelevati dalle due posizioni limite e la posizione intermedia viene utilizzata per l'alimentazione alternata. Il braccio del robot adotta un modulo lineare di servocomando per ottenere alta velocità, stabilità e precisione. L'alimentazione adotta la tensione costante e, inoltre, è presente un meccanismo di rettifica per controllare l'alimentazione nel processo di alimentazione. Un modulo lineare di servo-movimento è usato per convertire i fogli degli elettrodi differenti (figura 2.16 (Gelon LIB Group, b)).



Figura 2.16 - Automatic Stacking Machine Gelon LIB Group (Gelon LIB Group, b)

2.2.9. Tab welder machine

La pila di celle viene sigillata e trasferita alla stazione di saldatura a linguetta, dove i contatti positivi e negativi vengono saldati per formare i terminali delle celle. Le linguette sono normalmente realizzate in lega Al-Ni per il catodo e Cu-Ni per l'anodo e sono saldate tramite ultrasuoni sul collettore di corrente ritagliato con il notching (Carlo Novarese - FAAM,).

La saldatrice ad ultrasuoni automatica, prodotta dall'azienda TMAX (TMAX BATTERY EQUIPMENTS, a), viene utilizzata principalmente per la produzione di celle di batterie pouch o prismatiche agli ioni di litio. Ha incorporato sistemi di controllo di precisione a bassa tensione e un sistema di correzione a serpentina. Può saldare le linguette di collettori di corrente con uno spessore da 0,5 a 50 mm. In figura 2.17 è raffigurato un esempio di saldatrice ad ultrasuoni automatica (TMAX BATTERY EQUIPMENTS, a).

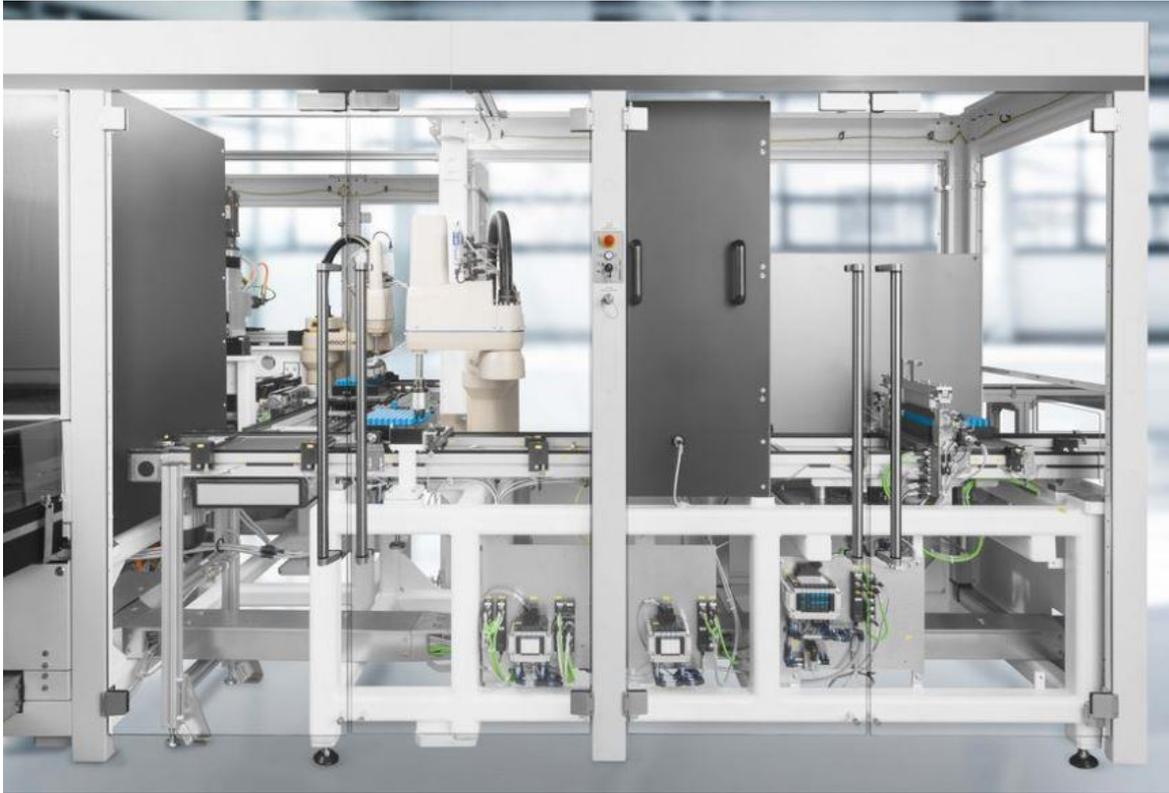


Figura 2.17 - Automatic Ultrasonic Tab Welding Machine TMAX (TMAX BATTERY EQUIPMENTS, a)

2.2.10. Sealing Machine

La custodia per celle pouch è stampata per formare una cavità superiore e inferiore per ospitare la pila della cella. Dopo aver inserito la pila di elettrodi nella cavità inferiore, la coffee bag viene ripiegata e la cella viene sigillata su tre lati tramite calore: è utilizzato un polimero speciale sulla superficie della busta e delle schede che, mentre viene fuso, sigilla la cella.

La macchina TMAX-A-023, della omonima azienda produttrice (TMAX BATTERY EQUIPMENTS, b), è adatta per la sigillatura, per le custodie pre-tagliate, per la rifilatura, per l'attrezzatura per la formatura a caldo, tutto svolto in modo automatico. Inoltre, è possibile aggiungere dei test di controllo, dei codici di scansione, la pesatura e le funzioni di carico e scarico automatico del materiale (figura 2.18 (TMAX BATTERY EQUIPMENTS, b)).



Figura 2.18 - Large Automatic Degas and Sealing Machine TMAX (TMAX BATTERY EQUIPMENTS, b)

2.2.11. Electrolyte Filling Machine

Le celle, aperte solo su un lato, vengono spostate alla stazione di riempimento. L'elettrolita viene inserito, normalmente dopo aver ottenuto applicato il vuoto, all'interno delle celle. A questo punto le celle sono finalmente sigillate e pronte per essere formate. Una sacca extra, mostrata in figura 2.19 (Carlo Novarese - FAAM), viene lasciata disponibile: durante la formazione, diversi gas potrebbero crearsi e prima di essere pronte per l'uso, le celle dovranno essere degassate riaprendole sulla sezione dell'extra sacca e poi nuovamente sigillate sotto vuoto dove viene tagliata la sacca extra.

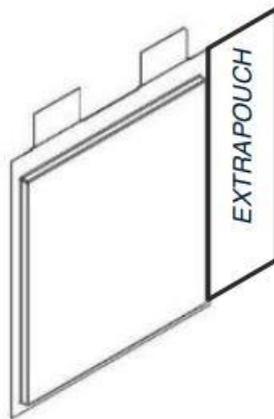


Figura 2.19 - Extra Pouch FAAM (Carlo Novarese - FAAM)

L'azienda TMAX ha sviluppato e prodotto la TMAX-A-010 (figura 2.20 (TMAX BATTERY EQUIPMENTS, c)) che è una macchina automatica per il riempimento dell'elettrolita. Principalmente questa macchina è utilizzata per il riempimento sottovuoto

dell'elettrolita in custodie morbide per le batterie agli ioni di litio, in modo tale da garantire che l'elettrolita penetri istantaneamente nella cella.

La macchina può essere installata sia in una dry room (stanza asciutta), ma anche in una stanza standard ed è capace anche di rimuovere l'extra sacca, contenti eventuali gas che si creano dopo che la formazione della cella.



Figura 2.20 - Automatic Electrolyte Filling Machine TMAX (TMAX BATTERY EQUIPMENTS, c)

2.2.12. Camera Climatica

La camera climatica per test di prova della batteria EV di Proventia (azienda tecnologica che opera nei mercati globali offrendo soluzioni e servizi per l'industria dei motori, delle macchine e dei veicoli per combattere il cambiamento climatico e aiutare a risolvere il problema dell'inquinamento atmosferico globale) è una delle più grandi sul mercato, può ospitare pacchi batteria di dimensioni standard e offre spazio sufficiente per eseguire test con più pacchi contemporaneamente. L'intervallo di temperatura operativa è in genere compreso tra -40 e +90 gradi Celsius, ma l'attrezzatura ambientale è in grado di raggiungere condizioni di +150 gradi per scopi di test senza batteria. La velocità di variazione della temperatura è ottimizzata in base ai requisiti. L'intervallo di umidità regolabile è compreso

tra RH10 e RH95%. Ogni camera climatica di test della batteria viene fornita con uno spazio separato per la strumentazione e capacità infrastrutturali designate.

I laboratori di prova climatica delle batterie per veicoli elettrici di Proventia soddisfano i requisiti EUCAR Hazard Level 6 e sono conformi alla Direttiva macchine UE, nonché alle normative sulla salute e la sicurezza. La camera climatica appena citata è mostrata in figura 2.21, mentre nella figura 2.22 viene mostrato il sistema di camere climatiche installato in un impianto industriale (PROVENTIA).

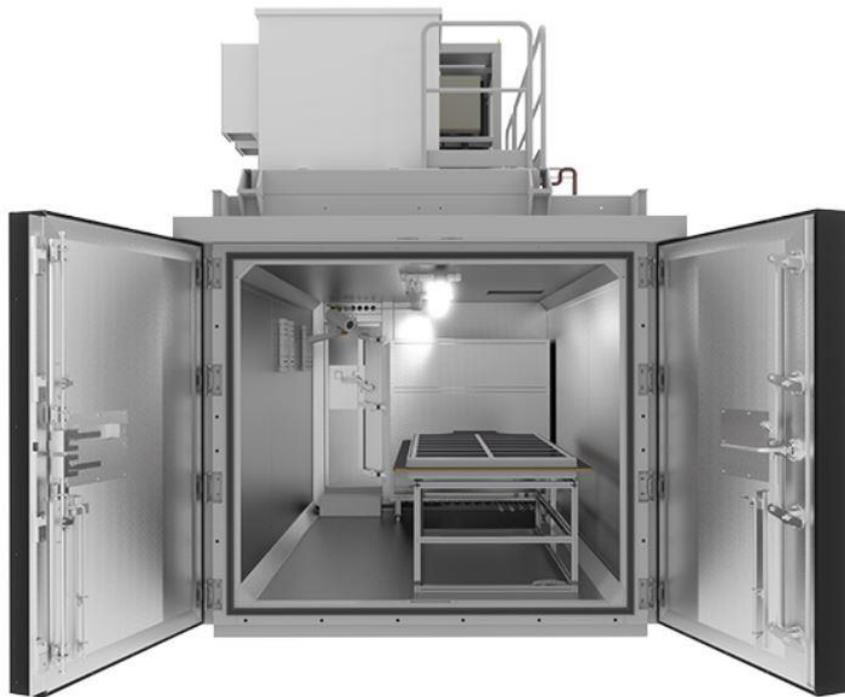


Figura 2.21 - Camera climatica di test del pacco batteria EV PROVENTIA (PROVENTIA)



Figura 2.22 - Sistema di camere climatiche si un impianto industriale PROVENTIA (PROVENTIA)

2.3. Ubicazione dell'impianto industriale

Quando un'azienda di produzione ha la necessità di costruire un nuovo stabilimento per espandere la propria attività, la scelta del luogo di ubicazione per gli impianti industriali è cruciale a livello strategico. Si tratta, infatti, di stabilire il posizionamento di infrastrutture di produzione destinate a funzionare per decenni, tenendo conto, ad esempio, degli impatti a livello ambientale e delle dinamiche di mercato che, nel tempo, potranno influire sui costi strutturali e livelli occupazionali, determinando l'andamento del business.

Prima di elencare e analizzare i diversi criteri di scelta del luogo dove sorgerà l'impianto industriale in questione, si ritiene opportuno fare delle considerazioni sui termini utilizzati di solito per indicare questo processo decisionale. Per ubicazione si intende il luogo nel quale si osserva un determinato fenomeno; mentre per localizzazione ci si riferisce al processo attraverso il quale il fenomeno è venuto a collocarsi nel luogo nel quale viene osservato. Un impianto industriale viene costruito in un determinato luogo in seguito ad un procedimento di scelta, rispettando particolari criteri, tra luoghi diversi, valutati più o meno convenienti per la destinazione d'uso finale.

L'analisi di scelta ubicazionale ha lo scopo di individuare le attività industriale più adatte per una data ubicazione, analizzando, quindi, le risorse e le potenzialità in termini di mercato di una specifica zona, in modo tale da determinare le iniziative industriale di più favorevole sviluppo e definire le caratteristiche tecnico-economiche di massima.

2.3.1. L'ubicazione delle industrie

La località dove costruire il nuovo stabilimento può essere suburbana (**accentramento**), periferica o decentrata (**decentramento**) (Lorenzo Fedele, 2008).

L'**accentramento** comporta alcuni vantaggi significativi:

- Disponibilità di manodopera qualificata;
- Gradimento dei quadri e dei dirigenti in termini di qualità della vita;
- Miglior accesso ai servizi di produzione, finanziari, fiscali, ecc...

- Miglior accesso al mercato;
- Maggior disponibilità di materiali e parti di ricambio.

Gli svantaggi inerenti all'accentramento riguardano:

- Costo elevato dei terreni di fabbricazione;
- Difficoltà di ampliamento degli spazi successivi;
- Tasse ed imposte generalmente più elevate rispetto ad una zona decentrata/periferica;
- Maggiori costi della manodopera;
- Maggiori problemi legati alla sicurezza e alla sostenibilità ambientale;
- Maggior disturbi di ordine politico.

Il decentramento, che porta a scegliere preferibilmente per le piccole e medie imprese le zone rurali essendo più tranquille e comunque ben servite, con enormi collegamenti, per i maggiori centri mercantili, è una vera e propria necessità, invece, per le imprese di grandi dimensioni. I vantaggi di tale scelta sono:

- Maggiore disponibilità di terreno con una superficie adeguata per la realizzazione dell'impianto;
- Agevolazioni creditizie e finanziarie;
- Aumento del rendimento della manodopera;
- Azione gestionale più efficace;
- Possibilità di adottare politiche aziendali diversificate riguardo a salari, premi di produzione, cottimi, promozioni, senza subire concorrenza da altri stabilimenti;
- Presenza di fenomeni di inurbamento;
- Implica processi di sviluppo;
- Riduzione degli impatti sulla popolazione;
- Minor traffico per e da il luogo di lavoro.

Il decentramento inoltre presenta anche i seguenti svantaggi:

- Minore uniformità delle decisioni;
- Ridotto accesso a manodopera e servizi specializzati;
- Maggiore difficoltà dei trasporti da e per lo stabilimento dell'impianto industriale;

- Minore disponibilità di materiali, parti di ricambio e manodopera per la manutenzione.

La scelta ubicazionale può dettagliarsi secondo lo schema seguente che prevede due livelli distinti: la Macro-ubicazione e la Micro-ubicazione.

1. MACRO-UBICAZIONE

- Ubicazione geografica: scelta dell'area geografica (continente, nazione, regione) in cui realizzare l'impianto, tenendo conto dell'inserimento dell'impianto nel sistema politico, sociale ed economico locale e nazionale;
- Ubicazione topografica: scelta dell'area topografica (provincia, zona) e di una particolare località nella zona (comune, area di sviluppo industriale) individuata fino ad identificare il preciso suolo o appezzamento da destinare all'impianto.

2. MICRO-UBICAZIONE

- Ubicazione interna: intesa come la scelta della collocazione nell'area degli edifici di cui sopra (l'impianto industriale vero e proprio, i magazzini, gli uffici, i servizi di stabilimento, i servizi ausiliari, i piazzali ed i parcheggi, le aree di manovra, ecc....) e dei singoli reparti costituenti l'impianto;
- Ubicazione puntuale: la scelta delle macchine, delle installazioni e degli arredamenti, nonché della disposizione di manodopera all'interno del singolo reparto.

2.3.2. Principali fattori ubicazionali

I fattori che sono considerati nella definizione dell'ubicazione di un impianto industriale possono considerarsi in:

- Esterni: fattori che derivano dall'ambiente nel quale l'impresa è ubicata. Tra i fattori esterni più significativi risaltano: caratteristiche meteo-climatiche (temperatura, umidità, precipitazioni atmosferiche), classificazione sismica del territorio, caratteristiche idrogeologiche del territorio, caratteristiche del terreno, presenza di falde acquifere superficiali, esposizione a fenomeni naturali (frane, inondazioni, ecc...);

- Interni: fattori propri dei singoli processi produttivi che costituiscono l'attività in esame. Tra i fattori interni più rilevanti sono da evidenziare le specifiche dell'impianto in termini di resistenza ai carichi per solai e strutture, vibrazioni, ecc...

I principali fattori che influenzano la scelta dell'ubicazione di un nuovo impianto industriale sono vari, tra i quali: costi di costruzione, caratteristiche del mercato, lead time di produzione e di distribuzione, materie prime, energie, manodopera, trasporti, oneri di sistemazione del terreno, costo di collegamento e raccordo con le infrastrutture. Viene fornita di seguito una breve descrizione di alcuni di tali fattori che aiutano a determinare la scelta dell'ubicazione di un nuovo stabilimento industriale (Cagliano Anna Corinna, 2020).

Costi di costruzione

Possono variare da un territorio all'altro, in funzione delle condizioni locali relative ai costi dei materiali, della manodopera, dei costi di acquisto del terreno e dei tributi pubblici. Sono, inoltre, influenzati dal clima e dalle conseguenti scelte costruttive necessarie per garantire un adeguato microclima interno.

Ne consegue che nella definizione del costo di costruzione dell'impianto sono individuabili diverse voci di costo. Tra le più significative:

- oneri di sistemazione del terreno;
- costo delle strutture portanti;
- costo delle tamponature e degli isolamenti termici;
- costo di collegamento con le infrastrutture.

Caratteristiche del mercato

Il mercato può assumere due differenti configurazioni:

- *mercato concentrato*: in questo caso c'è quasi sempre la convenienza (limitatamente all'esame di questo fattore) a costruire l'impianto nelle vicinanze del mercato stesso;
- *mercato distribuito*: in questo secondo caso la scelta ubicazionale è meno vincolata, ma è un criterio di scelta più complesso.

Lead Time di produzione e di distribuzione

L'impianto industriale viene ubicato e costruito vicino o meno al mercato a seconda del lead time richiesto. Ad esempio, se il mercato richiede un lead time breve, allora lo stabilimento sarà posizionato nelle vicinanze dello stesso.

Materie prime

La dislocazione del nuovo impianto industriale è nei pressi della fonte delle materie prime a seconda di che tipo sia il processo produttivo.

- *Processo con perdita di peso o di volume =>* dislocazione vicino alla fonte delle materie prime;
- *Processo con perdita di peso o di volume ridotta =>* dislocazione indifferente.

Energie e risorse produttive

L'acquisizione delle risorse produttive e dei servizi necessari alla realizzazione del processo produttivo comporta dei costi che dipendono in maniera sensibile dalle scelte ubicazionali. Oltre alle materie prime, il cui costo di acquisizione è legato al costo del trasporto, occorre considerare la possibilità di ottenere, a prezzi accettabili ed in quantità sufficienti: energia, acqua, elettricità, ecc... Tra le voci di costo più rilevanti risultano il costo dell'approvvigionamento di energia e di acqua e il costo del personale.

Manodopera

La disponibilità di manodopera locale specializzata o da formare influisce una scelta ubicazionale. Questa dipende dalla presenza numerica, dalla facilità di spostamento dal luogo di lavoro all'abitazione, dai costi del personale e dal livello culturale presente. Inoltre, rappresenta un punto di forza per far nascere una nuova mentalità produttiva in un territorio ancora non industrializzato.

Trasporti

I trasporti sono necessari per portare le materie prime allo stabilimento ed i prodotti ai mercati. Le condizioni ideali si hanno quando le materie prime si possono reperire e i prodotti finali si possono vendere direttamente sul posto dove è localizzato l'impianto

produttivo. Lo spostamento dei materiali è generalmente responsabile di un'alta percentuale del costo finale del prodotto. Ne consegue, quindi, che il costo di trasporto è uno degli elementi che maggiormente ha caratterizzato la definizione di modelli di localizzazione industriale. I costi di trasporto dipendono dalla distanza da percorrere, dal tipo di percorso, dal tipo di sistema di trasporto e dal tipo di mezzo di trasporto.

Con riferimento al costo di trasporto, l'ubicazione ottimale è quella che minimizza il costo unitario totale del prodotto sul mercato di vendita. In generale, si può sostenere che il costo unitario per chilometro di trasporto tende a diminuire al crescere della distanza percorsa.

Disponibilità di servizi

È allo stato attuale uno degli aspetti più rilevanti. La presenza di aziende complementari è determinante per alcune aziende in quanto favorisce la localizzazione in prossimità di città dotate di spiccate caratteristiche di disponibilità di terziario avanzato. Per contro, però, una scelta decentrata comporta la crescita di alcune voci dei costi di amministrazione legati alla necessità di attivare uffici commerciali e/o direzionali staccati dallo stabilimento.

Scelta del terreno

Quando si è individuato il territorio, la scelta del terreno è influenzata da diversi elementi. I principali elementi che possono intervenire in questa scelta sono i seguenti:

- La legislazione urbanistica. Gli strumenti urbanistici cui fare riferimento sono il “Piano Regolatore Generale” (PRG) e il “Piano degli Insediamenti Produttivi” (PIP);
- Le vie di comunicazione, come la vicinanza a svincoli stradali;
- Servitù e vincoli (ad esempio la eventuale presenza di attività produttive confinanti contrastanti con quelle dell'impianto che si vuole costruire) comportano stipula di accordi o accettazione di compromessi che generalmente determinano “extra-costi” di difficile valutazione;
- Rischi per lo stabilimento derivanti ad esempio da accadimento di fenomeni naturali disastrosi (frane, terremoti), oppure da presenza di preconcetti ed avversione manifesta da parte della popolazione nel territorio;
- Rischi per terzi (esplosioni, incendi, inquinamento, ecc...).

