



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

**Progettazione del layout per la produzione di batterie al litio:
analisi dello stato dell'arte**

RELATRICE

Prof.ssa Anna C. Cagliano

CANDIDATO

Lo Re Davide

Matricola: 275384

Anno Accademico 2021-2022 

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	4
GLOSSARIO	6
Introduzione	7
1. Analisi della letteratura - Stato dell'arte delle batterie	11
1.1 INTRODUZIONE AI VARI TIPI DI BATTERIE	11
1.1.1 Cella al piombo acido	11
1.1.2 Cella al nichel-cadmio (NiCd)	12
1.1.3 Cella al nichel-metal-idruro (NiMH)	13
1.1.4 Cella agli ioni di litio (Li-Ion)	13
1.2 COMPONENTI DI UNA CELLA DI BATTERIA	14
1.3 SPECIFICHE TECNICHE DI UNA BATTERIA	16
1.4 DESIGN E STRUTTURA DELLE CELLE IN COMMERCIO	17
1.5 PRODUZIONE MONDIALE DI LITHIUM-ION BATTERY (LIB)	19
1.5.1 Trends e sviluppi nel mercato dei EVs	19
1.5.2 Domanda di LIB nel settore automobilistico	23
1.5.3 Gigafactories: Stato dell'arte e prospettive future	25
2. La produzione delle batterie al litio	27
2.1 LAYOUT	27
2.1.1 Il problema del layout	28
2.2 TIPOLOGIE DI LAYOUT	28
2.2.1 Layout a punto fisso	29
2.2.2 Layout per reparti	30
2.2.3 Layout per prodotto	30
2.2.4 Layout a isola	31
2.2.5 Scelta del layout	32
2.3 AUTOMAZIONE NEI SISTEMI PRODUTTIVI	32
2.4 IL PROCESSO PRODUTTIVO	33
2.4.1 Electrode Manufacturing	34
2.4.2 Cell assembly	38
2.4.3 Cell Finishing	40
2.5 MACCHINE IMPIEGATE NEL PROCESSO PRODUTTIVO	43
2.5.1 Slurry Mixer	43
2.5.2 Coater and Dryer	45
2.5.3 Solvent Recovery System	47
2.5.4 Calender	49
2.5.5 Slitter	50
2.5.6 Vacuum Dryer	51
2.5.7 Electrode Notching Machine	52

2.5.8 Stacking Machine.....	52
2.5.9 Welding Machine.....	54
2.5.10 Sealing Machine.....	54
2.5.11 Electrolyte Filling Machine.....	55
2.5.12 Formation e Aging Machine.....	56
3. Analisi Desk: Layout per la produzione di Batterie al Litio	58
3.1 METODOLOGIA E CONTENUTI.....	58
3.1.1 Processo di ricerca.....	58
3.1.2 Literature Review.....	59
3.2 CARATTERISTICHE DI UN IMPIANTO PER LIB	60
3.2.1 Consumo energetico di un impianto per LIB	61
3.2.2 Parametri qualitativi nella linea produttiva.....	64
3.2.3 Costi legati alla produzione di LIB.....	66
3.3 PROGETTAZIONE DEL LAYOUT DI UN IMPIANTO PER LIB	68
3.3.1 Progettazione e disposizione delle risorse produttive.....	68
3.3.2 Colli di bottiglia in una linea produttiva.....	69
3.3.3 Progettazione della logistica e della movimentazione.....	71
3.3.4 Progettazione dei Magazzini.....	74
3.3.5 Condizioni ambientali nella produzione di LIB	76
3.3.6 Impianti flessibili.....	76
3.4 SOLUZIONI PER PROGETTARE IL LAYOUT PRODUTTIVO	77
3.4.1 Simulazione e Modellazione 3D.....	77
3.4.2 Modello BatPaC.....	84
3.5 ANALISI CRITICHE.....	86
4. Conclusioni e Ricerche Future.....	89
4.1 BENEFICI DELLA TESI.....	89
4.2 LIMITAZIONI RISCONTRATE.....	91
4.3 PASSI E SVILUPPI FUTURI.....	92
Bibliografia.....	93
Sitografia	99

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1.1 - ESEMPIO DI UNA BATTERIA AL PIOMBO ACIDO (MOTUS, 2020).....	12
FIGURA 1.2 - ESEMPIO DI UN PACCO DI BATTERIE (ENEA, 2019)	15
FIGURA 1.3 - ESEMPIO DI CELLE PRISMATICHE (FLASH BATTERY, 2020)	18
FIGURA 1.4 - ESEMPIO DI CELLE CILINDRICHE (FLASH BATTERY, 2020).....	18
FIGURA 1.5 - ESEMPIO DI CELLE POUCH (FLASH BATTERY, 2020).....	18
FIGURA 1.6 - STOCK DI VEICOLI ELETTRICI PRODOTTI TRA IL 2010 E IL 2020 (GLOBAL EV OUTLOOK, 2021) ..	20
FIGURA 1.7 - VEICOLI ELETTRICI REGISTRATI E VENDUTI DAL 2015 AL 2020 (GLOBAL EV OUTLOOK, 2021) ...	23
FIGURA 1.8 - DOMANDA DI BATTERIA AL LITIO PER AREA GEOGRAFICA (GLOBAL EV OUTLOOK, 2021)	24
FIGURA 1.9 - CAPACITÀ TOTALE DELLE GIGAFACTORY NEL 2020 (LUMI4INNOVATION, 2021)	25
FIGURA 1.10 - PROGETTI DI GIGAFACTORY DEI MAGGIORI PRODUTTORI EUROPEI (LUMI4INNOVATION, 2021) 26	
FIGURA 2.1 - CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI DI PRODUZIONE (CORSO DI IMPIANTI INDUSTRIALI, 2018).....	29
FIGURA 2.2 - LAYOUT PER REPARTI (CORSO DI IMPIANTI INDUSTRIALI, 2018).....	30
FIGURA 2.3 - LAYOUT PER PRODOTTO (CORSO DI IMPIANTI INDUSTRIALI, 2018).....	31
FIGURA 2.4 - LAYOUT PER GRUPPI (CORSO DI IMPIANTI INDUSTRIALI, 2018).....	31
FIGURA 2.5 - SCELTA DEL TIPO DI LAYOUT (CORSO DI IMPIANTI INDUSTRIALI, 2018).....	32
FIGURA 2.6 - FASI DEL PROCESSO DI PRODUZIONE DI UNA BATTERIA AGLI IONI DI LITIO (ISCIENCE, 2021)	33
FIGURA 2.7 - ROTOLI PER PRODURRE GLI ELETTRODI (FAAM, 2019)	34
FIGURA 2.8 - GERARCHIA PER L'ASSEMBLAGGIO DI UN PACCO DI BATTERIA (ISCIENCE, 2021)	40
FIGURA 2.9 - ESEMPIO DEI METODI DI MIXING: (I) HMS; (II) BALL MILLING; (III) ULTRASONIC (ISCIENCE, 2019).....	44
FIGURA 2.10 - ESEMPIO DI UNA BALL MILLING MACHINE (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)	45
FIGURA 2.11 - ESEMPI DELLE TECNICHE DI COATING (FAAM, 2019).....	45
FIGURA 2.13 - ESEMPIO DI UN COATER CONTINUO (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)	46
FIGURA 2.12 - METODI DI COATING SIMULTANEO (IN ALTO) E COATING DISCONTINUO A TRE STRISCE (IN BASSO) (FAAM, 2019).....	46
FIGURA 2.14 - TECNICHE DI DRYING: JET NOOZLE (SX), FLOATING NOOZLE (CENTRO), AIRFOIL NOOZLE (DX) (FAAM, 2019).....	47
FIGURA 2.15 - PROCESSO DEL SOLVENT RECOVERY SYSTEM.....	47
FIGURA 2.16 - SOLVENT RECOVERY SYSTEM - CALSTAR	48
FIGURA 2.17 - ESEMPIO DI CALENDER CHE UTILIZZA IL PROCESSO ROLL-TO-ROLL (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)	49
FIGURA 2.18 - ESEMPIO DI LASER SLITTING (TMAX BATTERY EQUIPMENTS).....	50
FIGURA 2.19 - ESSICCATORE A CAMERA (NABERTHERM)	51
FIGURA 2.20 - ELETRODE NOTCHING PROCESS (FAAM, 2019).....	52
FIGURA 2.21 - PROCESSO DI STACKING CON IL METODO Z-FOLDING (FAAM, 2019).....	52
FIGURA 2.22 - AUTOMATIC POUCH Z FOLDING MACHINE (TMAX BATTERY EQUIPMENTS).....	53
FIGURA 2.23 - AUTOMATIC TAB WELDING MACHINE FOR CYLINDRICAL CELL (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)	54
FIGURA 2.24 - SIGILLATURA DI UNA CELLA POUCH (TMAX BATTERY EQUIPMENTS).....	55

<i>FIGURA 2.25 - AUTOMATIC SEALING MACHINE FOR POUCH CELL BATTERY (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)</i>	55
<i>FIGURA 2.26 - CELLA POUCH SIGILLATA CON L'EXTRAPOUCH (FAAM, 2019)</i>	56
<i>FIGURA 2.27 - AUTO ELECTROLYTE FILLING MACHINE (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)</i>	56
<i>FIGURA 2.28 - AUTOMATIC FORMATION MACHINE (NABERTHERM)</i>	57
<i>FIGURA 3.1 - PROCESS ENERGIES OF LITHIUM-ION BATTERY CELL PRODUCTION (YUAN ET AL., 2017)</i>	63
<i>FIGURA 3.2 - IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI NEL PROCESSO DI MIXING</i>	64
<i>TABELLA 3.3 - PINCIPALI PARAMETRI NELLA LINEA PRODUTTIVA (ELECTRIC DRIVES PRODUCTION CONFERENCE, 2013)</i>	65
<i>TABELLA 3.3 - PINCIPALI PARAMETRI NELLA LINEA PRODUTTIVA (ELECTRIC DRIVES PRODUCTION CONFERENCE, 2013)</i>	66
<i>FIGURA 3.4 - COSTO E PRODUZIONE DELLA BATTERIA AGLI IONI DI LITIO (ARGONNE, 2021)</i>	66
<i>TABELLA 3.5 - COSTI RELATIVE ALLA PRODUZIONE DI LIB (iSCIENCE, 2021)</i>	67
<i>FIGURA 3.6 - COSTI RELATIVE ALLA PRODUZIONE DI LIB (iSCIENCE, 2021)</i>	67
<i>FIGURA 3.7 - STRUTTURA GENERALE DI UN IMPIANTO DI PRODUZIONE DI LIB (J. ELECTROCHEM. SOC., 2020)</i>	68
<i>FIGURA 3.8 - CONCEPT DESIGN DEL LAYOUT DI UNA LINEA PRODUTTIVA DI LIB (LITHIUM-ION BATTERIES: BASICS AND APPLICATIONS, 2018)</i>	69
<i>FIGURA 3.9 - STACKING E WINDING PERFORMANCES (AUTOMATION TECHNOLOGY: PRODUCTS, 2014)</i>	70
<i>FIGURA 3.10 - HANDLING SYSTEM (PROCEDIA CIRP, 2016)</i>	71
<i>FIGURA 3.11 - AREA E LOGISTICA DI UN IMPIANTO PRODUTTIVO DI LIB (LITHIUM-ION BATTERIES: BASICS AND APPLICATIONS, 2018)</i>	73
<i>FIGURA 3.12 - CONDIZIONI AMBIENTALI IN UN IMPIANTO PRODUTTIVO DI LIB (LITHIUM-ION BATTERIES: BASICS AND APPLICATIONS, 2018)</i>	76
<i>FIGURA 3.13 - VR SYSTEM (HTC VIVE EUROPE, 2018)</i>	78
<i>FIGURA 3.14 - LISTA DEI COMPONENT DEL LAYOUT SU VC 4.0 (UNIVERSITY OF VAASA, 2018)</i>	80
<i>FIGURA 3.15 - AREA DI STOCCAGGIO DEL LAYOUT (UNIVERSITY OF VAASA, 2018)</i>	81
<i>FIGURA 3.16 - AREA DESTINATA ALLA FASE DI MIXNG PER L'ANODO (BLU) E CATODO (ROSSO) (UNIVERSITY OF VAASA, 2018)</i>	81
<i>FIGURA 3.17 - REPARTO DI STACKING (UNIVERSITY OF VAASA, 2018)</i>	82
<i>FIGURA 3.18 - MODELLAZIONE 3D DEL LAYOUT DI UNA GIGAFACTORY (UNIVERSITY OF VAASA, 2018)</i>	83
<i>FIGURA 3.19 - PROGETTAZIONE DELLA FASE DI COATING (ARGONNE, 2012)</i>	85
<i>FIGURA 3.20 - PROGETTAZIONE DELLA FASE DI DRYING (ARGONNE, 2012)</i>	85
<i>FIGURA 3.21 - DIAGRAMMA SCHEMATICO DEL LAYOUT DI UN IMPIANTO DI LIB CON IL MODELLO BATPAC (ARGONNE, 2012)</i>	86

GLOSSARIO

BatPac	Battery Performance and Cost
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Battery Management System
BOM	Bill of Materials
Ca	Calcio
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CMC	Carbossimetilcelluloso
COP	Climate Change Conference
EBA	European Battery Alliance
EOL	End of Line
EV	Electric vehicles
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
GHG	Greenhouse Gases
GWP	Global warming potential
H ₂ SO ₄	Acido Solforico
HAP	Hazardous air pollutants
HSM	Hydrodynamic shearmixing
HT	High Temperature
JIT	Just in Time
LCA	Life Cycle Assessment
LIB	Lithium Ion Battery
Li-Ion	Ioni di Litio
Li-Po	Polimeri di Litio
M	Mole
NiCd	Nichel-cadmio
NiMH	Nichel-metal-idruro
NMP	N-metil-2-pyrrolidone
NT	Normal Temperature
OCV	Open circuit voltage
Pb	Piombo
PbO ₂	Diossido di Piombo
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PVDF	Fluoruro di polivinilidene
R2R	Roll-to-roll
Sb	Antimonio
SEI	Solid Electrolyte Interface
TCO	Total Cost of Ownership
TMS	Thermal Management System
TOC	Theory of Constraints
VOC	Composti organici volatili

Introduzione

Dal 31 ottobre al 13 novembre 2021 si è tenuta a Glasgow la COP26, conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici. Oltre 190 leader mondiali, negoziatori, rappresentanti di governo, imprese e cittadini si sono riuniti per due settimane di complessi negoziati, finalizzati all'adozione delle misure per contenere e, se possibile, invertire il processo di surriscaldamento globale e il conseguente cambiamento climatico. Tra le decisioni di maggiore rilievo contenute nel Patto di Glasgow, innanzitutto, è stato tenuto vivo l'obiettivo di mantenere la temperatura entro +1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali (1850-1900). È stata, inoltre, segnalata l'individuazione di nuovi obiettivi minimi di decarbonizzazione, definiti all'interno del tema "Net Zero": un taglio del 45% delle emissioni di anidride carbonica rispetto al 2010, da attuarsi entro il 2030, e il raggiungimento di zero emissioni nette "intorno alla metà del secolo" - indicazione temporale generica voluta da Cina, Russia e India, indisponibili all'assunzione di tale impegno entro il 2050. In aggiunta, nonostante il deludente risultato ottenuto nell'accordo per dismettere l'utilizzo del carbone come fonte energetica e per arrestare i sussidi economici e finanziari ai combustibili fossili "*eliminare gradualmente l'uso del carbone e i finanziamenti per i combustibili fossili*" sia stato sostituito dall'impegno a "*ridurre gradualmente l'uso del carbone e i finanziamenti per i combustibili fossili*", si tratta comunque di una previsione estremamente rilevante poiché, per la prima volta, i combustibili fossili vengono menzionati in un documento di chiusura di una COP.

Accelerare l'adozione dei veicoli elettrici (EV) è uno dei pilastri della COP26. La tecnologia degli ioni di litio sarà il pilastro principale per la corsa all'elettrificazione, considerando la sua elevata densità energetica e di potenza, la sua leggerezza e l'assenza di alternative competitive. Senza tenere conto di altre possibili barriere (tra le principali la diffusione delle infrastrutture di ricarica), l'incremento delle vendite di EV necessario per raggiungere gli obiettivi prefissati per l'azzeramento delle emissioni nette comporterà una pressione estrema sulle catene di approvvigionamento delle batterie agli ioni di litio. Innanzitutto, si sente la necessità di sviluppare più impianti per produrre celle agli ioni di litio su larga scala - le cosiddette "gigafactory" - rispetto a quelle attualmente previste. Spesso la loro costruzione suscita molta attenzione nel settore: i politici possono pubblicizzare le opportunità di lavoro create e proclamare che il loro paese "procede spedito sulla via dell'elettrificazione".

In ogni modo, la corsa alla mobilità elettrica aumenterà anche l'entità degli investimenti necessari: se prendiamo come modello un impianto da 30 GWh attualmente sviluppato in Ungheria da SK Innovation, produttrice sudcoreana di batterie, per conseguire l'obiettivo di azzerare entro il 2030 le emissioni nette occorrerebbero 4.600 Gwh supplementari di capacità, richiedendo l'investimento di circa 353 miliardi di dollari.

Come ulteriore complessità, i produttori dovranno anche adeguarsi alle nuove tecnologie: le batterie allo stato solido, per esempio, entreranno verosimilmente in produzione nel prossimo decennio e richiederanno processi di fabbricazione più complessi rispetto alle batterie attuali.

In Europa si era già parlato di un piano di azioni per far fronte alla rilenta corsa verso un'economia "green" e sostenibile. Nello specifico, nell'Ottobre del 2017, la Commissione Europea, insieme ai paesi dell'UE, agli istituti di ricerca industriale ed alla comunità scientifica, ha deciso di lanciare la piattaforma di cooperazione European Battery Alliance (EBA). In linea con il Green Deal Europeo, il piano di azione per l'economia circolare e la strategia industriale, l'EBA mira a sviluppare la tecnologia delle batterie e la capacità produttiva nell'UE, che è fondamentale per la mobilità a basse emissioni, lo stoccaggio di energia e la strategia economica dell'Europa, requisiti essenziali per l'attuale competitività del settore automobilistico.

In particolare, questo piano d'azione strategico combina la ricerca, l'innovazione, il finanziamento/investimento, il commercio e lo sviluppo delle competenze, al fine di rendere l'Europa un leader globale nella produzione e nell'uso sostenibile delle batterie con tecnologia agli ioni di litio verso la dimensione delle gigafactories, già pienamente diffusa tra i produttori asiatici e americani.

Per raggiungere gli obiettivi prefissati, l'Unione Europea sta promuovendo un approccio transfrontaliero e integrato che agisca sull'intera catena del valore della produzione delle batterie e che si concentri sulla sostenibilità, a partire dall'estrazione e dal trattamento delle materie prime, la fase di progettazione e di fabbricazione delle celle e pacchi di batteria, e il loro utilizzo, riciclaggio e smaltimento, collocato all'interno di un contesto di economia circolare.

Come già detto, negli ultimi anni, il mercato dei veicoli elettrici (EVs) è cresciuto notevolmente. Questo ha influito alla crescente diffusione delle batterie agli ioni di litio (LIB). Tuttavia, la mancanza di una profonda conoscenza dei processi di produzione delle batterie agli ioni di litio e della struttura degli impianti produttivi, chiamati "gigafactory",

fa sì che si hanno costi elevati, bassa qualità e prestazioni limitate. Ecco perché viene proposto uno studio sulle attuali tecniche e tecnologie per la progettazione del layout di un impianto che produce batterie agli ioni di litio, analizzando l'intera linea produttiva, i processi, i singoli reparti o isole di produzione ed assemblaggio e la relativa logistica.

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 una revisione della letteratura teorica volta a visualizzare gli aspetti chiave contenuti nella progettazione del layout e della linea produttiva di un impianto di LIB presenti nella letteratura esistente.

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. Analizzare ed ottimizzare e migliorare un plant layout di un impianto industriale ha lo scopo di divulgare le conoscenze di un tema ancora poco conosciuto, in primis, ma di andare anche a ridurre, oltre a tempi e costi, gli sprechi che si possono generare con la lavorazione dei materiali ed il miglioramento riguardo la disposizione dei macchinari nello stabilimento, dovuto al fatto che nella produzione delle batterie sono richieste dettagliate e puntuali caratteristiche tecniche dei locali di utilizzo.

Una corretta conoscenza e predisposizione delle risorse produttive, degli spazi e dei percorsi interni garantisce a rendere il lavoro molto più intuitivo e facile per gli operatori ed evidenzia inoltre eventuali inefficienze al fine 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.

Oltre all'introduzione, l'elaborato è suddiviso in quattro capitoli.

Nel primo capitolo, *Analisi della letteratura - Stato dell'arte delle Batterie*, 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 di litio presenti sul mercato: cilindriche, prismatiche e pouch, e l'andamento della loro produzione nel tempo, evidenziando le gigafactory esistenti ed in fase di sviluppo. Questo capitolo è utile a contestualizzare il nostro studio e permettere

una facile lettura dei paragrafi successivi anche non avendo una profonda conoscenza con l'argomento.

Nel secondo capitolo, *Line Manufacturing delle Batterie al Litio*, viene presentata un'analisi della letteratura esistente su tema del plant layout, esponendo quanti e quali tipi di layout sono esistenti attualmente per un impianto industriale e quale tipologia di layout più si adatta al nostro studio.

Successivamente, viene descritto il processo produttivo che avviene all'interno dell'impianto di produzione le risorse necessarie per la produzione delle batterie: i materiali necessari e le macchine richieste per tutto il processo di produzione.

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 la progettazione del layout di un impianto.

Mentre, nel terzo capitolo, *Analisi Desk: Layout per la produzione di Batterie al Litio*, viene descritto, innanzitutto, il processo con cui è stato strutturato questo studio. Vengono poi riportate le caratteristiche principali di un impianto produttivo come i costi generali ed i consumi energetici legati alla produzione. Successivamente, vengono descritte alcune, tra le diverse soluzioni, di determinazione del layout di un impianto di LIB, suddiviso tra la parte di produzione e la parte di logistica, movimentazione e magazzini. Infine, vengono proposti due metodi per la progettazione del layout basati su due casi studio.

Nel quarto e ultimo capitolo, *Conclusioni e Ricerche Future*, verranno evidenziate le conclusioni trovate e quali potranno essere gli eventuali sviluppi futuri partendo dalla tesi proposta, come ad esempio lo studio del layout di un impianto flessibile.

1. Analisi della letteratura - Stato dell'arte delle batterie

In questo capitolo verranno analizzate le principali tipologie di batterie attualmente più diffuse in commercio. Particolare attenzione verrà posta alla batteria che utilizza la tecnologia agli ioni di litio, che verrà scelta per la trattazione della presente tesi.

1.1 Introduzione ai vari tipi di batterie

La batteria è uno degli elementi principali che caratterizza il veicolo elettrico, spesso anello debole della catena del valore che ne limita le prestazioni. Infatti, essa ne determina il peso, il costo, l'autonomia e la potenza, motivo per cui una solida conoscenza delle tipologie di batterie esistenti è molto utile. Le più comuni tipologie di batterie ricaricabili, o accumulatori, attualmente impegnate per il settore automotive sono quattro: la cella al piombo acido, la cella al nichel-cadmio (NiCd), la cella al nichel-metal-idruro (NiMH) e le celle al litio, nella versione a ioni di litio (Li-Ion) e quella a polimeri di litio (Li-Po).

1.1.1 Cella al piombo acido

La batteria al piombo acido è il più vecchio sistema di batteria ricaricabile, noto anche come batteria secondaria o accumulatore. Ideata nel 1859 dal fisico francese Gaston Planté, viene usata principalmente per consentire l'avviamento del motore termico di automobili, motori ed altri veicoli a motore (Licoccia, 2013). Ogni cella della batteria è costituita da un anodo di piombo spugnoso (Pb) e un catodo di diossido di piombo (PbO₂) in una soluzione elettrolitica contenente acido solforico (H₂SO₄) diluito in acqua distillata, corrispondente ad una concentrazione molare di circa 4,5 M. Tuttavia, i produttori di batterie non utilizzano solo piombo come materiale per le piastre ma aggiungono altri elementi come l'antimonio (Sb) e il calcio (Ca), al fine di attenuare la manifestazione di alcuni fenomeni negativi più comuni nelle batterie come l'autoscarica, la riduzione di vita nei cicli carica/scarica o la tendenza alla solfatazione (Flash Battery, 2020).

Come mostrato in figura 1.1, la configurazione più comune della batteria a piombo-acido è formata da sei celle disposte in serie, la cui differenza di potenziale tra le stesse genera una tensione nominale di circa 12V per ogni pacco di batteria, nello stato carico (Licoccia, 2013).

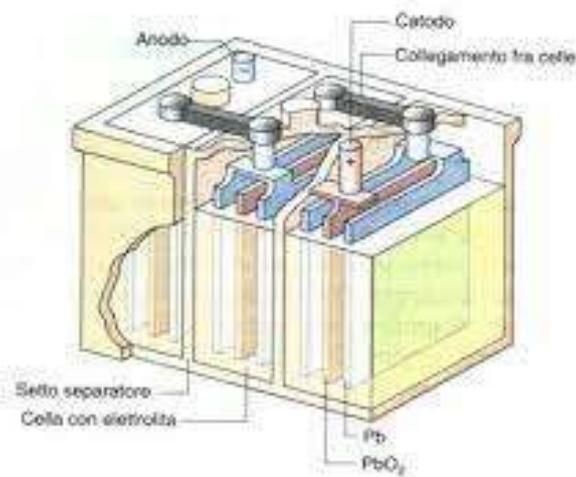


Figura 1.1 - Esempio di una batteria al piombo acido (MOTUS, 2020)

Tradizionalmente, questa tipologia di batteria era la più diffusa nei veicoli elettrici per via della loro tecnologia consolidata, l'elevata disponibilità ma, soprattutto, per il basso costo, grazie all'utilizzo di materie prime estremamente economiche (Flash Battery, 2020).

Tuttavia, presenta alcuni svantaggi che hanno reso il suo campo di applicazione sempre meno diffuso nei veicoli elettrici. Tra questi l'esigenza di non mantenere la batteria scarica e/o parzialmente carica per lunghi periodi, in quanto si potrebbe manifestare il corto circuito interno, la solfatazione di piastre/celle, che portano alla riduzione sia dell'energia disponibile inizialmente presente sia della durata della batteria stessa, la possibile fuoriuscita di acido, notevolmente dannoso per l'ambiente, e l'elevato volume che determina una parte significativa della massa finale del veicolo (25-50%).

1.1.2 Cella al nichel-cadmio (NiCd)

Realizzata per la prima volta nel 1899 da Waldmar Jugner, è stato uno dei primi tentativi di superare le batterie al Pb per alimentare i motori, 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, 2013). Queste celle usano un ossido di nichel per catodo, il cadmio per anodo, un sale per elettrolita.

Le batterie al NiCd presentano alcuni vantaggi come una più lunga shell-life, celeri tempi di carica-scarica e non si danneggiano se lasciate scariche per lunghi orizzonti temporali (Zhang, 2012). Tuttavia, hanno due principali svantaggi: il primo è l'eccessivo costo,

dovuto in parte ai problemi di gestione delle batterie usate, a causa dell'elevata tossicità del cadmio; il secondo, e forse il più incisivo, è il cosiddetto “effetto memoria”, ovvero sottoponendo la batteria ad un processo di carica con ancora capacità residua, quest'ultima risulterà inutilizzabile nei successivi impieghi (Flash Battery, 2020).

1.1.3 Cella al nichel-metal-idruro (NiMH)

Le batterie, o accumulatori, al nichel-metal-idruro rappresentano una evoluzione delle batterie al NiCd, in cui l'anodo è costituito da diverse leghe di metalli piuttosto che del cadmio. Rispetto alle celle al cadmio, le NiMH hanno una maggiore densità energetica, un'elevata capacità rispetto ad una batteria al NiCd di pari dimensioni e l'effetto “memoria” risulta meno significativo, seppur avendo un costo simile ai precedenti modelli (Licoccia, 2013).

Oltre ad essere impiegate per l'elettronica di consumo, le batterie al NiMH hanno ricoperto per lungo tempo un ruolo centrale nei veicoli elettrici e ibridi, tra cui l'utilizzo in alcuni modelli come la Toyota Prius, Honda Civic o la Ford Escape Hybrid. Tuttavia, a partire dal 2020, sono state quasi interamente sostituite dalle batterie al litio nei veicoli elettrici e plug-in, avendo queste ultime migliori prestazioni nonostante il costo sia significativamente più elevato, ma rimangono ancora oggi in uso in alcuni veicoli (Flash Battery, 2020).

1.1.4 Cella agli ioni di litio (Li-Ion)

La tipologia di batteria ricaricabile attualmente più diffusa in ambito automotive, ma anche nell'elettronica di consumo, è la batteria agli ioni di litio. Ideata a partire dagli anni Ottanta, venne commercializzata per la prima volta da Sony nel 1991 (ENEA, 2019).

La batteria agli ioni di litio presenta numerosi vantaggi rispetto ai precedenti modelli, in particolare alla versione al piombo, in riferimento al peso e volume. Infatti, oltre a ridurre gli ingombri, fornisce praticità, autonomia e minori consumi grazie alla sua leggerezza (Flash Battery, 2020).

Presenta migliori prestazioni anche in termini di specifiche tecniche: elevata densità energetica (fino a 530Wh/l), alta energia specifica ed alta potenza specifica, con un basso tasso di autoscarica (5% mensile a confronto del 30% delle celle più comuni).

Oltre a non richiedere una costante manutenzione, dal momento che le celle sono sigillate, le batterie agli ioni di litio non sono soggette all'effetto “memoria”, che ne colpisce

significativamente le prestazioni. Ciononostante, vi sono alcuni problemi di sicurezza che rendono tutt'oggi questa tipologia di batteria molto pericolosa e in cerca di continui miglioramenti. La tecnologia agli ioni di litio usa un anodo di grafite e diversi componenti per il catodo, che nei primi modelli consisteva in litio metallico (Flash Battery, 2020). Questo era soggetto a una implicita instabilità chimica e, durante la fase di ricarica, poteva incorrere in surriscaldamenti che portavano alla fusione del litio e a una ossidazione veloce e incontrollabile, provocando incendi, rotture o addirittura l'esplosione della batteria stessa. Si calcola che a metà del 2006 Sony dovette ritirare più di dieci milioni di batterie utilizzate in laptop Asus, Dell, Apple, Lenovo, Toshiba e Sharp (ENEA, 2019). A seguito di questi inconvenienti la produzione di batterie si è concentrata sulla sostituzione del catodo a litio metallico con un catodo a litio non metallico, in particolare verso il catodo a ioni di litio dispersi in una matrice cristallina di un ossido che rende più stabile la chimica della batteria (ENEA, 2019).

La batteria allo stato solido, attualmente in fase di sviluppo da Toyota, Volkswagen, Stellantis, Ford e BMW, è un esempio di avanzamento della ricerca per migliorare la stabilità chimica ed aumentare la sicurezza delle batterie. La differenza sostanziale con le batterie al litio consiste nell'elettrolita presente sotto forma solida piuttosto che liquida, che permette maggiori prestazioni, soprattutto riguardanti la densità di energia e la velocità di ricarica. Tuttavia, vi sono ancora molti ostacoli da superare: il principale riguarda l'allestimento delle linee produttive per la produzione in massa, dovendo riuscire a creare un elettrolita chimicamente stabile, il che rende un pacco di batterie eccessivamente costoso per i volumi di produzione stimati (Licoccia, 2013).

1.2 Componenti di una cella di batteria

Un pacco di batteria, talvolta chiamato semplicemente "batteria", è un dispositivo utilizzato per convertire l'energia chimica accumulata in energia elettrica (MOTUS, 2020). Come mostrato in figura 1.2, è costituito da vari componenti: celle elementari, che a loro volta costituiscono i moduli, un contenitore, un sistema elettronico di supervisione "Battery Management System" (BMS), un sistema elettronico per la gestione dei guasti "Thermal Management System" (TMS), cavi di connessione e di segnale, un sistema di raffreddamento e un sistema di comunicazione dei dati (ENEA, 2019). La cella, quindi, è la componente elementare delle batterie in grado di convertire l'energia chimica,

contenuta nei materiali attivi, direttamente in energia elettrica, mediante reazioni elettrochimiche di ossidoriduzione (Electropedia, 2018).



Figura 1.2 - Esempio di un pacco di batterie (ENEA, 2019)

Come già descritto nei paragrafi 1.2, la cella è composta da due piastre, chiamate elettrodi, che vengono caricate positivamente e negativamente. Entrambi gli elettrodi vengono poi immersi in un'altra sostanza chiamata elettrolita che, nella maggior parte dei casi, si trova in forma liquida o gel (MOTUS, 2020). Su ognuna delle due piastre avvengono reazioni distinte, sia durante la fase di carica che in fase di scarica. Durante la fase di carica le reazioni convertono l'energia elettrica fornita dall'esterno in potenziale chimico; mentre durante la scarica si inverte il processo producendo energia elettrica (ENEA, 2019).

Di seguito, il dettaglio delle componenti di una cella:

- **L'ANODO:** polo negativo, è l'elettrodo nel quale avviene il processo di ossidazione: durante la scarica fornisce elettroni al circuito esterno ossidando il litio (Electropedia, 2018). Negli usi più comuni, il materiale impiegato per questo elemento è la grafite.
- **IL CATODO:** polo positivo, è l'elettrodo nel quale avviene il processo di riduzione: durante la scarica riceve elettroni dal circuito esterno riducendo il numero di ossidazioni del litio.
- **L'ELETTROLITA:** è un conduttore di ioni ma un isolante per gli elettroni. Divide i due elettrodi attraverso un separatore poroso che consente il trasferimento ciclico di una certa quantità di ioni litio tra anodo e catodo (Flash Battery, 2020). L'elettrolita più comune per batterie gli ioni di litio è costituito

da una soluzione allo stato liquido di un sale contenente ioni litio in solventi organici.

1.3 Specifiche tecniche di una batteria

Per completare la descrizione generale delle caratteristiche afferenti alle batterie, utile per contestualizzare il lavoro della tesi, occorre adesso illustrare le principali specifiche tecniche che le caratterizzano. Secondo una pubblicazione realizzata dal *MIT Electric Vehicle Team*, nel 2008, i principali valori di una batteria sono i seguenti:

- **TENSIONE NOMINALE:** indica il lavoro che può compiere l'unità di carica elettrica nel passare dal polo positivo a quello negativo. Rappresenta la differenza di potenziale che esiste tra le piastre positive e negative immerse nell'elettrolita (Pedrini, 2007). L'unità di misura è il Volt [V].
- **TENSIONE DI TAGLIO (CUT-OFF VOLTAGE):** è la tensione minima della cella quando è completamente scarica. L'unità di misura è il Volt [V].
- **CAPACITÀ NOMINALE:** rappresenta la quantità di carica che una cella può erogare continuamente durante la fase di scarica, con una certa corrente di scarica, fino a raggiungere la condizione di cut-off voltage (Electropedia, 2018). In maniera semplificata, la capacità rappresenta il numero di Ampere che la batteria riesce ad erogare nell'intervallo di tempo di un'ora. La capacità è calcolata moltiplicando la corrente di scarica (in ampere) per il tempo di scarica (in ore). L'unità di misura è [Ah].
- **ENERGIA NOMINALE:** è la capacità di accumulo di energia elettrica complessiva della cella, ovvero il totale dei Watt-ora disponibili quando la batteria viene scaricata dal 100% dello stato di carica al valore di cut-off voltage (Pedrini, 2007). L'energia è calcolata moltiplicando la capacità nominale [Ah] per la tensione nominale [V]. L'unità di misura è il Watt [Wh].
- **CICLO DI VITA:** rappresenta il numero di cicli di scarica-carica che la batteria può compiere prima che le sue prestazioni, in termini di capacità nominale, si riducano sotto un limite prefissato, generalmente il 75-80% del valore iniziale. La durata del ciclo è stimata per specifiche condizioni di carica e scarica (Electropedia, 2018). La vita operativa effettiva della batteria è influenzata da diversi fattori come la profondità dei cicli e da altre condizioni come la temperatura e l'umidità.

- **ENERGIA SPECIFICA (Wh/kg):** fornisce l'indicazione dell'energia nominale della batteria per unità di massa, talvolta indicata come la densità di energia gravimetrica. L'energia specifica è una caratteristica della chimica della batteria: insieme al consumo di energia del veicolo, essa determina il peso della batteria necessario per raggiungere una soglia di autonomia elettrica (Pedrini, 2007). L'unità di misura è il Watt per kg [Wh/kg].
- **DENSITÀ ENERGETICA:** rappresenta l'energia nominale della batteria per unità di volume, talvolta indicata come densità di energia volumetrica. Come per l'energia specifica, questo valore è una caratteristica della chimica della batteria: insieme al consumo di energia del veicolo, essa determina la dimensione della batteria necessaria per raggiungere una data autonomia elettrica (Pedrini, 2007). L'unità di misura è il Watt per L [Wh/L].

1.4 Design e struttura delle celle in commercio

Come anticipato nel sottoparagrafo 1.1.4, il modello di batteria più comune nelle moderne auto elettriche è la batteria agli ioni di litio. Le batterie per auto elettriche sono sempre state prodotte in moduli (Zhang, 2012). Questo significa che le singole celle, indipendentemente da quale sia la loro forma e chimica, sono assemblate per formare dei moduli, che a loro volta vengono assemblati fino a formare l'intero pacco di batteria, ottenendo così una maggiore semplicità costruttiva, meno componentistica, e di conseguenza il peso e lo spazio sono completamente, o quasi, sfruttati per immagazzinare energia. Questo processo viene denominato “cell-to-pack”.

La divisione in moduli è stata sviluppata per diverse motivazioni, sia tecniche che costruttive. Dal punto di vista della produzione, le batterie si adattano meglio alle piattaforme scalabili: per creare una batteria per una piattaforma più grande o più piccola, non serve riprogettare da zero la batteria, ma basta aggiungere, o sottrarre, uno o più moduli. Invece, dal punto di vista tecnico i moduli aiutano a tenere traccia dello status delle singole celle, identificando più facilmente eventuali guasti, o snellire il processo di riparazioni: basta sostituire un modulo anziché tutta la batteria. Tuttavia, la suddivisione in moduli ha anche degli svantaggi, che si concentrano soprattutto nella maggiore complessità di costruzione (Hassoun, 2020).

Data l'estrema flessibilità in fase di costruzione, troviamo diverse configurazioni delle celle di batteria:



Figura 1.3 - Esempio di celle prismatiche (Flash Battery, 2020)

PRISMATICHE: questi formati di celle sono caratterizzati da un contenitore prismatico di alluminio o di acciaio sottile, come mostrato in figura 1.3. La costruzione permette alta densità di energia, ottima dissipazione del calore, ottimo impacchettamento e sfruttamento dello spazio. Quelle che si trovano in commercio raggiungono una capacità fino a 100 Ah.



Figura 1.4 - Esempio di celle cilindriche (Flash Battery, 2020)

CILINDRICHE: la figura 1.4 illustra un esempio di celle cilindriche, di dimensioni ridotte. Queste tipologie di batterie sono molto diffuse, per esempio, in pacchi per le batterie dei computer portatili. Celle più grandi non sono di alta commercializzazione poiché molto costose. Quelle che si trovano in commercio raggiungono una capacità fino a 200 Ah.



Figura 1.5 - Esempio di celle pouch (Flash Battery, 2020)

A SACCHETTO (POUCH): le celle sottili a sacchetto sono la migliore soluzione in termini di volume occupato. Non hanno un contenitore rigido, per cui anche il peso è molto ridotto. Stanno diventando una valida alternativa a quelle prismatiche, specialmente per le auto elettriche. La figura 1.5 mostra un esempio di celle pouch.

1.5 Produzione mondiale di Lithium-Ion Battery (LIB)

La produzione di veicoli elettrici è aumentata rapidamente nel XXI secolo. Si pensi che nel 2005 il numero di EVs prodotti in tutto il mondo era inferiore a 1500 vetture, tuttavia nel 2016, il numero totale di auto elettriche prodotte è cresciuto fino a 3 milioni come riportato dall'International Energy Agency (IEA, 2021). Solo 1,2 milioni delle auto prodotte sono state immatricolate per viaggiare su strada, ciò in virtù del fatto che lo sviluppo dei veicoli elettrici non contava di un processo di produzione performante e il prezzo di ogni unità era elevato. Oggi, le auto elettriche hanno l'1,1% della quota di mercato globale, ma per esempio, la situazione in Norvegia crea fiducia per la proliferazione dei veicoli elettrici dove, con varie concessioni e sgravi, la quota di mercato è aumentata fino al 29% (International Energy Agency, 2021).

Nonostante l'aumento percentuale segua un trend negativo, la quantità totale di veicoli elettrici prodotti cresce enormemente. Si può osservare che nel 2020 la produzione si presume sia cresciuta del 18% e nel 2030 si prevede un aumento della produzione di circa il 16%. Allo stesso modo, si prevede che siano prodotti circa 30 milioni di veicoli elettrici nel 2030 (International Energy Agency, 2021).

Mentre la domanda di veicoli elettrici aumenta, anche le capacità di produzione mondiale, con le corrispondenti linee produttive, devono essere aumentate, dovendosi adeguare ai nuovi ritmi produttivi.

1.5.1 Trends e sviluppi nel mercato dei EVs

Dopo un decennio di rapida crescita, nel 2020 lo stock globale di auto elettriche prodotte in tutto il mondo ha raggiunto la soglia dei 10 milioni, come mostrato in figura 1.6, con un aumento del 43% rispetto al 2019, e rappresenta, come anticipato nel paragrafo precedente, una quota pari all'1% dei veicoli globali (Global EV Outlook, 2021). I veicoli elettrici a batteria (BEV) hanno rappresentato i due terzi delle nuove registrazioni di auto elettriche e due terzi della produzione di veicoli elettrici nel 2020 (International Energy Agency, 2021). La Cina, con 4,5 milioni di auto elettriche, ha la flotta più grande mai prodotta, anche se nel 2020 l'Europa ha visto il più grande aumento annuale di veicoli elettrici prodotti, raggiungendo 3,2 milioni di unità.

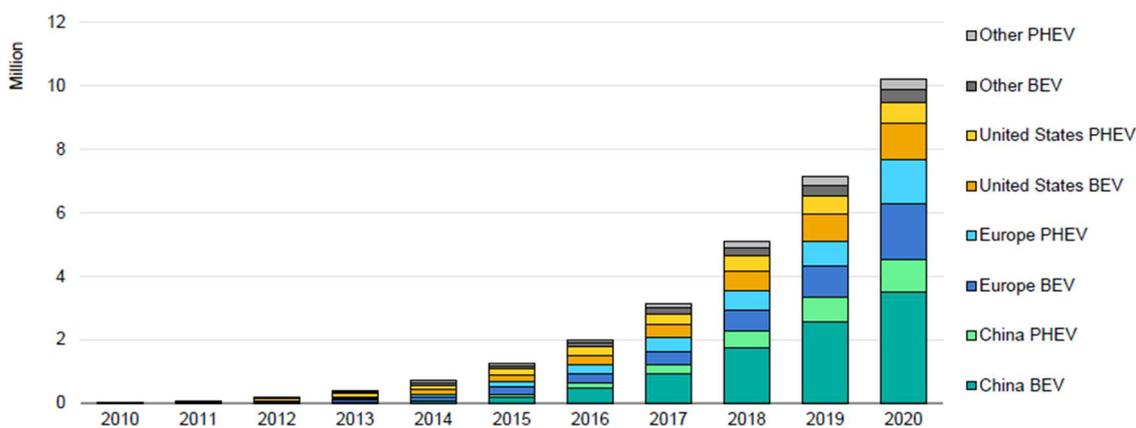


Figura 1.6 - Stock di veicoli elettrici prodotti tra il 2010 e il 2020 (Global EV Outlook, 2021)

Nel complesso, il mercato globale per tutte le tipologie di auto è stato significativamente influenzato dalle ripercussioni economiche della pandemia di Covid-19. Il primo semestre del 2020 ha visto decrescere il numero di immatricolazioni di nuove auto, riducendo di circa un terzo il valore rispetto all'anno precedente. Questo è stato parzialmente compensato da un incremento più che proporzionale nel secondo semestre, che ha portato ad un calo complessivo del 16% su base annua. In particolare, con la riduzione complessiva delle immatricolazioni di nuove auto, la quota globale di vendite di auto elettriche è aumentata del 70% fino a un raggiungere il picco nel 2020 (Global EV Outlook, 2021).

Infatti, nel 2020 sono state registrate circa 3 milioni di nuove auto e, per la prima volta, l'Europa ha guidato la classifica contando 1,4 milioni di nuovi veicoli elettrici immatricolati. La Cina ha seguito con 1,2 milioni di nuove immatricolazioni mentre gli Stati Uniti hanno registrato 295.000 nuove auto elettriche.

Vi sono numerosi fattori che hanno contribuito all'aumento delle immatricolazioni di auto elettriche nel 2020. In particolare, diversi governi hanno fornito o esteso incentivi fiscali che hanno portato una riduzione del costo per l'acquisto di nuove auto elettriche, applicando una sempre più graduale competitività nel mercato a favore dei consumatori.

Focus sull'Europa

Nel complesso il mercato automobilistico europeo si è ridotto del 22% nel 2020. Tuttavia, come già descritto sopra, le nuove registrazioni di auto elettriche hanno raggiunto il picco di 1,4 milioni, rappresentando una quota di vendita pari al 10% circa. Nei grandi mercati, la Germania ha registrato 395.000 nuove auto elettriche e la Francia 185.000 (Global EV Outlook, 2021).

Il Regno Unito ha più che raddoppiato le immatricolazioni fino a raggiungere 176.000 di nuove unità registrate. Le auto elettriche in Norvegia hanno raggiunto una quota di vendita record del 75%, in aumento di circa un terzo rispetto al 2019. Le quote di vendita delle auto elettriche hanno superato il 50% in Islanda, il 30% in Svezia e hanno raggiunto il 25% nei Paesi Bassi (IEA, 2021).

Questa impennata delle immatricolazioni di auto elettriche in Europa, nonostante la crisi pandemica di mezzo, riflette due importanti manovre politiche effettuate. In primo luogo, il 2020 è stato l'anno di riferimento per gli standard dell'Unione Europea sulle emissioni di CO₂ che hanno limitano la media di emissioni di biossido di carbonio (CO₂) per chilometro percorso applicato per le nuove auto. In secondo luogo, molti governi europei hanno aumentato gli schemi di sovvenzione per i veicoli elettrici come incentivi di stimolo per contrastare gli effetti della pandemia.

Nei Paesi europei, le registrazioni di BEV rappresentano il 54% delle immatricolazioni di auto elettriche nel 2020, continuando a superare quelle dei veicoli elettrici ibridi a plug-in (PHEV). Tuttavia, nonostante la registrazione di BEV sia raddoppiata rispetto all'anno precedente, il numero di immatricolazioni riferite ai PHEV è triplicata, registrando un aumento più che proporzionale (Global EV Outlook, 2021). La quota di BEV è stata particolarmente elevata nei Paesi Bassi (82% delle immatricolazioni totali di auto elettriche), Norvegia (73%), Regno Unito (62%) e Francia (60%).

Focus sulla Cina

In Cina, il mercato automobilistico complessivo è stato influenzato dalla pandemia in maniera più accentuata rispetto ad altri Paesi. Si considera che le immatricolazioni totali di nuove auto siano diminuite di circa il 9%. Infatti, nel primo semestre del 2020, le immatricolazioni di nuove auto elettriche sono state inferiori rispetto al target di mercato. Tuttavia, questa tendenza si è invertita nel secondo semestre, momento in cui la Cina ha limitato le conseguenze della crisi pandemica: il risultato è stato una quota di vendite del 5,7%, in crescita rispetto al 4,8% del 2019 (Global EV Outlook, 2021). I BEV hanno

rappresentato circa l'80% delle nuove auto elettriche immatricolate e ciò è dovuto principalmente alle azioni politiche chiave che hanno incentivato il mercato delle auto elettriche in Cina. Inizialmente, le sovvenzioni all'acquisto di auto elettriche dovevano terminare alla fine del 2020, ma a seguito di segnali positivi da parte del mercato sono state applicate delle deroghe che hanno permesso una ripresa graduale del settore: nell'Aprile del 2020 e nel bel mezzo della pandemia, sono stati ridotti gli incentivi del 10% ma questi ultimi sono stati estesi fino al 2022. Riflettendo le preoccupazioni economiche legate alla pandemia, diverse città hanno allentato le politiche sulle restrizioni de settore automotive, consentendo comunque l'immatricolazione di veicoli a combustione interna, al fine di sostenere le industrie automobilistiche locali.

Focus sugli Stati Uniti

Il mercato automobilistico statunitense è sceso del 23% nel 2020, anche se le immatricolazioni di automobili del mercato complessivo sono diminuite meno che proporzionalmente.