2.3.3. Metodi di scelta dell'ubicazione fra più alternative

Per effettuare una determinata scelta dell'ubicazione, con i dati finora esposti, si hanno a disposizione diversi metodi da poter mettere in atto. Questi metodi si suddividono in due tipologie (Cagliano Anna Corinna, 2020):

1. Fattori ubicazionali QUALITATIVI, che utilizza principalmente il metodo del punteggio;
2. Fattori ubicazionali QUANTITATIVI, che utilizza il metodo dei costi e il metodo dei costi di trasporto.

Metodo del Punteggio

Il procedimento da seguire per applicare questo metodo è quello più semplice: si elencano tutti i fattori ritenuti importanti per ciascuna possibile ubicazione, si assegna un peso a ciascun fattore indicante la sua influenza sulla scelta dell'ubicazione, si determina una valutazione numerica, collegata ad ogni fattore considerato, per ciascuna delle alternative ubicazioni e, infine, si calcola il punteggio tramite il prodotto del peso per la valutazione numerica. L'ubicazione ottimale che viene scelta è quella che ottiene il punteggio maggiore tra tutti. A titolo di esempio viene mostrato il procedimento sopra elencato in figura 2.23 (Cagliano Anna Corinna, 2020d).

fattori ubicazionali	peso p	valutazione V			punteggio p x V		
		A	B	C	A	B	C
manodopera	40	80	30	50	3200	1200	2000
mat. prime	25	40	95	70	1000	2375	1750
mercato	15	50	70	70	750	1050	1050
energia	10	40	80	60	400	800	600
Costi costr.	10	90	25	40	900	250	400
TOTALE	100				6250	5675	5800

ubicazione preferibile 

Figura 2.23 - Metodo del Punteggio (Cagliano Anna Corinna, 2020d)

Metodo in Base ai Costi

Il procedimento relativo a questo metodo per la scelta dell'ubicazione è simile a quello utilizzato per il metodo del punteggio con la differenza che in questo vengono usati i costi di investimento e i costi di esercizio: si elencano tutti i costi di costruzione, in modo da considerare l'investimento complessivo (oppure si individuano solo le voci di costo differenti tra le varie alternative ubicazionali), si elencano i costi di gestione annui, si comparano tali valori oppure si inseriscono in un metodo di valutazione della redditività degli investimenti e in seguito si effettua la scelta dell'alternativa ubicazionale migliore che avrà il valore più vantaggioso, o meglio l'alternativa con la voce di costo minore. In figura 2.24 viene raffigurato un esempio di applicazione di questo metodo (Cagliano Anna Corinna, 2020).

costi di investimento	località		costi annui di esercizio	località	
	A	B		A	B
terreno	100	70	trasporto		
fabbricati	840	790	materie prime	77	76
scavi	25	30	trasporto		
livellamento	20	15	prodotti finiti	317	314
palificazioni	75	25	manodopera	250	200
raccordo ferrov.	20	10	energia	73	60
raccordo strad.	8	esistente			
approv. acqua	10	10			
TOTALE [M€]	1098	950	TOTALE [M€]	717	650

Figura 2.24 - Metodo in Base ai Costi (Cagliano Anna Corinna, 2020d)

Metodo dei Costi di Trasporto

La posizione dell'impianto è influenzata dai costi di trasporto rispetto ai punti di destinazione dei prodotti in uscita (semi-lavorati o finiti) verso i clienti. La scelta ubicazione viene eseguita in base al criterio di minimizzazione dei costi di trasporto:

n punti noti P_i ($i = 1, \dots, n$)

Il nuovo impianto è ubicato in un punto incognito $X(x,y)$.

Fra $X(x,y)$ e P_i ($i = 1, \dots, n$) esistono dei trasporti il cui costo è proporzionale alle distanze $d(X, P_i)$ con unità di misura pari a [km/viaggio].

Da ogni punto P_i con coordinate (a_i, b_i) si effettuano un numero di viaggi all'anno pari a V_i , con unità di misura [viaggi/anno]. Ogni viaggio ha un determinato costo C_i per unità di percorso di trasporto tra X e P_i , misurato in [€/kilometro].

La funzione obiettivo rappresenta il costo totale annuale dei trasporti [€/anno]:

$$f(X) = \sum_{i=1}^n V_i * C_i * d(X, P_i)$$

$$f(X) = \sum_{i=1}^n W_i * d(X, P_i)$$

Con $W_i = V_i * C_i$ “pesi” espressi in [viaggio/anno]x[€/kilometro].

Per avere l'alternativa ubicazione migliore bisogna determinare il valore X^* per cui si realizzi la seguente condizione:

$$f(X^*) = \sum_{i=1}^n W_i * d(X^*, P_i) = \min f$$

2.3.4. Scelta finale dell'ubicazione

Come esposto già nell'introduzione di questo progetto di tesi finale, la Commissione Europea, insieme ai paesi membri dell'UE e a tutta la comunità scientifica e industriale, ha avviato un mega-progetto comunitario per sostenere le attività di ricerca, innovazione e sviluppo della filiera delle batterie per veicoli elettrici, puntando all'obiettivo di avere entro il 2030 almeno il 30% dei veicoli immatricolati su uso stradale di tipo elettrico, per arrivare entro il 2050 ad avere emissioni zero di CO₂. L'iniziativa prevede la costruzione in 12 Paesi membri di impianti industriali di produzione, con capacità annuali elevate (decine di GWh), dedicati esclusivamente alle batterie agli ioni di litio.

L'Italia è stata scelta per ospitare uno di questi stabilimenti, che sarà il più grande di tutta l'Europa e il dodicesimo su scala mondiale. Principalmente per questo motivo si è scelto di ubicare questo sito industriale nella Regione Piemonte, la quale da decenni ormai, come anche altre regioni dell'Italia Settentrionale, è un polo attrattivo di tantissimi impianti a livello industriale, in quanto la sua posizione si offre vantaggiosa in termini di vicinanza al mercato di vendita, alla catena di fornitura delle materie prime necessarie per il ciclo produttivo e, anche, per gli ottimi collegamenti navali, aerei e su rotaie.

La zona scelta, quindi, per la costruzione dell'impianto industriale da 20 GWh, argomento di questo studio, è situata in una zona rurale, abbastanza lontana dai centri abitati, già ospitante altri stabilimenti industriali, distante dalla città di Torino all'incirca 40 chilometri, percorribili in meno di un'ora.

Nella figura 2.25 è mostrata la zona in oggetto, che predispone di una superficie libera di all'incirca 600 mila metri quadri, utili abbastanza per ospitare la costruzione dell'impianto.



Figura 2.25 - Ubicazione Impianto Industriale

Come si può notare dall'immagine, la zona scelta, per le sue caratteristiche tecniche e per la sua posizione geografica, è situata in un punto strategico per l'Italia e per l'Europa. Dista 40 km dall'aeroporto di Torino e 92 km da quello di Milano Malpensa. Questi due aeroporti sono facilmente raggiungibili grazie all'Autostrada A5 che collega il Piemonte con la Valle D'Aosta, ma anche dai poli logistici di Orbassano, Novara, Rivalta Scrivia e Piacenza. Inoltre, la zona è favorita per il collegamento con la Germania, grande produttrice di materie prime e componenti per la produzione delle batterie al litio, soprattutto a Duesseldorf distante 900 km percorribili in meno di 10 ore; e con Genova, a soli 190 chilometri, che favorisce il collegamento navale, tramite il suo grande e operativo porto commerciale, con anche aziende fornitrici intercontinentali.

La costruzione dell'impianto di produzione e stoccaggio di batterie agli ioni di litio porterà un notevole rilancio per il sistema produttivo della Regione Piemonte e delle amministrazioni locali, in quanto sarà in grado di offrire 4 mila posti di lavoro impiegati nello stabilimento e ulteriori 10 mila tra quelli diretti e indiretti.

Per effettuare la scelta finale di questa ubicazione è stata valutata inoltre la catena di fornitura delle materie prime e componenti necessarie per la produzione. Il mercato di fornitura attualmente è abbastanza chiuso, dato che i processi di estrazione delle materie prime e lavorazione di queste per trasformare nelle componenti richieste sono di difficile attuazione in Europa, soprattutto per l'elevata concorrenza dei colossi mondiali come Cina e Giappone. Nelle immagini che seguono verrà mostrata la catena di fornitura per ogni componente necessaria alla produzione degli elettrodi e all'assemblaggio della cella. Per comodità grafica e visiva le mappe sottostanti raffigurano principalmente il mercato europeo che avvantaggia la scelta dell'ubicazione finale, nonostante però siano state inserite aziende che sono site al di fuori delle zone presentate.

Nella figura 2.26 sono presenti le aziende interessate alla fornitura di componenti per la produzione dell'anodo.

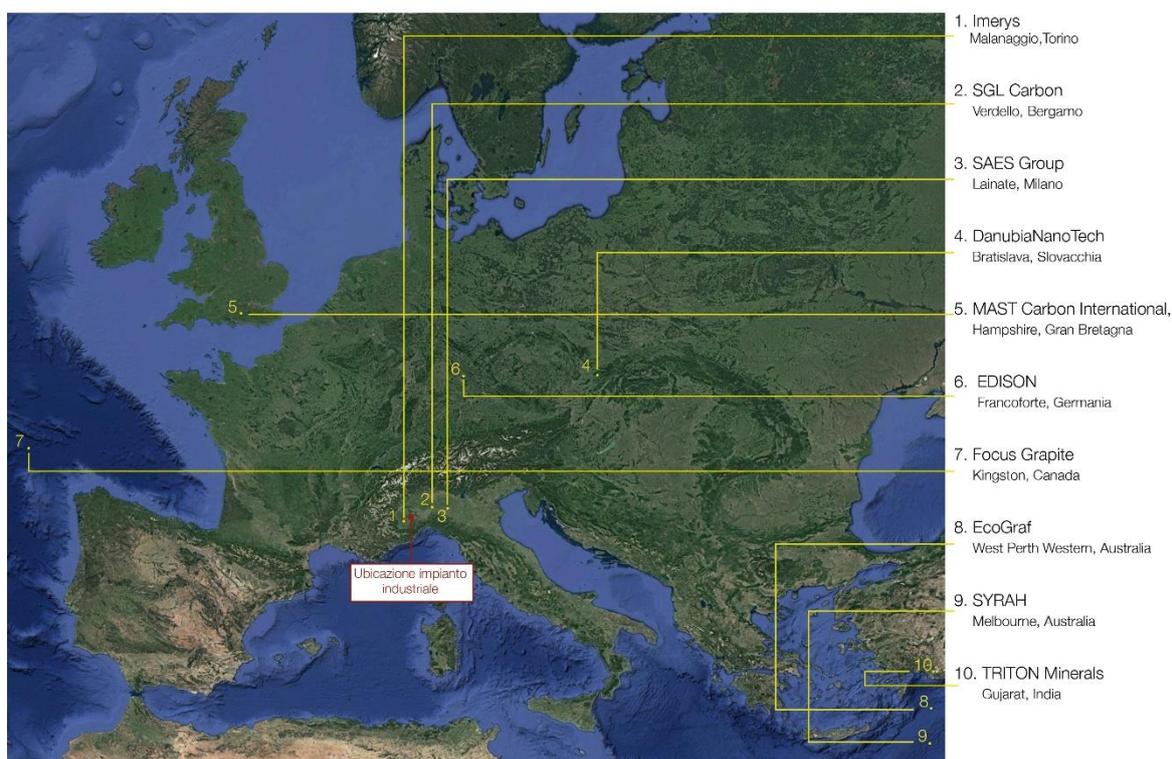


Figura 2.26 - Mercato di fornitura delle componenti per l'anodo

In figura 2.27 vengono mostrate le aziende produttrici di componenti per la produzione del catodo della cella di batteria.

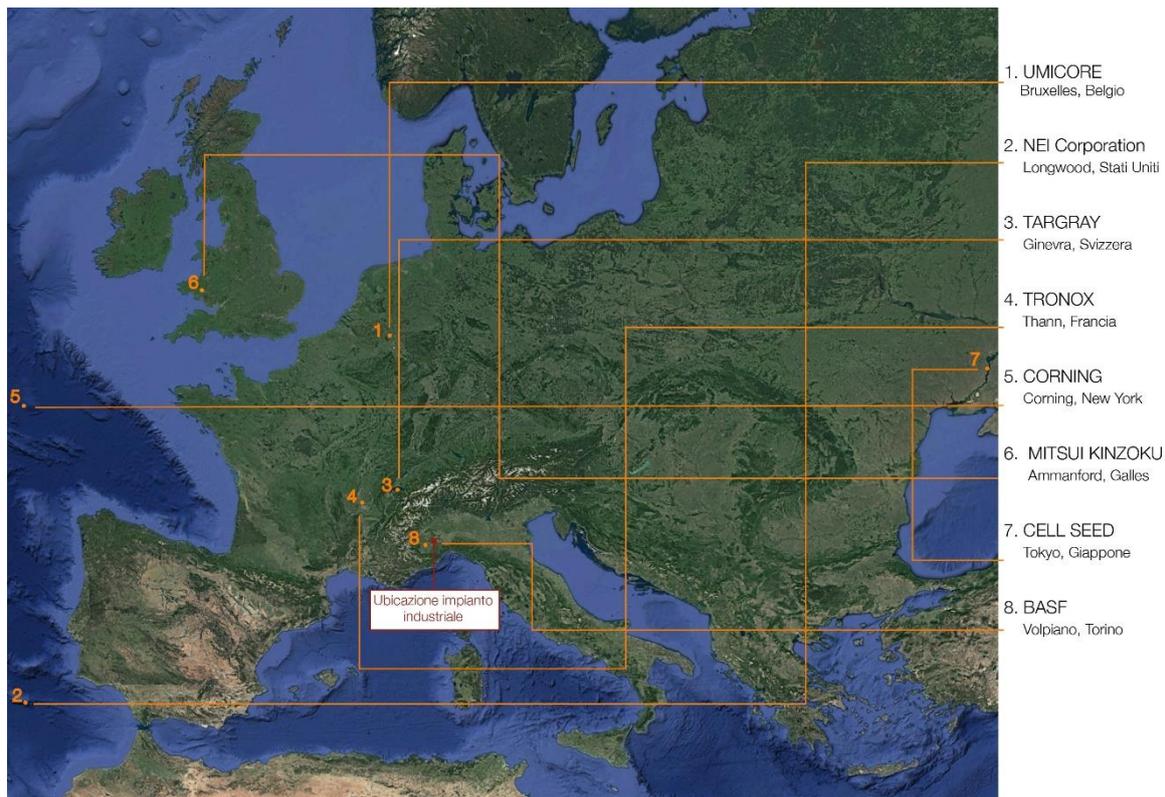


Figura 2.27 - Mercato di fornitura delle componenti per il catodo

Nelle figure 2.28, 2.29 e 2.30 vengono presentate le aziende principali produttrici delle ulteriori componenti richieste per la produzione degli elettrodi e della cella finale. Nello specifico, in figura 28 si mostrano le aziende fornitrici dell'elettrolita; in figura 29 quelle per la fornitura di separatori e, in ultimo, nella figura 30 sono raffigurate le aziende produttrici di leganti e additivi utili per la produzione degli elettrodi. Per quest'ultime la scelta si è concentrata principalmente nella zona europea, essendo più vantaggiosa per l'ubicazione dell'impianto industriale.

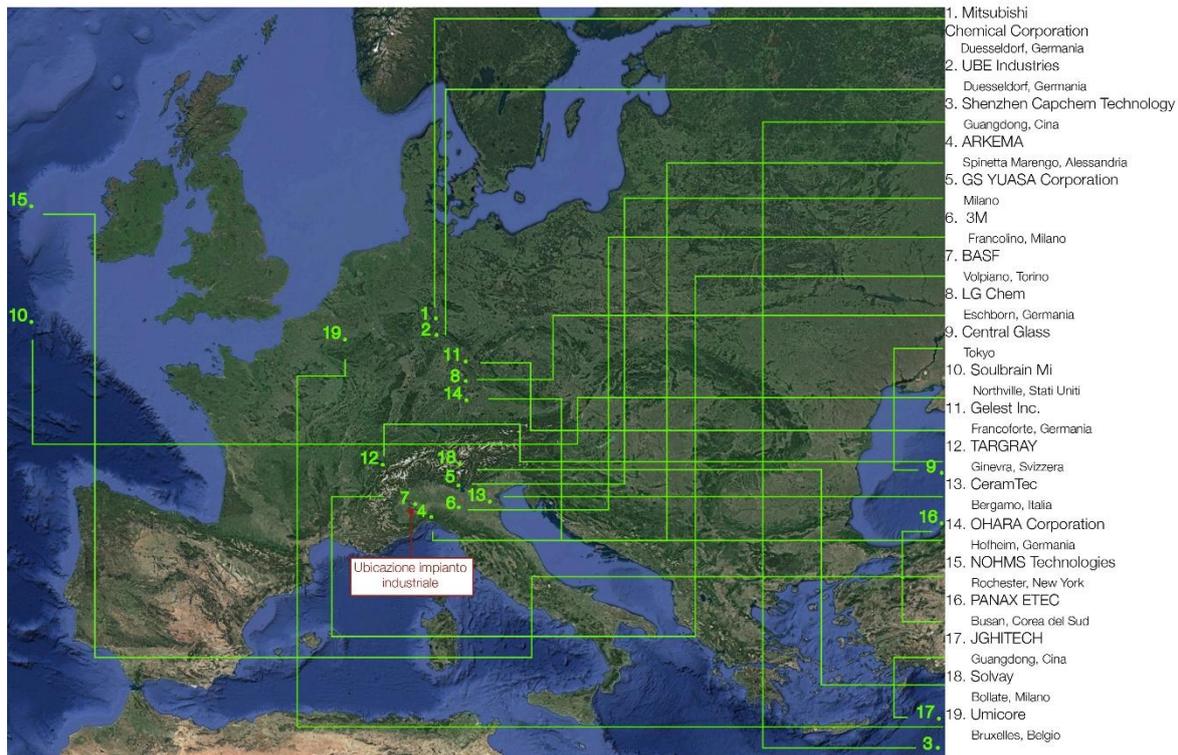


Figura 2.28 - Mercato di fornitura dell'elettrolita

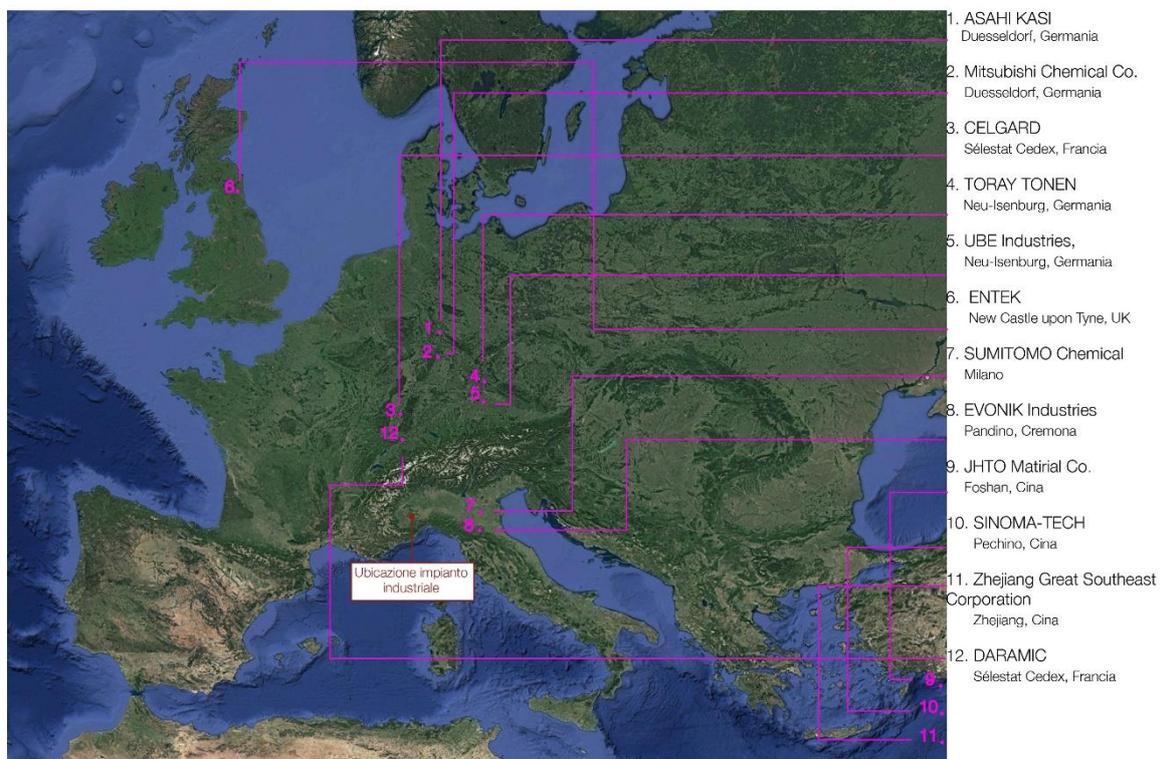


Figura 2.29 - Mercato di fornitura dei separatori

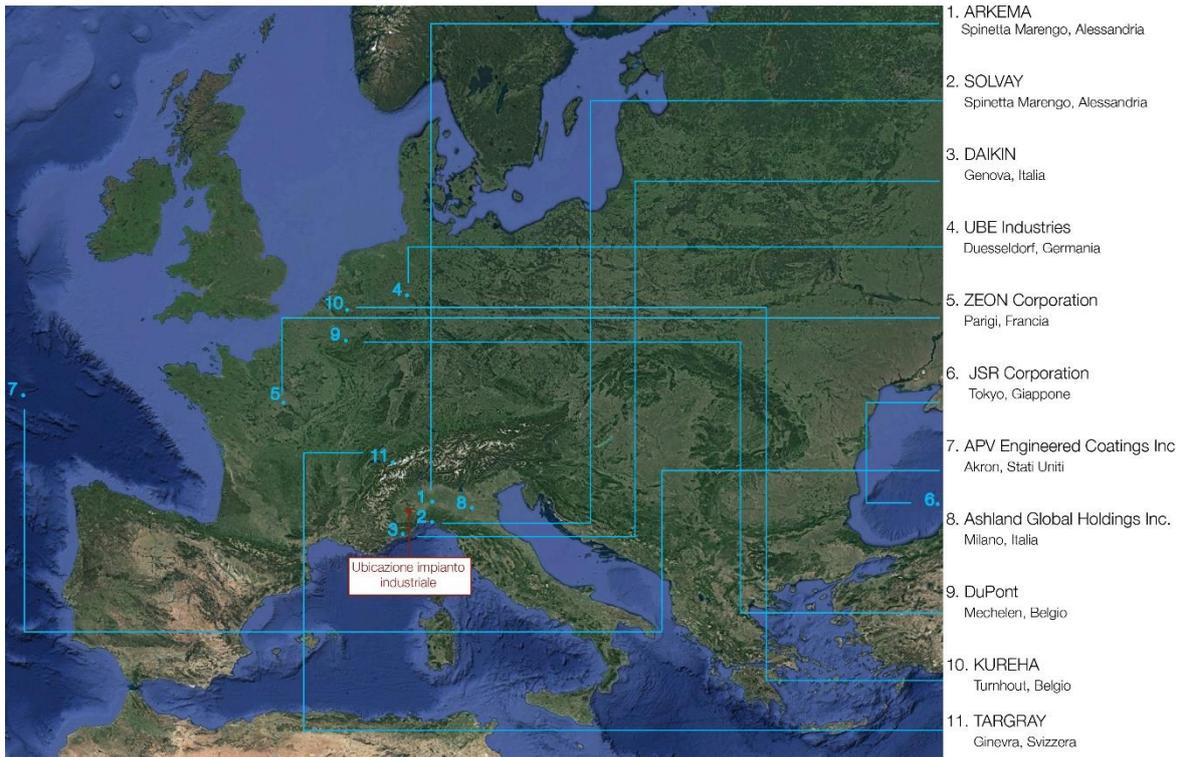


Figura 2.30 - Mercato di fornitura dei leganti e additivi

Capitolo 3

Dimensionamento del Layout

La base da cui partire per dimensionare un impianto industriale per la produzione di batterie agli ioni di litio è la capacità finale della cella. Le seguenti descrizioni e analisi espongono le capacità per una cella litio-ione di tipo pouch (a sacchetto) e, inoltre, vengono specificate le quantità di materie prime necessarie.