Nel 2020, sono state registrate solamente 295.000 nuove auto elettriche, numero ben inferiore rispetto ad Europa e Cina, di cui circa il 78% erano BEV, in calo di 327.000 unità rispetto al 2019. La loro quota di vendita ha sfiorato il 2% (Global EV Outlook, 2021). Questo trend negativo viene principalmente spiegato dal fatto che gli incentivi statali sono diminuiti nel 2020 a causa dei crediti d'imposta per Tesla e General Motors, che rappresentano la quota maggiore di auto elettriche prodotte e registrate.

Focus sul resto dei Paesi

I mercati delle auto elettriche negli altri Paesi sono stati resilienti durante il 2020. Ad esempio, in Canada il mercato delle auto nuove si è ridotto del 21%, mentre le nuove le immatricolazioni di auto elettriche sono rimaste pressoché invariate rispetto all'anno precedente, con una quota di circa 51.000 unità. La Nuova Zelanda è una notevole eccezione. Nonostante la sua forte risposta alla crisi pandemica, ha visto un calo del 22% nelle immatricolazioni di nuove auto elettriche nel 2020, in linea con un calo del mercato automobilistico del 21%. Il declino sembra essere in gran parte legato a registrazioni di EVs eccezionalmente basse nel mese di Aprile 2020, quando la Nuova Zelanda era in uno stato di lockdown totale (Global EV Outlook, 2021). Un'altra eccezione è il Giappone, dove il mercato complessivo delle nuove auto si è contratto dell'11% rispetto al 2019, mentre le immatricolazioni di auto elettriche sono diminuite del 25% nel 2020. Il mercato

delle auto elettriche in Giappone è sceso in termini assoluti e relativi ogni anno dal 2017, quando ha raggiunto il picco di 54.000 immatricolazioni e una quota di vendita dell'1% (Global EV Outlook, 2021). Nel 2020, ci sono stati 29.000 immatricolazioni e una quota di vendita dello 0,6%.

In figura 1.7, vengono sintetizzati i dati, con i relativi andamenti negli anni, riferenti alle unità di veicoli elettrici registrati e venduti tra il 2015 ed il 2020.

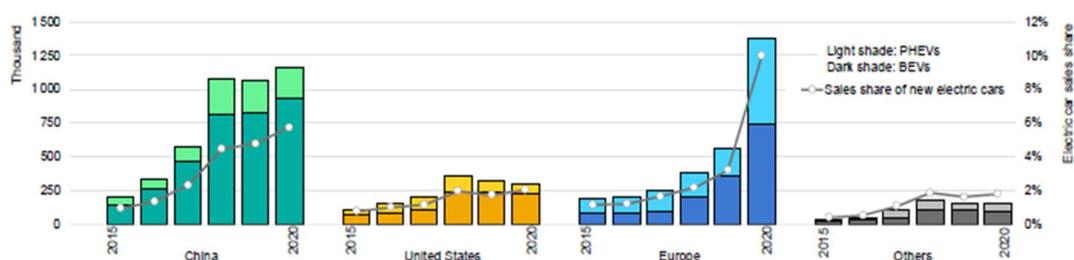


Figura 1.7 - Veicoli elettrici registrati e venduti dal 2015 al 2020 (Global EV Outlook, 2021)

1.5.2 Domanda di LIB nel settore automobilistico

La produzione di batterie agli ioni di litio (Li-Ion) per il settore automobilistico è stata di 160 gigawattora (GWh) nel 2020, in aumento del 33% rispetto al 2019. L'aumento riflette il 41% dell'aumento delle immatricolazioni di auto elettriche e la produzione lineare di batterie con capacità media di 55 kilowattora (kWh) per i BEV e 14 kWh per i PHEV. La domanda di batterie per altre tipologie di veicoli di trasporto è aumentata del 10%. La produzione di batterie continua a essere dominata dalla Cina, che rappresenta oltre il 70% della capacità di produzione globale di celle per batterie. La figura 1.8 rappresenta la domanda di batterie al litio, in termini di GWh durante gli ultimi 10 anni. Si può osservare come nel 2020 la Cina abbia rappresentato la quota maggiore della domanda di batterie con quasi 80 GWh, mentre l'Europa ha avuto il più grande aumento percentuale, circa il 110% fino a raggiungere una domanda di 52 GWh. Invece, la domanda negli Stati Uniti è rimasta stabile a 19 GWh tra il 2019 e il 2020.

Il nichel-manganese-cobalto continua ad essere la chimica dominante impiegata per le batterie Li-Ion, con circa il 71% di quota di vendita mentre nichel-cobalto-alluminio rappresenta la maggior parte della quota rimanente venduta. La chimica litio-ferro-fosfato delle batterie ha riguadagnato quote di vendita, ma è ancora sotto il 4% per il mercato

delle auto elettriche. Secondo l'indagine annuale del BNEF sui prezzi delle batterie, il costo medio ponderato delle batterie per il settore automotive è sceso del 13% nel 2020 rispetto al 2019, raggiungendo 137 dollari/kWh per un pacco di batteria. Secondo uno studio condotto da UBS, i prezzi più bassi sono offerti per gli acquisti di grandi volumi, confermati dall'analisi di una Volkswagen ID3, che mostra un costo stimato di 100 USD/kWh per le sue celle della batteria.

Nel 2020, in Europa la domanda di batterie ha superato la capacità di produzione nazionale.

La capacità attuale di produzione è di circa 35 GWh all'anno, ma si stima possa crescere fino ad arrivare ad una produzione di 400 GWh entro il 2025. Lo slancio è stato evidente nel 2020 quando, in tutta Europa, sono stati annunciati nuovi progetti di impianti per la produzione di batterie, con il sostegno della Banca europea per far fronte agli investimenti. Negli Stati Uniti, sia i produttori coreani che i produttori nazionali di batterie hanno segnalato grandi investimenti in un mercato attualmente dominato dalla joint venture Tesla-Panasonic.

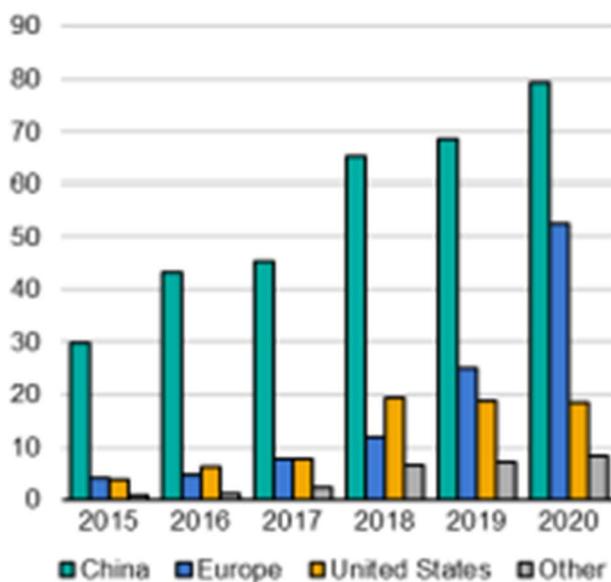


Figura 1.8 - Domanda di batteria al litio per area geografica (Global EV Outlook, 2021)

1.5.3 Gigafactories: Stato dell'arte e prospettive future

Le gigafactories sono grandi impianti di produzione di celle di batterie agli ioni di litio, tecnologia che verrà implementata in quasi tutte le piattaforme per i veicoli elettrici negli anni a seguire. Il termine venne utilizzato per la prima volta da Elon Musk, CEO di Tesla, in riferimento allo stabilimento di Reno, in Nevada, durante la presentazione del suo progetto nel 2014 (Crisantemi, 2021). Come possiamo osservare in figura 1.9, l'attuale capacità totale delle gigafactories esistenti è stimata di circa 450GWh, ripartita tra le principali case produttrici.

Si può notare come LG Chem sia il top player tra i produttori, con circa 81 GWh di capacità, distribuita tra le più importanti gigafactories attualmente esistenti: due in Nanjiing (Cina) e una in Ochang (Corea del Sud), a supporto dei più importanti OEM come Ford, BMW, Tesla, Stellantis, Tesla, Hyundai e Renault. Altre importanti gigafactories attive sono dell'azienda BYD, che conta stabilimenti in Qinghai (Cina), Chongqing, Guangdong, Huzhou (Cina) e Bishan (Singapore).

Altri importanti stabilimenti si trovano in Dalian (Cina), Tokushima, Sumoto, Osaka e Kasai City (Giappone) afferenti alla società Panasonic. Anche Samsung SDI e CATL dispongono di impianti per la produzione di celle agli ioni di litio, rispettivamente in Xian (Cina), Ulsan (Corea del Sud) e in Gurumgram (India), Xining, Sichuan, Guangzhou, Wuhan, Ningde, Jingzhou, Jiangsu (Cina).

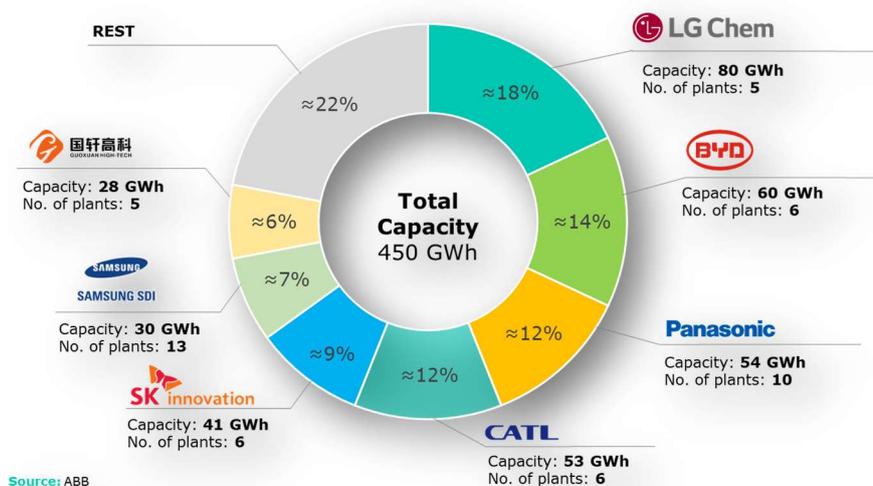


Figura 1.9 - Capacità totale delle gigafactory nel 2020 (Lumi4Innovation, 2021)

Iniziativa Europea

A fronte della registrazione di un aumento delle vendite di veicoli elettrici, l'Europa sta cercando di migliorare la sua capacità produttiva di batterie agli ioni di litio a livello nazionale, piuttosto che esternalizzare l'approvvigionamento nei paesi asiatici come Cina, Giappone e Corea del Sud, che sono attualmente i principali produttori globali.

Inoltre, a partire da maggio 2021, 38 gigafactories per la produzione di celle agli ioni di litio sono in costruzione e in fase di progettazione in Europa e nel Regno Unito, secondo l'ultimo rapporto dell'organizzazione non governativa Transport&Environment, ottenendo un finanziamento pari a 25,5 miliardi di euro. In figura 1.10 vengono illustrate le iniziative delle gigafactories attualmente in fase di sviluppo, in Europa, come Britishvolt nel Regno Unito, Italtvolt in Italia, Freyr in Norvegia e Basquevolt-Nabatt in Spagna.

In particolare, possiamo osservare come Italtvolt sia il primo grande progetto a riguardare il nostro Paese, dove è stata scelta come ubicazione dell'impianto l'area dell'ex stabilimento Olivetti di Scarmagno. La prima fase del progetto, che si dovrebbe concludere nel 2024, richiederà un investimento di circa 4 miliardi. Una volta completata, la gigafactory di Italtvolt sarà un impianto di circa 300 mila metri quadrati e si presume avrà una capacità iniziale di 45 GWh, che potrà raggiungere i 70 GWh negli anni a seguire. Si stima che il sito creerà fino a 15 mila posti di lavoro (Crisantemi, 2021). Recentemente, anche il gruppo Stellantis, nato dalla fusione di PSA e FCA, ha annunciato i piani per la costruzione di una gigafactory a Termoli.

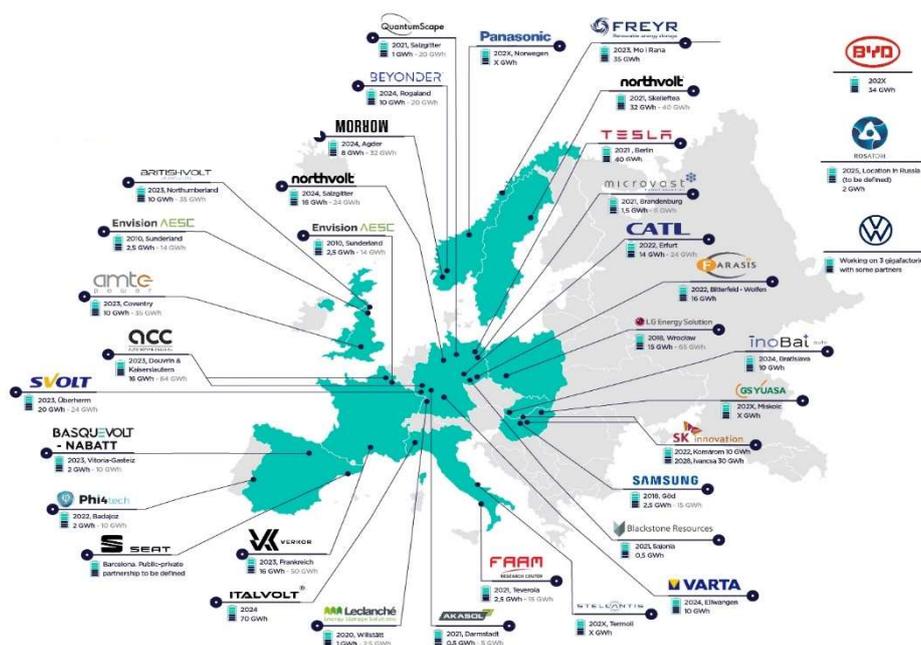


Figura 1.10 - Progetti di gigafactory dei maggiori produttori Europei (Lumi4Innovation, 2021)

1. La produzione delle batterie al litio

In questo capitolo verranno analizzate le principali tipologie di layout e, in particolare, quella adatta all'impianto di LIB. Successivamente, verrà analizzato il processo di produzione delle batterie agli ioni di litio, descrivendo le singole fasi di lavorazione e le relative risorse e macchinari impiegati durante il processo.

2.1 Layout

Con il termine layout ci si riferisce al posizionamento e alla disposizione di risorse fisiche all'interno di una fabbrica. Queste risorse possono essere, ad esempio, macchine, scorte intermedie, percorsi all'interno dello stabilimento e flussi di materiale (Haverila et al., 2009). Dunque, si può definire un buon layout quando all'interno dello stabilimento le strutture e le attrezzature vengono utilizzate nel modo più efficiente possibile.

Come ci si può aspettare, più grande sarà il layout di un impianto produttivo, maggiori saranno i fattori, spesso correlati tra loro, da tenere in considerazione, soprattutto maggiore sarà la complessità in fase di progettazione. Questo è uno dei motivi per cui la selezione del layout comporta sempre un compromesso (Haverila et al., 2009). Come descritto da Tompkins, White, Bozer e Tanchoco nel loro libro, *Facilities Planning* (2003) il layout deve essere attentamente pianificato per permettere il corretto flusso dei materiali all'interno della linea produttiva, priorità ineccepibile, soprattutto nelle grandi fabbriche automatizzate dove vengono prodotti elevati volumi. Inoltre, anche i reparti di manutenzione e magazzini sono fondamentali nella fase di progettazione del layout poiché anche brevi interruzioni della linea produttiva, dovuti a guasti o assenza di materiale intermedio, possono influenzare notevolmente la produzione.

Lo studio del layout può riferirsi a (Galante, 2018):

- Modifiche parziali di un layout esistente
- Trasformazione generale
- Trasferimento degli impianti in uno stabilimento già esistente
- Costruzione di un nuovo stabilimento

Il layout produttivo trattato in questa tesi mira a produrre batterie agli ioni di litio per auto elettriche. L'obiettivo principale della tesi si focalizza sulla progettazione del layout analizzato sotto diversi punti di vista: la movimentazione del materiale, la disposizione dei macchinari necessari, i costi, i tempi di lavorazione e l'utilizzo dello spazio.

2.1.1 Il problema del layout

Il problema trattato in questa tesi è quello della progettazione del layout di uno stabilimento industriale che consiste, come già detto, nell'individuazione del numero di macchine necessarie alla realizzazione di una data produzione e nella ricerca della loro migliore disposizione all'interno dell'impianto. È un problema di notevole complessità in quanto, secondo Haverila, Uusi-Rauva e Kouri (2009), bisogna tenere in considerazione diversi fattori durante la progettazione del layout:

- Bill of material (BOM) o Distinta Base, ovvero l'elenco delle materie prime e delle parti di cui è composto il prodotto finale.
- Individuazione ed organizzazione della sequenza delle fasi di lavoro, ovvero il ciclo di lavorazione.
- Volume e capacità di produzione.
- Durata totale della produzione, espressa in anni.
- Determinazione delle strutture di supporto: reparti di manutenzione, strutture per i dipendenti come spogliatoi e sala pranzo, ecc.

Le risorse impiegate saranno singole macchine o centri di lavoro, ovvero interi reparti di lavorazione, celle di lavorazione, linee di lavorazione o di assemblaggio. Si cercherà la migliore disposizione planimetrica delle risorse all'interno dell'impianto industriale destinato alla produzione di celle di batterie al litio, in modo da conseguire gli obiettivi individuati (Galante, 2018).

2.2 Tipologie di layout

Per procedere alla progettazione del layout è opportuno individuarne preliminarmente la tipologia più adatta tra quelle ormai consolidate (Galante, 2018). A tal fine è necessario esaminare i seguenti tre aspetti del processo produttivo, rappresentati in figura 2.1:

- modalità di risposta alla domanda
- modalità di realizzazione della produzione
- tecnologia di realizzazione del prodotto

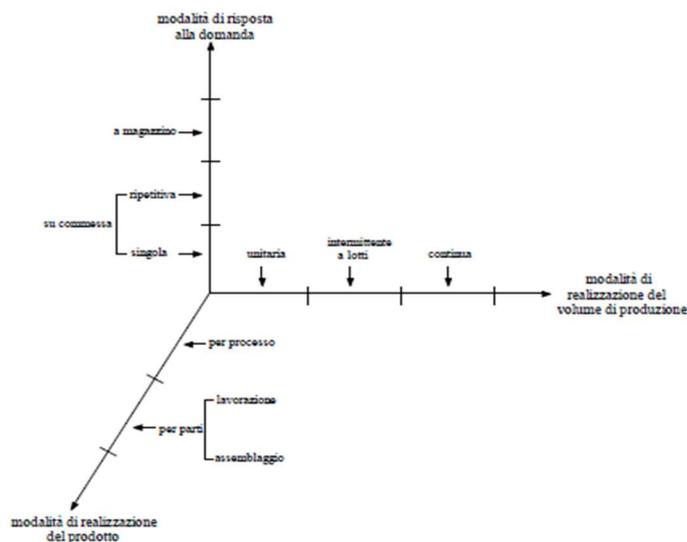


Figura 2.1 - Classificazione dei sistemi di produzione (Corso di Impianti industriali, 2018)

In base agli attributi sopra elencati, negli stabilimenti moderni si individuano quattro principali combinazioni di layout: a punto fisso, per reparti o per processo, per prodotto e per gruppi o isole. Nei paragrafi che seguono verrà trattata ognuna di essa, analizzando le principali caratteristiche ed i relativi vantaggi e svantaggi, al fine di individuare la migliore soluzione, per il nostro studio, rispetto alle altre.

2.2.1 Layout a punto fisso

Questa tipologia di layout è adatta per la produzione di oggetti voluminosi e pesanti, come ad esempio macchine, utensili, navi e aerei, in quanto la caratteristica fondamentale si basa sulla minimizzazione dei movimenti dei materiali, o del componente principale del prodotto, mentre le attrezzature, il personale ed i componenti del prodotto confluiscono verso tale posizione (Cagliano, 2020).

I vantaggi di tale scelta interessano la minimizzazione degli investimenti di capitale nel layout, la riduzione del movimento dei prodotti e l'ampliamento delle capacità professionali e la responsabilizzazione dei dipendenti. Invece, gli svantaggi riguardano il movimento e posizionamento delle macchine lungo e costoso, il basso tasso di utilizzo delle macchine per i tempi di spostamento e posizionamento e la necessità di maestranze molto qualificate.

2.2.2 Layout per reparti

È indicato anche come layout per processo o funzionale o ancora job shop. Le macchine di uno stesso tipo di lavorazione, ad esempio verniciatura, sono riunite in un unico reparto (reparto verniciatura), come viene illustrato in figura 2.2. Viene indicato principalmente per prodotti richiesti in quantità limitata e spesso non standardizzati (meccanica pesante), che hanno cicli di fabbricazione differenziati (Galante, 2018).

I vantaggi presentati dal layout per reparti sono: la possibilità di controllo di processi ad alta precisione o complessi, soddisfazione dell'operatore che esegue compiti diversi, minore influenza dei guasti delle macchine rispetto al layout per prodotto e flessibilità della produzione. Mentre gli svantaggi: lunghe linee di flusso e quindi maggiori costi di movimentazione, necessità di magazzini intermedi e bassa utilizzazione delle macchine.

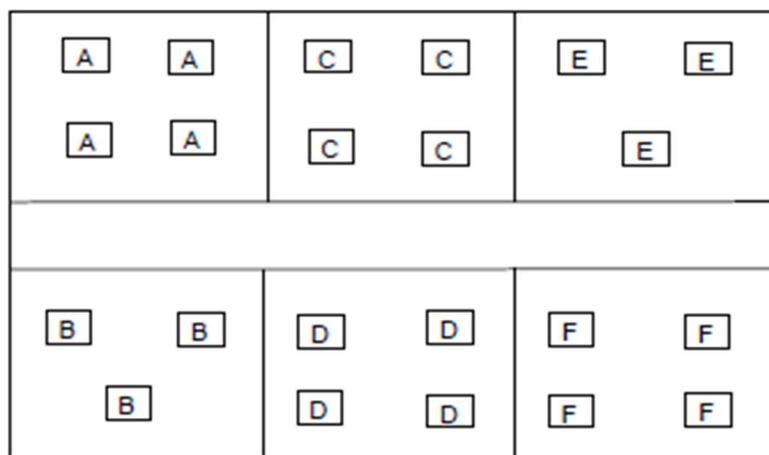


Figura 2.2 - Layout per reparti (Corso di Impianti industriali, 2018)

2.2.3 Layout per prodotto

In figura 2.3 viene mostrata, in maniera semplificata, la struttura produttiva del layout per prodotto, costituita da una successione di macchine utilizzate per realizzare una sequenza prefissata di lavorazioni, per prodotti richiesti in grande quantità e con varianti limitate, caratteristico delle industrie manifatturiere per la grande produzione in serie (es: settore automobilistico). Le linee di produzione dedicate di tale configurazione possono essere manuali ma, nella maggior parte dei casi, automatiche (linee a trasferta).

I vantaggi sono: linee di flusso semplici, movimentazione materiali ridotta, alta utilizzazione delle macchine, tempo di produzione breve e basse scorte di produzione (Galante, 2018).

Gli svantaggi: scarsa flessibilità, produttività legata alla macchina più lenta e il guasto di una macchina spesso blocca la linea.

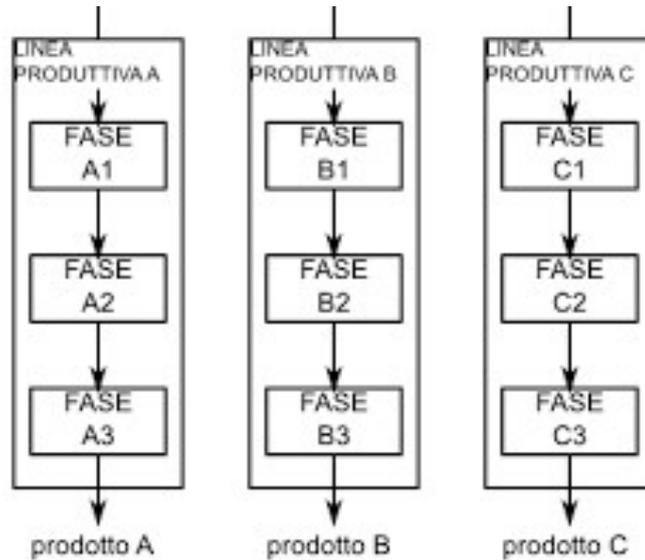


Figura 2.3 - Layout per prodotto (Corso di Impianti industriali, 2018)

2.2.4 Layout a isola

Conosciuto anche come layout per gruppi o layout a celle, questa soluzione di impianto è utile per produzioni di piccola e media serie (Galante, 2018), giustificato dal fatto che non dispone di linee produttive dedicate a differenza del layout per prodotto, come viene mostrato in figura 2.4. L'impianto è diviso in sezioni o gruppi di macchine diverse che riuniscono in un unico spazio tutte le lavorazioni su una famiglia di prodotti o di pezzi simili. La famiglia è caratterizzata dalla similitudine dei cicli di lavorazione ed ogni sezione, con il suo gruppo di macchine, prende il nome di cella di lavorazione (Galante, 2018).

I vantaggi di tale struttura sono: riduzione dei tempi e dei costi di attrezzaggio rispetto al layout per reparti, riduzione del lead time e riduzione dei costi di trasporto.

Gli svantaggi invece consistono maggiormente nella diminuzione della flessibilità dell'impianto rispetto al layout per reparti.

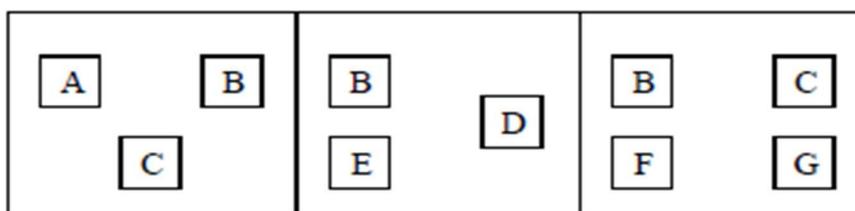


Figura 2.4 - Layout per gruppi (Corso di Impianti industriali, 2018)

2.2.5 Scelta del layout

Quando si sceglie e si pianifica il layout, i fattori sopra menzionati devono essere coinvolti nel processo decisionale (Galante, 2018). In figura 2.5 sono mostrate le aree di impiego delle tipologie di layout descritte in funzione del numero di tipologie di prodotti da realizzare e del volume di produzione. Poiché ci sono più di 20 fasi di lavoro nella produzione di celle di batterie agli ioni di litio e disposte sempre nello stesso ordine, il layout per prodotto (production line) risulta essere la scelta più adatta per il nostro studio. Inoltre, l'elevato volume di produzione è adatto al volume produttivo del layout per prodotto.

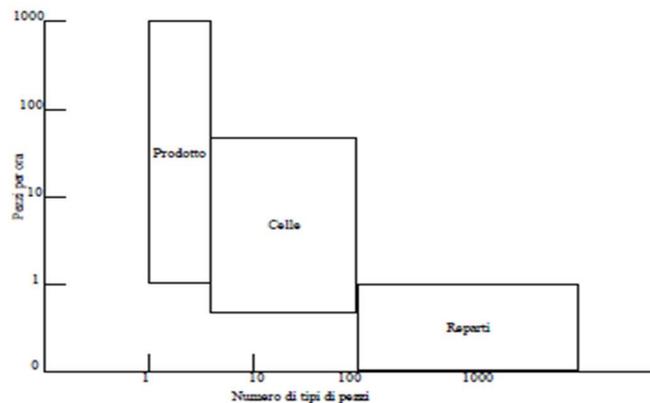


Figura 2.5 - Scelta del tipo di layout (Corso di Impianti industriali,

2.3 Automazione nei sistemi produttivi

L'automazione nell'ambito dei sistemi di produzione riguarda:

- i sistemi di lavorazione
- i sistemi informativi per la pianificazione e il controllo del flusso di materiali e di informazioni all'interno del processo produttivo.

Nei moderni sistemi produttivi le due categorie spesso si sovrappongono in quanto anche le risorse produttive sono gestite da calcolatori e connesse a un sistema centralizzato di gestione aziendale. Il termine Computer Integrated Manufacturing (CIM) è usato per indicare l'impiego dei calcolatori nei sistemi di produzione ma si riferisce anche ad aspetti legati alla progettazione delle linee di lavorazione e assemblaggio automatizzate. Tuttavia, anche nei sistemi di produzione automatizzati, le risorse umane costituiscono una componente necessaria per il funzionamento del sistema. Il loro impiego viene richiesto sia nelle operazioni di lavorazione sia nei sistemi di supporto alla produzione (Galante, 2018).

2.4 Il processo produttivo

In questo paragrafo viene descritto il processo di produzione delle celle agli ioni di litio. Il processo produttivo di batterie al litio ha circa 20 fasi di lavorazione e la figura 2.6 introduce l'attuale stato dell'arte del processo di produzione delle batterie. La sequenza che viene descritta è un esempio di linea produttiva attraverso la quale le batterie possono essere prodotte, per cui è possibile ipotizzare una diversa sequenza di lavorazione sotto.

La produzione di celle agli ioni di litio può essere divisa in tre fasi principali: electrode manufacturing, ovvero la produzione di elettrodi; cell assembly, in riferimento all'assemblaggio delle celle; cell finishing, dove la cella si forma elettricamente (iScience, 2021). Le fasi di electrode manufacturing e cell finishing sono indipendenti dal tipo di cella prodotta, mentre nella fase di cell assembly vi è una distinzione del processo produttivo tra celle cilindriche, prismatiche e pouch.



Figura 2.6 - Fasi del processo di produzione di una batteria agli ioni di litio (iScience, 2021)

Nei paragrafi che seguono verrà descritta ogni singola fase del processo produttivo, analizzando, per ogni attività, le principali caratteristiche produttive ed i relativi macchinari utilizzati nei vari processi.

2.4.1 Electrode Manufacturing

Per la fabbricazione degli elettrodi vengono utilizzati dei rotoli, di rame e di alluminio, illustrati in figura 2.7. Ogni attività ha diverse capacità e velocità di produzione e, di conseguenza, un numero differente di macchine utilizzate (Liu et al., 2014).

I rotoli degli elettrodi possono essere movimentati mediante nastri trasportatori, robot o carrelli elevatori automatizzati. Un modo semplice per facilitare la movimentazione 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 successiva fase di lavorazione. Nonostante l'utilizzo di trasportatori e robot sarà indispensabile la presenza di risorse umane a supporto di ogni attività.



Figura 2.7 - Rotoli per produrre gli elettrodi (FAAM, 2019)

I reparti lavorativi presenti in questa fase vengono riportati di seguito:

- *Electrode Slurry Mixing*
- *Coating*
- *Drying*
- *Solvent Recovery System*
- *Caledering*
- *Slitting*
- *Vacuum Drying*

Electrode Slurry Mixing

Come primo passo, le polveri di materiale secco di anodo e catodo, comunemente chiamate materiale attivo (carbonio, legante e additivi), vengono miscelate all'interno di grandi serbatoi. Nonostante ci siano diverse ricerche in corso sulle tecniche di rivestimento a secco, come la deposizione elettrostatica, tecniche laser e colata semisolida, gli attuali impianti di produzione utilizzano ancora le tecniche di rivestimento a umido.

In particolare, per l'elettrodo catodico (positivo) si utilizza un foglio di alluminio; mentre lo slurry è di solito costituito da un solvente come N-metil-2-pirrolidone (NMP), un additivo, come il nerofumo che è usato per migliorare la conduttività della batteria, un materiale legante come il fluoruro di polivinilidene (PVDF) (Yoshio, Brodd & Kozawa 2009; Li, Daniel & Wood, 2011). Spesso, vengono utilizzati il LiCoO_2 , LiNiO_2 , o un materiale tridimensionale (LiNiMnCoO_2) come materiale attivo per l'anodo, al fine di offrire migliori prestazioni della batteria nei veicoli elettrici (EVs) (Zheng, Tan, Liu, Song & Battaglia 2012).

Mentre, per l'elettrodo anodico (negativo) si utilizza un foglio di rame e per la preparazione dello slurry si utilizza lo stesso solvente dell'anodo, ovvero materiali conduttivi e leganti (Yoshio et al. 2009; Li et al. 2011), ma il materiale attivo è il carbonio invece che la grafite (Yoo, Frank & Mori 2003).

Quando le miscele sono pronte, vengono immagazzinate nei rispettivi serbatoi di stoccaggio e infine trasportate alla sezione di miscelazione attraverso dei tubi.

La preparazione dello slurry anodico è relativamente facile e può essere realizzata con le tecniche di miscelazione convenzionali. Differentemente, la preparazione dello slurry catodico risulta essere un po' più complessa e richiede lo sviluppo di nuove tecniche per ottenere una batteria efficiente nella fase finale (Liu, Chen, Liu, Fan, Tsou & Tiu, 2014).

I produttori possono utilizzare diversi sistemi di miscelazione in base alla configurazione della cella da produrre e dei requisiti di qualità richiesti. I più comuni sono i miscelatori a lotti come miscelatori intensivi, miscelatori planetari o miscelatori continui. Di solito, vengono utilizzati miscelatori diversi per l'anodo e il catodo al fine di evitare la contaminazione incrociata e ridurre il tempo non produttivo associato alla pulizia.

Coating

Lo slurry miscelato nella precedente fase di mixing viene inviato alle macchine per il rivestimento in modo continuo o intermittente su sottili fogli dell'anodo e del catodo (rame o alluminio) chiamati collettori di corrente (iScience, 2019). A seconda del tipo di macchina utilizzata per il rivestimento, è possibile applicare una fase di asciugatura e recupero del solvente che rimuove l'NMP (N-metiletil-2-pirrolidone), considerato dannoso per l'ambiente. Il meccanismo di rivestimento è di solito un rullo o una spruzzatrice.

Drying

La fase di drying (asciugatura) è una fase a sé stante, che avviene all'interno di una camera di essiccazione. Essa viene azionata da un riscaldamento convettivo dell'aria o da un riscaldamento a infrarossi. La temperatura raggiunta all'interno della camera di essiccazione è tipicamente di 50-180 °C, temperatura attraverso la quale si raggiunge una migliore efficienza (Novarese, 2019).

Grazie allo sviluppo di recenti tecnologie, la fase di asciugatura viene effettuata in serie al coating, al fine di risparmiare tempo e costi.

Solvent Recovery System

Generalmente, lo slurry anodico e catodico contiene 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. In particolare, nelle più comuni celle di batterie, i materiali catodici contengono NMP (N-metil-2-pyrrolidone) come solvente, in quanto per l'anodo viene usata dell'acqua (Babcock & Wilcox, 2018).

In un impianto industriale di celle di batterie agli ioni di litio, il recupero del solvente è un sistema suddiviso in più parti che raccoglie il solvente, attraverso l'evaporazione, dal rotolo rivestito, lo filtra e lo riporta al processo di miscelazione. 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 (Thomas, 2017). I processi di drying e di recovery solvent hanno il più alto consumo di energia (46,8%).

Calendering

La batteria agli ioni di litio è nota per avere la più alta densità volumetrica di energia rispetto ad altri tipi di batterie. Questo perché gli elettrodi rivestiti vengono compressi, con una serie di rulli, attraverso una macchina di compattazione per ottenere due principali vantaggi: il primo è quello di ridurre le dimensioni e raggiungere lo spessore desiderato; il secondo vantaggio è quello di massimizzare la densità volumetrica di energia degli elettrodi (Babcock & Wilcox, 2018). Questo processo avviene nella fase chiamata calendering.

Dopo che i rulli ad alta pressione della macchina compattatrice hanno pressato gli elettrodi rivestiti, questi ultimi vengono avvolti in rotoli e trasportati al reparto successivo, dove verranno tagliati.

Slitting

Gli elettrodi provenienti dalla fase di calendaring vengono poi tagliati durante lo slitting, al fine di ridimensionare i fogli in base alle misure richieste. I rotoli generano quindi i cosiddetti “rotoli figlia”.

Il taglio viene fatto per celle cilindrica e non per celle pouch o celle prismatiche. Il taglio è una fase molto critica che deve essere eseguita correttamente ed eventualmente verificata nel laboratorio di controllo per assicurarne la conformità rispetto le misure richieste.

Il metodo standard di taglio degli elettrodi è quello meccanico tramite lamine. Tuttavia, questo metodo ha una serie di svantaggi come l'elevato capitale iniziale, la non versatilità con forme di elettrodi variabili e l'usura degli strumenti di taglio in breve tempo. Una valida alternativa attualmente impiegata in questa fase è il taglio laser. Grazie alla sua natura senza contatto, il taglio laser riduce l'usura dei componenti e potrebbe essere facilmente utilizzato su vari tipi di forme e geometrie di elettrodi con un alto livello di velocità, risparmiando costi ed ottenendo maggiore efficienza (Kronthaler et al., 2012).

I singoli rotoli separati vengono poi puliti e riavvolti. Questi rotoli vengono asciugati sottovuoto per rimuovere ogni residuo quantità di solvente rimanente.

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 più bassa possibile, in modo tale da avere una più lunga durata della batteria. Questo è reso possibile grazie al processo di essiccazione sottovuoto, nonostante richieda un intenso consumo di energia e tempo. Secondo una ricerca condotta da Eser et al., l'anodo di grafite contiene una quantità di umidità molto più elevata rispetto al catodo a causa dell'umidità residua nel legante carbossimetilcelluloso (CMC) acquoso (Stich et al., 2017). L'attuale tecnologia di essiccazione di solito pone gli elettrodi sotto un ambiente a bassa pressione con riscaldamento 60C-150C per oltre 12 ore. Tuttavia, riportare un basso livello di umidità non sempre comporta una migliore efficienza elettrochimica e delle proprietà meccaniche delle batterie.

2.4.2 Cell assembly

Dopo la fase di produzione, gli elettrodi formati dovranno essere inseriti all'interno della custodia della batteria, chiamata coffee bag, riempita successivamente con l'elettrolita e sulla quale vengono saldate le linguette. Infine, la custodia viene chiusa e sigillata.

L'elettrolita deve essere correttamente versato all'interno della custodia poiché la formazione e i processi di invecchiamento dipendono da esso, così come le prestazioni complessive della batteria in termini di capacità, durata del ciclo e sicurezza. Non ci deve essere allagamento o esaurimento in quanto ciò influenzerà le prestazioni complessive della cella (Sheng 2015).

Successivamente, la cella è pronta, le linguette saldate e il contenitore sigillato, per cui le celle vengono confezionate da un robot in un ambiente controllato per facilitarne l'immagazzinamento nella fase di formazione dei cicli.

I reparti lavorativi presenti in questa fase vengono riportati di seguito:

- *Electrode shaping – Notching*
- *Stacking or Winding*
- *Welding*
- *Packing*

Electrode shaping – Notching

Per una cella pouch c'è un ulteriore passo prima della fase di stacking, dove i singoli rotoli tagliati vengono separati. I “rotoli figlia”, derivanti dal taglio del rotolo padre in più sezioni, sono separati in lamine sottili tramite punzoni taglienti che generano fogli delle dimensioni desiderate (iScience, 2021). 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.

Stacking or Winding

Una volta separati, i fogli anodici e catodici vengono poi posizionati ed impilati alternativamente l'uno sull'altro per formare la cella, operazione chiamata stack of cell, all'interno dei quali viene posizionato un foglio separatore formato da un film polimerico poroso con la funzione di assorbire l'elettrolita e allo stesso tempo impedire il contatto fisico tra i due elettrodi (MOTUS, 2020).

Per le celle prismatiche e cilindriche, i rotoli di elettrodi sono avvolti insieme con i rotoli separatori (processo chiamato jelly roll) nella fase di avvolgimento (winding).

Welding

Le tecnologie di saldatura all'avanguardia sono altamente automatizzate. Tuttavia, i processi relativi alla giunzione presentano ancora numerosi problemi, che possono causare seri problemi di sicurezza o di danneggiamento della linguetta (Brand et al., 2013; Zhao et al., 2014). Attraverso questo processo, le linguette dei collettori vengono quindi saldate ai due poli degli elettrodi.

La tecnica di saldatura ad ultrasuoni è ampiamente utilizzata per la giunzione delle linguette delle celle pouch (Zwicker et al., 2020); mentre la saldatura a punti di resistenza è una valida alternativa per le celle cilindriche e prismatiche. Sebbene la saldatura a ultrasuoni abbia alcuni vantaggi come un basso consumo di energia e la capacità di unire materiali dissimili, la limitazione dello spessore del giunto e la potenziale generazione di un elevato calore possono limitare i casi di applicazione. La saldatura a resistenza ha un basso costo e un basso apporto termico. Tuttavia, gli svantaggi includono la difficoltà di unire materiali altamente conduttivi e dissimili (Das et al., 2018).

La saldatura costituisce solo il 7,34% del costo totale di produzione e consuma meno del 2% dell'energia totale.

Packing

Le celle che soddisfano i requisiti sono pronte per essere confezionate nella coffee bag, dove vengono cablate e collegate tra loro per raggiungere la tensione e la capacità di corrente necessaria a rispettare i requisiti del modulo della batteria. Ogni cella è racchiusa in questi contenitori, che vengono quindi parzialmente sigillati prima di iniettare l'elettrolita. Il rivestimento viene sigillato solo su tre lati, poiché il quarto serve per l'aggiunta dell'elettrolita.

Lee, Kim, Hu, Cai & Abell (2010) sostengono che la batteria si ottiene come risultato di diversi livelli di gerarchia di connessioni che sono: connessione elettrodi-tab, connessione cellula-cellula per determinare un livello unitario, connessione cella-cella per un assemblaggio modulare e infine la connessione modulo- modulo per un livello di pacco di batteria, come chiaramente indicato nella Figura 2.8.

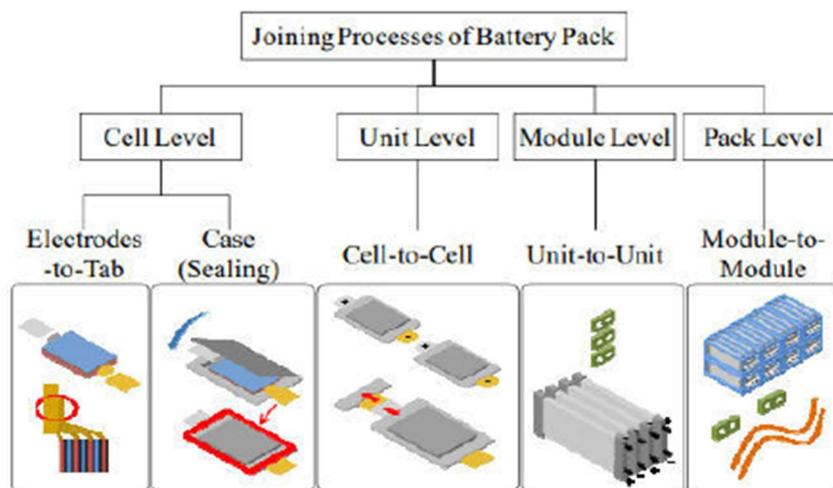


Figura 2.8 - Gerarchia per l'assemblaggio di un pacco di batteria (iScience, 2021)

2.4.3 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 di Solid Electrolyte Interface (SEI) sul film anodico 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 definitivamente nel veicolo.

I reparti lavorativi presenti in questa fase vengono riportati di seguito:

- *Electrolyte Filling and Final Sealing*
- *Formation and Aging*
- *Quality Control and Sorting*
- *Additional Systems and Utilities*

Electrolyte Filling and Final Sealing

L'elettrolita viene versato nella cella da un ago dosatore di alta precisione. La fase di electrolyte filling si può suddividere in due sottofasi, che si manifestano in due periodi temporali diversi: la prima, in cui si riempie la cella sottovuoto con l'elettrolita (fase di riempimento o filling), mentre nella seconda viene applicata una pressione per attivare gli effetti capillari della cella stessa (fase di bagnatura o wetting).

La tecnica di wetting ottimale dell'elettrolita per le celle pouch avviene mediante pressatura a rulli; mentre per le celle prismatiche e cilindriche si utilizza un tavolo

vibrante (Wood, Li and Daniel, 2015). La cella viene poi sigillata usando il sottovuoto per le celle pouch e la piegatura a z o saldatura per le celle prismatiche e cilindriche (iScience, 2021).

Formation and Aging

Questa è una fase molto importante nella produzione delle batterie. Durante tutta la linea produttiva delle batterie agli ioni di litio, le celle si trovano in uno stato non carico. La prima carica della cella avviene in questa fase, chiamata formation, dove una reazione genera l'elettrochimica dei materiali e aiuta ad immagazzinare energia elettrica, formando un'interfaccia elettrolitica solida sull'anodo quando il materiale attivo nei film dell'elettrodo entrano in contatto con l'elettrolita (Yoshio et al. 2011; Lu, Li, Schneider & Harris 2014).

Sostanzialmente, alle celle, dopo la prima carica, vengono applicati una serie di cicli di carica e scarica continui per determinare l'invecchiamento delle stesse e identificare quelle con prestazioni ridotte. Durante questo processo, uno strato di interfaccia protettiva noto come interfaccia dell'elettrolita solido si forma tra l'elettrolita e le particelle di grafite dell'anodo. Le celle sono conservate in scaffali o torri di invecchiamento, dove vengono monitorate le caratteristiche della cella e le prestazioni misurando la tensione a circuito aperto, la capacità e l'impedenza per un periodo di tempo considerevolmente lungo.

L'invecchiamento (aging) può avvenire a temperature elevate (30-50 °C) così come anche alle normali temperature ambiente. Il tempo di invecchiamento può variare fino da 1, 3 o 5 settimane, e quando le proprietà della cella sono stabilizzate nel tempo, l'invecchiamento è considerato concluso e la cella viene inviata per il controllo di qualità finale. Diversi fornitori possono utilizzare diverse soluzioni di invecchiamento come quello ad alta temperatura e quello ambientale (iScience, 2021).

I processi di formazione e invecchiamento richiedono la maggior parte del consumo energetico, del tempo e spazio nella produzione delle celle.

Quality Control and Sorting

Dopo l'invecchiamento, prima che le celle lascino la fabbrica, vengono testate in un banco di prova End of Line (EOL). Le celle vengono rimosse dai supporti buoni nei rack di invecchiamento e portate alla stazione di test (Heimes et al, 2019).

Qui, le celle vengono scaricate allo stato di carica di spedizione, misurando la loro capacità. In base al produttore, vengono eseguiti ulteriori test in questo processo, come test a impulsi, test di tensione a circuito aperto, test di perdita, misure di resistenza interna, e ispezioni ottiche. Una volta raccolti i dati derivanti dai test sulle prestazioni, le celle vengono suddivise in base alla qualità e imballate per la distribuzione.

Additional Systems and Utilities

Durante i processi di drying e calendering, sono necessarie, come già accennato nei paragrafi precedenti, unità separate per il trattamento del flusso di scarico del solvente, che include il recupero del solvente e il controllo dell'umidità (Heimes et al, 2019). Inoltre, le diverse fasi del processo richiedono condizioni ambientali specifiche. Pertanto, esistono diversi requisiti di condizionamento dell'aria che richiedono alti consumi di energia come la dry room, dove è necessaria aria secca (<1% di umidità) con punto di rugiada da 40 a 70 °C. L'aria secca per la dry room richiede un sistema di deumidificazione separato. Allo stesso modo, per i processi di drying e vacuum drying (essiccazione sottovuoto), è richiesta aria secca (<15% di umidità) con punto di rugiada che varia da 0 a 5 °C e da 0 a 30 °C, rispettivamente per i due processi (iScience, 2021). Sebbene queste unità aggiuntive aumentino il consumo di energia, esse forniscono anche l'opportunità di ridurre i consumi energetici e i costi sfruttando i metodi di recupero del calore e del solvente.

2.5 Macchine impiegate nel processo produttivo

Le tecnologie attualmente esistenti per la produzione delle celle di batteria giocano un ruolo importante nello sviluppo continuo delle prestazioni delle batterie agli ioni di litio. Le macchine impiegate durante il processo produttivo sono particolarmente note per l'elevata velocità di produzione, dovuta principalmente all'alto tasso di automazione dei sistemi (Liu et al., 2014).

Precisione, affidabilità, durata, disponibilità e bassi costi operativi complessivi (Total Cost of Ownership - TCO) sono le caratteristiche principali dei sistemi di produzione high-tech. I singoli reparti, o sezioni delle linee di produzione, presentano un elevato grado di versatilità in quanto è possibile adattarli e disporli in base alle diverse richieste di produzione, grazie al design modulare delle varie macchine. In questo modo gli effetti sui parametri di prestazione della batteria sono di conseguenza positivi.

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.

Nei successivi sottoparagrafi, si analizzeranno ed illustreranno le principali tecnologie e metodologie per eseguire ogni attività del ciclo produttivo, riportando alcune esempi dei più moderni macchinari ad oggi impiegati per produrre le batterie al litio.