3.1. Bill of Materials – BOM

Per avviare un primo studio di fattibilità per un nuovo impianto industriale, oltre al ciclo produttivo, è di fondamentale importanza la Bill of Materials, o BOM o Distinta Base, che rientra negli output dell'ingegnerizzazione del prodotto, una delle fasi utili e necessarie per lo studio del prodotto che si andrà a costruire e produrre (Cagliano Anna Corinna, 2020a).

Una Distinta Base è un elenco completo dei materiali principali e dei sottocomponenti necessari per realizzare un determinato prodotto. La sua creazione è utile per andare a ridurre i tempi e i costi legati alle operazioni di stoccaggio dei materiali in magazzino.

Una BOM con una anagrafica dettagliata dei materiali impatta positivamente sulla fornitura delle linee di produzione, ma genera anche dei benefici a livello di logistica interna: è uno strumento che si presta perfettamente per sincronizzare al meglio la logistica e la produzione.

La Distinta Base apporta notevoli miglioramenti ai diversi processi interni per la definizione del prodotto finale:

- Pianificazione dell'acquisto di materie prime: si migliora la pianificazione degli acquisti evitando il rischio di accumulare stock in eccesso;
- Definizione del costo delle attrezzature: oltre alla spesa relativa all'acquisto delle materie prime, esiste un costo legato alle attrezzature necessarie per gestirle, che la BOM permette di definire al meglio;
- Prevenzione di rotture di stock: l'impianto di produzione deve sempre disporre delle materie prime necessarie per fabbricare un prodotto senza interruzioni;
- Riduzione degli errori: la distinta base definisce tutti i processi relativi alla fabbricazione di un prodotto, riducendo così le probabilità di errore.

La Bill of Materials presenta un'organizzazione gerarchica dei materiali strutturata in più livelli: al livello "zero", in alto alla gerarchia, si trova il prodotto finito. Ai livelli più bassi ci sono invece le componenti e i sottocomponenti. In figura 3.1 è riportata la Distinta Base per costruire e produrre un pacco di batterie per veicoli elettrici.

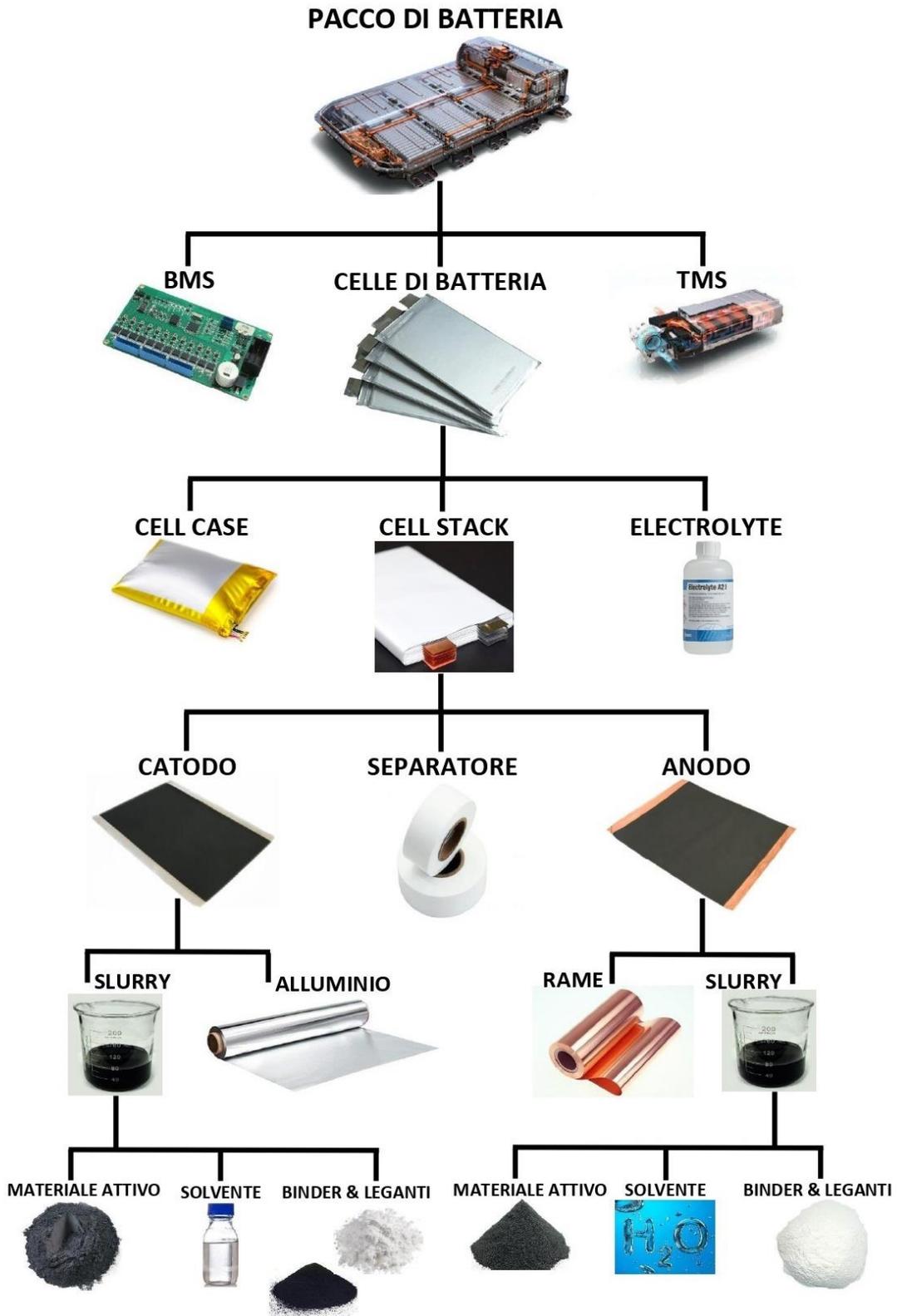


Figura 3.1 - Distinta base di un pacco di batteria per veicoli elettrici.

Come si può notare, al livello 0 della BOM è presente il pacco di batteria che viene installato direttamente sui veicoli elettrici. Ogni pacco di batteria è formato da tre principali assiemi, riportati nel livello 1 della BOM: il BMS, il TMS e la cella di batteria.

Il Battery Management System (BMS) è il componente intelligente di un pacco di batterie, responsabile per un avanzato monitoraggio e management. È il cervello vero e proprio della batteria e gioca un ruolo fondamentale a livello di sicurezza, prestazioni, tassi di carica e longevità. Si tratta di un insieme di algoritmi avanzati e componenti elettronici che garantiscono misure di alta precisione.

Il Thermal Management System (TMS) riguarda invece la gestione termica del pacco di batteria. Dato che tutti i dispositivi elettronici e i circuiti generano calore in eccesso, il TMS migliora l'affidabilità del sistema e previene eventuali guasti: la quantità di calore emesso è uguale alla potenza assorbita, se non ci sono altre interazioni energetiche.

Nella BOM il focus viene dato alla cella di batteria, argomento di studio per questo elaborato, essendo il prodotto elementare dal quale poi viene studiato e dimensionato l'impianto industriale. A livello 2 della BOM, una cella di batteria si divide in tre sottocomponenti: il case esterno, o coffee bag, l'elettrolita e la pila degli elettrodi (cell stack). A sua volta, ogni cell stack, nel livello 3 della BOM è composta da un impilamento di catodo e anodo, divisi da un foglio di separatore. Il livello 4 è costituito dalle componenti del catodo da una parte, la slurry del catodo e il collettore di corrente in alluminio, e dell'anodo dall'altra parte, la slurry dell'anodo e il collettore di corrente in rame. Infine, nel livello 5 della BOM, la slurry catodica e anodica sono costituite dai sottocomponenti finali, che rappresentano le materie prime necessarie per la produzione della cella: il materiale attivo, il solvente e i binder & leganti. La trattazione nel dettaglio dei componenti e sottocomponenti di una cella di batteria sono state trattate nel capitolo 2 del seguente studio.

3.2. Informazioni tecniche

Le valutazioni e i calcoli da effettuare per questo studio iniziano dalla capacità finale della Gigafactory, questo perché è importante conoscere il volume di produzione desiderato al fine poi di progettare l'impianto industriale. L'obiettivo finale da raggiungere è quello di **20 GWh**. Per lo studio si è presa in considerazione la produzione di pacchi di batteria per veicoli elettrici con una densità di energia ciascuno di 80 kWh. Questo valore non implica

il fatto che non si possano produrre con questo impianto industriale altri diversi tipi di celle di batteria.

Capacità Gigafactory	20	GWh
Densità Energia pacco di batteria	80	kWh
Capacità cella	40	Ah
Vnom	3,6	V
Densità Energia cella	144	Wh
Cap. Produz. Celle Annuale	138888889	celle/anno
Giorni lavorativi all'anno	300	gg
Cap. Produz. Celle Giornaliera	462963	celle/gg

Figura 3.2 - Informazione tecniche per la Gigafactory

Come si può notare in figura 3.2, la cella pouch da produrre fornisce una intensità di corrente pari a 40 Ah e, con una tensione nominale da 3,6 V, avrà una capacità media finale che può essere calcolata intorno ai 144 Wh ($40 \text{ Ah} * 3,6 \text{ V} = 144 \text{ Wh}$). Queste informazioni possono essere utilizzate per calcolare il volume finale di celle annuale dell'impianto che sarà pari a più di 138 milioni celle/anno. Considerato che in media in un anno i giorni lavorativi sono pari a 300 gg, si avrà una produzione giornaliera di celle maggiore di 460 mila celle/gg. Come già presentato nel capitolo 1, la capacità annuale della Gigafactory è un valore ideale in quanto a causa di diversi fattori, quali guasti delle attrezzature, interruzione della linea, problemi di disponibilità dei materiali, prodotti difettosi o non conformi, la capacità annuale sarà inferiore a quella prevista inizialmente. Per questo motivo, si è scelto di avere una produzione annuale di celle pari a 140 milioni celle/anno e una produzione giornaliera di 480 mila celle/gg. Con questi nuovi valori la capacità finale dell'impianto sarà circa del 10% maggiore rispetto a quella ideale, rispecchiando i risultati riportati dalla letteratura (Nelson *et al.*, 2012).

Con le caratteristiche delle celle sopracitate verrebbero prodotti dei pacchi di batteria da installare sui veicoli elettrici con una densità di energia pari a 80 kWh. Ogni pacco, quindi, richiederebbe 560 celle che verrebbero installate tramite 8 moduli costituiti ognuno da 70 celle assemblate attraverso collegamenti in serie e in parallelo. Anche in questo caso la densità di energia di ogni pacco sarebbe maggiore di circa il 10% di quella prevista idealmente, come riportato nella letteratura esistente.

3.3. Fasi di lavorazione

Ciascuna delle fasi di lavorazione del processo di produzione è dimensionata in modo che quando l'impianto lavora a piena capacità, si raggiungerà la produzione annuale in termini di capacità pari a 20 GWh. Questo significa riuscire a produrre all'anno 250 mila pacchi di batterie da installare sui veicoli elettrici. Per il dimensionamento di ogni singola attività del ciclo di produzione si sono considerati giornate lavorative da 24 ore, divise in turni da 8 ore, nell'ottica dell'ottimizzazione dei processi dovuti all'automazione di ogni passaggio da una fase all'altra e alla digitalizzazione dei macchinari utilizzati sempre più innovativi.

Il primo passo da cui partire per dimensionare un layout di un impianto industriale è calcolare il takt time. Il **Takt Time**, punto saliente della filosofia Lean, è utile per definire il ritmo che la produzione deve avere per soddisfare pienamente la domanda e quindi, il ritmo al quale si dovrebbe produrre per fare in modo che il flusso del valore sia sincronizzato con le reali esigenze dei clienti. In pratica è il tempo disponibile per la produzione diviso per la domanda, ognuno dei due termini riferito allo stesso orizzonte temporale. Il takt time rappresenta dunque il ritmo al quale deve scorrere il flusso del valore (obiettivo: determinare ogni quanto tempo medio c'è bisogno di un pezzo per soddisfare la domanda del cliente) (Cagliano Anna Corinna, 2020e).

$$TAKT\ TIME = \frac{\text{Tempo di Lavoro Effettivo}}{\text{Domanda Media}}$$

Considerando giornate lavorative da 24 ore, si avrà come tempo di lavoro effettivo 1440 minuti e la domanda media pari alla domanda giornaliera da soddisfare (480000 celle). In questo modo il **TAKT TIME** sarà **0,003 minuti per unità**. Nel calcolo del Takt Time non si è tenuto conto del rendimento, in quanto, come spiegato nel paragrafo precedente, la produzione annuale e giornaliera è sovradimensionata del 10% tenendo in conto anche il fattore del rendimento effettivo dei macchinari.

Infine, per il calcolo del numero di macchine necessarie per ogni attività è indispensabile conoscere il tempo ciclo macchina, o meglio il tempo impiegato dalla macchina per produrre un'unità di prodotto, che nel caso in questione è la singola cella. Espresso il tempo ciclo

macchina, attraverso il takt time, si calcola il numero di macchine necessarie per quella determinata operazione, secondo la formula seguente:

$$\#MACCHINE = \frac{\textit{Tempo Ciclo Macchina}}{\textit{Takt Time}}$$

Poiché ci sono più di 20 fasi di lavoro nella produzione di celle di batterie agli ioni di litio e sono sempre nello stesso ordine, il layout per prodotto (production line) pare essere la scelta più adatta. Inoltre, l'elevato volume di produzione è adatto al volume del layout per prodotto. La produzione ha lo scopo di durare a lungo e la fabbrica sarà completamente automatizzata, che sono anche caratteristiche per il production line. Per questi motivi, il layout per prodotto viene scelto come tipo di layout.

3.4. Electrode Manufacturing

Per la fabbricazione degli elettrodi vengono utilizzati dei rotoli che, a causa del diverso numero di macchine tra le varie attività del processo di produzione, è necessario che vengano riavvolti passo dopo passo. Ogni attività di lavoro ha diverse capacità e velocità di produzione e, di conseguenza, un numero differente di macchine utilizzate.

I rotoli degli elettrodi possono essere movimentati mediante nastri trasportatori, robot o carrelli elevatori automatizzati. Un modo semplice per completare queste transizioni è quello di utilizzare nastri trasportatori e robot, che solleveranno il rullo sul nastro trasportatore e alla fine del percorso un altro robot lo predisporrà alla macchina successiva per la prossima lavorazione. Nonostante però l'utilizzo di trasportatori e robot automatizzati sarà indispensabile la presenza di risorse umane che verranno dettagliate per ogni attività.

3.4.1. Electrode Slurry Mixing

Le materie prime principali per produrre la slurry, che formerà l'elettrodo insieme al collettore di corrente, sono polveri ad eccezione dell'unica componente liquida che è il solvente. Ognuna di queste componenti necessita di un proprio serbatoio dal quale ogni materiale viene trasferito al serbatoio unico di miscelazione.

Per avere una slurry con le caratteristiche richieste di produzione, la fase di mixing richiede circa 3 ore di lavoro (Liu *et al.*, 2014), quindi ogni macchina di mixing produrrà la slurry necessaria per tre ore alla volta. Ogni serbatoio di mixing ha un volume di lavoro pari a 900 litri e l'intera macchina ha una lunghezza di 3200 mm e una larghezza di 1600 mm. Questi valori portano ad avere un'area occupata per ogni mixer di 5,12 m².

MIXING CATODO		
Densità NMC	4,65	g/cm ³
Densità Carbone	1,825	g/cm ³
Densità PVDF	1,77	g/cm ³
Densità NMP	1,03	g/cm ³
Volume NMC per una cella	0,05376	litri
Volume Carbone per una cella	0,00961	litri
Volume PVDF per una cella	0,00743	litri
Volume NMP per una cella	0,15330	litri
Volume tot. per una cella	0,22411	litri
Volume Mixing	900	litri
Tempo Mixng	3	ore
TEMPO MACCHINA CATODO	0,04482	min/unità
#MACCHINE MIXING CATODO	15	
Lunghezza Mixer	3200	mm
Larghezza Mixer	1600	mm
Area Mixer Catodo	5,12	m²
Area tot MIXING CATODO	76,49	m²

Figura 3.3 - Mixing Catodo

Nella figura 3.3 si può notare che, considerando le densità delle varie componenti della slurry catodica (NMC, Carbone, PVDF, NMP), per produrre una singola cella è necessario un volume di circa 0,22 litri, che, in base alle caratteristiche del mixer, porta ad ottenere un tempo ciclo macchina pari a 0,04482 min/unità. Di conseguenza, per raggiungere la produzione media giornaliera, si necessitano di 15 mixer, operanti in parallelo, con un'aria totale di 76,49 m².

Dal lato della slurry anodica, come mostrato nella figura 3.4, procedendo allo stesso modo sopra descritto, con la differenza che le componenti necessarie sono grafite, carbone, CMC e acqua, il volume necessario per una singola cella è di circa 0,15 litri, con un tempo ciclo macchina, quindi, di 0,02989 min/unità. In questo caso le macchine di mixer richieste ammontano a 10, con un'area totale di lavoro per la parte anodica di 50,84 m².

MIXING ANODO		
Densità Grafite	2,24	g/cm ³
Densità Carbone	1,95	g/cm ³
Densità CMC	2	g/cm ³
Densità Acqua	1	g/cm ³
Volume Grafite per una cella	0,04826	litri
Volume Carbone per una cella	0,00000	litri
Volume CMC per una cella	0,00318	litri
Volume Acqua per una cella	0,09751	litri
Volume tot. per una cella	0,14895	litri
Volume Mixing	900	litri
Tempo Mixng	3	ore
TEMPO MACCHINA ANODO	0,02979	min/unità
#MACCHINE MIXING ANODO	10	
Lunghezza Mixer	3200	mm
Larghezza Mixer	1600	mm
Area Mixer Anodo	5,12	m²
Area tot MIXING ANODO	50,84	m²

Figura 3.4 - Mixing Anodo

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 2 operatori ogni 3 macchine di mixer. Precisamente 10 dipendenti per la parte catodica e 6 dipendenti per la parte anodica (Nelson *et al.*, 2012). Considerando giornate lavorative di 24 ore, i lavoratori totali necessari sono 48.

Data la pericolosità e tossicità dei materiali attivi utilizzati gli spazi necessari per questa operazione, si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, respiratore con filtro antipolvere, scarpe di sicurezza, guanti in nitrile o simili e tuta protettiva con annessa protezione del capo (Carlo Novarese - FAAM).