2.5.1 Slurry Mixer

A prescindere dal solvente, le materie prime dello slurry consistono in polveri. Lo slurry anodico viene versato, lungo un tubo, in un serbatoio separato rispetto allo slurry catodico. La fase di miscelazione dura quasi tre ore (Liu et al., 2014), ciò significa che i due serbatoi di miscelazione rimangono occupati per tre ore per produrre parallelamente le due tipologie di slurry.

Un'accurata miscelazione delle slurries rappresenta una sfida importante nel processo di produzione delle batterie, in quanto potrebbe influenzare irrevocabilmente i passaggi successivi nella produzione delle batterie. Liu D. et al. (Liu et al., 2014) hanno esaminato

diversi tipi di dispositivi di miscelazione e metodi di miscelazione, che vengono riportati in figura 2.9:

- Hydrodynamic shearmixing (HSM) è una tecnologia già matura, utilizzata in altri settori ma che può essere facilmente applicata anche all'industria delle batterie. È economica e può essere facilmente scalata. Il miscelatore HSM di solito include una barra di agitazione esterna come la turbina tipo Rushton. Le sollecitazioni sono il meccanismo principale per rompere gli agglomerati durante il processo.
- Ball Milling è anche un metodo comune per la miscelazione di polvere secca e slurry nella produzione di batterie, dove la miscelazione avviene tramite particelle a forma di sfera che colpiscono ed agitano lo slurry.
- Ultrasonic Mixing permette un'ottima miscelazione grazie al collasso di micro-bolle e micro-turbolenza. La miscelazione ultrasonica senza agitazione esterna consuma meno energia rispetto al metodo convenzionale HSM, specialmente per la miscelazione di slurry ad alta concentrazione (Kustersa et al., 1994; Nguyen et al., 2014; Kraytsberg e Ein-Eli, 2016).

La Ball Milling e Ultrasonic Mixing possono aumentare significativamente l'uniformità di miscelazione in presenza di polveri secche e slurry ad alta concentrazione, rispettivamente. Un esempio di macchinario per lo slurry mixing che utilizza il metodo ball milling è riportata in figura 2.10.

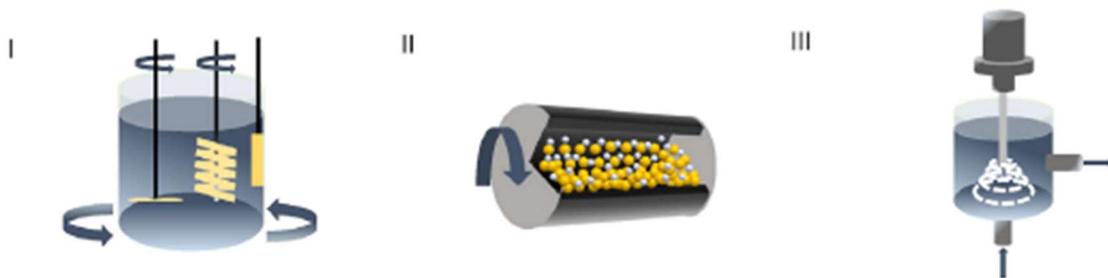


Figura 2.9 - Esempio dei metodi di mixing: (I) HMS; (II) ball milling; (III) ultrasonic (iScience, 2019)



Figura 2.10 - Esempio di una ball milling machine (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)

2.5.2 Coater and Dryer

I processi di coating e di drying sono quelli in cui si ripone maggiore attenzione. Durante la fase di rivestimento, lo slurry viene depositato sul collettore di corrente per formare un film sottile che viene asciugato e riavvolto in una bobina. La metodologia di rivestimento senza solventi (a secco), ancora in fase di sviluppo, potrebbe eliminare la fase di asciugatura, processo dispendioso in termini di energia e tempo. Tuttavia, la tecnologia di rivestimento a secco può attualmente raggiungere la produzione su scala pilota. Con l'aiuto degli sviluppi tecnologici nell'ambito, ha il potenziale per essere introdotta anche su scala industriale.

Gli strumenti utilizzati per il rivestimento degli elettrodi usufruiscono di diverse tecniche e tecnologie per depositare lo slurry sul film degli elettrodi, come lo slot die, il comma roll oppure il closed roll (Novarese, 2019), riportati in figura 2.11.



Figura 2.11 - Esempi delle tecniche di coating (FAAM, 2019)

Entrambi i lati del collettore di corrente vengono rivestiti e, a seconda della tecnica utilizzata, i due lati potrebbero essere rivestiti simultaneamente o separatamente. La

differenza risiede nel fatto che 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. Un esempio di entrambe le tecniche di rivestimento viene mostrato in figura 2.10, in cui si riporta il metodo di deposizione simultaneo di entrambi i lati con la tecnica dello slot die e un esempio di coating discontinuo a tre strisce (Novarese, 2019).

Inoltre, in figura 2.12 viene riportato l'esempio di un reale macchinario di coating che utilizza il sistema di rivestimento continuo (Novarese, 2019).

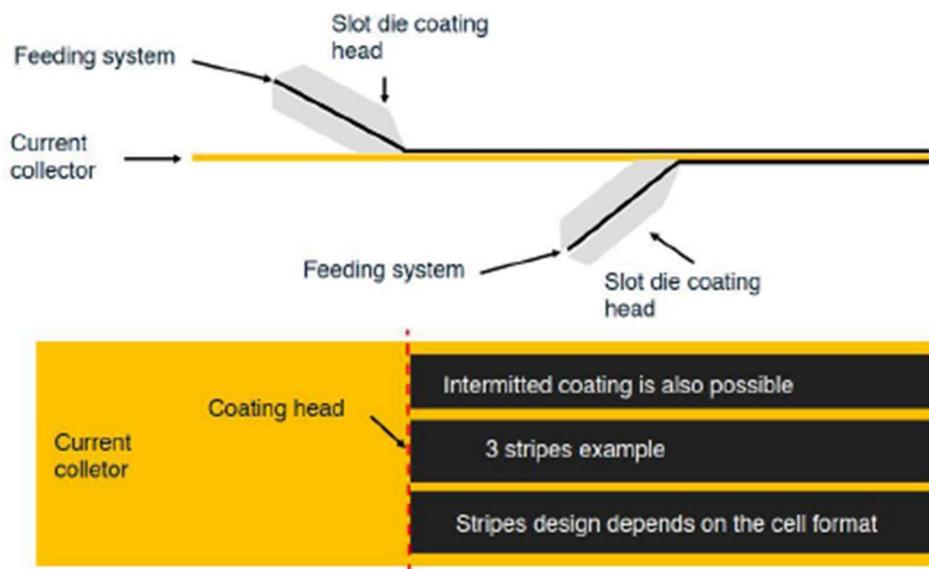


Figura 2.12 - Metodi di coating simultaneo (in alto) e coating discontinuo a tre strisce (in basso) (FAAM, 2019)



Figura 2.13 - Esempio di un coater continuo (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)

Una volta rivestito il film dell'elettrodo, quest'ultimo procede alla fase di drying. Le risorse necessarie per completare questa fase sono collegate in serie con i macchinari relativi al processo di coating. Il materiale passa attraverso diverse zone di asciugatura dove i solventi e il contenuto di acqua vengono evaporati. I solventi evaporati vengono poi raccolti e trattati. Tuttavia, come già descritto sopra, se la miscelazione viene fatta a secco, non sono presenti solventi (Novarese, 2019).

All'interno delle dry rooms, vengono utilizzate diverse tecniche per iniettare aria calda sulla superficie del film dell'elettrodo, grazie all'utilizzo di particolari ugelli. Alcuni esempi sono il jet nozzle (ugello a getto), il floating nozzle (ugello fluttuante) e l'airfoil nozzle (ugello a profilo alare), come illustrato in figura 2.14

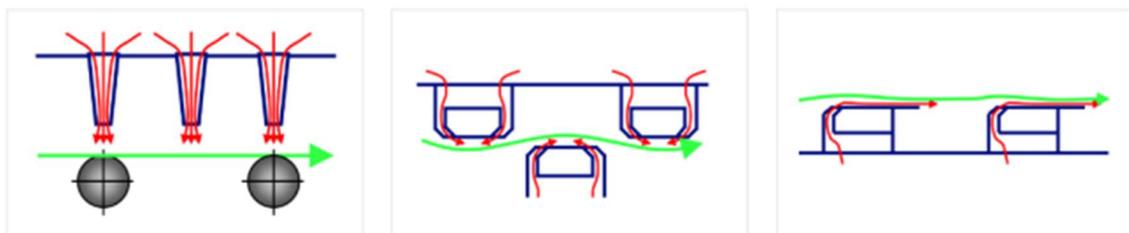


Figura 2.14 - Tecniche di drying: jet nozzle (sx), floating nozzle (centro), airfoil nozzle (dx) (FAAM, 2019)

2.5.3 Solvent Recovery System

Il sistema di recupero del solvente mira a ridurre il consumo di solvente nella produzione di elettrodi. In esso, è compreso il sistema di riciclaggio e combustione a emissioni sostenute. La figura 2.15 mostra le interazioni tra le parti del sistema.

Il sistema di concentrator e carbon bed possono essere condivisi all'interno della linea produttiva per l'anodo ed il catodo, ma per le fasi rimanenti sia la linea anodica che quella catodica richiedono principalmente un proprio sistema perché il solvente NMP recuperato contiene residui di materiale attivo anodico e catodico. 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, un sistema di ricircolo dell'aria o

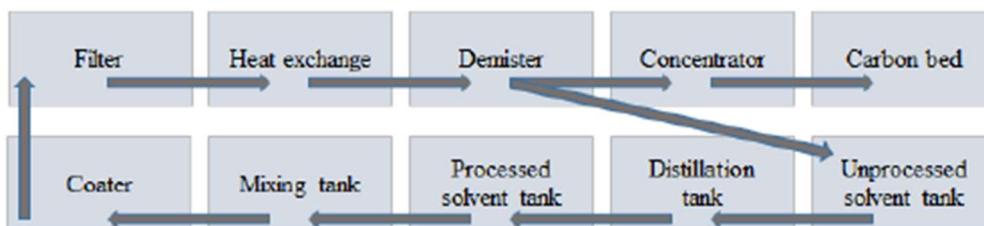


Figura 2.15 - Processo del Solvent Recovery System

un'unità di distillazione. L'aria carica di solvente passa in parallelo attraverso un certo numero di recipienti, chiamati adsorber, dove il solvente viene assorbito dal carbone attivo. Una volta che un adsorber risulta saturo di carbonio e il solvente inizia a filtrare, 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 degli inquinanti atmosferici pericolosi (HAP) prodotti dalle emissioni di processo al fine di soddisfare o superare i requisiti normativi ed infine, l'aumento della redditività riducendo i costi di acquisto per solventi.

Lo slurry viene raffinato e purificato seguendo l'ordine mostrato nella figura precedente e alla fine può essere riportato allo slurry mixer e successivamente al coater. (Babcock & Wilcox 2017a).

In figura 2.16 viene mostrato un esempio di macchinario per il recupero di solventi, dell'azienda produttrice cinese Calstar.



Figura 2.16 - Solvent Recovery System - Calstar

2.5.4 Calender

I rotoli del film rivestito possono essere trasferiti alla fase di calendaring attraverso dei nastri trasportatori, nella maggior parte dei casi automatizzati, per avviare il processo di compattazione. Durante questa fase, l'elettrodo viene trasportato attraversando una pressa a rulli per comprimere il materiale attivo (Liu et al., 2014).

I rulli di pressione assottigliano il film e dopo la compattazione la pellicola viene nuovamente arrotolata anche se, negli attuali impianti, l'unità di calendaring potrebbe essere collegata in serie con i macchinari del coating al fine di evitare l'inserimento, lungo la linea produttiva, di un'ulteriore unità di riavvolgimento del rivestimento, riducendo costi e spazi.

L'obiettivo principale in questa fase è quello di ridurre il volume dell'elettrodo per aumentare la densità volumetrica e appiattare la sua superficie. Tuttavia, comprimendo troppo l'elettrodo si potrebbe ridurre la sua porosità ad un livello in cui l'elettrolita non può penetrare nella sua struttura, compromettendo le prestazioni dell'elettrodo.

In figura 2.17 viene presentato un esempio di macchina impiegata nell'attività del calendaring che utilizza, inoltre, il processo roll-to-roll (R2R). La tecnica roll-to-roll consiste in genere in diversi rulli che avvolgono il materiale, di solito trasportato attraverso un nastro, svolgendo una serie di operazioni di fabbricazione.



Figura 2.17 - Esempio di calender che utilizza il processo roll-to-roll (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)

2.5.5 Slitter

Il foglio compattato viene trasferito, attraverso un nastro trasportatore, alla fase di slitting per essere tagliato. Partendo da un rotolo principale, anche chiamato jumbo roll, si ottengono diversi rotoli più piccoli, chiamati rotoli “figlia” della misura desiderata. La tecnica più utilizzata per il processo di slitting è quella a laser in quanto questa tecnologia offre maggiore flessibilità. Tuttavia, durante la fase di taglio si possono creare polveri di alluminio e di rame; in particolare si potrebbe incorrere al rischio di danneggiamento del materiale attivo o alla contaminazione dovuta a polveri quando viene utilizzata questa tecnica, per cui è obbligatorio aspirarle ed evitare qualsiasi contaminazione sulla superficie dell'elettrodo, che potrebbe compromettere il giusto funzionamento della cella finale assemblata.

Il processo di slitting può essere continuo o ad intermittenza a seconda della configurazione della cella. Per le celle pouch si utilizza il processo di taglio ad intermittenza; mentre per le celle prismatiche e cilindriche si utilizza il processo di taglio continuo (iScience, 2021).

In figura 2.18 viene riportato un esempio di macchinario impiegato per il taglio dei fogli degli elettrodi, che utilizza la tecnologia a laser.



Figura 2.18 - Esempio di laser slitting (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)

2.5.6 Vacuum Dryer

Una volta tagliati i fogli nella dimensione desiderata, è necessario applicare una fase di asciugatura a secco agli elettrodi 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 a secco potrebbe essere eseguita in diversi modi e potrebbe richiedere fino a 24 ore, anche se il sistema più comune ed utilizzato in commercio è l'utilizzo dei forni di asciugatura sottovuoto. Si riporta in figura 2.19 un esempio di essiccatore a camera, sviluppato dall'azienda produttrice di forni industriali Nabertherm.



Figura 2.19 - Essiccatore a camera (Nabertherm)

Il successivo processo di assemblaggio delle celle varia non solo a seconda della configurazione della cella (cilindrica, prismatica o sacchetto) ma anche dal tipo di design della cella: gli elettrodi potrebbero essere per esempio laminati con il separatore o semplicemente piegati ed impilati insieme ad esso. Dopo l'asciugatura, il processo di assemblaggio avviene in una stanza asciutta.

2.5.7 Electrode Notching Machine

Durante la fase di intaglio (notching), l'elettrodo viene modellato in base alla posizione di contatto e il materiale in eccesso viene esportato. L'intaglio viene effettuato preferibilmente prima dell'asciugatura degli elettrodi e fuori dalla camera di essiccazione poiché, producendo polvere metallica, potrebbe influenzare e compromettere le prestazioni della cella finale. Questa fase è necessaria soprattutto per la produzione della cella pouch.

In figura 2.20 viene mostrato, in maniera semplificata, il processo di intaglio degli elettrodi (Novarese, 2019).

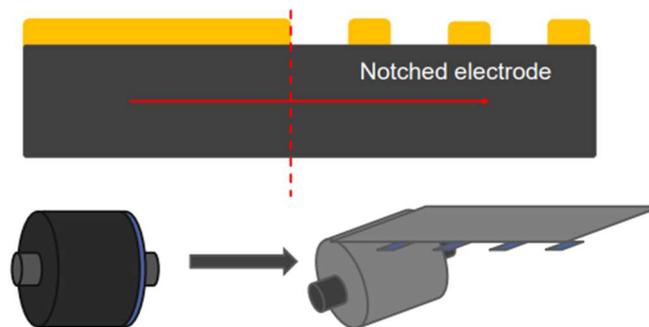


Figura 2.20 - Electrode notching process (FAAM, 2019)

2.5.8 Stacking Machine

Una volta intagliati, gli elettrodi vengono poi divisi e sovrapposti, alternativamente tra anodo e catodo, per formare delle pile, dove nel mezzo viene inserito il separatore, come viene sintetizzato in figura 2.21. A seconda del design della cella, in particolare per le celle aventi una configurazione prismatica, gli elettrodi vengono assemblati utilizzando un processo di impilamento (Novarese, 2019). Tuttavia, il metodo di avvolgimento dei fogli è generalmente il più comune.

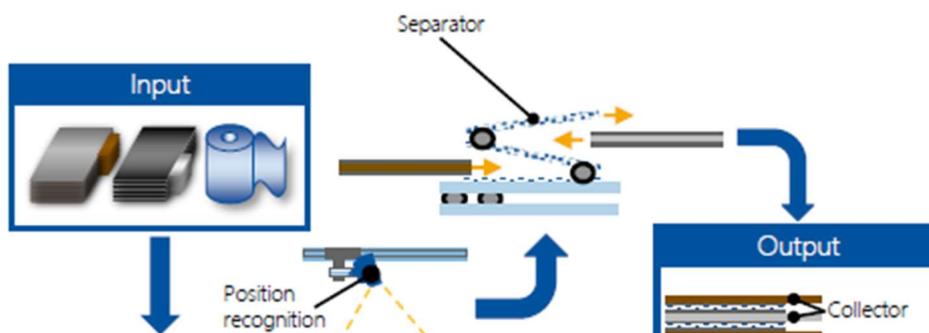


Figura 2.21 - Processo di stacking con il metodo z-folding (FAAM, 2019)

Durante la fase di impilamento, il separatore può essere inserito con diverse tecniche. Le più comuni sono: il flat winding (avvolgimento piatto), il single sheet stacking (impilamento di fogli singoli) e lo Z-folding (piegatura a Z). Questi metodi presentano però alcuni svantaggi. Da un lato, la gestione della struttura dei fogli non rigidi risulta complessa nel processo di impilamento che utilizza il metodo single sheet stacking. D'altra parte, il processo di impilamento flat winding influisce negativamente sulla qualità della cella a causa degli eccessivi carichi di processo applicati.

Di conseguenza, il processo che utilizza 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)

I fogli dell'anodo e del catodo sono inseriti alternativamente da sinistra e da destra nel separatore, e vengono successivamente piegati a forma di z, da cui deriva il nome Z-folding. Il separatore viene inserito da un nastro e la parte eccedente viene tagliata a fine processo. La pila di celle viene infine fissata con del nastro adesivo.

In figura 2.22 viene riportato un esempio di macchinario per la piegatura a Z semi-automatica.



Figura 2.22 - Automatic Pouch Z Folding Machine (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)

2.5.9 Welding Machine

In questa fase del processo, la cella viene trasferita alla stazione di saldatura delle linguette, dove i contatti positivi e negativi vengono saldati per formare i terminali della cella. Le linguette sono normalmente fatte di lega Al-Ni per catodo e Cu-Ni per l'anodo (Novarese, 2019).

La tecnologia attualmente più diffusa per saldare le linguette è la tecnica ad ultrasuoni, che collega queste ultime sul collettore di corrente impilato. In figura 2.23 viene mostrato un esempio di saldatrice ad ultrasuoni automatica, prodotta dall'azienda TMAX, utilizzata per saldare principalmente le celle cilindriche.

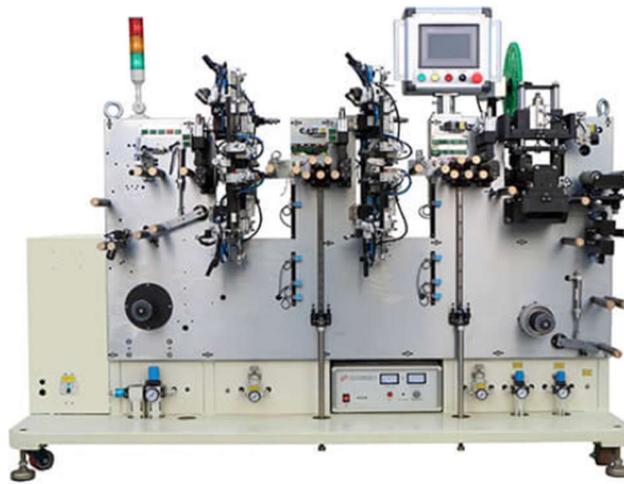


Figura 2.23 - Automatic Tab Welding Machine for Cylindrical Cell (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)

2.5.10 Sealing Machine

Il rivestimento esterno della cella è stampato per formare una cavità superiore e inferiore al fine di contenere la pila della cella prodotta fino ad ora, come mostrato in figura 2.24 per una cella pouch. Dopo che la pila delle celle è stata inserita nella cavità inferiore, il foglio viene piegato e la cella viene sigillata su tre lati tramite calore, lasciando aperto un solo lato per permettere l'inserimento dell'elettrolita nella successiva fase: viene utilizzato uno speciale polimero sulla superficie del foglio e delle linguette del sacchetto che, attraverso la fusione, sigilla la cella (Novarese, 2019).



Figura 2.24 - Sigillatura di una cella pouch (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)

Un esempio di macchinario automatizzato per la sigillatura per celle pouch viene riportato di seguito, in figura 2.25, prodotto dall'azienda TMAX.



Figura 2.25 - Automatic sealing machine for pouch cell battery (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)

2.5.11 Electrolyte Filling Machine

Le celle, aperte da un solo lato, sono trasportate alla stazione di riempimento, dove verrà inserito l'elettrolita. Il processo di electrolyte filling si può suddividere in due fasi: il riempimento (filling) e la bagnatura (wetting) (iScience, 2021). Nella prima, l'elettrolita viene introdotto all'interno delle celle dopo aver ottenuto il sottovuoto, con l'aiuto di un ago dosatore ad alta precisione. Successivamente, applicando una determinata pressione alla cella si attiva l'effetto capillare nella cella (bagnatura o wetting). Le fasi di filling e wetting vengono ripetute più volte a seconda del produttore e del tipo di cella. Le celle sono così sigillate e pronte per essere formate. Durante l'electrolyte filling, viene lasciata una sezione extra non sigillata nella cella, come si osserva in figura 2.26, poiché durante

il processo di formazione e carica della cella è possibile che si generino diversi gas (Novarese, 2019). Per cui, prima che le celle siano pronte per essere utilizzate, dovranno essere degassificate riaprendole sulla sezione extrapouch e risigillate di nuovo in sottovuoto, tagliando la sezione extrapouch.

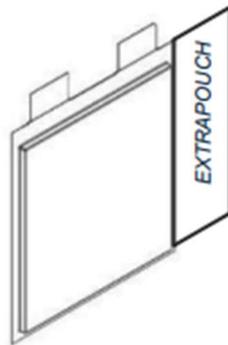


Figura 2.26 - Cella pouch sigillata con l'extrapouch (FAAM, 2019)

Di seguito, in figura 2.27, viene riportato un esempio di macchinario automatico per l'electrolyte filling, prodotto dall'azienda TMAX, che viene usato principalmente per l'iniezione dell'elettrolita liquido o gel all'interno delle celle, dopo aver applicato il sottovuoto alla custodia.



Figura 2.27 - Auto electrolyte filling machine (TMAX BATTERY EQUIPMENTS)

2.5.12 Formation e Aging Machine

Durante l'ultima macrofase del processo di produzione di una cella agli ioni di litio, queste ultime vengono: precaricate, formate (formation), ovvero vengono applicati diversi cicli di carica e scarica, degassificate (se necessario, come già detto nel paragrafo precedente), invecchiate (aging), testate, smistate ed immagazzinate (Novarese, 2019). Durante la formazione, gli ioni di litio sono incorporati nella struttura cristallina della grafite sul lato anodico. Qui si forma la Solid Electrolyte Interface, che crea uno strato di interfaccia tra

l'elettrolita e l'elettrodo. In figura 2.28 si riportano due esempi di macchinari utilizzati in questa fase del processo.

L'invecchiamento, o aging, rappresenta la fase finale della produzione delle celle ed è utilizzato per garantire un determinato livello di qualità della batteria. Durante l'invecchiamento, le caratteristiche e le prestazioni delle celle vengono monitorate misurando regolarmente la tensione a circuito aperto (OCV) della cella per un periodo di circa tre settimane. Viene fatta una distinzione tra invecchiamento ad alta temperatura (HT) e a temperatura normale (NT), le quali si effettuano in due fasi temporali distinte.

Durante il processo, le celle di solito vengono sottoposte prima all'invecchiamento HT e poi a quello NT. Le cellule vengono poi conservate in cosiddetti scaffali e/o torri di invecchiamento.