3.4.2. Coating & Drying

Eseguito il mixing, per trasportare al coater le slurries prodotte, per essere depositate sui rotoli dei collettori di corrente, sono necessari dei serbatoi di stoccaggio e dosaggio dello stesso volume di quelli della miscelazione. La slurry viene rilasciata su entrambi i lati del foglio in modo tale che vengano depositati 238 grammi di slurry anodica e 550 grammi di quella catodica per ogni metro quadro (Ming Wang, Dingying Dang, Andrew Meyer, Renata Arsenault, Yang-Tse Cheng, 2020). Per raggiungere la capacità richiesta per la cella (40 Ah), la parte catodica è in grado di fornire 160 mAh/g, invece quella anodica 370

mAh/g: questo vuol dire che servono 6 catodi e 6 anodi per comporre la cella finale. Ogni elettrodo ha una lunghezza di 300 mm e una larghezza di 200 mm. Inoltre, ad ogni elettrodo vanno aggiunti 50 mm di collettore di corrente non rivestito dalla slurry che servirà per la saldatura della pila. Considerato che il coater riesce a rivestire rotoli di larghezza pari a 1300 mm, con larghezza massima rivestita di 1200 mm, abbastanza utile da produrre sullo stesso lato corto i 6 elettrodi necessari, per produrre una singola cella servono 350 mm di lunghezza del rotolo. Con la velocità della macchina di 40 m/min, il tempo ciclo macchina per una singola cella è pari a 0,00875 min/unità, che portano a richiedere, per la produzione giornaliera, 3 macchine per la parte catodica e 3 per quella anodica. Ogni coater & dryer ha una lunghezza di 76000 mm e una larghezza di 3200 mm, con un'area quindi di 243,2 m². Per domanda giornaliera richiesta, sono necessari 709,33 m² di coating & drying catodico e 709,33 m² di quello anodico. Nelle figure 3.5 è riportato quanto appena descritto.

COATING&DRYING CATODO		
#catodi per cella	6	
Lunghezza catodo	300	mm
Larghezza catodo	200	mm
Larghezza rotolo alluminio	1300	mm
Larghezza rotolo rivestita	1200	mm
#elettrodi per lato corto rotolo	6	
Lunghezza collettore di corrente	50	mm
Lunghezza di rotolo necessaria per una cella	350	mm
Velocità di lavoro coater	40	m/min
TEMPO MACCHINA CATODO	0,00875	min/unità
#MACCHINE COATING CATODO	3	
Lunghezza Coating&Drying	76000	mm
Larghezza Coating&Drying	3200	mm
Area Coating Catodo	243,2	m ²
Area tot COATING&DRYING CATODO	709,33	m²
COATING&DRYING ANODO		
#anodi per cella	6	
Lunghezza anodo	300	mm
Larghezza anodo	200	mm
Larghezza rotolo rame	1300	mm
Larghezza rotolo rivestita	1200	mm
#elettrodi per lato corto rotolo	6	
Lunghezza collettore di corrente	50	mm
Lunghezza di rotolo necessaria per una cella	350	mm
Velocità di lavoro coater	40	m/min
TEMPO MACCHINA ANODO	0,00875	min/unità
#MACCHINE COATING ANODO	3	
Lunghezza Coating&Drying	76000	mm
Larghezza Coating&Drying	3200	mm
Area Coating Anodo	243,2	m ²
Area tot COATING&DRYING ANODO	709,33	m²

Figura 3.5 - Coating & Drying catodico e anodico

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 3 operatori per ogni macchina di coating. Precisamente 9 dipendenti per la parte catodica e 9 dipendenti per la parte anodica (Nelson *et al.*, 2012). Considerando giornate lavorative di 24 ore, i lavoratori totali necessari sono 55.

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, respiratore con filtro antipolvere, scarpe di sicurezza, guanti in nitrile o simili antitaglio e tuta protettiva con annessa protezione del capo (Carlo Novarese - FAAM).

3.4.3. Solvent Recovery System

Il sistema di recupero dei solventi mira a ridurre il consumo di solventi nella produzione degli elettrodi. Esso comprende il sistema di riciclaggio e combustione ad emissione sostenuta. Come già anticipato nel capitolo 1, soltanto la linea di produzione catodica richiede un'operazione di recupero del solvente utilizzato (NMP), in quanto per gli elettrodi anodici viene utilizzato come solvente della semplice acqua.

Il filtro, lo scambiatore di calore e il demister (separatore liquido-vapore) richiedono insieme un'aria di 20 m² di spazio, nello specifico 5000 mm di lunghezza e 4000 mm di larghezza. Per il calcolo del numero delle macchine di quest'operazione non viene utilizzato il metodo trattato nelle altre fasi, in quanto il solvent recovery system viene installato in linea proprio successivamente l'attività di coating & drying. Dato che, quindi, le macchine di coating & drying della linea catodica sono pari a 3, altrettante ne sono richieste per questa fase, richiedendo uno spazio totale di 60 m² (figura 3.6).

SOLVENT RECOVERY SYSTEM CATODO		
Area Recovery System	20	m²
#MACCHINE RECOVERY SYSTEM	3	
Area tot SOLVENT RECOVERY SYSTEM	60,00	m²

Figura 3.6 - Solvent Recovery System

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 2 operatori, o meglio 6 dipendenti totali necessari per l'intera giornata lavorativa di 24 ore (Nelson *et al.*, 2012).

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, respiratore con filtro antipolvere, scarpe di sicurezza, guanti in nitrile o simili antitaglio e tuta protettiva con annessa protezione del capo (Carlo Novarese - FAAM).

3.4.4. Calendering

I rotoli degli elettrodi rivestiti possono essere trasferiti alle calandre con nastri trasportatori assistiti da robot. I rulli pressanti assottigliano il rotolo dell'elettrodo e, dopo aver effettuato il calendering, vengono riavvolti. Grazie a questa operazione, lo spessore totale del rotolo dell'elettrodo anodico diminuisce da 280 μm a 170 μm , mentre il rotolo del catodo passa da 260 μm a 160 μm .

Per produrre una cella, come esposto già precedentemente, sono necessari 350 mm di lunghezza del rotolo anodico e altrettanti del rotolo catodico. La macchina lavora ad una velocità di 30 m/min e in questo modo il tempo ciclo macchina per produrre un'unità di prodotto è pari a 0,01167 min/unità. Con questi valori, il numero di macchine necessari per la domanda di produzione giornaliera sono rispettivamente 4 per la linea catodica e 4 per la linea anodica. Ogni calender misura in lunghezza 5000 mm e in larghezza 4500 mm, occupando un'area di 22,50 m². Per entrambe le linee di produzione degli elettrodi sono richiesti 87,50 m² ciascuna. In figura 3.7 è riportato quanto esposto.

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 1 operatore per ogni macchina di calendering. Precisamente 4 dipendenti per la parte catodica e 4 dipendenti per la parte anodica (Nelson *et al.*, 2012). Considerando giornate lavorative di 24 ore, i lavoratori totali necessari sono 24.

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, respiratore con filtro antipolvere, scarpe di sicurezza, guanti in nitrile o simili antitaglio e tuta protettiva con annessa protezione del capo (Carlo Novarese - FAAM).

CALENDERING CATODO		
Velocità di lavoro Calender	30	m/min
Lunghezza di rotolo necessaria per una cella	350	mm
TEMPO MACCHINA CATODO	0,01167	min/unità
#MACCHINE CALENDERING CAT.	4	
Lunghezza Calender	5000	mm
Larghezza Calender	4500	mm
Area Calender Catodo	22,5	m²
Area tot CALENDERING CATODO	87,50	m²
CALENDERING ANODO		
Velocità di lavoro Calender	30	m/min
Lunghezza di rotolo necessaria per una cella	350	mm
TEMPO MACCHINA ANODO	0,01167	min/unità
#MACCHINE CALENDERING AN.	4	
Lunghezza Calender	5000	mm
Larghezza Calender	4500	mm
Area Calender Anodo	22,5	m²
Area tot CALENDERING ANODO	87,50	m²

Figura 3.7 - Calendering catodico e anodico

3.4.5. Slitting

I rotoli dei fogli degli elettrodi vengono trasferiti alla fase di taglio attraverso nastri trasportatori e robot. In questa fase i rotoli vengono tagliati longitudinalmente in rotoli di dimensioni inferiori in base alla larghezza richiesta del singolo elettrodo, che nel caso di questo studio è pari a 200 mm, quindi, da ogni rotolo rivestito largo 1200 mm ne verranno creati 6 differenti. Anche in questa operazione sono richieste due linee di lavoro separate tra anodo e catodo, in quanto durante il taglio si potrebbero creare delle polveri di materiale attivo che andrebbero ad interferire il funzionamento elettrochimico finale della cella.

Come si evince dalla figura 3.8, lo slitter lavora con una velocità ottimale di 50 m/min e sempre con una lunghezza di rotolo pari a 350 mm, necessaria per la produzione di una singola cellula, il tempo ciclo macchina per unità di prodotto è di 0,007 min/unità. Dunque, il numero di macchine richieste è pari a 3 per la parte catodica e 3 per la linea anodica. Ogni macchina ha una lunghezza di 2650 mm e una larghezza di 1900 mm che porta ad avere uno spazio occupato per ognuna di 5,035 m², con un'area totale di 30,22 m².

SLITTING CATODO		
Lunghezza di rotolo necessaria per una cella	350	mm
Velocità di lavoro Slitter	50	m/min
TEMPO MACCHINA CATODO	0,007	min/unità
#MACCHINE SLITTING CATODO	2,33	3
Lunghezza Slitter	2650	mm
Larghezza Slitter	1900	mm
Area Slitter Catodo	5,035	m²
Area tot SLITTING CATODO	15,11	m²
SLITTING ANODO		
Lunghezza di rotolo necessaria per una cella	350	mm
Velocità di lavoro Slitter	50	m/min
TEMPO MACCHINA CATODO	0,007	min/unità
#MACCHINE SLITTING ANODO	2,33	3
Lunghezza Slitter	2650	mm
Larghezza Slitter	1900	mm
Area Slitter Anodo	5,035	m²
Area tot SLITTING ANODO	15,11	m²

Figura 3.8 - Slitting catodico e anodico

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 2 operatori, o meglio 6 dipendenti totali necessari per l'intera giornata lavorativa di 24 ore (Nelson *et al.*, 2012).

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, respiratore con filtro antipolvere, scarpe di sicurezza, guanti in nitrile o simili antitaglio e tuta protettiva con annessa protezione del capo (Carlo Novarese - FAAM).

3.4.6. Vacuum Drying

In assenza di elettrolita, non viene arrecato nessun danno se gli elettrodi vengono esposti alla normale aria dell'impianto industriale. Prima però che la cella venga assemblata gli elettrodi vanno asciugati in dei forni sottovuoto per alcune ore.

I forni per grandi impianti industriali hanno volumi 22500 litri. Considerando che per una cella sono richiesti 6 elettrodi catodici e 6 elettrodi anodici, il volume occupato dalla componente catodica è pari a 0,0576 litri, mentre da quella anodica è di 0,0612 litri. Ogni

macchina, quindi, riuscirebbe a lavorare contemporaneamente più di 390 mila celle per la linea catodica e quasi 370 mila celle per la linea anodica. Dovendo rispondere alla produzione giornaliera di 480 mila celle, sono necessarie 4 macchine in totale, 2 per ogni linea. Ogni vacuum dryer ha una lunghezza di 5400 mm e una larghezza di 3140 mm. L'area richiesta totale è di 33,91 m² per ogni linea di produzione (figura 3.9).

VACUUM DRYING CATODO		
Volume forno	22500	litri
#catodi per cella	6	
Lunghezza catodo	300	mm
Larghezza catodo	200	mm
Spessore catodo	0,16	mm
Volume cella catodo	0,0576	litri
#celle per macchina	390625	celle/macch
#MACCHINE DRYING CATODO	1,23	2
Lunghezza vaccum oven	5400	mm
Larghezza vaccum oven	3140	mm
Area Vacuum Drying Catodo	16,96	m²
Area tot VACUUM DRYING CATODO	33,91	m²
VACUUM DRYING ANODO		
Volume forno	22500	litri
#anodi per cella	6	
Lunghezza anodo	300	mm
Larghezza anodo	200	mm
Spessore anodo	0,17	mm
Volume cella anodo	0,0612	litri
#celle per macchina	367647	celle/macch
#MACCHINE DRYING ANODO	1,31	2
Lunghezza vaccum oven	5400	mm
Larghezza vaccum oven	3140	mm
Area Vacuum Drying Catodo	16,96	m²
Area tot VACUUM DRYING ANODO	33,91	m²

Figura 3.9 - Vacuum Drying catodico e anodico

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 2 operatori per ogni macchina. Precisamente 4 dipendenti per la parte catodica e 4 dipendenti per la parte anodica (Nelson *et al.*, 2012). Considerando giornate lavorative di 24 ore, i lavoratori totali necessari sono 24.

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, respiratore con filtro antipolvere, scarpe di sicurezza, guanti in nitrile o simili antitaglio e tuta protettiva con annessa protezione del capo (Carlo Novarese - FAAM).

3.5. Cell Assembly

L'assemblaggio delle celle comprende le fasi dal taglio del singolo elettrodo alla sigillatura finale delle celle dentro la coffee bag. Durante queste fasi i case delle celle sono riempiti con la pila degli elettrodi e con l'elettrolita ed infine sigillati.

Ogni attività di lavoro ha diverse capacità e velocità di produzione e, di conseguenza, un numero differente di macchine utilizzate. Diversamente da quanto richiesto per la fase di Electrode Manufacturing, nella fase di Cell Assembly la linea del processo produttivo sarà unica, in quanto gli elettrodi anodici e catodici vengono assemblati insieme.

I rotoli degli elettrodi, inizialmente, e i singoli elettrodi, in seguito, possono essere movimentati mediante nastri trasportatori, robot o carrelli elevatori automatizzati. Un modo semplice per completare queste transizioni è quello di utilizzare nastri trasportatori e robot, che solleveranno i pezzi sul nastro trasportatore e alla fine del percorso un altro robot li predisporrà alla macchina successiva per la prossima lavorazione. Nonostante però l'utilizzo di nastri trasportatori e robot automatizzati sarà indispensabile la presenza di risorse umane che verranno dettagliate per ogni attività.

3.5.1. Electrode Shaping – Notching

I rotoli degli elettrodi arrivano alla macchina di questa operazione tramite nastri trasportatori e robot. Il rotolo viene installato nella macchina e man mano che viene aperto su un nastro, la macchina, attraverso dei punzoni, lo ritaglierà secondo le misure impostate tramite il pannello di controllo a monte, che nel caso di questo studio sono 300 mm di lunghezza e in più 50 mm di lunghezza del collettore di corrente.

Per entrambe le linee di produzione, anodiche e catodiche, sono necessari 6 catodi e 6 anodi. Considerando che la macchina ha una velocità di lavoro pari a 30 tagli/min, il tempo impiegato per una unità di prodotto è di 0,2 min/unità. Questo fa sì che siano necessarie 67 macchine per ogni linea di produzione. La singola macchina occupa uno spazio di layout pari a 4,84 m² e, quindi, l'intera operazione richiede per ogni linea un'area totale di 322,67 m². In figura 3.10 è descritto quanto esposto.

DIE CUTTING CATODO		
Velocità di lavoro	30	tagli/min
#catodi per cella	6	
TEMPO MACCHINA CATODO	0,2	min/unità
#MACCHINE DIE CUTTING CAT.	67	
Lunghezza Cutter	2200	mm
Larghezza Cutter	2200	mm
Area Macchina	4,84	m²
Area tot DIE CUTTING CATODO	322,67	m²
DIE CUTTING ANODO		
Velocità di lavoro	30	tagli/min
#anodi per cella	6	
TEMPO MACCHINA ANODO	0,2	min/unità
#MACCHINE DIE CUTTING ANODO	67	
Lunghezza Cutter	2200	mm
Larghezza Cutter	2200	mm
Area Macchina	4,84	m²
Area tot DIE CUTTING ANODO	322,67	m²

Figura 3.10 - Electrode Shaping & Notching catodico e anodico

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 1 operatore per ogni 10 macchine. Precisamente 7 dipendenti per la parte catodica e 7 dipendenti per la parte anodica (Nelson *et al.*, 2012). Considerando giornate lavorative di 24 ore, i lavoratori totali necessari sono 42.

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, respiratore con filtro antipolvere, scarpe di sicurezza, guanti in nitrile o simili e tuta protettiva con annessa protezione del capo (Carlo Novarese - FAAM).

3.5.2. Stacking

Prima di avviare la macchina, gli elettrodi catodici vengono disposti tutti da una parte e quelli anodici dalla parte opposta. I robot meccanici installati nella macchina trasportano uno ad uno gli elettrodi necessari per comporre la cella finale. Quando un catodo viene posto sul nastro di separatore, un anodo viene messo accanto in modo tale che, dopo aver inserito i 12 elettrodi necessari a raggiungere la capacità della cella finale, viene applicato lo Z-

folding, cioè il ripiegamento del nastro che fa avere l'impilamento degli elettrodi mantenendo i collettori di corrente positivi tutti da una parte e quelli negativi dall'altra.

STACKING & Z-FOLDING		
Velocità di lavoro	1,2	s/pezzo
#Elettrodi per cella	12	
TEMPO MACCHINA	0,24	min/unità
#MACCHINE STACKING	80	
Lunghezza Macchina	2000	mm
Larghezza Macchina	1800	mm
Area Macchina	3,6	m²
Area tot STACKING	288,00	m²

Figura 3.11 - Stacking della cella finale

Per ogni posizionamento dell'elettrodo la macchina impiega 1,2 secondi. Quindi, per produrre un'intera cella di 12 elettrodi sono necessari 0,24 min/unità, e dunque, con un takt time di 0,003 min/unità, sono necessarie 80 macchine per l'intera operazione. Ogni macchinario necessita di un'area di 3,6 m² (lunghezza 2000 mm e larghezza 1800 mm), per uno spazio totale di 288 m².

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 1 operatore per ogni 10 macchine, quindi, 8 dipendenti in totale (Nelson *et al.*, 2012). Considerando giornate lavorative di 24 ore, i lavoratori totali necessari sono 24.

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, respiratore con filtro antipolvere, scarpe di sicurezza, guanti in nitrile o simili e tuta protettiva con annessa protezione del capo (Carlo Novarese - FAAM).

3.5.3. Tab Welding

Attraverso dei nastri trasportatori le pile delle celle arrivano alla macchina saldatrice dei collettori di corrente. Con degli ultrasuoni la saldatrice unisce i 6 collettori di corrente catodici e altrettanti collettori anodici. La velocità di lavoro della macchina è pari a 5 celle/min, impiegando 0,2 min/unità per ogni unità di prodotto. In questo modo sono necessarie 67 saldatrici con un'area totale di 264 m², con ognuna una lunghezza di 2200 mm e una larghezza di 1800 mm (figura 3.12).

TAB WELDING		
Velocità di lavoro	5	celle/min
TEMPO MACCHINA	0,2	min/unità
#MACCHINE TAB WELDING	67	
Lunghezza Tab Welder	2200	mm
Larghezza Tab Welder	1800	mm
Area Macchina	3,96	m²
Area tot TAB WELDING	264,00	m²

Figura 3.12 - Tab Welding della cella finale

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 1 operatore per ogni 10 macchine, quindi, 7 dipendenti in totale (Nelson *et al.*, 2012). Considerando giornate lavorative di 24 ore, i lavoratori totali necessari sono 21.

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, respiratore con filtro antipolvere, scarpe di sicurezza, guanti in nitrile o simili e tuta protettiva con annessa protezione del capo (Carlo Novarese - FAAM).

3.5.4. Case Insertion & Case Closure

Il materiale utilizzato per la coffee bag è alluminio che avendo uno spessore predefinito di 100 µm fa sì che la custodia venga acquistata già come parte finita e non quindi prodotta in linea durante il processo produttivo. Ogni cella è racchiusa in questi contenitori, che vengono poi sigillati solo su tre lati, in quanto il quarto lato verrà utilizzato per iniettare l'elettrolita.

CASE INSERTION & CLOSURE		
Velocità di lavoro	5	celle/min
TEMPO MACCHINA	0,2	min/unità
#MACCHINE SEALING	67	
Lunghezza Macchina	4500	mm
Larghezza Macchina	2700	mm
Area Macchina	12,15	m²
Area tot SEALING	810,00	m²

Figura 3.13 - Case Insertion & Case Closure della cella finale

Dalla figura 3.13 si può notare che la velocità di lavoro della macchina è pari a 5 celle/min, impiegando 0,2 min/unità per ogni unità di prodotto. Sono necessarie, quindi, 67 macchine sigillatrici. Ogni macchinario ha una lunghezza di 4500 mm e una larghezza di 2700 mm, occupando un'area di 12,15 m². Lo spazio finale richiesto per l'intera operazione è di 810 m².

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 1 operatore per ogni 10 macchine, quindi, 7 dipendenti in totale (Nelson *et al.*, 2012). Considerando giornate lavorative di 24 ore, i lavoratori totali necessari sono 21.

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, respiratore con filtro antipolvere, scarpe di sicurezza, guanti in nitrile o simili e tuta protettiva con annessa protezione del capo (Carlo Novarese - FAAM).

3.6. Cell Finishing

La fase di cell finishing comprende le fasi dall'inserimento dell'elettrolita alla formazione e testing finale della cella. Ogni attività di lavoro ha diverse capacità e velocità di produzione e, di conseguenza, un numero differente di macchine utilizzate.

Le celle di batterie ormai fabbricate e prodotte possono essere movimentate mediante nastri trasportatori, robot e carrelli elevatori automatizzati. Nonostante però l'utilizzo di nastri trasportatori e robot automatizzati sarà indispensabile la presenza di risorse umane, in quanto alcune attività di questa fase prevedono il riposo in magazzino per diverse ore o il collegamento ai tester per la formazione.

3.6.1. Electrolyte Filling

L'inserimento dell'elettrolita nelle celle finite viene adoperato dalle macchine attraverso degli ugelli preposti. Per l'inserimento delle celle nelle varie posizioni della macchina è necessaria la figura di un lavoratore. Una volta azionata, la macchina inocula l'elettrolita da una parte, mentre dall'altra sigilla definitivamente la custodia della cella.

Ogni macchinario riesce a lavorare contemporaneamente 32 celle in un minuto e, di conseguenza, il tempo impiegato per produrre una unità di prodotto è di 0,03125 min/unità. Per produrre le 480 mila celle giornaliere sono necessarie 11 macchine che lavorano in parallelo. Le dimensioni di ogni macchina sono 2500 mm di lunghezza e 1700 mm di larghezza. Lo spazio necessario totale per l'intera operazione è di 46,75 m² (figura 3.14).

ELECTROLYTE FILLING		
Velocità di lavoro	32	unità/min
TEMPO MACCHINA	0,03125	min/unità
#MACCHINE FILLING	10,4	11
Lunghezza Macchina	2500	mm
Larghezza Macchina	1700	mm
Area Macchina	4,25	m²
Area tot ELECTROLYTE FILLING	46,75	m²

Figura 3.14 - Electrolyte Filling della cella finale

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 1 operatore per ogni macchina, quindi, 11 dipendenti in totale (Nelson *et al.*, 2012). Considerando giornate lavorative di 24 ore, i lavoratori totali necessari sono 33. Diversamente da quanto richiesto per le prime due fasi del processo produttivo, per questa operazione operatori devono utilizzare, come attrezzatura di sicurezza, occhiali in vetro, scarpe di sicurezza e guanti antitaglio (Carlo Novarese - FAAM).

3.6.2. Rest

Le celle quando vengono riempite con l'elettrolita iniziano automaticamente ad attivarsi essendo composte da materiali attivi. Questo determina che prima del loro ufficiale testing, vengano fatte riposare in un magazzino per minimo 24 ore, affinché l'elettrolita possa insediarsi nel modo giusto in tutti i pori del separatore e degli elettrodi anodici e catodici, in modo tale che possa essere quanto più conduttivo possibile.

Per dimensionare lo spazio richiesto per effettuare questa operazione, bisogna partire dall'area che occupa una singola cella. Con le dimensioni citate nei paragrafi precedenti, la cella occupa uno spazio di 0,07 m². Quando si dimensiona un magazzino e le varie scaffalature e raparti di cui è composto bisogna indicare le dimensioni del posto pallet, o

meglio lo spazio disponibile tra un piano e un altro di una scaffalatura dove riporre un pallet, e le dimensioni dell'unità di carico dove verranno messe le celle per il riposo. Ogni unità di carico ha un'area di 0,96 m², e per ognuna di esse, quindi, è possibile mettere massimo 13 celle non sovrapposte tra loro. Così facendo, per depositare in magazzino l'intera produzione giornaliera di 480 mila celle, si rendono necessarie 36924 unità di carico. Come mostrato in figura 3.15, ogni scaffalatura avrà in altezza 12 livelli di stoccaggio e 20 pallet lungo tutta la linea di scaffalature. Con queste premesse, dunque, le linee di scaffalature richieste sono pari a 13. Considerando scaffalature bifronte, si rendono utili 6,5 corridoi, di larghezza ciascuno di 2500 mm, portando ad avere, infine, la larghezza del magazzino di 33150 mm e la lunghezza pari a 22500 mm. Il magazzino finale occuperà un'area totale di 745,88 m² e, considerando le altezze delle unità di carico, dei posti pallet e il numero di livelli di stoccaggio per ogni scaffalatura, l'altezza minima del magazzino dovrà essere di 7400 mm (Cagliano Anna Corinna, 2020c).

REST		
Larghezza cella	200	mm
Lunghezza cella	350	mm
Area occupata da una cella	0,07	m²
Larghezza unità di carico	800	mm
Lunghezza unità di carico	1200	mm
Altezza unità di carico	600	mm
Area unità di carico	0,96	m²
Larghezza posto pallet	1000	mm
Lunghezza posto pallet	1300	mm
Altezza posto pallet	800	mm
Area posto pallet	1,3	m²
#celle per unità di carico	13,7	13
#unità di carico necessarie	36923,1	36924
Livelli di stoccaggio	12	
#Scaffalature	3077	
#pallet lungo una scaffalatura	20	
#linee di scaffalature	12,82	13
#corridoi	6,5	
Larghezza corridoio	2500	mm
Larghezza magazzino	33150	mm
Lunghezza magazzino	22500	mm
Altezza minima magazzino	7400	mm
Area tot MAGAZZINO	745,88	m²

Figura 3.15 - Rest Warehouse per la cella finale

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 4 dipendenti (Nelson *et al.*, 2012). Considerando giornate lavorative di 24 ore, i lavoratori totali necessari sono 12.

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, scarpe di sicurezza e guanti antitaglio (Carlo Novarese - FAAM).

3.6.3. Formation Cycling

Le celle di batteria, dopo la loro prima attivazione automatica, devono essere attivate definitivamente. Il processo di attivazione avviene attraverso cicli di carica e di scarica. Per raggiungere un buono e giusto obiettivo, le celle devono subire 3 cicli di carica e di scarica. Questa è l'operazione che richiede tra tutte le attività lo spazio maggiore, in quanto questo procedimento è molto dispendioso in termini di tempo.

FORMATION CYCLING		
Tempo di testing	960	min
Celle per tester	1000	celle/tester
TEMPO MACCHINA	0,96	min/unità
#MACCHINE TESTING	320	
Area Macchina	62,86	m ²
Area tot FORMATION CYCLING	20115,20	m²

Figura 3.16 - Testing finale delle celle di batteria

La figura 3.16 riporta quanto è ritenuto utile e necessario per adempiere a ciò che richiede portare a termine l'attività di formation cycling. Ogni cella di batteria deve essere attivata per due turni da 8 ore consecutivi, precisamente per 960 min. Ogni macchina ha una capacità di lavoro, in termini di numero di celle, pari a 1000 celle/tester, quindi, il tempo macchina impiegato per un'unità di lavoro è pari a 0,96 min/unità, che porta a domandare 320 macchine in totale. Ogni tester necessita di un'area pari a 62,86 m², occupando uno spazio totale di più di 20000 m².

Anche per quanto concerne il numero di lavoratori utili per il testing, questa operazione è quella tra tutto il ciclo di produzione a richiederne un numero maggiore, in quanto sono 80 dipendenti sono necessari per ogni turno lavorativo (Nelson *et al.*, 2012).

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, scarpe di sicurezza e guanti antitaglio (Carlo Novarese - FAAM).

3.6.4. Electrolyte Re-Filling

Questa operazione è identica a quella precedente riguardo all'inserimento dell'elettrolita nelle celle e si rende necessaria principalmente a introdurre ulteriore elettrolita, in quanto dopo la formazione attraverso il testing, i materiali attivi che iniziano a condurre elettricità potrebbero creare all'interno della cella delle bolle di gas con dispersione di elettrolita, facendo venire meno il funzionamento finale della batteria.

Come per l'operazione precedente, anche per questa sono previste 11 macchine di lavorazione, con 46,75 m² di spazio occupabile, e 33 lavoratori in totale per l'intera giornata lavorativa (figura 3.17).

ELECTROLYTE RE-FILLING		
Velocità di lavoro	32	unità/min
TEMPO MACCHINA	0,03125	min/unità
#MACCHINE FILLING	10,4	11
Lunghezza Macchina	2500	mm
Larghezza Macchina	1700	mm
Area Macchina	4,25	m²
Area tot ELECTROLYTE RE-FILLING	46,75	m²

Figura 3.17 - Electrolyte Re-Filling della cella finale

3.6.5. Aging

Prima di essere completamente pronte per la vendita finale le celle di batteria devono essere testate per valutare il loro corretto funzionamento in termini elettrochimici. Nonostante il tempo impiegato per questa operazione sia maggiore rispetto a quello dedicato per la fase di formazione, lo spazio necessario richiesto è nettamente minore, come si può notare nella figura 3.18.

AGING		
Tempo di testing	20160	min
Celle per tester	1000	celle/tester.
TEMPO MACCHINA	20,16	min/unità
#MACCHINE TESTING	6720	
Area Macchina	1,2	m ²
Area tot AGING	8064,00	m²

Figura 3.18 - Aging per la cella finale

Ogni cella di batteria deve essere testata per 14 giorni consecutivi, precisamente per 20160 min. Ogni tester riesce a monitorare contemporaneamente 1000 celle, quindi, il tempo macchina impiegato per una unità di lavoro è pari a 20,16 min/unità, che porta a domandare 6720 macchine in totale. Ogni tester necessita di un'area pari a 1,2 m², occupando uno spazio totale di più di 8064 m².

Per effettuare i lavori di questa operazione sono necessari per ogni turno da otto ore 3 dipendenti (Nelson *et al.*, 2012). Considerando giornate lavorative di 24 ore, i lavoratori totali necessari sono 24.

Per questa operazione si richiede agli operatori di utilizzare un'attrezzatura di sicurezza: occhiali in vetro, scarpe di sicurezza e guanti antitaglio (Carlo Novarese - FAAM).

3.7. Risultati

L'impianto industriale è composto da molte sezioni, come magazzini, attrezzature, trasportatori, percorsi, spazio di monitoraggio e reparti di ricezione e spedizioni dei prodotti finiti. Per raggiungere la capacità finale prevista, nel caso di questo studio 35 GWh, è necessaria la presenza di diverse macchine, robot di assistenza e trasportatori nella maggior parte delle attività del ciclo produttivo. Chiaramente, più attrezzature richiedono un maggiore spazio. Molte delle linee di trasporto sono normali nastri trasportatori, ma occasionalmente il materiale di produzione viene trasferito anche attraverso dei lunghi tubi. Questo avviene ad esempio quando il materiale è liquido o sottoforma di impasto, come la slurry nella fase di electrode mixing. Il trasferimento di materiali e merci viene attuato in

molti casi con l'aiuto di robot di assistenza. Questi robot prelevano i prodotti sul nastro trasportatore lungo il quale avviene il trasferimento al punto successivo.

Lo spazio occupato da ogni singola attività è riportato in tabella 3.1. Come si può notare le attività che richiedono uno spazio enorme sono Formation Cycling e Aging, in quanto sono molto dispendiose a livello di tempo (960 min e 20.160 min rispettivamente) dovendo ospitare una quantità di celle maggiore rispetto alla produzione giornaliera prevista di 480.000 celle.

Attività	Lunghezza (m)	Larghezza(m)	Area totale (m²)
Mixing Catodo	3,20	24,00	76,80
Mixing Anodo	3,20	16,00	51,20
Coating&Drying Catodo	76,00	9,60	729,60
Coating&Drying Anodo	76,00	9,60	729,60
Solvent Recovery System Catodo	6,30	9,60	60,48
Calendering Catodo	5,00	18,00	90,00
Calendering Anodo	5,00	18,00	90,00
Slitting Catodo	2,65	5,70	15,11
Slitting Anodo	2,65	5,70	15,11
Vacuum Drying Catodo	5,40	6,28	33,91
Vacuum Drying Anodo	5,40	6,28	33,91
Die Cutting Catodo	17,60	19,80	348,48
Die Cutting Anodo	17,60	19,80	348,48
Stacking & Z-Folding	16,00	18,00	288,00
Tab Welding	17,60	16,20	285,12
Case Insertion & Case Closure	36,00	24,30	874,80
Elecetrolyte Filling	2,50	18,70	46,75
Rest	22,50	33,15	745,88
Formation Cycling	112,10	179,52	20124,19
Electrolyte Re-Filling	2,50	18,70	46,75
Aging	54,25	147,84	8020,32
AREA TOTALE			33054,48

Tabella 3.1 - Spazi totali necessari

Lo spazio totale necessario per le attività dal Mixing al Rest è 4.863,22 m², considerando esclusivamente l'area occupata dalle macchine utilizzate. Riguardo, invece, le attività dal Formation Cycling all'Aging richiedono uno spazio totale pari a più di 28.000 m², sempre considerando esclusivamente lo spazio necessario alle macchine di queste operazioni. In questo modo l'impianto industriale necessita al minimo di 33.000 m².

Per avere un'idea complessiva del layout dello stabilimento bisogna tenere conto dell'assemblaggio dei vari macchinari e dei robot e stazioni di lavoro vicine per i lavori di manutenzione. Notando la complessità del ciclo produttivo e delle diverse fasi di lavoro e di tecniche utilizzate si è valutato che il layout per prodotto (production line) è quello che si presta in modo migliore alle richieste per questa produzione. Nelle figure 3.19 e 3.20 vengono riportati le due parti di layout citate precedentemente. La scelta di dividere il layout finale dell'impianto è stata fatta esclusivamente per una mera facilità visiva delle varie operazioni.

Come si può notare nella figura 3.19, le operazioni sono state inserite tutte in linea, una successiva all'altra, e lo spazio circostante ad ognuna di esse è riservato, come già accennato, ai sistemi di movimentazione, di supporto e monitoraggio e di manutenzione, che devono essere installati. In questo modo, dunque, lo spazio necessario è di quasi 16.500 m², che richiedono circa 239 m di lunghezza e 68 m di larghezza.

Nella figura 3.20 sono riportate le ultime tre operazioni, due delle quali richiedono lo spazio più grande di tutto il ciclo di produzione. Anche in questo caso, l'area richiesta è di circa 34500 m², con 180 m di lunghezza e 190 m di larghezza.

In ultimo, la figura 3.21 riporta il plant layout di tutto l'impianto industriale, al solo fine di dare l'immagine complessiva, con un'area occupata di quasi 51.000 m².

Come già detto, il layout presentato tratta esclusivamente quanto è richiesto per il ciclo produttivo. Nel capitolo successivo verranno trattati i magazzini di stoccaggio dei materiali e di spedizione dei prodotti finiti, unitamente ai servizi generali come uffici, mensa e parcheggi.

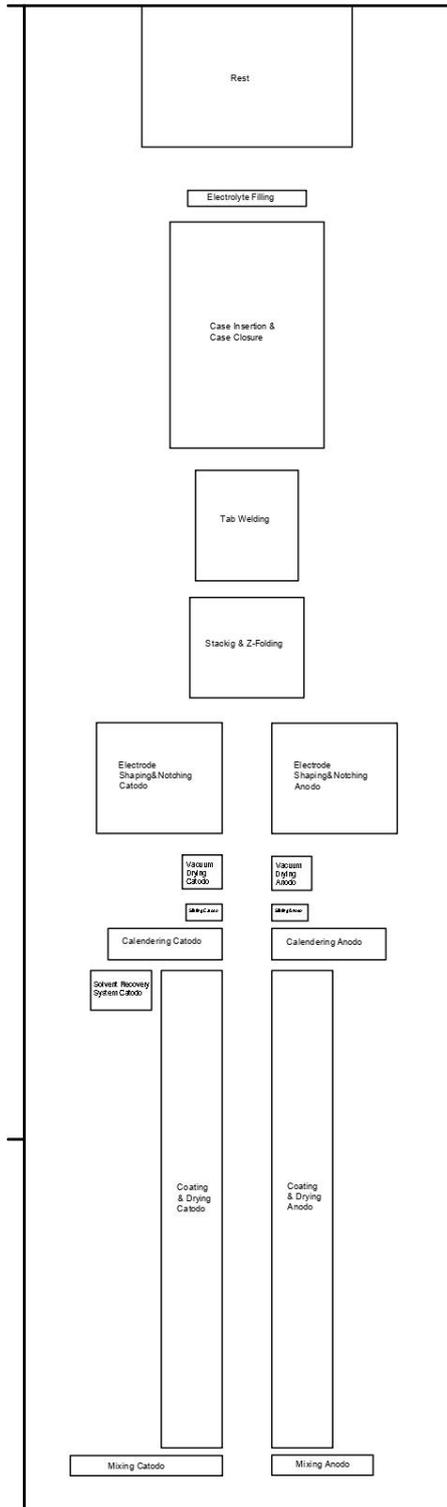


Figura 3.19 - Layout finale dell'impianto da Electrode Mixing a Rest

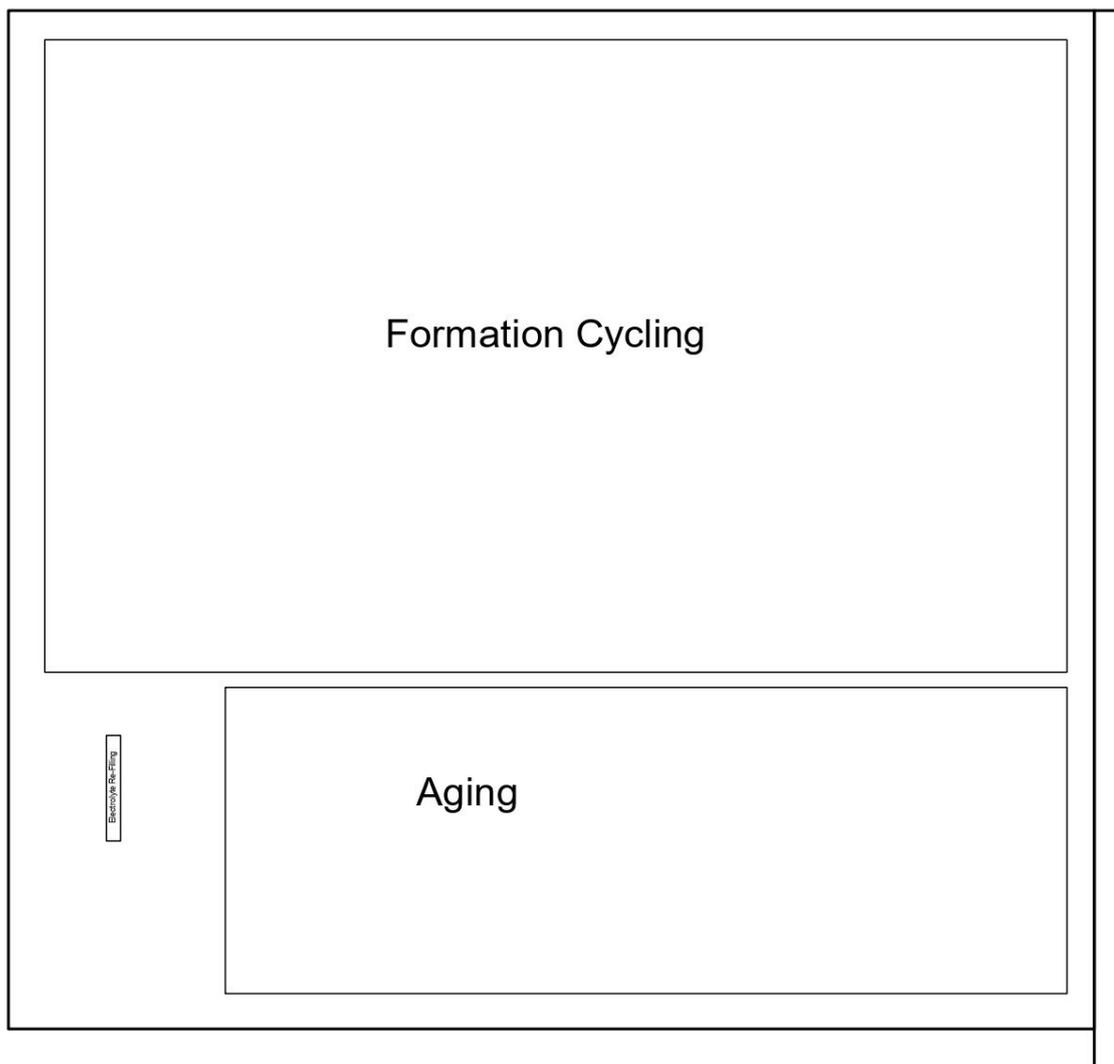


Figura 3.20 - Layout finale impianto da Formation Cycling a Aging

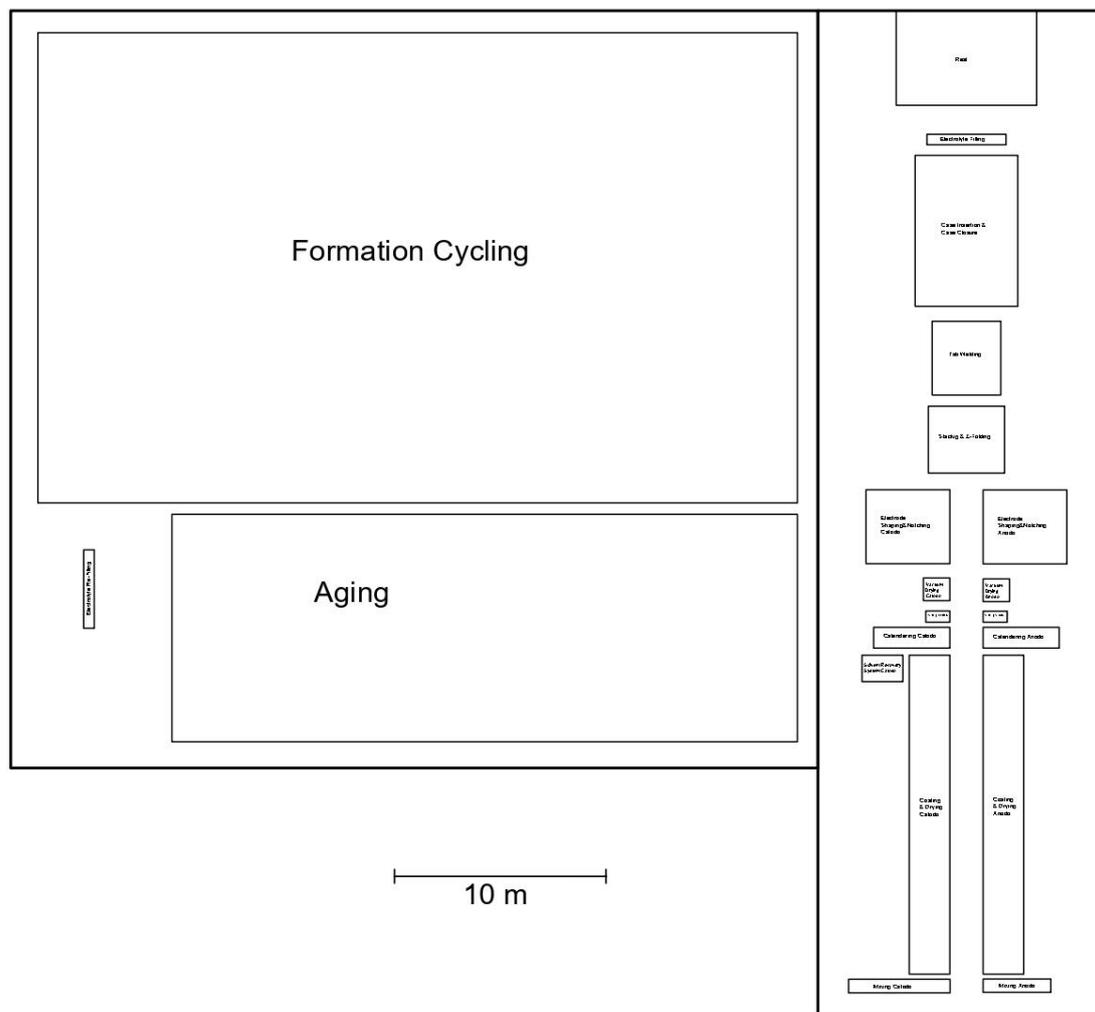


Figura 3.21 - Layout finale dell'impianto industriale

3.8. Automazione e Manutenzione

Questo studio non si concentra direttamente sul sistema di automazione. Tuttavia, è chiaro che l'automazione è parte integrante dello stabilimento e la pianificazione deve essere fatta correttamente. Di seguito vengono presentati i pensieri sull'automazione e i suoi concetti subordinati.