L'ordine e la durata di ogni fase di aging dipendono fortemente dal materiale utilizzato, dal tipo di cella prodotta e dalla tecnologia impiegata dal produttore. Si stima che l'intero processo può durare fino a 10-15 giorni e richiede un alto livello di automazione per essere efficiente dal punto di vista dei costi, soprattutto perché le celle vengono spostate da nastri rotatori da una stazione all'altra (Novarese, 2019).



Figura 2.28 - Automatic formation machine (Nabertherm)

2. Analisi Desk: Layout per la produzione di Batterie al Litio

In questo capitolo viene analizzato il processo e la metodologia utilizzata per la stesura della tesi. Successivamente, vengono esaminati i principali fattori utili a contestualizzare una gigafactory come il consumo energetico, i parametri qualitativi della linea produttiva ed i costi legati alla produzione. Infine, si riporta l'attuale stato dell'arte della progettazione e disposizione del layout di una gigafactory, evidenziando l'allocazione interna dei reparti, dei macchinari e delle facilities non direttamente legate alla produzione, introducendo due metodi utilizzati per la progettazione e determinazione delle risorse interne ad un impianto.

3.1 Metodologia e contenuti

La metodologia di ricerca è il quadro e la linea guida volta ad illustrare l'intero processo di ricerca. Il design della ricerca è una parte essenziale in qualsiasi processo di ricerca poiché sintetizza come esso risponde agli obiettivi di ricerca e alle richieste di ricerca (Saunders, Lewis & Thornhill, 2016). In questo capitolo viene riportato lo sviluppo del processo di ricerca utilizzato durante la stesura della tesi. Comprende le strategie di ricerca in termini di orizzonte temporale, lo scopo della ricerca, l'approccio della ricerca, gli strumenti di ricerca utilizzati e infine il processo di raccolta dei documenti e come essi vengono analizzati e classificati in questo studio per rispondere all'esigenza di ricerca individuata.

3.1.1 Processo di ricerca

Come menzionato nel capitolo 3.1, la fase di ricerca è definita come un quadro per lo svolgimento di attività di ricerca in diversi campi di studio. Il design della ricerca è classificato in due categorie importanti, vale a dire ricerca esplorativa e conclusiva. La ricerca conclusiva è ulteriormente suddivisa in una ricerca descrittiva e casuale.

In questo studio viene utilizzata una ricerca di tipo descrittivo poiché mira a riportare un'esposizione esauriente delle teorie e dei concetti che connotano l'argomento scelto, supportata dalle fonti e della ricerca attraverso l'analisi della letteratura, definita "literature review".

L'approccio della ricerca è un'altra importante fase che caratterizza il processo della ricerca. Questo perché l'approccio di ricerca scelto determinerà il modello di disegno di ricerca che alla fine aiuterà a classificare il contributo dei risultati della ricerca.

Ketokivi & Mantere (2010) hanno generalmente classificato l'approccio di ricerca in tre categorie: il ragionamento deduttivo, induttivo e abduttivo. I due ricercatori propongono che il ragionamento deduttivo è applicabile quando una serie di premesse sono le determinanti delle conclusioni e risultati di una ricerca. Le conclusioni e i risultati saranno considerati veri solo quando tutte le premesse sono vere. D'altra parte, Ketokivi et al. (2010) sostengono che nel ragionamento induttivo non ci sia bisogno di una relazione tra le conclusioni e i risultati della ricerca e le premesse osservate. È sufficiente che le conclusioni e i risultati siano considerati validi una volta che sono supportati dalle osservazioni fatte. In riferimento all'ultimo tipo di approccio suggerito da Ketokivi et al. (2010), il ragionamento abduttivo considera che un "fatto sorprendente" è semplicemente la razionale dietro l'inizio di una ricerca. La parte interessante è che il fatto sorprendente è considerato la conclusione piuttosto che una premessa. Quindi, sulla base della conclusione, è possibile generare un insieme di possibili premesse e poi considerarle sufficienti a spiegare la conclusione (Saunders et al. 2016).

Per questo studio, è stato considerato più appropriato adottare un approccio induttivo poiché le informazioni raccolte erano riferite a specifici processi e modalità di progettazione per impianti di LIB, ma che sono state combinate al fine di generare un'informazione generale sull'impianto di produzione di LIB.

3.1.2 Literature Review

Quindi, la prima attività condotta in questo studio è stata quella di effettuare una revisione della letteratura pertinente riguardante gli argomenti da esaminare durante lo studio. L'analisi della letteratura permette ai ricercatori di identificare le lacune dell'argomento di ricerca attualmente esistenti, oltre a fornire una comprensione più profonda dei campi di ricerca in cui lo studio sarà sviluppato (Collis e Hussey, 2013).

L'analisi della letteratura è stata divisa in due fasi principali: una per ottenere il quadro generale dell' stato dell' arte delle LIB; mentre la seconda con l'obiettivo di approfondire l'argomento scelto, fornendo un'analisi critica.

La prima analisi della letteratura, quella riguardante l'introduzione delle batterie ed i relativi processi di produzione, è stata condotta con l'obiettivo di capire e contestualizzare il ruolo delle batterie agli ioni di litio e come esse vengono prodotte ad oggi.

La seconda analisi della letteratura aveva l'obiettivo di riportare e descrivere i principali metodi con i quali si progetta un layout, in termini di linee produttive, macchinari, risorse, sistemi di stoccaggio, reparti di produzione ed assemblaggio, di un impianto di produzione di LIB, al fine di riportare la conoscenza attuale sull'argomento ed evidenziare i temi che necessitano di approfondimenti da parte dei successivi ricercatori. Una volta determinato il metodo da utilizzare, è stata condotta una revisione approfondita degli studi che utilizzano diverse tecnologie e metodi per progettare un impianto che produce batterie Li-ion.

L'approccio all'analisi della letteratura è stato quello di includere tutti gli articoli riguardanti gli argomenti citati, ma anche di analizzare quelli che spesso venivano citati da altri articoli. Le fonti utilizzate per la revisione della letteratura sono state Web of Science, Scopus, ResearchGate, MDPI ed infine Google Scholar, cercando di individuare quei documenti che presentavano un'alta affidabilità delle informazioni.

3.2 Caratteristiche di un impianto per LIB

La batteria è un fattore significativo che incide drasticamente nel prezzo di un veicolo elettrico, in quanto rappresenta il 60% dei costi di produzione e circa il 40% dei costi complessivi del veicolo elettrico (International Federation for Information Processing, 2013). Per quanto riguarda i veicoli che si posizionano ad una fascia di prezzo molto bassa, queste cifre possono aumentare significativamente, fino a che i costi della batteria superino il valore residuo del veicolo. Confrontando gli obiettivi e le prospettive future dell'elettrificazione degli EVs con la struttura dei costi dei veicoli elettrici, è ovvio che una riduzione dei costi sia indispensabile per espandere il mercato e raggiungere la produzione su larga scala in maniera efficiente.

Quindi, la riduzione dei costi nella produzione di batterie è possibile attraverso un approccio di ottimizzazione e miglioramento continuo del processo di produzione e organizzazione dell'impianto produttivo al fine di ottenere una concezione più strutturata della tecnologia impiegata nella catena di produzione (International Federation for Information Processing, 2013).

Una delle sfide attuali per il pianificatore, che rende complesso il processo di produzione di celle agli ioni di litio, nel processo decisionale è legata all'identificazione dell'impiantistica per ogni fase del processo. Questo ostacolo comprende la tipologia di tecnologia di produzione da utilizzare lungo la linea produttiva ed il collegamento di tutte le macchine e impianti al fine di rendere efficiente il flusso di materiale (Kampker et al, 2016). Questo porterebbe a investimenti più equilibrati sulle diverse fasi del processo e quindi ridurre i costi complessivi.

3.2.1 Consumo energetico di un impianto per LIB

Si prevede che l'elettrificazione globale del settore dei trasporti sia in rapido aumento nel prossimo decennio. Si prevede che lo stock globale di veicoli elettrici (EV) raggiungerà 140-245 milioni di unità entro il 2030, circa 30 volte la quantità attuale in commercio.

L'aumento delle richieste di EV influenza anche la domanda di batterie per autoveicoli, dove la capacità globale della batteria EV è prevista per essere aumentata dall'attuale valore di circa 170 GWh all'anno a 1,5-3 TW all'anno nel 2030. Questo spinge ad una notevole riduzione dei costi della produzione delle batterie insieme ad un miglioramento delle tecnologie impiegate. D'altra parte, l'uso crescente di batterie EV crea un significativo impatto sia sulla società che sull'ambiente, in quanto richiede decisioni politiche relative all'elettrificazione, all'allocazione delle risorse e degli investimenti e alla produzione di energia "green". Pertanto, c'è la necessità di disporre informazioni trasparenti soprattutto sul costo e sui requisiti energetici nella produzione delle batterie. A questo proposito, vengono riportati i dettagli energetici del processo di produzione delle batterie attualmente disponibili nell'industria, ma poco diffusi nella comunità scientifica o tra il pubblico.

I sistemi di produzione e le loro richieste di energia variano con la capacità della fabbrica, l'ubicazione della fabbrica, il tipo, l'energia e la chimica della cella della batteria che essere prodotta, e le tecnologie specifiche che vengono utilizzate. Le diverse fasi del processo di produzione delle batterie agli ioni di litio presentano diverse necessità di energia a causa dei diversi materiali e macchinari utilizzati e quindi risulteranno differenti valori di emissione del potenziale di riscaldamento globale (GWP) durante la linea produttiva. I dati esistenti sulle emissioni GWP per la produzione di batterie agli ioni di litio per autoveicoli sono nell'intervallo di 1,1-424 kg di CO₂-eq. per 1 kWh di capacità

del pacco batterie, mentre l'attuale uso di energia utilizzato (energia destinata alla produzione) è nell'intervallo di 28-740 Wh per la produzione di 1 Wh di celle immagazzinate (Kurland, S.D., 2020).

Le stime del consumo di energia e delle emissioni di gas serra (GHG) associate alla produzione di batterie agli ioni di litio (Li-ion) batterie hanno dimostrato di variare notevolmente (Ellingsen et al., 2017). Gli elevati requisiti energetici richiesti dall'estrazione e dalla lavorazione delle materie prime sembrano essere in ragionevole accordo con gli studi presenti nella letteratura, mentre l'energia utilizzata per l'assemblaggio di moduli o pacchi di batteria è considerata richiedere solo quantità minime di energia (Dai et al 2019), lasciando ai processi di produzione delle celle come la più grande fonte di energia impiegata.

Una parte significativa della varianza individuata può essere attribuita al fatto che molte stime effettuate sono valide solo per la produzione di impianti pilota, ovvero impianto con dimensioni e capacità intermedie tra quelle di laboratorio e quelle industriali (Dai et al 2019). Altri suggeriscono che i diversi metodi portano a risultati contrastanti (Ellingsen et al 2017). A maggiore comprensione dell'energia richiesta per produrre celle per batterie Li-ion è fondamentale per valutare correttamente le implicazioni ambientali di un uso rapidamente crescente delle batterie Li-ion.

Gli impatti ambientali della produzione di batterie tendono ad essere quantificati utilizzando la valutazione del ciclo di vita (LCA) (Peters e Weil 2018). Tuttavia, gli studi LCA convenzionali potrebbero non essere lo strumento corretto per valutare gli impatti ambientali delle tecnologie emergenti. Almeno 20 fabbriche di batterie Li-ion, con un volume di produzione annuale di diversi gigawattora di capacità di batterie Li-ion (GWhc), sono attualmente in fase di commissionamento (IEA 2021). Ancora, esistono poche stime affidabili nella letteratura scientifica, e gli studi si basano ancora su valori medi di dati non molto recenti (Philippot et al 2019), o studi individuali di impianti su scala pilota.

Sono state fatte delle ipotesi da precedenti LCA che sottostimavano l'energia richiesta per il fabbisogno energetico della dry-room, il che ha diminuito l'impatto energetico calcolato della produzione di batterie (Ellingsen, et al., 2017). Diverse fonti più recenti notano che l'uso di energia nella dry room per la produzione di celle è sostanziale rispetto ad altre fonti di uso di energia nella produzione di batterie agli ioni di litio (Dai et al., 2019). Yuan et al. hanno condotto misurazioni energetiche di diverse fasi di processo nella produzione di pacchi batteria in un impianto su scala pilota e hanno trovato che la dry room e NMP-

drying sono i principali contributori all'uso di energia di processo nella produzione di celle e pacchi, come viene illustrato in figura 3.1.

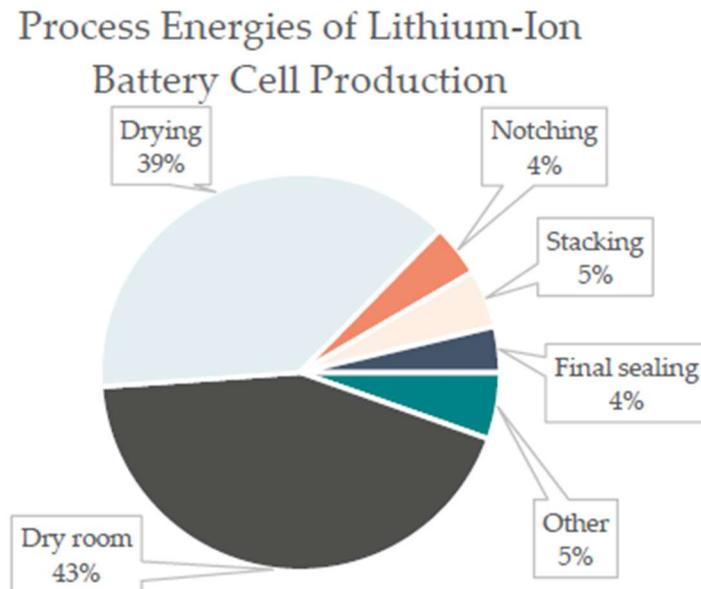


Figura 3.1 - Process Energies of Lithium-Ion battery Cell production (Yuan et al., 2017)

Nel loro studio, Ahmed et al. hanno scoperto che la quantità d'aria necessaria nella fase di drying ha il maggior effetto sulle differenze nei consumi energetici delle dry room, il che significa che le stanze più voluminose richiedono più energia. Inoltre, il contenuto di umidità dell'aria esterna ha una correlazione diretta con la quantità di energia richiesta per mantenere l'aria secca nella dry room. In particolare, l'aria che entra dall'esterno può variare significativamente e causare cambiamenti significativi nell'uso di energia delle operazioni. Ellingsen & Hung hanno notato che in alcune regioni della Cina, periodi annuali di intense precipitazioni e clima caldo, con conseguente aria umida, possono provocare un elevato consumo di energia per rimuovere il contenuto di acqua nella dry room (Ellingsen & Hung, 2018).

Per la fase di assemblaggio di un pacco di batteria, Dai et al. hanno scoperto che questa viene effettuata manualmente in alcune fabbriche in Cina, per cui l'energia utilizzata nella fase di assemblaggio sarebbe irrilevante rispetto all'energia impiegata per la produzione delle celle (Dai et al., 2019). Se l'assemblaggio è automatizzato o semi-automatizzato, allora l'elettricità richiesta risulterà molto bassa.

Per la fabbricazione e l'assemblaggio dei pacchi sono stati determinati dei valori che oscillano tra lo 0,5-1,2% del fabbisogno energetico della batteria.

3.2.2 Parametri qualitativi nella linea produttiva

Il processo di produzione per le batterie agli ioni di litio è formato da una lunga e complessa linea produttiva, di cui fanno parte circa 20 fasi di lavorazione. Molto spesso, queste fasi sono strettamente correlate tra di loro, per cui il successo di una determina il successo dell'altra e, di conseguenza, la prestazione finale della batteria. Un altro passo importante nella pianificazione della linea produttiva dell'impianto riguarda anche l'identificazione dei principali parametri qualitativi delle diverse fasi di lavorazione, che influiscono sia positivamente che negativamente la produzione.

La prima fase è l'identificazione delle correlazioni processo-prodotto lungo l'intera catena di produzione delle celle agli ioni di litio, fattibile attraverso l'analisi FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) che identifica i principali parametri che potrebbero portare al guasto della linea produttiva. Con questa procedura, non solo possono essere tracciati tutti gli effetti, ma è possibile analizzare anche tutte le cause che generano i guasti, ottenendo un modello completo di causa-effetto dell'intera linea di produzione. Uno schema, che utilizza l'analisi FMEA, per l'identificazione dei parametri qualitativi nella fase di mixing, è riportato in figura 3.2.

Potential cause		Correlation	Potential effect		Evaluation					Potential end effect
Selection of cause category	Cause		Selection of effect category	Effect	Probability	Security in probability eval.	Severity	Security in severity eval.	Detection	
raw materials anode	solvent mass	un-dissolved binder in case of a solvent deficit	shurry anode	homo-geneity	1	2	3	2	2	power capability
			shurry anode	particle size			3	2	2	
			shurry anode	solvent content			3	3	2	power capability, cycle stability

Figura 3.2 - Identificazione dei parametri nel processo di mixing

Successivamente, in base ai risultati dell'analisi FMEA, i parametri e le correlazioni vengono clusterizzate in 3 macrocategorie, in base all'influenza sulla qualità che essi generano su una o più caratteristiche del prodotto finale.

Secondo un'indagine condotta dall'Institute for Machine Tools and Industrial Management (iwmb) e dalla Technische Universität München (TUM), sono stati individuati numerosi parametri che influiscono in 13 delle 20 fasi lavorative. Nella tabella 3.3 vengono riassunti i principali, dove la colonna dei parametri attivi, "most active", descrive quelli che possono influire direttamente il processo; mentre la colonna dei parametri passivi, "most passive", descrive quelli che possono influenzare la singola fase presa in considerazione.

Process	Most active	Most passive
mixing	rotational speed	homogeneity
	process time	viscosity
	solvent mass	solvent content
coating	homogeneity	adhesion
	viscosity	thickness variation
	solvent content	coating weight per unit area
convection drying	flow rate	failures per unit area
	temperature	solvent content
	tape speed	moisture content
calandering	thickness variation	adhesion
	load per unit length	failures per unit area
	roll temperature	roughness
vacuum drying 1	temperature	moisture content
	no. of heating cycles	thickness variation
	no. of vacuum cycles	adhesion
cutting	power per unit area	uncut material
	vertical focus pos.	cutting edge quality
	thickness of electrode foil	width of heat affected zone
stacking	clamping force	stacking precision
	roughness of hold-down device	failures per stack
	gripper vacuum level	electrode planarity
case welding 1	power per unit area	leak tightness
	feed rate	penetration depth
	focus shift	mechanical strength
electrolyt filling	pressure profile	free electrolyte
	temperature	foam formation
	surface energy	wetting of the stack
precharging	c-rate	gas formation

Tabella 3.3 - Principali parametri nella linea produttiva
(Electric Drives Production Conference, 2013)

Process	Most active	Most passive
	charging current	electrolyte composition
	moisture of the stack	SEI formation
case welding 2	power per unit area	leak tightness
	feed rate	penetration depth
	focus shift	mechanical strength
formation	temperature	calendaric life
	time duration	cycle stability
	electrolyte composition	operational safety
test	cycle profile	calendaric life
	temperature	cycle stability
	thickness variation	power density

Tabella 3.3 - Principali parametri nella linea produttiva (Electric Drives Production Conference, 2013)

3.2.3 Costi legati alla produzione di LIB

Il prezzo del litio era estremamente alto una decina di anni fa. Tuttavia, il suo prezzo è diventato più accessibile grazie alle maggiori applicazioni, alla domanda in crescita e alla produzione attuale. Il prezzo di una batteria agli ioni di litio è pari circa al 25%-30% del prezzo di un'auto elettrica. I prezzi di mercato delle batterie Li-ion sono diminuiti negli ultimi anni, come illustrato in figura 3.4, tanto che il prezzo è sceso di quasi il 15%. Boomerang New Energy Finance ha previsto, come mostrato in figura 3.4, che il prezzo della batteria Li-ion si ridurrà a un quarto del prezzo di oggi entro il 2030 e che la sua produzione annuale crescerà con la diminuzione del suo costo. La disponibilità di litio e il suo costo dipenderà principalmente dalla domanda di mercato per le utilities, dai progressi nelle tecnologie EVs e dal suo utilizzo, dalla crescita del riciclaggio, dalle questioni geopolitiche, dall'allocazione del budget e dall'impatto ambientale generato.

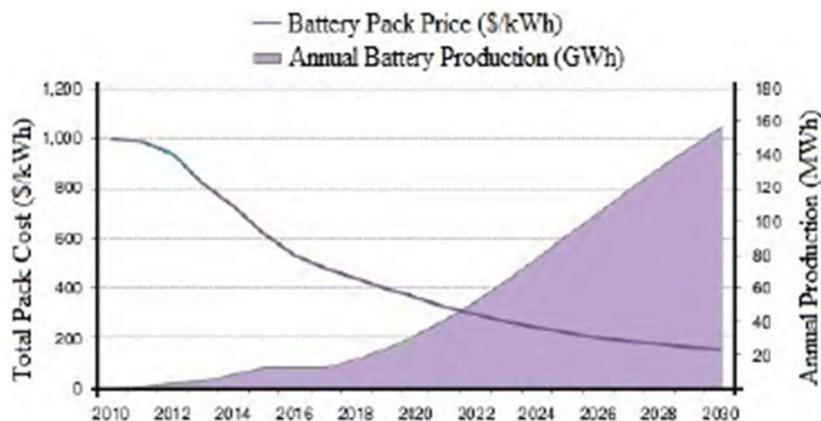


Figura 3.4 - Costo e produzione della batteria agli ioni di litio (Argonne, 2021)

Inoltre, la stima del costo relativo ad ogni fase di produzione è fondamentale per determinare quelle in cui è necessario dedicare più ricerca e innovazione.

La tabella 3.5 e la figura 3.6 mostrano la ripartizione dei costi di produzione calcolati dal modello BatPac dell'*Argonne National Laboratory*. Il modello simula un impianto che produce 100.000 pacchi di batterie l'anno, formate da 67-Ah LiNi0.6Mn0.2- Co0.2O2 (NMC622) celle di grafite (Nelson et al., 2019).

Si può notare come la fase di electrode coating, di drying, di cell formation e aging hanno contribuito per il 48% dell'intero costo di produzione. Per cui, queste fasi sono quelle che richiedono più attenzione e maggiori investimenti di capitale al fine di migliorare ed ottimizzare l'intero processo produttivo (Nelson et al., 2019).

Manufacturing processes	Cost per year/\$* (Nelson et al., 2019)	Percentage %
Slurry mixing	7,396,000	7.91%
Coating/drying	13,984,000	14.96%
Solvent recovery	4,296,000	4.60%
Calendering	4,849,000	5.19%
Slitting	2,891,000	3.09%
Vacuum drying	2,990,000	3.20%
Stacking	8,086,000	8.65%
Welding	6,864,000	7.34%
Enclosing	11,636,000	12.45%
Formation/aging	30,482,750	32.61%

Tabella 3.5 - Costi relative alla produzione di LIB (iScience, 2021)

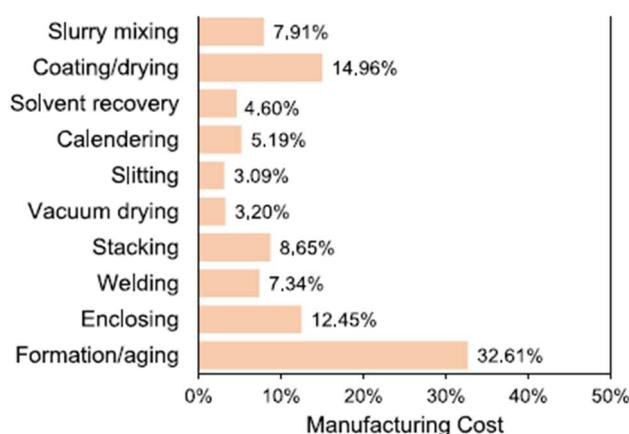


Figura 3.6 - Costi relative alla produzione di LIB (iScience, 2021)

3.3 Progettazione del layout di un Impianto per LIB

La capacità di una fabbrica di LIB determina il suo massimo volume di produzione in un dato periodo (Haverila et al., 2009). Di solito la capacità viene misurata come produzione annuale. La capacità è influenzata da molti fattori come le risorse, le attrezzature di produzione e lo spazio. Un fattore importante, su cui è stato incentrato lo studio di questa tesi, è proprio la disposizione dello spazio dell'impianto di produzione ed in particolare la sua progettazione (Haverila et al., 2009).