La fabbrica, anche se automatizzata, ha bisogno di lavoratori per supportare e rispondere alle operazioni di monitoraggio e manutenzione, che devono essere formati al fine di intervenire tempestivamente quando si presentano dei guasti alle attrezzature e altri problemi. La sala di monitoraggio può essere situata in posizione centrale in modo che in caso di errori, è possibile intervenire rapidamente. Il sistema Jidoka riporta in dettaglio eventuali errori in modo che siano facili da individuare e correggere dagli esseri umani. È

di fondamentale importanza disporre di un sistema di identificazione degli errori ben funzionante, poiché l'interruzione della produzione in una fase comporta una diminuzione del volume totale di produzione. Nonostante i lavoratori esperti, è importante sapere che la manutenzione proattiva è buona per avere un alto livello. Ad esempio, i sensori possono monitorare la temperatura delle macchine o il consumo di energia (Shrouf, Ordieres and Miragliotta, 2014).

Un altro aspetto da considerare è l'importanza delle operazioni. Ci sono fasi di lavorazione con poche macchine, come il recupero dei solventi, e alcune delle fasi di lavoro con decine di macchine. È, quindi, importante sapere quale fase deve essere monitorata in modo più critico. Un sistema Jidoka ben pianificato può calcolare il modo più sensato per fare riparazioni e, cosa più importante, è possibile prevedere la necessità di manutenzione (Ma, Wang and Zhao, 2017).

I tempi di manutenzione dei robot e delle macchine variano sempre a seconda della situazione e del produttore del robot. Alcuni dei robot hanno bisogno di manutenzione ogni 3850 ore o 12 mesi. Significa due manutenzioni all'anno in produzione continua. Tuttavia, per esempio, KUKA Robotics raccomanda 10 000 ore di tempo di manutenzione per i loro robot (RobotWorx). Invece, ABB esorta a controllare i loro robot una volta all'anno. Per alcune parti è sufficiente controllarli ogni tre anni, ma molti richiedono un controllo annuale (ABB Robotics, 2013).

Capitolo 4

Magazzini e Servizi di Stabilimento

Nell'impianto industriale, oltre all'area occupata per il ciclo di produzione, si necessita di ulteriore spazio per la fabbricazione e produzione delle celle di batteria. Sebbene il focus principale di questo studio sia il dimensionamento dell'area interessata esclusivamente al ciclo di produzione, è comunque doverosa una trattazione di questi spazi supplementari. Si tratterà dunque dei magazzini delle materie prime e dei prodotti finiti, dei servizi generali di stabilimento e di altri servizi, come la sala di monitoraggio e quella di manutenzione.

4.1. Magazzino Materie Prime e Prodotti Finiti

In questo lavoro le materie prime considerate sono quelle inerenti alla composizione della slurry anodica e catodica. Nello specifico sono considerate materie prime il materiale attivo (NMC e Grafite), il Carbone, il binder (PVDF e CMC) e il solvente (NMP e Acqua).

In Tabella 4.1 sono riportate le quantità di materiali necessarie per la produzione di una cella, il consumo giornaliero per produrre le 480.000 celle e il consumo annuo per raggiungere la capacità dell'impianto di 20 GWh (Meyer *et al.*, 2017) (Liu *et al.*, 2014).

	Massa per 1 cella (g)	Massa giornaliera (T)	Massa annuale (T)
NMC per Catodo	250	120	35975
Carbone per Catodo	17	8	2425
PVDF per Catodo	14	7	2021
NMP per Catodo	158	76	22737
Grafite per Anodo	109	52	15659
Carbone per Anodo	0	0	0
CMC per Anodo	6	3	824
Acqua per Anodo	98	47	14041

Tabella 4.1 - Quantità di materiali necessari per una cella, per un giorno di produzione e per un anno

4.1.1. Electrode Slurry

Nella slurry dell'elettrodo anodico, la grafite è il materiale attivo, mentre le altre componenti le danno le caratteristiche utili per condurre elettricità. La figura seguente mostra la concentrazioni dei materiali che costituiscono la slurry anodica (Liu *et al.*, 2014).

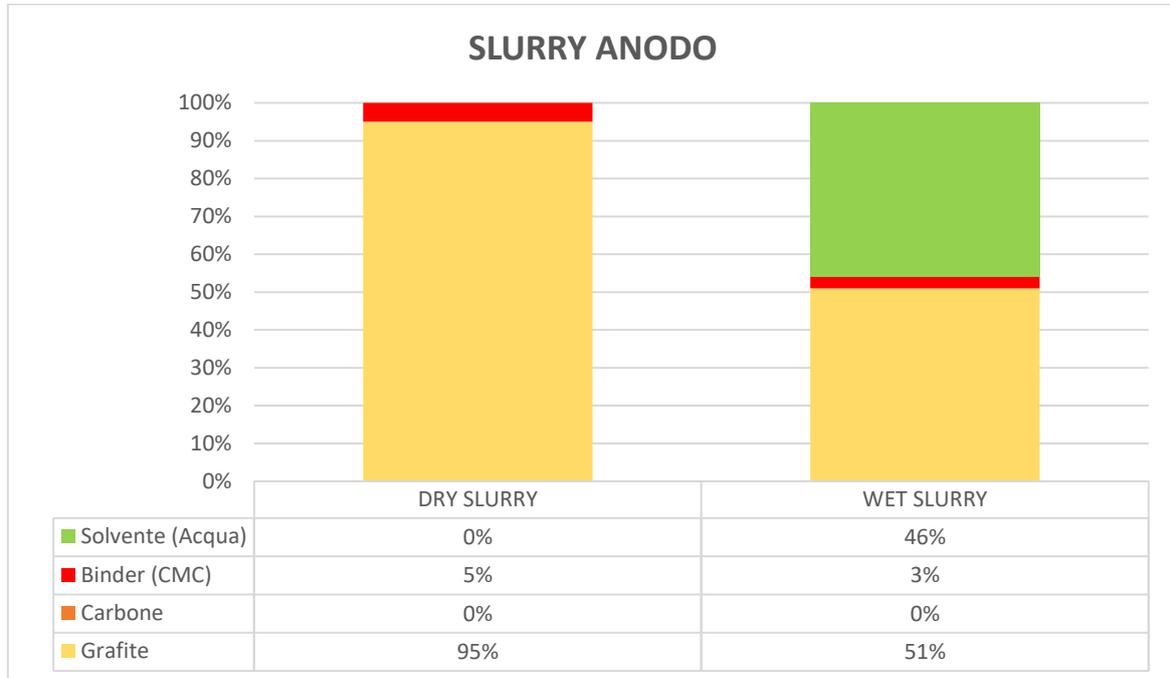


Figura 4.1 - Concentrazioni dei materiali nella slurry anodica (Liu *et al.*, 2014).

Come si può notare in figura 4.1, le percentuali di concentrazione di ogni singolo materiale cambiano a seconda che si tratti della slurry asciutta (in assenza di solvente) o della slurry bagnata. Nella slurry bagnata la concentrazione dei materiali solidi è pari al 54% che corrisponde nella slurry asciutta al 95% di grafite e al 5% di binder. Considerando questi valori percentuali e le rispettive densità, si ottengono le masse necessarie, riportate nella Tabella 4.1, per produrre la slurry per una singola cella.

Dal lato della slurry catodica, come già ribadito, il materiale attivo preso in studio per questo progetto di tesi è NMC. A differenza della slurry anodica, per il catodo vengono utilizzati come solvente NMP, Carbone e PVDF come binder e leganti. Nella figura 3.2 sono riportate le rispettive percentuali di concentrazione nella slurry (Liu *et al.*, 2014).

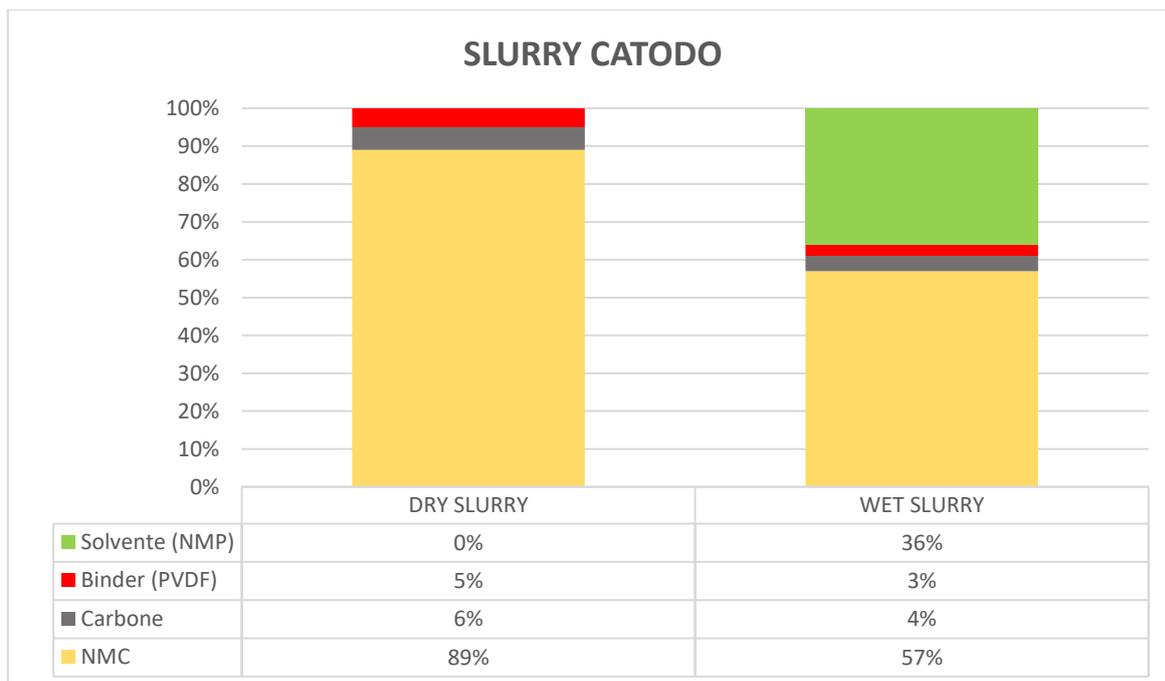


Figura 4.2 - Concentrazioni dei materiali nella slurry catodica (Liu et al., 2014).

In questo caso, la slurry bagnata è composta dal 36% di solvente e dal 64% di materiale solido, di cui corrisponde nella slurry asciutta l'89% di NMC, il 5% di binder e il 6% di Carbone. Considerando sempre le rispettive densità è possibile raggiungere la quantità, in massa, di tutti i componenti, come mostrato nella Tabella 4.1.

4.1.2. Dimensionamento Magazzini

L'obiettivo da raggiungere è quello di non avere presenti in magazzino scorte di materiali eccessive, altrimenti si perderebbe il significato primario di Just In Time. Ognuno di loro ha bisogno di un proprio contenitore da cui il materiale viene trasferito al fusto di miscelazione lungo il tubo. Ciò significa che, ad eccezione del magazzino in linea per il riposo delle celle dopo l'inoculazione dell'elettrolita, non ci sono scorte intermedie durante il ciclo produttivo. Lo stoccaggio delle materie prime può essere collocato in una o più parti, ma per questa tipologia di produzione è conveniente ubicare il magazzino adiacente alla zona di inizio del ciclo di produzione, ovvero Electrode Mixing.

Considerato che i materiali interessati al processo produttivo sono materiali attivi e quindi anche se fermi in magazzino nei loro contenitori potrebbero dare avvio a reazioni chimiche tanto da compromettere l'efficacia del prodotto finale, e, inoltre, essendo pericolosi in

quanto molto tossici, si è scelto di dimensionare il magazzino delle materie prime affinché la quantità da stoccare contemporaneamente sia quella necessaria per la produzione di due giornate lavorative. Tale scelta si è ritenuta utile valutando anche l'ubicazione dei principali fornitori dei materiali richiesti e di conseguenza, quindi, anche i tempi e i costi di trasporto. Questo approccio segue quello previsto dal JIT, *Just In Time*, ovvero una metodologia di approvvigionamento della filosofia della Lean Production. Principalmente consiste nell'organizzazione del processo produttivo che prevede il rifornimento del materiale di trasformazione esattamente nel momento in cui viene richiesto, allo scopo di ridurre i costi legati all'accumulo di scorte. Nella figura 4.3 sono riportati, considerando le densità e la quantità dei materiali della Tabella 4.1, i volumi di ogni componente necessari a soddisfare la domanda di due giornate, che, quindi, devono essere immagazzinati. Si noti che i colori verde e giallo sono inerenti rispettivamente alle componenti catodiche e anodiche.

MAGAZZINO MATERIE PRIME & PRODOTTI FINITI		
Volume di NMC richiesto	51,6	m ³
Volume di Carbone richiesto	8,9	m ³
Volume di PVDF richiesto	7,6	m ³
Volume di NMP richiesto	147,2	m ³
Volume di Grafite richiesto	46,6	m ³
Volume di Carbone richiesto	0,0	m ³
Volume di CMC richiesto	2,7	m ³
Volume di Acqua richiesto	93,6	m ³

Figura 4.3 - Volumi dei materiali richiesti per due giornate lavorative

Quando si dimensiona un magazzino bisogna tenere conto delle Norme Tecniche per le Costruzioni, che contengono le regole di riferimento per la progettazione e realizzazione di strutture nuove e per l'adeguamento di quelle esistenti. L'ultima revisione delle NTC, emanata con DM del 17 febbraio 2018 e pubblicate in Gazzetta Ufficiale il 20 febbraio 2018, individua, nella tabella 3.1.II, i nuovi valori dei sovraccarichi per le diverse categorie d'uso delle costruzioni. Per aree di immagazzinamento ad uso commerciale e ad uso industriale, Cat. E1, il sovraccarico massimo consentito è relativo a 6,00 kN/m² (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2018). Avendo un'area posto pallet pari a 1,3 m² (larghezza di 1.000 mm e lunghezza pari a 1.300 mm), il sovraccarico massimo di ogni scaffalatura su quest'area è pari a 795,1 kg, che dovrà essere distribuito tra i ripiani della scaffalatura che nel nostro caso sono pari a 6. Per calcolare il numero di scaffalature necessarie ad immagazzinare la quantità di ogni materia prima, si è calcolato in primis il

volume massimo da immagazzinare sotto il vincolo dettato dalle NTC, e, infine, con i valori di riferimento dell'immagine 4.3, il numero di scaffalature per ogni componente. La figura 4.4 riporta quanto appena descritto in termini di volume e numero di scaffalature necessarie per ogni materiale (Cagliano Anna Corinna, 2020c).

MAGAZZINO MATERIE PRIME & PRODOTTI FINITI		
Massa max per posto pallet	795,1	kg
Volume max NMC per scaffalatura	0,17	m ³
Volume max Carbone per scaffalatura	0,44	m ³
Volume max PVDF pwe scaffalatura	0,45	m ³
Volume max NMP per scaffalatura	0,77	m ³
Volume max Grafite per scaffalatura	0,35	m ³
Volume max Carbone per scaffalatura	0,00	m ³
Volume max CMC per scaffalatura	0,40	m ³
Volume max Acqua per scaffalatura	0,80	m ³
#Scaffalature per NMC	302	
#Scaffalature per Carbone	20	
#Scaffalature per PVDF	17	
#Scaffalature per NMP	191	
#Scaffalature per Grafite	131	
#Scaffalature per Carbone	0	
#Scaffalature per CMC	7	
#Scaffalature per Acqua	118	

Figura 4.4 - Volume e numero scaffalature necessarie per ogni materia prima

Un altro aspetto da tenere in considerazione per la progettazione e costruzione del magazzino è il tipo di scaffalature da installare: scaffalature industriali diverse rispondono quindi a esigenze logistiche diverse che le aziende possono avere. Le principali tipologie di scaffalature oggi esistenti sono “Magazzino a gravità”, “Scaffalature Drive-In con carrello/satellite”, “Magazzini compattabili” e quelli tradizionali (Ferretto Group, 2017).

I **magazzini a gravità** operano secondo una logica FIFO (First In First Out) con entrate e uscite da due lati distinti della struttura. La movimentazione avviene per gravità, attraverso dei rulli, e così i pallet risultano sempre allineati al fronte di prelievo: questo permette un concreto incremento della produttività. Si suddividono in gravità pesante, per stoccaggi ad alta densità per prodotti omogenei ad alta rotazione; o leggera per unità di carico non particolarmente pesanti, di piccole - medie dimensioni, quali scatole, contenitori in plastica o metallo, permettendo un'attività di picking molto veloce.

Le **scaffalature drive-in** funzionano con logica LIFO (Last In First Out), ma attraverso un sistema di drive-through anche con logica FIFO. Il sistema Drive-In è ideale per la realizzazione di stoccaggi ad alta densità per materiale omogeneo con bassa rotazione e un

elevato numero di pallet per referenza. I prodotti vengono stoccati in maniera omogenea per ogni colonna di corsie all'interno delle quali il pallet è collocato.

I magazzini compattabili sono indicati per realizzare elevatissime densità di stoccaggio di materiali a frequenza di rotazione medio-bassa. La caratteristica principale di questa soluzione è il sistema mobile costituito da carrelli compattabili movimentati elettricamente. A parità di superficie garantiscono una capacità doppia rispetto a una soluzione tradizionale. Valore aggiunto di questo sistema è la possibilità di essere riconfigurato e trasferito con grande facilità.

In riferimento alla figura 4.4, il numero totale di scaffalature per tutto il magazzino è pari a 785. Posizionando 40 posti pallet lungo scaffalatura, il numero totale di linee di scaffalature sarà pari a 20, e, di conseguenza, 10 corridoi, avendo previsto scaffalature bifronte di tipologia tradizionale. Nella figura 4.5 vengono mostrate le dimensioni totali dell'intero magazzino: con una larghezza di ogni corridoio pari a 2500 mm, il magazzino necessita di 51 m di larghezza e 42,5 m di lunghezza, che corrispondono ad un'area totale da occupare pari a 2167,5 m². Considerando 6 ripiani per ogni scaffalatura, l'altezza massima richiesta sarà pari a 7,6 m e, dunque, il magazzino necessita di un'altezza minima di 8 m.

MAGAZZINO MATERIE PRIME & PRODOTTI FINITI		
TOT. SCAFFALATURE NECESSARIE	785	
#pallet lungo una scaffalatura	40	
#linee di scaffalature	19,64	20
#corridoi	9,8	10
Larghezza corridoio	2500	mm
Larghezza Magazzino	51000	mm
Lunghezza Magazzino	42500	mm
AREA TOT. MAGAZZINO	2167,5	m²

Figura 4.5 - Dimensioni totali del magazzino

Quando le celle di batteria superano il test nella fase di Aging, devono essere, infine, trasferite in un magazzino dove vengono poi pallettizzate e spedite per la vendita finale ai clienti. Per quanto concerne il magazzino dei prodotti finiti si è deciso di dimensionarne uno della stessa tipologia di quello delle materie prime, in quanto la vendita potrebbe avvenire anche dopo i due giorni e quindi il numero di celle da stoccare in attesa della vendita è maggiore rispetto a quelle prodotte in due giornate lavorative.

4.2. Servizi generali di stabilimento

Per la definizione dei servizi generali di stabilimento è di fondamentale importanza essere a conoscenza del numero totale di dipendenti presenti contemporaneamente nell'impianto industriale. Nella tabella 4.2 sono riportati il numero dei dipendenti presenti contemporaneamente in un turno lavorativo di 8 ore e il numero di lavoratori necessari per un'intera giornata lavorativa. Per il calcolo del numero dei dipendenti necessari per ogni attività del processo di produzione si è tenuto presente quanto espresso nello studio di Argonne National Laboratory (Nelson *et al.*, 2012).

Attività	N° Dipendenti/turno	N° Dipendenti/gg
Magazzino Materie Prime	8	24
Mixing Catodo	10	30
Mixing Anodo	6	18
Coating&Drying Catodo	9	27
Coating&Drying Anodo	9	27
Solvent Recovery System Catodo	2	6
Calendering Catodo	4	12
Calendering Anodo	4	12
Slitting Catodo	1	3
Slitting Anodo	1	3
Vacuum Drying Catodo	4	12
Vacuum Drying Anodo	4	12
Die Cutting Catodo	7	21
Die Cutting Anodo	7	21
Stacking & Z-Folding	8	24
Tab Welding	7	21
Case Insertion & Case Closure	7	21
Electrolyte Filling	11	33
Rest	4	12
Formation Cycling	80	240
Electrolyte Re-Filling	11	33
Aging	8	24
Magazzino Vendite	7	21
TOT. DIPENDENTI	219	657

Tabella 4.2 - Dipendenti totali necessari per il ciclo produttivo

4.2.1. Parcheggio

Quando si va a dimensionare un parcheggio per uno stabilimento industriale, che comprende contemporaneamente un numero consistente di dipendenti, non bisogna considerare un posto auto per ogni lavoratore, ma almeno il 40-60% del totale, in quanto si prevede che per ogni macchina ci siano più di un dipendente. Il fattore utilizzato per questo studio è pari a 0,5, quindi, il numero di parcheggi auto sarà pari a 110. Come mostrato in figura 4.6, si è

deciso di distribuire i posti auto totali su 4 file, di cui due centrali bifronte. Ogni posto ha una dimensione di 12,5 m² e di conseguenza l'area minima occupata dai posti auto è pari a 1375 m².

PARCHEGGI		
#parcheggi auto	109,5	110
Lunghezza posto auto	5000	mm
Larghezza posto auto	2500	mm
Area posto auto	12,5	m²
Area parcheggio auto	1375	m²
#parcheggi auto disabili	2	
Lunghezza posto auto disabili	5000	mm
Larghezza posto auto disabili	3200	mm
Area posto auto disabili	16	m²
Area parcheggio disabili	32	m²
Linee di parcheggio	4	
Larghezza strada bidirezionale	5500	mm
Larghezza strada all'entrata	5200	mm
Lunghezza totale parcheggio	75700	mm
Larghezza totale parcheggio	31000	mm
AREA TOT. PARCHEGGIO	2346,7	m²

Figura 4.6 - Parcheggi auto per l'impianto industriale (Cagliano Anna Corinna, 2020b).

La normativa prevede che per ogni 50 posti auto sia necessario un parcheggio per persone disabili. Nel nostro caso, saranno previsti 2 parcheggi disabili con lunghezza di 5000 mm e larghezza di 3200 mm. Le strade interne, considerandole bidirezionali, devono avere una larghezza minima di 5500 mm, mentre per la strada all'entrata del parcheggio si è deciso una larghezza pari a 5200 mm. Tutto ciò fa in modo che l'area totale dei parcheggi sarà di 2346,7 m². La forma consigliata, soprattutto per diminuire gli spazi occupati, è quella “a pettine”, della quale viene dato un esempio in figura 4.7 (Cagliano Anna Corinna, 2020b).

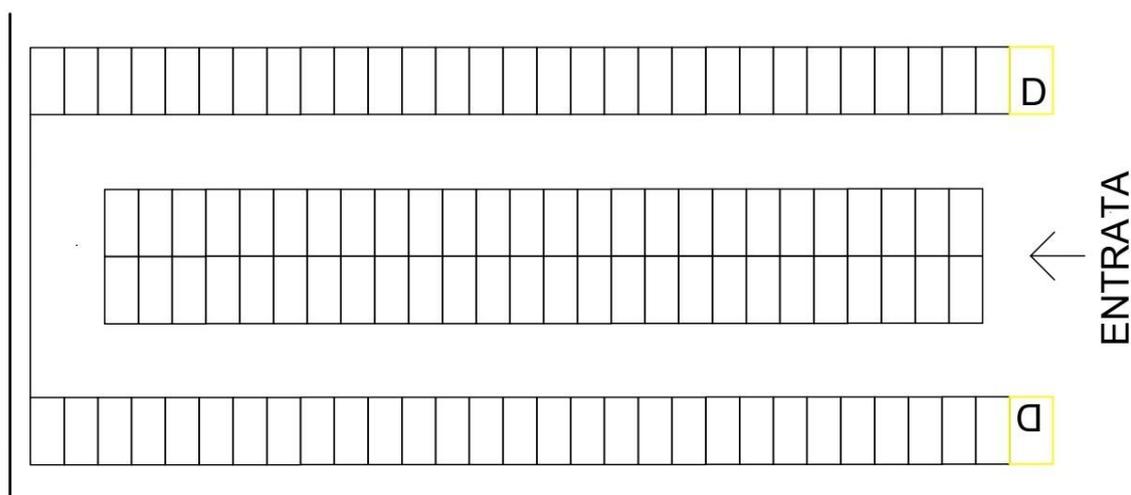


Figura 4.7 - Area dedicata al parcheggio dello stabilimento.

4.2.2. Mensa, Infermeria e Servizi Igienico-Sanitari

Per quanto concerne gli ultimi servizi utili questi, come quelli appena descritti e dimensionati, vanno calcolati in base al numero di dipendenti presenti nello stesso momento nella fabbrica (Cagliano Anna Corinna, 2020b).

Di solito la mensa o area ristoro di un impianto industriale non prevede una cucina dove i pasti vengono preparati e cucinati, ma è un locale costituito da una sala di consumazione pasti e una linea di distribuzione del cibo che arriva direttamente tramite il servizio di catering. Per questo motivo, l'area che necessita questo servizio è pari a $1,5 \text{ m}^2$ per ogni lavoratore: nel nostro caso, con 219 dipendenti, lo spazio occupato sarà minimo di $328,5 \text{ m}^2$.

Anche l'infermeria si prevede $0,1 \text{ m}^2$ per ogni dipendente, ma le normative impongono che il locale adibito per questo servizio deve essere di 50 m^2 minimo. Per questo impianto industriale viene richiesta un'infermeria di circa 22 m^2 , quindi il locale sarà minimo di 50 m^2 .

Un discorso diverso avviene per i servizi igienico-sanitari. Non c'è un fattore unico per tutto lo spazio interessato per questo servizio, ma ogni sezione di questo ha un determinato fattore. Nello specifico, per gli spogliatoi sono previsti $0,75 \text{ m}^2$ per dipendente, per i lavabi

0,1 m² per dipendente e, infine, per le docce 0,15 m² per dipendente. In totale l'area occupata sarà di 219 m².

Tutto quando appena descritto lo si può notare in dettaglio nella figura 4.8 (Cagliano Anna Corinna, 2020b).

MENSA		
Area totale mensa	328,5	m²
INFERMERIA		
Area infermeria	21,9	m ²
Area minimo di legge	50	m ²
AREA TOT. INFERMERIA	50	m²
SERVIZIO IGIENICO - SANITARI		
Spogliatoio	164,25	m ²
Lavabi	21,9	m ²
Docce	32,85	m ²
AREA TOT. SERVIZI IGENICI	219	m²

Figura 4.8 - Servizi generali di stabilimento (mensa, infermeria e servizi igienico-sanitari) (Cagliano Anna Corinna, 2020b).

4.2.3. Sala di monitoraggio e Sala di Manutenzione

Una possibile ubicazione per la sala di manutenzione è tra la fase di produzione degli elettrodi e la fase di assemblaggio della cella, perché in questo modo si minimizzerebbero gli spostamenti nel caso ci fosse un guasto che richiede una manutenzione immediata.

Gli strumenti di manutenzione sono posti di base vicino alle macchine e l'accesso a questi non deve essere ostacolato. Nella maggior parte dei casi questi strumenti non hanno bisogno di molto spazio e quindi è possibile installarli accanto ai macchinari.

I magazzini, avendo un'altezza minima di 8 m ed essendo le sezioni più alte tra tutte le attività del ciclo di produzione, dettano l'altezza dell'intero impianto industriale. Per questo motivo, la sala di monitoraggio e tutti gli uffici tecnico-amministrativi possono essere collocati al secondo piano, senza che venga aumentata la planimetria totale dello stabilimento.

Capitolo 5

Conclusioni e Ricerche Future

In questo capitolo si puntualizzeranno i risultati ottenuti, con i relativi benefici e i limiti riscontrati in tale progetto di tesi. Infine, si offrirà uno spunto per eventuali miglioramenti e sviluppi futuri.

5.1. Benefici della tesi

Lo studio condotto è stato previsto per essere valido e affidabile. La coerenza dei dati trattati rispecchia la ricerca scientifica, noto è infatti che i risultati ottenuti sono simili ad altri studi effettuati da altri ricercatori (Dani, 2006; Jan and Ho, 2006; Meyer et al., 2017; Ming Want et al., 2020; Reinhart et al., 2013). Dati i molti diversi metodi per la produzione delle celle di batterie agli ioni di litio e la mancanza di informazioni disponibili sulle apparecchiature, le informazioni utili e necessarie sono state tratte da molte fonti separate. La maggior parte delle macchine trovate sono destinate principalmente alla produzione di volumi più piccoli.

Le batterie al litio sono le batterie più comuni per l'alimentazione delle auto elettriche. Si tratta di batterie piuttosto compatte e leggere, in grado di generare notevoli quantità di energia elettrica e che non necessitano di cicli di carica e di utilizzo completi. Per questo, come abbiamo visto, sono centrali alla strategia di elettrificazione di una casa automobilistica e persino di un Paese. Concentrare tutte le fasi di produzione, a partire dalle materie prime, in un unico impianto, una gigafactory, riduce notevolmente i costi di produzione. Inoltre, permette a quel produttore, o a quel Paese, di poter soddisfare la domanda di batterie agli ioni di litio. Questo comporta, inoltre, la possibilità di ridurre il costo del prodotto finale e quindi di favorire la diffusione dei veicoli elettrici: il 2020 è stato un anno particolarmente positivo per la mobilità elettrica in Italia. A fine 2020, infatti, le vendite di auto elettriche pure e di ibride plug-in sono aumentate del 147% rispetto al 2019, passando da 575.000 unità a 1,42 milioni di unità. Le auto elettriche e ibride hanno quindi rappresentato il 12% dei veicoli immatricolati.

È importante ribadire che la procedura presentata e il tipo di prodotto delle celle LIB sono solo un'opzione tra tante. Nella vita reale, ci sono diversi modi per organizzare la produzione e le scelte nella selezione dei materiali, nella sequenza di lavoro e nella selezione delle attrezzature possono essere diverse. Lo spazio dimensionato rispetto a quello dell'ubicazione dell'impianto industriale è solo una minima parte (33.000 m² rispetto ai 600.000 della zona individuata) e questo permetterebbe alcune necessarie modifiche del ciclo di produzione o di aumento della capacità produttiva annuale.

I regolamenti sul trattamento dei rifiuti, la legge sulla protezione e la sicurezza sul lavoro sono tutti trattati in una raccolta legislativa. La conformità con loro è richiesta nel posizionamento di attrezzature, percorsi e operazioni. Allo stesso modo, i problemi di sicurezza possono essere suddivisi in base alla sicurezza dei locali, alla qualità delle materie prime e delle celle finite e alla sicurezza delle operazioni. Prendersi cura di ciò assicura una minore possibilità di disastro, ma con una maggiore fiducia da parte di clienti e partner vari. La sicurezza può anche essere promossa facendo scelte nella selezione delle materie prime e nella progettazione della fase di lavoro.

Nel processo di produzione LIB sono utilizzati molti metalli pesanti e materie plastiche. La loro corretta gestione non solo salva l'ambiente, ma migliora anche la sicurezza. Inoltre, alcuni materiali come il cobalto e il litio sono preziosi e rari. Pertanto, è consigliabile riciclarli con attenzione. Quando si selezionano i materiali è possibile scegliere quelli che sono più facili da maneggiare. Una delle scelte fatte sono i materiali per liquami catodici: la cella LNMC ha una durata maggiore (1000-2000 cicli di carica e scarica) ed è più resistente al calore (210 °C).

Oltre alla sicurezza del prodotto finale, è importante garantire la sicurezza delle fasi di lavoro. Molte operazioni causano molto calore, che deve essere monitorato e maneggiato con cura, poiché molti degli ingredienti da considerare sono sensibili ad esso. In un lavoro male eseguito, la temperatura della cella o della macchina aumenta causando incendi e, in caso di cella della batteria sigillata, è possibile anche l'esplosione. Ecco perché ci devono essere sistemi di raffreddamento sia nelle celle che nelle macchine usate.

5.2. Limitazioni riscontrate

Ci sono state diverse sfide anche in questo progetto. Una delle sfide principali è la mancanza di informazioni sul settore. Le informazioni trovate sono spesso contraddittorie. I motivi di queste differenze sono vari. In primo luogo, le celle possono avere caratteristiche differenti: alcune aziende potrebbero produrre veicoli con batterie di circa 1 kg di peso e invece altre case automobilistiche userebbero batterie di circa 100 grammi.

Un altro motivo riguarda il significato stesso del termine “produzione di celle per batterie”. Alcune fabbriche producono celle con un processo produttivo che va dalla miscelazione alla batteria completa dell'auto, ma in alcune fabbriche parte delle operazioni viene esternalizzata e sono prodotte solo le celle senza sistema di gestione della batteria (BMS). La terza differenza è il volume di produzione, in quanto la produzione di una fabbrica di grandi volumi può essere resa più efficiente.

Altre sfide nella produzione riguardano le temperature operative, la produzione di elettricità e la qualità e la durata delle celle della batteria. La qualità delle celle della batteria deve essere elevata per garantire la domanda e, in caso di difetti, il riutilizzo e il riciclaggio dei materiali devono essere pianificati bene. Una delle cose più grandi che causa incertezza è lo sviluppo tecnologico futuro perché definisce l'azione dei concorrenti. È molto importante utilizzare la migliore tecnologia disponibile perché altrimenti la fabbrica non sarà in grado di eguagliare il livello dei prezzi e la domanda prevalente nel settore LIB. Tuttavia, sebbene la fabbrica utilizzi la tecnologia più recente, i requisiti per le celle della batteria prodotte possono cambiare in futuro e, se è come descritto sopra, potrebbe essere necessario modificare il processo di produzione.

Nella nuova fabbrica, la produzione inizia di solito su piccola scala. Anche nella fabbrica automatizzata, ci sarà molto apprendimento prima che la fabbrica funzioni a piena capacità. È difficile sviluppare azioni in un campo in rapida evoluzione come la produzione di celle LIB. L'apprendimento rapido è necessario per raggiungere il successo.

Nonostante l'attenta ricerca di informazioni affidabili, ci sono ancora incertezze in alcune fasi di lavoro. Uno di questi è l'asciugatura degli elettrodi. Di solito viene implementata almeno due volte durante il processo produttivo. La prima asciugatura viene eseguita durante la produzione dell'elettrodo, dopo essere stato fatto il rivestimento con la slurry ma prima dell'avvolgimento. L'essiccazione degli elettrodi è stata studiata per decenni e al

giorno d'oggi, molti ricercatori e produttori di apparecchiature mostrano che l'essiccazione richiede decine di secondi, altri invece fino a 1,5 giorni di tempo di asciugatura. La differenza tra la necessità di spazio per queste due opzioni è enorme per quanto il numero di cellule prodotte in 36 ore è di 720.000 ($480.000 \text{ celle/gg} * 1,5 \text{ gg}$). Un'altra essiccazione viene effettuata dopo il riempimento elettrolitico. Molti articoli hanno suggerito un tempo di asciugatura di 24 o 48 ore, ma altri ancora consigliano di asciugare solo poche ore in uno spazio sottovuoto. Se da un lato le opzioni più durature si rivelano migliori, dall'altro aumenta il tempo del ciclo di produzione. Inoltre, lo spazio fisico necessario per asciugare le celle crescerà molto e ciò causerà maggiori investimenti.

La seconda fase che richiede ulteriori ricerche è la miscelazione degli elettroliti. Il liquame elettrolitico contiene 2-4 carbonati diversi la cui quantità dipende dal contenuto dei fanghi dell'elettrodo. Questo è il motivo per cui il tempo di miscelazione può cambiare a causa di ulteriori esami.

La costruzione della fabbrica e i costi di acquisto non sono studiati in questa ricerca. Un'entità così grande richiederebbe molte ricerche e gare d'appalto per ottenere una stima affidabile del prezzo totale del progetto. Invece, i costi di produzione possono essere valutati dall'acquisto di materiale e dal consumo di elettricità. Tradizionalmente, le celle cilindriche hanno avuto costi di produzione inferiori rispetto ad altri tipi di cellule. Questo perché le celle cilindriche sono normalmente prodotte con volumi elevati e almeno una parte delle operazioni sono automatizzate.

5.3. Sviluppi Futuri

Ulteriori ricerche relative alle celle LIB possono essere suddivise in base alle proprietà delle celle e all'efficienza del processo di produzione. I più grandi soggetti di ricerca sulle proprietà delle celle di batteria stanno sviluppando celle più sicure, migliorando il tempo di vita e aumentando la densità di energia. La tendenza sembra essere che le celle più potenti sono create da nuovi materiali o da celle con dimensioni più grandi rispetto a quelle utilizzate nel mercato attuale. Ad esempio, la tensione della cella è tutt'oggi in fase di analisi e studio e nel prossimo futuro sarà possibile realizzare una tensione di 4,6 V invece di una tensione attuale di 4,2 V (Blomgren, 2017).

L'efficienza dei processi può essere aumentata migliorando l'efficienza energetica e la capacità di lavoro delle apparecchiature utilizzate: aumentare la capacità con meno macchinari. Tutte le decisioni prese in fase di dimensionamento del layout sono provate a giustificare le limitazioni di un impianto industriale; infatti, ci sono ancora alcuni pochi aspetti che potrebbero essere organizzati in modo diverso. Uno di questi è la dimensione del lotto durante la produzione. Un lotto di piccole dimensioni (ad esempio di 2500 pezzi) da una parte comporta un Takt Time inferiore, ma dall'altra parte, richiede più configurazione a causa della creazione di un numero maggiore di lotti.

Un altro degli obiettivi di sviluppo più importanti è anche il riciclaggio delle celle non conformi e a fine vita. Il riciclaggio delle celle LIB consiste in processi sia fisici che chimici e ci sono diversi modi per implementarlo. La figura seguente 5.1 presenta il modo sensato di separare i materiali l'uno dall'altro. Prima di tutto, il case della cella deve essere aperto. Successivamente l'elettrodo può essere riciclato mediante operazioni meccaniche e chimiche. Tutto sommato, il processo di riciclaggio può consistere in 30 passaggi. Questi sono, ad esempio, diversi processi di estrazione con solvente, processi di dissoluzione, processi di lisciviazione e trattamenti termici (Xu *et al.*, 2008).

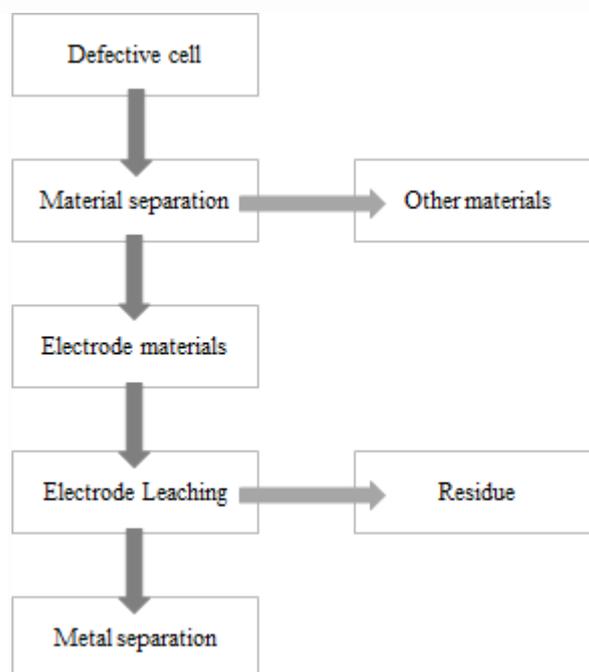


Figura 5.2 - Riciclaggio della cella di batteria agli ioni di litio (Xu *et al.*, 2008)

Una gigafactory in qualsiasi momento, dopo essere stata completamente costruita e portata a pieno regime con il processo produttivo, può essere ampliata in termini di capacità

prodotta annualmente. Questo significa chiaramente aumentare lo spazio necessario per tutta la produzione, come ad esempio già annunciato per la gigafactory che verrà costruita in Italia (da 45 GWh iniziale si arriverà a 70 GWh annuali di produzione). Lo studio condotto in questa elaborato di tesi riguarda un impianto industriale per 20 GWh, quindi nel caso di aumento di capacità di produzione, oltre al maggior numero di macchinari e quantità di materiali, è necessario aumentare lo spazio necessario, reso disponibile dal luogo proposto per l'ubicazione dell'impianto pari a 600.000 m², a fronte dei 33.000 m² richiesti per il dimensionamento calcolato nello studio.