In questo capitolo verrà presentato il procedimento seguito per realizzare lo studio e le modalità di progettazione del layout di un impianto per la produzione di batterie agli ioni di litio.

3.3.1 Progettazione e disposizione delle risorse produttive

In base al produttore e al tipo di cella che viene prodotta, il processo di produzione può differire e, di conseguenza, anche la disposizione delle risorse. Pertanto, in questo studio viene scelto un processo generalizzato, semplificando le fasi di lavorazione o aggregando insieme diverse fasi, in base ai requisiti di energia e di materiale richiesti. Le fasi del processo e la struttura del modello generalizzato sono mostrate in figura 3.7, dove vengono illustrati i principali input, output e le principali unità coinvolte.

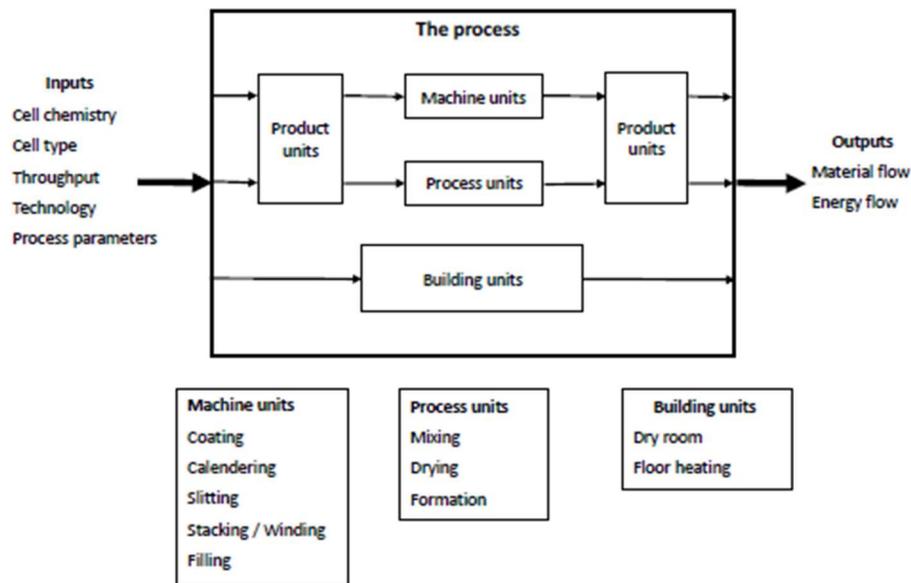


Figura 3.7 - Struttura generale di un impianto di produzione di LIB (J. Electrochem. Soc., 2020)

Il dimensionamento delle macchine e delle attrezzature è determinato basandosi su specifici calcoli ingegneristici per una singola linea di produzione e successivamente adattato al numero di linee in base alla capacità totale prevista (J. Power Sources 2015).

La figura 3.8 mostra un esempio di configurazione di design per un sito di produzione pilota di LIB con le principali aree di produzione collocate secondo la loro posizione nella sequenza del processo.

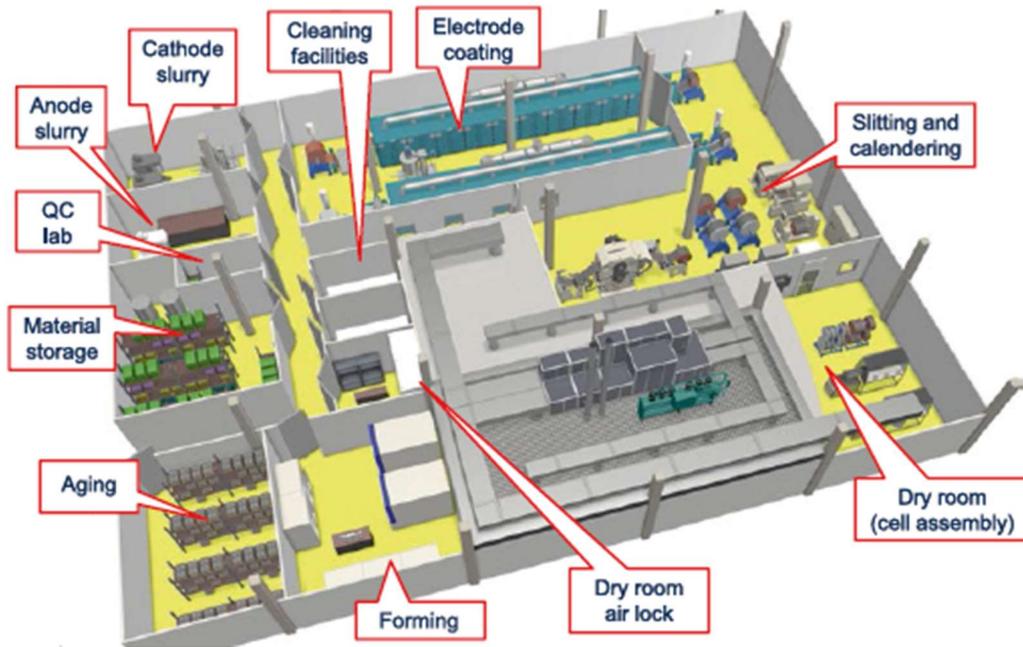


Figura 3.8 - Concept design del layout di una linea produttiva di LIB (*Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications, 2018*)

3.3.2 Colli di bottiglia in una linea produttiva

La capacità massima di un impianto di LIB 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). Questo strumento di miglioramento continuo mira a rafforzare il processo migliorando le fasi di lavoro che più rallentano la produzione (Dani, 2006; Jan and Ho, 2006). Quando si inizia a progettare il dimensionamento di un nuovo impianto industriale è importante quindi concentrarsi sulle fasi che generano dei colli di bottiglia, così da aumentare la capacità effettiva. Quando si parla di una fabbrica automatizzata con produzione continua, è più difficile migliorare la capacità in presenza di colli di bottiglia: la carenza di produzione non può essere colmata da turni supplementari se l'impianto lavora già H24. In queste circostanze, le fasi più critiche devono avere un tasso di utilizzo inferiore altrimenti 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.

I principali colli di bottiglia nel processo di produzione sono lo stacking, l'electrolyte filling e la fase di formation, che hanno anche una notevole influenza sulla qualità del prodotto finale. La stringente condizioni ambientale da mantenere nella produzione di celle richiede anche di lavorare in un ambiente asciutto (VDMA, 2020).

In particolare, il processo di impilamento (stacking) è significativamente più lento del processo di avvolgimento prismatico (prismatic winding) ed è uno dei colli di bottiglia nella fase di assemblaggio delle celle.

Il divario di prestazioni tra l'impilamento e la piegatura a z con l'avvolgimento prismatico è costituito dalla procedura. La procedura di avvolgimento è continua poiché il componente attraversa la linea grazie ad un'unica sequenza di accelerazione, mantenimento e decelerazione delle “spindle rotation” che avvolgono i fogli di elettrodi. Mentre la procedura di piegatura a z e l'impilamento richiedono diverse sequenze di pick-and-place dove bisogna afferrare, spostare e posizionare gli elettrodi al sito di giunzione dove il composto viene assemblato (Westermeyer et al, 2014). La procedura è quindi discontinua e la velocità media di alimentazione del materiale per la fabbricazione di un elettrodo-separatore è significativamente inferiore a quella per la procedura di avvolgimento continuo, come dimostrato in figura 3.9. Questa è una delle principali ragioni per cui la produzione del composto piegato a z e impilato è il collo di bottiglia della produzione delle celle

	Material feeding speed [mm/s]	Cell cycle time [s]	Performance [cpm]
Single sheet stacking	83	120	0.5
Z-folding	129-132	81-83	0.72-0,74
Prismatic winding	300-360	30-36	1,7-2

Figura 3.9 - Stacking e Winding performances (Automation Technology: Products, 2014)

L'elevato grado di precisione di posizionamento e di pulizia richiesto deve essere soddisfatto nonostante sia necessario un aumento della produttività. La qualità del processo di impilamento ha un'influenza significativa sulle successive prestazioni della cella. La sfida più importante da superare per questa fase produttiva è quindi la

combinazione di un alto tasso precisione di posizionamento con un simultaneo aumento della velocità.

Tuttavia, negli attuali sviluppi delle tecnologie impiegate nel processo di LIB è già stata identificata dall'industria una valida soluzione per aumentare la produttività in questa fase. Uno sviluppo concettuale di un sistema di manipolazione in grado di aumentare significativamente la produttività è stato presentato in figura 3.10.

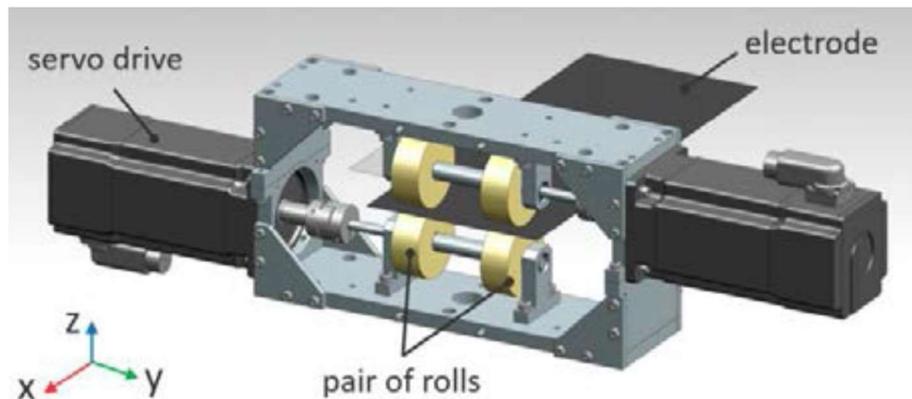


Figura 3.10 - Handling System (Procedia CIRP, 2016)

3.3.3 Progettazione della logistica e della movimentazione

Oltre al layout destinato alla produzione, è necessario pianificare anche altre aree all'interno di un impianto di produzione di batterie (Korthauer, 2018). Rientrano in questa categoria: tutte le strutture a supporto della produzione, la logistica per la fornitura dei materiali, i sistemi di sicurezza e i sistemi di protezione del personale dalle condizioni esterne come il tempo, come viene illustrato in figura 3.11:

Supporto alla produzione: comprende tutte le funzioni che assistono la produzione in maniera diretta, come le vie di comunicazione del materiale e personale, le unità di dosaggio degli elettroliti e il reparto di gestione della qualità.

Supporto generale: oltre alle aree di supporto alla produzione, sono necessarie le funzioni di supporto non direttamente collegate alla produzione. Queste includono le sale per la manutenzione, spogliatoi e armadietti. Spesso, le sale destinate alla manutenzione possono essere previste in prossimità dei macchinari ma questi non devono ostacolare il passaggio.

Logistica: le aree di stoccaggio sono necessarie per la ricezione/spedizione delle risorse necessarie e per lo stoccaggio di materie prime e prodotti finiti in attesa di essere spediti

o impiegati nel processo produttivo. Le dimensioni necessarie per questo tipo di area dipendono dal concetto operativo, dalla varietà dei prodotti e dal periodo di stoccaggio richiesto (Korthauer, 2018).

Utilities: in riferimento a tutti i sistemi per la generazione del processo e la tecnologia degli edifici, comprese le loro reti di distribuzione, che vengono, di solito, installati in un luogo centralizzato per ottenere significativi risparmi di costo e spazio ed effetti positivi di sinergia.

Amministrazione: sono necessarie anche le aree di amministrazione centrale. Questo include uffici per le funzioni amministrative come la gestione, gli acquisti e le risorse umane, o anche la mensa e le aree ricreative.

Inoltre, durante la fase di progettazione dell'area di un impianto produttivo di LIB, devono essere presi in considerazione anche i seguenti aspetti, in riferimento alla movimentazione del personale e del materiale:

Flusso del personale: le persone entrano nell'impianto di produzione attraverso gli ingressi del personale e poi procedono verso le aree di lavoro (Korthauer, 2018). Di solito, il personale di produzione raggiunge la propria postazione di lavoro attraverso gli spogliatoi. A seconda del luogo, questo percorso può essere complesso, ad esempio per raggiungere la dry room, o meno complesso, per raggiungere il magazzino.

Flusso dei materiali: le materie prime e i prodotti semilavorati sono consegnati all'area dell'impianto di produzione destinata alla logistica. Dopo l'ispezione in entrata, i pezzi sono trasportati (manualmente) alle singole aree o reparti di produzione. Per compensare i diversi tempi di ciclo derivanti dalle singole fasi del processo, sono necessari dei buffer in linea, per evitare colli di bottiglia lungo la linea produttiva.

Il materiale viene generalmente trasportato manualmente all'interno di un'area di produzione degli elettrodi. Mentre, un alto grado di automazione è impiegato per la fase di assemblaggio delle celle. I rotoli degli elettrodi tagliati e le successive celle della batteria sono raggruppati e movimentati su nastri trasportatori o conveyors prima di tornare, come prodotti finiti, nell'area di logistica dell'impianto di produzione. Lì, le celle vengono imballate in lotti per il trasporto, o vengono destinati ad un'ulteriore linea di assemblaggio di pacchi batteria adiacente, se l'impianto lo prevede (Korthauer, 2018).

Spostamento dell'attrezzatura: è importante garantire che qualsiasi nuova attrezzatura possa essere spostata e che le attrezzature già impiegate nel processo possano essere sostituite durante il funzionamento. Nella maggior parte dei casi, le nuove macchine sono

consegnate nell'area della logistica; mentre i piccoli macchinari possono essere trasportati direttamente nella postazione di lavoro attraverso corridoi e ascensori (Korthauer, 2018). Potrebbe essere necessario prevedere una piattaforma mobile sulla facciata esterna per spostare le macchine che non possono circolare attraverso i corridoi o negli ascensori. In casi estremi, è necessaria un'attrezzatura di sollevamento pesante per sollevare le macchine all'altezza richiesta.

Vie di fuga e di emergenza: un altro importante concetto è quello relativo alle vie di fuga e di emergenza. I regolamenti sono specifici per ogni paese, ma, come regola fondamentale, deve essere garantito che tutte le persone nell'edificio possano raggiungere un'uscita di emergenza entro una distanza massima specificata (Korthauer, 2018). Il concetto di edificio (lunghezza, larghezza, altezza e numero di piani) è spesso determinato dalla massima distanza di un'uscita rispetto l'esterno, le scale o una porta antincendio separata.

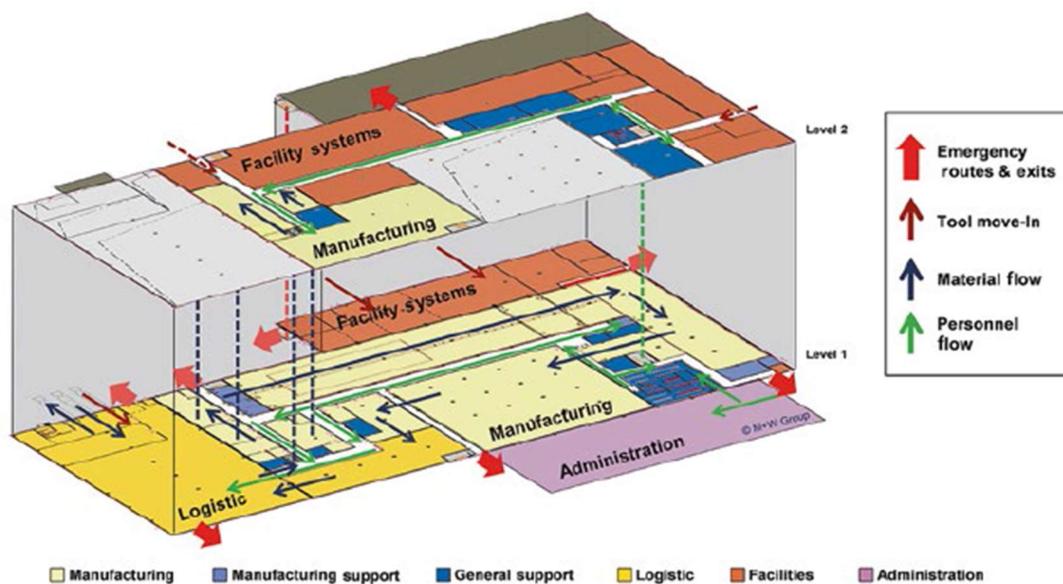


Figura 3.11 - Area e logistica di un impianto produttivo di LIB (*Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, 2018)

3.3.4 Progettazione dei Magazzini

L'obiettivo da raggiungere quando si progetta il magazzino di un impianto di LIB è quello minimizzare le scorte di materiali eccessive, altrimenti si perderebbe il significato primario di Just In Time. Ognuno dei due slurry ha bisogno di un proprio contenitore da cui il materiale viene trasferito alla fase di miscelazione. Ciò significa che, ad eccezione del magazzino in linea per il riposo delle celle dopo l'iniezione 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 adiacente alla zona di 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, è di fondamentale importanza dimensionare il magazzino delle materie prime affinché la quantità da stoccare contemporaneamente sia quella necessaria per la produzione. Tale processo deve quindi valutare diversi fattori come 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.

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, dove vengono riportati i 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 $6,00 \text{ kN/m}^2$ (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2018).

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.

Infine, quando le celle di batteria superano la fase di Aging, devono essere trasferite in un magazzino dove vengono poi inserite in dei pallet e spedite per la vendita finale ai clienti. Per quanto concerne il magazzino dei prodotti finiti, esso coincide, nella maggior parte dei casi, con la stessa tipologia di quello delle materie prime, in quanto la vendita potrebbe avvenire anche dopo alcuni giorni dal completamento e quindi il numero di celle da stoccare in attesa della vendita è maggiore rispetto a quelle prodotte.

3.3.5 Condizioni ambientali nella produzione di LIB

Ci sono una serie di requisiti specifici da rispettare per la produzione di celle agli ioni di litio, in particolare un controllo rigoroso del clima interno e della contaminazione incrociata. Questi fattori hanno un impatto significativo sulla qualità, sulla sicurezza, sulle prestazioni e sulla durata delle batterie.

La progettazione dell'impianto di produzione mira a ridurre al minimo anche i diversi impatti climatici all'interno dell'ambiente di produzione. Le norme ISO 7 o ISO 8 riportano le condizioni da rispettare nei diversi ambienti delle fasi produttive. La Fig. 3.12 mostra le diverse zone ambientali in un layout di produzione di LIB. I processi di coating e drying richiedono delle condizioni ambientali come aria pura controllata e un'umidità relativa inferiore al 15%. Mentre, le fasi di cell assembly ed electrode filling necessitano di una percentuale di umidità inferiore all'1%.

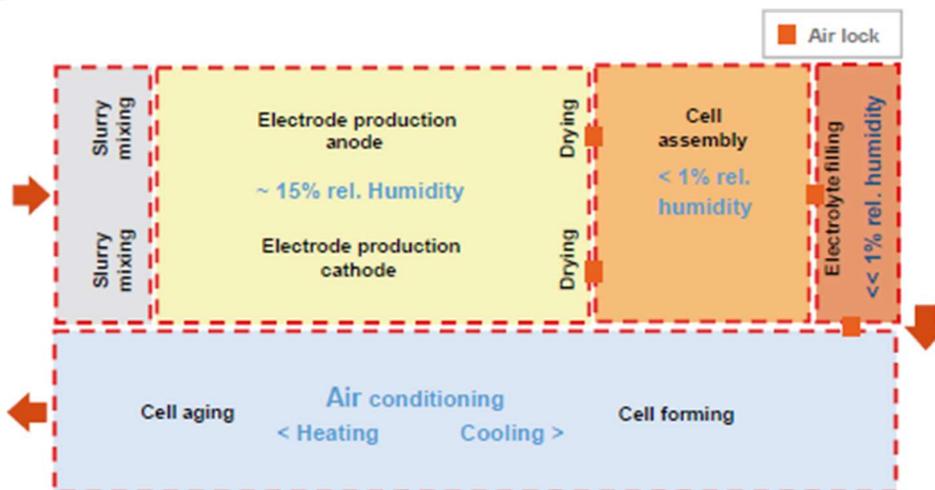


Figura 3.12 - Condizioni ambientali in un impianto produttivo di LIB (*Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, 2018)

3.3.6 Impianti flessibili

La domanda di batterie per veicoli a trazione elettrica potrebbe essere troppo elevata, negli anni a venire, per produrle economicamente in impianti dedicati ad un'unica tipologia di batteria tra quelle pouch, cilindriche o prismatiche. Inoltre, l'avanzamento della tecnologia nella composizione della batteria deve essere facilmente integrabile con le attrezzature di lavorazione esistenti. In questo rapporto, si definisce impianto flessibile il tipo di impianto che può produrre batterie per diversi tipi di veicoli. In particolare, la flessibilità risiede nella capacità dell'impianto di adattarsi a variazione di fattori chiave come la capacità dell'impianto, la chimica delle celle, il tipo di cella e le tecnologie di processo.

Lo sviluppo di un modello di produzione delle celle che può confrontare diverse soluzioni produttive può essere ben utilizzato negli studi di life-cycle assessment (LCA) così come nella progettazione dell'impianto e degli sviluppi tecnologici.

I produttori di batterie per EV stanno già adottando questo approccio. È possibile ridurre i costi delle batterie per i veicoli elettrici se queste vengono prodotte in un unico impianto, applicando solo dei minimi cambiamenti alle linee di produzione in base alle esigenze richieste.

3.4 Soluzioni per progettare il layout produttivo

In questo paragrafo, vengono descritte le principali tecniche utilizzate per progettare il layout di un impianto produttivo di LIB. Come già descritto nel capitolo introduttivo, le tecniche e le modalità di progettazione del layout di una gigafactory non sono ampiamente diffuse nella letteratura esistente a causa del recente sviluppo degli Evs e dei pochi studi legati al tema.

In particolare, vengono riportate delle simulazioni e dei modelli attualmente utilizzati per la fase di progettazione del layout di una gigafactory, affiancati da strumenti altamente tecnologici in quanto, come evidenziato durante questo studio, la linea produttiva di un impianto di LIB è caratterizzata da un elevato grado di automazione, il che supporta il pianificatore in tutto il processo decisionale.

3.4.1 Simulazione e Modellazione 3D

I vantaggi nell'utilizzo di un software di modellazione e simulazione 3D utilizzando comportano la creazione, la manipolazione e l'interazione con oggetti 3D in un ambiente virtuale. Questo ambiente virtuale è chiamato mondo 3D. Nel mondo 3D, la vista dell'utente è controllata da una telecamera nel software. Il mondo 3D può essere navigato utilizzando un mouse o un touchpad o usando un mouse 3D (Visual Components 2018a.). Gli oggetti che vengono rappresentati nel mondo 3D sono chiamati componenti e possono essere creati staticamente o dinamicamente creati nel mondo 3D durante la simulazione. Un componente può essere esportato come immagine o in altri tipi di file (Visual Components 2018a).

Secondo Westkämper, Spath, Constantinescu & Lentjes (2013), una fabbrica, che utilizza metodi digitali per la fase di pianificazione del layout e dei processi, ottimizza sia i tempi

che i costi. Ancora, Bracht, Geckler & Wenzel (2011) pongono maggiore enfasi sulla natura predittiva e visiva della fabbrica digitale allo scopo di ottimizzare il processo di produzione.

In particolare, l'applicazione visiva dei modelli e delle simulazione 3D dei layout delle fabbriche permette, a complessi sistemi di produzione come quelli presenti in una gigafactory, di riprodurre un processo realistico al fine di determinare lo spazio, la disposizione delle risorse e delle attrezzature richieste valutando diversi scenari, senza aver bisogno di averli fisicamente, determinando la migliore configurazione.

In caso di simulazione 3D, la visualizzazione 3D è un aspetto importante poiché supporta il pianificatore a vedere tutti i dettagli di alto livello (LOD) presente nella simulazione del layout. In particolare, per determinate fasi del processo di produzione come quella di assemblaggio, che presenta maggiori criticità, la visualizzazione 2D non è più adeguata (Masik, Schulze, Raab & Lemessi 2016). La visualizzazione 3D aiuta anche l'ingegnere nella validazione e nell'ottimizzazione del layout dell'impianto ma soprattutto nella presentazione dei risultati a tutte le parti interessate al progetto, in fase di simulazione (Schmitz et al. 2013; Ahola 2018). Alcuni degli strumenti a supporto della visualizzazione 3D sono gli occhiali Virtual Reality (VR), utilizzati per visualizzare un modello di simulazione in un ambiente di realtà virtuale.



Figura 3.13 - VR system (HTC Vive Europe, 2018)

In figura 3.13 viene rappresentato un tipico sistema di realtà virtuale HTC, impiegato nella pianificazione, progettazione e simulazione della produzione, prodotto dall'omonima azienda.