Infine, l'ultimo aspetto sviluppabile in futuro riguarda l'automazione. Elon Musk, CEO di Tesla, definì la gigafactory come “una macchina che costruisce un'altra macchina”. In effetti, le gigafactory sono stabilimenti caratterizzati da un alto grado di automazione, tanto che in alcuni stabilimenti la linea produttiva è automatizzata al 90%. In questo tipo di impianti, avviene tutto il processo di produzione delle batterie agli ioni di litio, partendo dalle materie prime; processo che richiede un'estrema precisione nella lavorazione, garantita in questo periodo da macchinari in modo automatico.

Bibliografia

- Blomgren, G. E. (2017) 'The Development and Future of Lithium Ion Batteries', *Journal of The Electrochemical Society*, 164(1), pp. A5019–A5025. doi: 10.1149/2.0251701jes.
- Cagliano Anna Corinna (2020a) *Impianti Industriali - Definizioni e Informazioni iniziali. Slide del corso. Politecnico di Torino, a.a. 2020-2021.*
- Cagliano Anna Corinna (2020b) *Impianti Industriali - Fabbricati Industriali e Servizi di Stabilimento. Slide del corso. Politecnico di Torino, a.a. 2020-2021.*
- Cagliano Anna Corinna (2020c) *Impianti Industriali - Magazzini Industriali: Sistemi di Stoccaggio Tradizionali 2. Slidel del corso. Politecnico di Torino, a.a. 2020-2021.*
- Cagliano Anna Corinna (2020d) *Impianti Industriali - Scelta dell'Ubicazione di un Impianto Industriale. Slide del corso. Politecnico di Torino, a.a. 2020-2021.*
- Cagliano Anna Corinna (2020e) *Impianti Industriali - Studio del Plant Layout. Slide del corso. Politecnico di Torino, a.a. 2020-2021.*
- Carlo Novarese - FAAM (no date) *A Li-ion cell production overview.*
- Dani, S. (2006) 'The Goal — A Process of Ongoing Improvement — 20th Anniversary Edition , 3rd revd edn by Eliyahu M. Goldratt with David Whitford, North River, Great Barrington, MA, 2004, pp. 384, pbk (ISBN 0-88427-178-1).', *International Journal of Production Research*, 44(2), pp. 419–420. doi: 10.1080/00207540500225756.
- Deng, D. *et al.* (2009) 'Green energy storage materials: Nanostructured TiO₂ and Sn-based anodes for lithium-ion batteries', *Energy & Environmental Science*, 2(8), p. 818. doi: 10.1039/b823474d.
- DURR Megtec (2020a) *New potentials in lithium-ion electrode manufacturing.*
- Ellis, B. L., Lee, K. T. and Nazar, L. F. (2010) 'Positive Electrode Materials for Li-Ion and Li-Batteries', *Chemistry of Materials*, 22(3), pp. 691–714. doi: 10.1021/cm902696j.
- Haverila, M. Uusi-Rauva, E., Kouri, I. & M. A. (2009) *Teollisuustalous*. 6th editio.

Tampere, Suomi: Hämeen Kirjapaino Oy.

- Heiskanen, S. K., Kim, J. and Lucht, B. L. (2019) 'Generation and Evolution of the Solid Electrolyte Interphase of Lithium-Ion Batteries', *Joule*, 3(10), pp. 2322–2333. doi: 10.1016/j.joule.2019.08.018.
- Jan, S.-H. and Ho, S. P. (2006) 'Construction Project Buffer Management in Scheduling Planning and Control', in. doi: 10.22260/ISARC2006/0158.
- Julien, C. *et al.* (2014) 'Comparative Issues of Cathode Materials for Li-Ion Batteries', *Inorganics*, 2(1), pp. 132–154. doi: 10.3390/inorganics2010132.
- Kaskhedikar, N. A. and Maier, J. (2009) 'Lithium Storage in Carbon Nanostructures', *Advanced Materials*, 21(25–26), pp. 2664–2680. doi: 10.1002/adma.200901079.
- Lamberti, A. *et al.* (2015) 'As-grown vertically aligned amorphous TiO₂ nanotube arrays as high-rate Li-based micro-battery anodes with improved long-term performance', *Electrochimica Acta*, 151, pp. 222–229. doi: 10.1016/j.electacta.2014.10.150.
- Lasi, H. *et al.* (2014) 'Industry 4.0', *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), pp. 239–242. doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- Liu, D. *et al.* (2014) 'An Effective Mixing for Lithium Ion Battery Slurries', *Advances in Chemical Engineering and Science*, 04(04), pp. 515–528. doi: 10.4236/aces.2014.44053.
- Ma, J., Wang, Q. and Zhao, Z. (2017) 'SLAE–CPS: Smart Lean Automation Engine Enabled by Cyber-Physical Systems Technologies', *Sensors*, 17(7), p. 1500. doi: 10.3390/s17071500.
- Meutzner, F. and de Vivanco, M. U. (2014) 'Electrolytes - Technology review', in, pp. 185–195. doi: 10.1063/1.4878487.
- Meyer, C. *et al.* (2017) 'Characterization of the calendaring process for compaction of electrodes for lithium-ion batteries', *Journal of Materials Processing Technology*, 249, pp. 172–178. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.031.
- Ming Wang, Dingying Dang, Andrew Meyer, Renata Arsenault, Yang-Tse Cheng (2020) 'Effects of the Mixing Sequence on Making Lithium Ion Battery Electrodes', *Journal of The Electrochemical Society*, 167(10). doi: 10.1149/1945-7111/ab95c6.

- Nelson, P. A. *et al.* (2012) *Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles - SECOND EDITION*. Argonne, IL (United States). doi: 10.2172/1209682.
- Ohzuku, T., Ueda, A. and Yamamoto, N. (1995) ‘Zero-Strain Insertion Material of Li [$\text{Li}_1 / 3\text{Ti}_5 / 3$] O_4 for Rechargeable Lithium Cells’, *Journal of The Electrochemical Society*, 142(5), pp. 1431–1435. doi: 10.1149/1.2048592.
- Patoux, S. *et al.* (2009) ‘High voltage spinel oxides for Li-ion batteries: From the material research to the application’, *Journal of Power Sources*, 189(1), pp. 344–352. doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.08.043.
- Pinson, M. B. and Bazant, M. Z. (2013) ‘Theory of SEI Formation in Rechargeable Batteries: Capacity Fade, Accelerated Aging and Lifetime Prediction’, *Journal of The Electrochemical Society*, 160(2), pp. A243–A250. doi: 10.1149/2.044302jes.
- Qiu, L. *et al.* (2014) ‘Novel polymer Li-ion binder carboxymethyl cellulose derivative enhanced electrochemical performance for Li-ion batteries’, *Carbohydrate Polymers*, 112, pp. 532–538. doi: 10.1016/j.carbpol.2014.06.034.
- Quartarone, E. and Mustarelli, P. (2011) ‘Electrolytes for solid-state lithium rechargeable batteries: recent advances and perspectives’, *Chemical Society Reviews*, 40(5), p. 2525. doi: 10.1039/c0cs00081g.
- Reinhart, G. *et al.* (2013) ‘Research and Demonstration Center for the Production of Large-Area Lithium-Ion Cells’, in *Future Trends in Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 3–12. doi: 10.1007/978-3-642-24491-9_1.
- Scrosati, B. and Garche, J. (2010) ‘Lithium batteries: Status, prospects and future’, *Journal of Power Sources*, 195(9), pp. 2419–2430. doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.048.
- Shrouf, F., Ordieres, J. and Miragliotta, G. (2014) ‘Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm’, in *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. IEEE, pp. 697–701. doi: 10.1109/IEEM.2014.7058728.
- Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A. & Tanchoco, J. M. A. (2005) *Facilities Plannig*.

- 4th editio. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- Wang, D. *et al.* (2009) ‘Self-Assembled TiO₂–Graphene Hybrid Nanostructures for Enhanced Li-Ion Insertion’, *ACS Nano*, 3(4), pp. 907–914. doi: 10.1021/nn900150y.
- Winter, M. *et al.* (1998) ‘Insertion Electrode Materials for Rechargeable Lithium Batteries’, *Advanced Materials*, 10(10), pp. 725–763. doi: 10.1002/(SICI)1521-4095(199807)10:10<725::AID-ADMA725>3.0.CO;2-Z.
- Wood, D. L., Li, J. and Daniel, C. (2015) ‘Prospects for reducing the processing cost of lithium ion batteries’, *Journal of Power Sources*, 275, pp. 234–242. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.11.019.
- Xia, Y., Zhou, Y. and Yoshio, M. (1997) ‘Capacity Fading on Cycling of 4 V Li / LiMn₂O₄ Cells’, *Journal of The Electrochemical Society*, 144(8), pp. 2593–2600. doi: 10.1149/1.1837870.
- Xu, J. *et al.* (2008) ‘A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries’, *Journal of Power Sources*, 177(2), pp. 512–527. doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.11.074.
- Yuan, C. *et al.* (2017) ‘Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles’, *CIRP Annals*, 66(1), pp. 53–56. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.109.
- Zhang, S. S. (2007) ‘A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries’, *Journal of Power Sources*, 164(1), pp. 351–364. doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.10.065.
- Zocchi Massimiliano (2020) *Ecco cosa sono le batterie cell-to-pack e perché sono così importanti per Tesla e gli altri.*
- Zolin, L. (2017) *Large-scale Production of Paper-based Li-ion Cells*, *Journal of Power Sources*. Cham: Springer International Publishing (PoliTO Springer Series). doi: 10.1007/978-3-319-39016-1.

Sitografia

- ABB Robotics (2013) *Maintenance Kit for Industrial Robots*. Available at:
<https://library.e.abb.com/public/c261447662ff41aa8f6edebdf6bf7c7f9AKK105713A7263-Maintenance-kit-datasheet-revB.pdf>.
- Automazione Plus (2001) *Cobat: il processo di riciclaggio delle batterie al piombo esauste*. Available at: https://automazione-plus.it/cobat-il-processo-di-riciclaggio-delle-batterie-al-piombo-esauste_3481/.
- Babcock & Wilcox (2018) *Babcock & Wilcox (2018). Solvent Recovery Adsorption and Distillation Systems*. Available at:
<http://www.babcock.com/media/documents/resources/megtec-auxiliary-bulletins/solvent-recovery-adsorptionand-distillation-systems-english-e301-2023-low-res.ashx>.
- C. Arbizzani, L. Damen, F. De Giorgio, S. Monaco e M. Mastragostino (2011) *ENEA - Materiali catodici per batterie litio-ione e loro caratterizzazione in celle da laboratorio*. Available at:
https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/tecnologie-elettriche/rds298.pdf.
- DURR Megtec (2020b) *Solvent Recovery Adsorption and Distillation Systems Proven solutions for EPA emissions control requirements*. Available at: https://www.durr-megtec.com/fileadmin/megtec.com/01_Products/01_Exhaust_Gas_and_Air_Pollution_Control/Sorptive_Processes/Files/duerr-megtec-solvent-recovery-brochure-en.pdf.
- Electropedia (2018) *Battery and Energy Technologies – Lithium Battery Manufacturing*. Available at: http://www.mpoweruk.com/battery_manufacturing.htm.
- ENEA (2019) *Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile. Le batterie al Litio*. Available at:
<http://www.uttei.enea.it/veicoli-a-basso-impatto-ambientale/file-veicoli-basso-impatto-ambientale/le-batterie-al-litio>.
- Energyskeptic (2015) *Electric Vehicle overview*. Available at:
<https://energyskeptic.com/2015/electric-vehicle-overview/>.
- Flash Battery (2020) *CELLE AL LITIO: DIFFERENZE, UTILIZZI E COME SCEGLIERE*

- LE MIGLIORI*. Available at: <https://www.flashbattery.tech/celle-litio-batterie-industriali/>.
- Gelon LIB Group (no date a) *Auto Slitting Machine GN-S060A-50*. Available at: <https://www.libgroup.net/product/72.html>.
- Gelon LIB Group (no date b) *Automatic Stacking Machine*. Available at: <https://libgroup.net/product/236.html>.
- IEA (2019a) *Distribuzione di auto elettriche in paesi selezionati, 2013-2018*, IEA, Parigi. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-deployment-in-selected-countries-2013-2018>.
- IEA (2019b) *Global EV Outlook 2019*. Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/7d7e049e-ce64-4c3f-8f23-6e2f529f31a8/Global_EV_Outlook_2019.pdf.
- Ilsole24ore (2021) *Italtolt, gigafactory di lavoro nella ex Olivetti di Scarmagno*. Available at: https://www.ilsole24ore.com/art/auto-elettriche-gigafactory-italvolt-4mila-mila-posti-lavoro-nascera-area-ex-olivetti-scarmagno-ADHnqiKB?refresh_ce=1.
- Jason, D. (2017) *10 Battery Gigafactories Are Now in the Works*. Available at: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/10-battery-gigafactories-are-now-in-progress-and-musk-may-add-4-more>.
- Licoccia Silvia (2013) *Batterie - Università degli Studi di Tor Vergata*. Available at: <http://didattica.uniroma2.it/files/index/insegnamento/148670-%0AChimica-Per-Lenergia>.
- Lorenzo Fedele (2008) *Dispensa didattica del Corso di Impianti Industriali*. Roma. Available at: http://www.ingmecc.uniroma1.it/attachments/2501_Dispensa_II.pdf.
- Mauro Pasquali, Gabriele Tarquini, Francesca Scaramuzzo (2015) *ENEA - Materiali anodici per batterie litio-ione di elevata energia*. Available at: https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/accumulo/2014/rds-par2014-172.pdf.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018) *Azioni sulle costruzioni – Capitolo 3 | NTC 2018*. Available at:

https://www.gazzettaufficiale.it/do/atto/serie_generale/caricaPdf?cdimg=18A0071600100010110004&dgu=2018-02-20&art.dataPubblicazioneGazzetta=2018-02-20&art.codiceRedazionale=18A00716&art.num=1&art.tiposerie=SG.

MIT Electric Vehicle Team (2008) *A Guide to Understanding Battery Specifications*. Available at: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf.

MOTUS (2020) *Luca Benedetti e Jusef Hassoun, Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Scienze Chimiche e Farmaceutiche, Laboratorio Elettrochimica ed Accumulo Energia. La produzione delle batterie Li-ione*. Available at: <https://www.motus-e.org/tecnologia/la-produzione-delle-batterie-li-ione>.

Nabertherm (no date) *LABORATORY FURNACES*. Available at: http://www.nabertherm.es/sites/default/files/2021-06/laboratory_english.pdf.

NETZSCH (no date) *PMH/PML Planetary Mixing & Kneading Machine*. Available at: www.netzsch.com.

Northvolt (2017) *Northvolt – Anläggning för storskalig batteritillverkning*. Available at: <https://www.serneke.se/projekt/northvolt-labs/#:~:text=Northvolt Labs,innan storskalig produktion tar vid>.

Pedrini Mario (2007) *Le batterie per trazione elettrica ASVEA - Associazione per lo Sviluppo di Veicoli ad Energia Alternativa*. Available at: <https://docplayer.it/4039070-Le-batterie-per-trazione-elettrica-asvea-associazione-per-lo-sviluppo-di-veicoli-ad-energia-alternativa.html>.

PROVENTIA (no date) *Climatic EV battery pack test chamber*. Available at: https://www.proventia.com/modular_test_solutions/hybrid_electric_vehicle_battery_pack_test_laboratory?gclid=Cj0KCQjwkZiFBhD9ARIsAGxFX8Bf4IXXg21yx56u9WLMoc9U_3vKISXQByh2ZeF-j71L_U21_GUB8uoaAnX0EALw_wcB.

Ren Daniel (2017) *Johnson Controls to ramp up mainland output of batteries for ‘start-stop’ engine technology*. Available at: <https://www.scmp.com/business/companies/article/2095178/johnson-controls-ramp-mainland-output-batteries-start-stop-engine>.

RobotWorx (no date) *Preventative Maintenance for Industrial Robots, 2018*. Available at: <https://www.robots.com/articles/preventative-maintenance-for-industrial-robots>.

Samsung SDI (2020) *What is a Solid-state Battery?* Available at:

<https://www.samsungsdi.com/column/technology/detail/56462.html?listType=gallery>.

Targay (2018) *The Role of Electrolyte in Lithium-ion Batteries*. Available at:

<https://www.targray.com/li-ion-battery/electrolyte>.

Technoluxpro.com (2019) *Batteria Li NMC*. Available at:

<https://technoluxpro.com/it/akkumulatory/batarei/li-nmc.html>.

Thomas (2017) *Solvent Recovery System*. Available at:

https://www.google.fi/search?q=thomasnet+solvent+recovery+system&rlz=1C1GGRV_nFI793FI793&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiXzvGtv8baAhViMZoKHfOVBB4Q_AUICigB&biw=1680&bih=944#imgrc=Yf99wmsj15ChjM:

TMAX BATTERY EQUIPMENTS (no date a) *Battery Automatic Ultrasonic Tab*

Welding Machine And Winding Machine For Battery Production Line. Available at:

https://www.tmaxcn.com/battery-automatic-2-in-1-ultrasonic-tab-welding-machine-and-winding-machine-for-battery-production-line_p2092.html.

TMAX BATTERY EQUIPMENTS (no date b) *Large Automatic Degas and Sealing*

Machine. Available at: https://www.battery-equipments.com/large-automatic-degas-and-sealing-machine_p588.html.

TMAX BATTERY EQUIPMENTS (no date c) *Large Automatic Electrolyte Filling*

Machine with Double Station. Available at: https://www.tmaxcn.com/automatic-electrolyte-filling-machine_p1443.html.

TMAX BATTERY EQUIPMENTS (no date d) *Large Automatic Lithium Battery*

Electrode Die Cutting Machine for Pouch Cell. Available at: https://www.battery-equipments.com/large-automatic-lithium-battery-electrode-die-cutting-machine-for-pouch-cell_p568.html.

Wikipedia - L'Enciclopedia Libera (2021) *Accumulatore nichel-metallo idruro*. Available

at: https://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore_nichel-metallo_idruro.

Ringraziamenti

Non riesco ad immaginare di esprimere tutta la mia gratitudine in poche righe nei confronti di tutte le persone che ho conosciuto, frequentato e sostenuto in questi 8 e lunghissimi anni.

Come da rito, ringrazio in primis la mia relatrice, prof.ssa Cagliano, per la disponibilità concessami, per gli insegnamenti puntigliosi e i consigli utili per l'elaborato di questa tesi che mi ha permesso di conoscere e imparare un mondo che nel mio bagaglio culturale era molto superficiale. Un caloroso e sentito grazie alla mia correlatrice, prof.ssa Bodoardo, per le esortazioni e i conforti, grazie ai quali sono riuscito ad arrivare alla fine di questo traguardo. La ringrazio pubblicamente anche per la collaborazione creatasi nel Consiglio di Amministrazione di EDISU Piemonte, nel quale insieme portiamo avanti battaglie sempre e solo per la difesa del diritto allo studio universitario per gli e le studenti. Infine, ma non per importanza, ringrazio il prof. Mangano per le puntuali precisazioni e miglioramenti e il dott. Alidoost, compagno di viaggio per questa tesi, per avermi seguito step by step negli ultimi 6 mesi e per avermi fatto osservare e studiare questo magico mondo delle batterie in ogni minimo meandro.

Ringrazio tutta la mia famiglia, soprattutto il mio principino Thiago che mi ha reso lo zio più felice di tutti, che con i loro sacrifici non mi hanno mai fatto mancare nulla e mi hanno sempre sostenuto, facendomi arrivare a questo mio traguardo. Grazie per avermi insegnato a non mollare mai. A voi devo tutto.

A mia nonna, fonte infinita di saggezza e positività, che è riuscita a coccolarmi e supportarmi anche con una telefonata, e mi ha insegnato regole di sopravvivenza facendomi sentire a casa anche a tantissimi km di distanza.

Ringrazio poi gli amici, in prima battuta quelli di una vita, e i colleghi che ho avuto modo di incontrare in questi anni: grazie per aver condiviso con me le giornate più pazze della mia convivenza a Torino, tra libri, caffè, serate e tanto tanto divertimento. Senza di voi non avrei scritto la parola "fine" a questa bellissima ed entusiasmante avventura. Siete la mia seconda famiglia, sono sicuro che su di voi potrò contare sempre.

A tutto Alter.POLIS, un collettivo di persone con le quali sono cresciuto e mi hanno aiutato ad essere chi sono ora. Non ci sono parole precise per descrivere tutti questi anni. Sapete quanto siete stati per me e non smetterò mai di dire GRAZIE!

A EDISU Piemonte, Ente per il Diritto allo Studio Universitario, e tutto il suo gruppo di dipendenti. I nervosismi e i mal di testa sono sempre stati all'ordine del giorno, ma come si suol dire "l'amore (per il DSU in questo caso) non è bello se non è litigare!". Un bacio ed un abbraccio senza fine, perché veramente incommensurabile, a Sara, Fabiana e Giuseppina. Voi sapete già, non hi bisogno di dire nulla se non un G-R-A-Z-I-E indescrivibile.

Infine, ringrazio tutte le persone che non ho citato ma che ho incontrato, anche solo per un istante, in questo percorso. Sapete benissimo che non è importante quanto tempo ma come lo si trascorre per capire quanto ogni minimo rapporto sia sincero e pieno di bontà.

Naturalmente ringrazio me medesimo. Alla persona che ero, che sono e che sarò. Le parole non servono in questo momento, dico solo che "chi trova AMICO, trova un tesoro!"

Grazie dal più profondo del mio cuore