La realtà virtuale offre un'interazione intuitiva e precisa con i modelli di simulazione 3D poiché le dimensioni reali possono essere direttamente sperimentate e tale processo fornisce dati ingegneristici più chiari.

Chen, Ong, Nee & Zhou (2010) hanno usato la VR per ottenere un path planning efficiente sia per i sistemi di assemblaggio virtuale che per la movimentazione di un braccio robotico all'interno del layout produttivo. La VR è stata anche presentata come un metodo di ottimizzazione della simulazione 3D poiché tutti i singoli componenti possono essere visualizzati tutti in una volta, definendo le reali dimensioni dei macchinari e dei requisiti spaziali (Nee et al. 2013).

Questo tipo di soluzione determinerebbe lo spazio ottimale di un impianto di LIB, facendo risparmiare alle aziende al fino al 50% nei costi operativi (Xie & Sahinidis 2008).

La possibilità di visualizzare i modelli di simulazione nell'ambiente di realtà virtuale permette di realizzare una chiara percezione del layout finale della fabbrica prima di effettuare qualsiasi investimento e di passare alla costruzione effettiva dell'impianto. La definizione e progettazione del layout di fabbrica è molto importante poiché l'intero processo, la posizione fisica delle macchine e il flusso del materiale di una fabbrica di produzione dipendono da esso. Inoltre, come introdotto nel paragrafo 3.3.4, è importante, ad oggi, che l'impianto sia flessibile per adattarsi alla variazione della produzione molto più velocemente.

Prima di effettuare qualsiasi tipo di simulazione o modellazione 3D, il pianificatore deve capire i dettagli dei layout dell'impianto e la tipologia di layout più adatta alla produzione, già descritte nel capitolo 2.2.

Di seguito, viene riportato uno studio sperimentale condotto dalla "University of VAASA". Questo studio è orientato alla progettazione di una fabbrica automatizzata di produzione LIB in un ambiente virtuale utilizzando un software di simulazione 3D, al fine di mostrare i principali passaggi per la pianificazione visiva del layout dell'impianto e l'ottimizzazione della capacità utilizzando un software di simulazione 3D (VC 4.0). Per semplicità, vengono riportate solo alcune delle fasi del processo produttivo per mostrare, successivamente, il risultato finale dell'impianto progettato. Come primo passo, bisogna definire le attrezzature, i macchinari e le componenti necessarie alla progettazione del layout produttivo. In figura 3.14, viene mostrato un esempio della lista dei componenti disponibili sul software VC 4.0. Per determinare lo spazio necessario del layout, bisogna partire dalla capacità desiderata dell'impianto (GW), da cui si determina, con un approccio top-down, il numero delle risorse necessarie. Quindi, in questa fase bisogna conoscere alcuni attributi principali delle risorse utilizzate come il volume e la velocità di produzione dei macchinari.

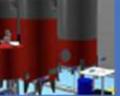
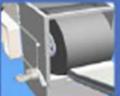
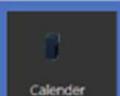
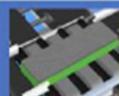
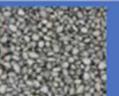
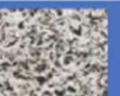
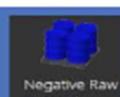
LIST OF OTHER MODELLED COMPONENTS FOR THE LAYOUT.						
						
COATING MACH.	SLITTING CONV.	INSULATOR MAT	STACKING MACH.	MIXING	LAB. TEST EQUIP.	WIND TURBINE
Drying machine is used in the layout with the main drying unit for complete drying.	Slitting conveyor is used in the layout to transport the slit electrodes out of the slitting unit.	This the insulation raw materials used in the layout.	stacking machine is used in the layout to stack coated electrodes together with insulator material in between	This is used in the layout as the main mixer in the mixing unit.	Lab testing equipment is used to test the integrity of the coated and slit electrodes in the layout.	Wind turbine is used for the generation of wind energy for the factory in the layout.
						
BUFFER TANK	2170 CELL	SLITTING MACHIN	WINDING MACHIN	TRUCK	PROCESS DESC.	LABEL STAND
Buffer tank is used to temporarily store the mixed slurry before transporting to the coating unit.	2170 cell is the cell used in this lithium-ion manufacturing factory.	Slitting machine is used to cut the coated electrodes into required height for stacking purposes.	Winding machine is used to roll the calendared electrodes and slit electrodes into bundle.	This is used for supplying of raw materials and shipping of final product.	This is used in the layout for brief description of each stage.	This is used in the layout to label the name of each stage.
						
CALENDERING MAC	STORAGE RACK	PRE-PACKED MOD	BATTERY MODULI	FACTORY GRASS	SIDE GRAVEL	FACTORY ENTRAN
Calendering machine is used in the layout for roller pressing of the coated electrodes.	Storage rack stores the cathode, anode and insulation raw materials in the storage area.	This is the pre-packed battery module where robot packed 385 cells in inner box.	Battery module is the final completed product from the factory.	This is used for the factory surrounding grass.	This is used as the external side gravel for the factory walls.	This is used for the concrete main entrance floor where trucks are offloaded.
						
ANODE RAW MAT	CATH. RAW MAT.					
This is the anode raw materials used in the layout.	This is the cathode raw materials used in the layout.					

Figura 3.14 - Lista dei componenti del layout su VC 4.0 (University of VAASA, 2018)

Nella progettazione del layout, l'anodo, il catodo e le materie prime vengono stoccati sugli scaffali, da carrelli trasportatori. Gli scaffali sono separati in 3 sezioni: una per l'anodo, una per il catodo e la terza per le materie prime isolanti. La figura 3.15 mostra un esempio della fase di stoccaggio riprodotto dal software.



Figura 3.15 - Area di stoccaggio del layout (University of VAASA, 2018)

Per le successive fasi di lavorazione, è utile determinare, attraverso la Bill of Materials (BOM), le materie prime necessarie in ogni fase e, di conseguenza il numero di macchinari necessari. In figura 3.16, viene illustrata la progettazione dello spazio relativo alla fase di mixing dove i serbatoi rossi rappresentano le unità di miscelazione dell'elettrodo positivo (catodo) mentre i serbatoi blu rappresentano le unità di miscelazione dell'elettrodo negativo (anodo). Questa differenziazione di colore aiuta a identificare facilmente il flusso per anodo e catodo nella linea produttiva.



Figura 3.16 - Area destinata alla fase di mixing per l'anodo (blu) e catodo (rosso) (University of VAASA, 2018)

Mentre, in figura 3.17 viene rappresentata la progettazione della fase di stacking/winding delle celle, che comporta l'avvolgimento di entrambe le strisce di elettrodi positivi e negativi insieme con il separatore, con il metodo z-folding. Analogamente alla fase di mixing, lo spazio progettato e simulato sul software VC 4.0 deriva da uno studio preliminare delle macchine necessarie, calcolate grazie alla BOM, in base al volume e alla velocità di lavorazione delle stesse.

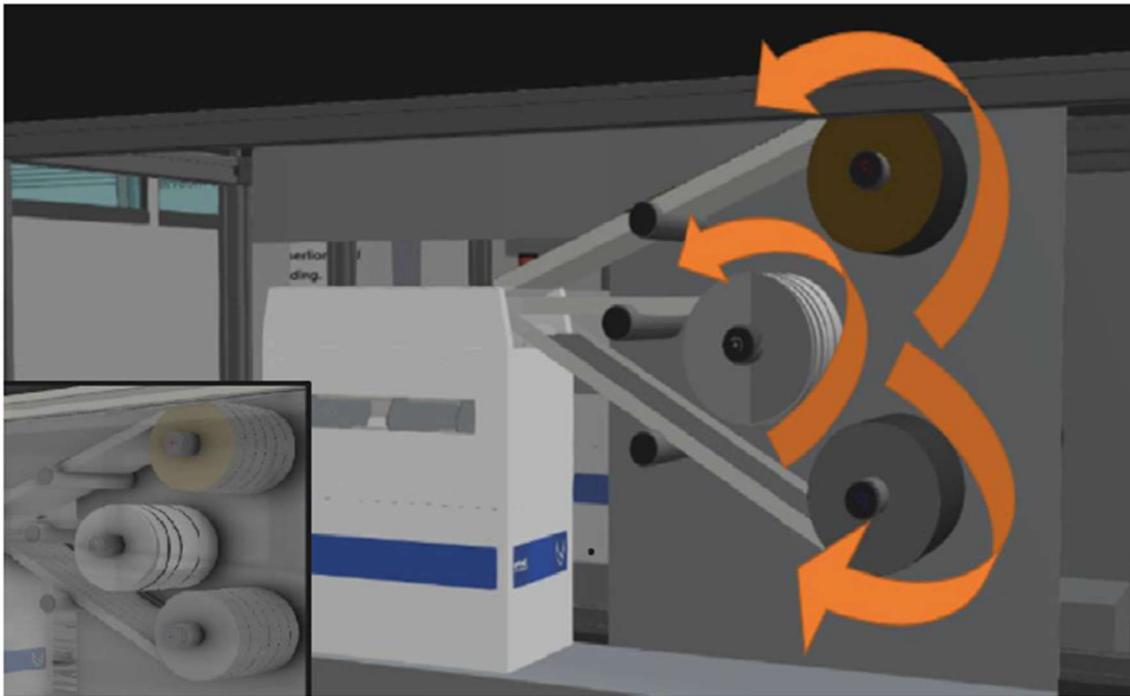


Figura 3.17 - Reparto di stacking (University of VAASA, 2018)

I risultati di questa ricerca mostrano che i metodi di modellazione e simulazione 3D hanno un enorme potenziale al fine di ottimizzare la progettazione del layout dell'impianto, di ridurre i costi e di ridurre i tempi di realizzazione del progetto finale, in quanto i possibili errori e le rielaborazioni sarebbero stati scoperti e corretti durante il processo di simulazione. L'unica limitazione imposta dal software è la potenza di calcolo richiesta. Infatti, per una gigafactory con elevate capacità di produzione, risulta complesso e dispendioso per il software riprodurre l'intera linea produttiva.

La figura 3.18 mostra una vista dall'alto di tutte le fasi del layout finale della fabbrica di produzione LIB progettate utilizzando il software VC 4.0.

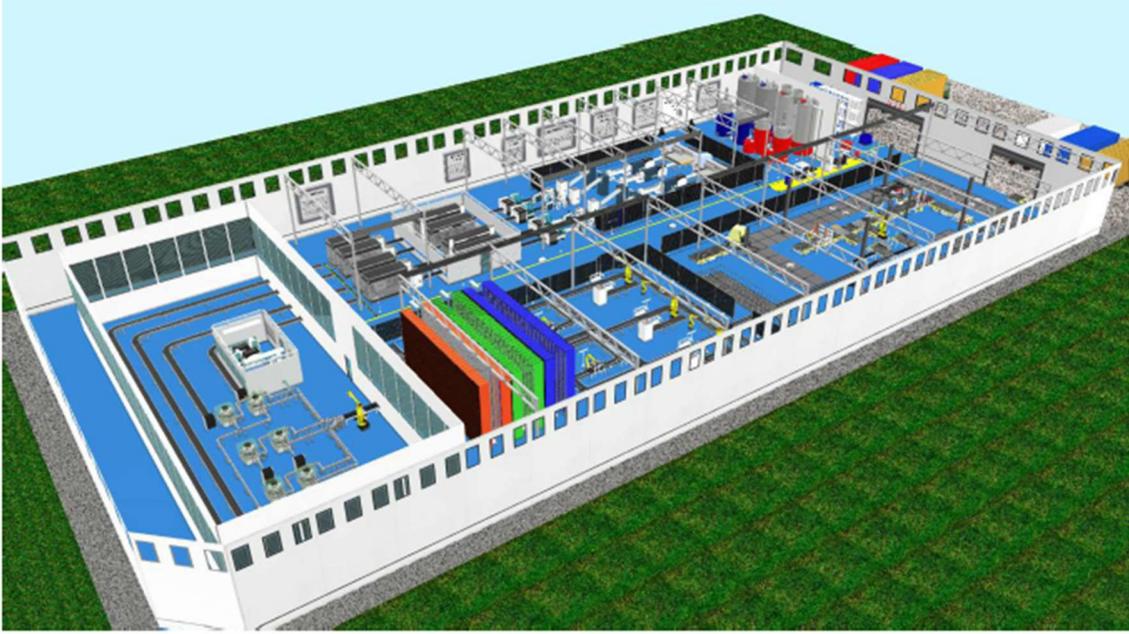


Figura 3.18 - Modellazione 3D del layout di una gigafactory (University of VAASA, 2018)

3.4.2 Modello BatPaC

In questo capitolo, viene descritto il modello denominato Battery Performance and Cost (BatPaC) sviluppato all'Argonne National Laboratory per la produzione di pacchi batteria agli ioni di litio, utilizzati nel trasporto automobilistico. Ad oggi, è l'unico modello disponibile pubblicamente che esegue un approccio bottom-up della progettazione e dei costi delle batterie agli ioni di litio, a differenza della soluzione descritta nel capitolo 3.4.1.

Il modello Battery Performance and Cost (BatPaC) qui descritto è il prodotto di una lunga fase di ricerca e sviluppo presso Argonne. Per diversi anni, Argonne ha sviluppato metodi per progettare batterie Li-ion per veicoli a trazione elettrica basati sulla modellazione con fogli di calcolo Excel. Questi modelli di progettazione hanno fornito tutti i dati necessari per stimare il fabbisogno dei materiali necessari per la produzione delle batterie in fase di progettazione. Questo ha facilitato il passo successivo, che è stato quello di estendere lo studio per includere la modellazione dei costi di produzione delle batterie, che non verrà però trattato in questo studio. Infatti, verrà riportato di seguito la metodologia adottata dal metodo BatPaC per la progettazione del layout di un impianto di LIB. L'uso di BatPaC richiede alcune conoscenze di base sui pacchi batteria; tuttavia, le informazioni necessarie sono facilmente reperibili nella letteratura attuale come le specifiche di una batteria, che devono essere specificati dall'utente in fase di progettazione. Questa soluzione di progettazione, di solito viene adottata per dimensioni dell'impianto e produzioni annuali intermedie.

Come già descritto ad inizio paragrafo, questo metodo di progettazione del layout di una gigafactory si basa su un approccio bottom-up. Questo implica che la fase di partenza sia la definizione e modellazione delle risorse e dei requisiti necessari alla produzione che determineranno, successivamente, lo spazio e la produzione annuale. Quindi, la dimensione dell'impianto viene determinata dal numero, dalle dimensioni, dalla velocità dei macchinari, per ogni fase di lavorazione.

Di seguito, viene riportato un esempio di progettazione del layout di un impianto produttivo di LIB, utilizzando il metodo BatPaC, capace di produrre 100.000 unità di batterie l'anno. Per semplificare, viene riportata la progettazione solo di alcune delle fasi del processo produttivo. In particolare, in figura 3.19 viene progettato lo spazio del layout relativo al reparto di coating degli elettrodi, unitamente al solvent recovery system, dove

vengono riportate tutte le informazioni utili sia per la progettazione dell'impianto sia per la pianificazione della produzione. Queste includono il numero dei macchinari, la velocità di lavorazione, ovvero il tasso di produzione, il numero di dipendenti richiesti per ogni turno di lavoro ed infine lo spazio complessivo occupato dal macchinario. La somma di quest'ultimo, determinerà l'area complessiva del layout produttivo.

Electrode Coating	Rate Factor	Direct Labor	Capital Equip.*	Plant Area, m ²
Positive Electrode	8,170,000 m ² /y cell area	4 per shift	8.0 mil\$ total	750
Uncoated area			18%	
Width of coater			1.5 m	
Coating speed			10 m/min	
Number of coaters			One	
Maximum rate			13,000,000 m ² /y	
Excess capacity			30%	
Negative Electrode	8,170,000 m ² /y cell area	4 per shift	8.0 mil\$ total	750
Solvent Recovery & Oxidation	1,527,000 kg NMP/y	2 per shift	3.0 mil\$ total	225

Figura 3.19 - Progettazione della fase di coating (Argonne, 2012)

Un altro esempio, utile a capire il metodo di progettazione tramite BatPaC, è mostrato in figura 3.20, riguardante il reparto di drying degli elettrodi. Anche qui, vengono riportate e informazioni utili a determinare il layout finale dell'impianto e la relativa produzione.

Electrode Drying	Rate Factor	Direct Labor	Capital Equip.*	Plant Area, m ²
	2,950,000 kg/y active material	2 per shift	1.6 mil\$ total	300
Dryer capacity			600 kg/shift	
Number of dryers			8	
Maximum rate			4,320,000 kg/y	

Figura 3.20 - Progettazione della fase di drying (Argonne, 2012)

Una volta terminata la pianificazione di tutte le fasi del processo, l'area derivante dalla somma di tutti i contributi di ogni singola fase determina lo spazio necessario all'impianto data una certa quantità di produzione di batterie. In questo studio, il layout finale dell'impianto di LIB per produrre 100.000 unità di batterie all'anno viene riportato in figura 3.21, dove la grandezza delle aree per ogni fase di lavorazione risulta essere approssimativamente proporzionali alla grandezza delle aree dell'impianto reale.

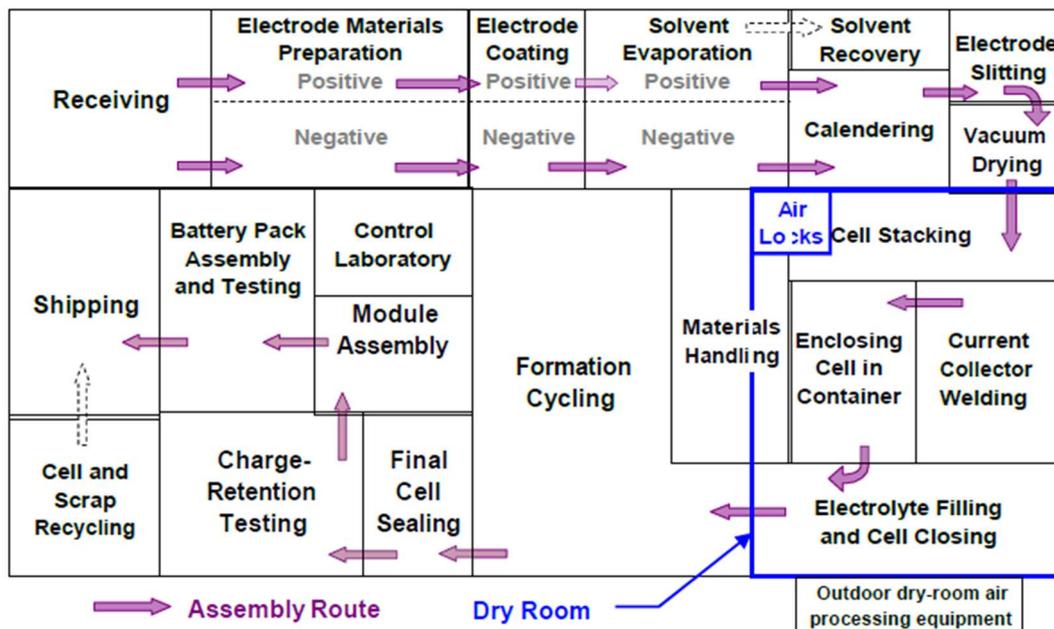


Figura 3.21 - Diagramma schematico del layout di un impianto di LIB con il modello BatPaC (Argonne, 2012)

3.5 Analisi critiche

Rispetto a quanto emerso, l'intera fase per la produzione delle batterie agli ioni di litio è caratterizzata da processi complessi e strettamente correlati. L'adeguato completamento di ogni fase di lavorazione influisce il risultato della successiva e, di conseguenza, del prodotto finito, ovvero della batteria. Per cui, una buona progettazione e disposizione delle macchine, degli spazi interni, delle strutture e delle risorse necessarie a supporto della produzione è fondamentale per ottimizzare qualità, tempi e costi di una gigafactory. Essendo un settore in via di sviluppo, vi è una scarsa conoscenza delle modalità di progettazione di una gigafactory, soprattutto perché l'aleatorietà del processo di produzione rende queste informazioni molto frammentate e difficili da contestualizzare in un impianto standard. Ogni impianto può variare in base alla tipologia dei macchinari utilizzati, al tipo di cella prodotta, alla possibilità di esternalizzare alcune fasi del processo o meno e, la più importante, alla capacità annua prefissata.

In questo studio, è stata descritta una possibile configurazione e progettazione di un impianto per LIB dove emerge una chiara e netta distinzione tra i vari spazi dell'impianto. Poiché è caratterizzato da molti macchinari disposti in serie, l'intero processo di produzione è raggruppato in un unico spazio condiviso, anche se è possibile distinguere in 3 macro sezioni il processo, ovvero produzione, assemblaggio e formazione elettrica degli elettrodi.

Durante la fase di progettazione è necessario tenere in considerazione alcuni parametri qualitativi dell'ambiente di lavorazione, come la percentuale di umidità o la temperatura della stanza, poiché il mancato rispetto dei requisiti richiesti dalle norme ISO potrebbe influire negativamente sulle prestazioni della batteria. Un altro aspetto critico nella progettazione del layout è la disposizione e pianificazione del magazzino. Poiché il primo reparto di lavorazione consiste nella fase di mixing, ovvero la miscelazione dello slurry per produrre gli elettrodi, e questo avviene in due linee di produzione parallele per l'anodo ed il catodo, è necessario tenere separate anche le materie prime nel magazzino, per evitare la contaminazione dei materiali. Inoltre, essendo dei materiali attivi, risulta quasi indispensabile adottare una tecnica Just in Time per la gestione dei magazzini, utile a ridurre le scorte in base alla necessità della produzione per evitare che il materiale depositato per un lungo tempo in magazzino si inizi a formare elettricamente all'interno dei recipienti. Infine, nel capitolo 3 viene descritta anche la progettazione del layout legata agli spazi non direttamente correlati alla produzione, come la movimentazione intera, le sale di monitoraggio, le sale dedicate ai dipendenti come la mensa, gli spogliatoi, ecc. In particolare, emerge una chiara necessità di progettare queste zone distanti dai reparti produttivi, al fine di non intaccare la produzione del flusso dei materiali all'interno delle macchine.

Per la fase di progettazione del layout di una gigafactory sono stati individuati, nella letteratura, due metodologie: la progettazione 3D, che si avvale di strumenti tecnologici come i visori VR, per simulare la disposizione ottimale degli spazi e del processo di produzione dell'impianto; e la progettazione attraverso il metodo BatPac, dove viene progettato l'impianto di produzione e la quantità di risorse necessarie attraverso un metodo top-down, ovvero partendo dalla capacità annuale richiesta si determina il numero dei macchinari e del loro ingombro, delle strutture, dei magazzini e di tutti gli spazi essenziali, al fine di determinare la corretta disposizione e l'area necessaria all'impianto sotto il vincolo della capacità annuale.

Seppur il primo metodo sembra presentare la migliore soluzione di progettazione dell'impianto, in quanto chi progetta il layout può determinare e modellare una soluzione simile a quella reale, anticipando eventuali criticità prima di procedere con l'effettiva costruzione, la seconda soluzione sembra essere la più adeguata alle esigenze attuali. Il motivo della scelta deriva dal fatto che per progettare un impianto reale con la tecnologia

3D bisogna avere a disposizione una potenza di calcolo elevata, il che rende ancora più complessa questa fase. Mentre, seppur non rappresenti la soluzione ottimale, la seconda metodologia risulta essere molto più adattabile alla complessa progettazione degli impianti attuali.

Infine, esaminando i parametri qualitativi della linea produttiva, emerge che per le principali fasi che rappresentano dei colli di bottiglia, ovvero la fase di stacking e formation, bisogna dedicare particolare attenzione durante la progettazione del layout, in quanto un guasto di queste fasi comporterebbe il fermo dell'intera linea produttiva.

In questo studio, non avendo dati su cui calcolare gli effettivi spazi necessari a progettare un layout di un impianto di LIB, come la capacità annuale della gigafactory, la velocità di produzione dei macchinari, la capienza dei magazzini in relazione alle materie prime, si è riportata un'analisi teorica della progettazione del layout presente nella letteratura, al fine di sensibilizzare e condividere la conoscenza di un settore ancora poco diffuso tra il pubblico.

3. Conclusioni e Ricerche Future

In questo capitolo vengono riportati i risultati ottenuti, descrivendo i relativi benefici e i limiti riscontrati durante il progetto di tesi. Infine, verrà proposto uno spunto per eventuali miglioramenti e sviluppi futuri legati al tema.

4.1 Benefici Della Tesi

L'obiettivo di questo elaborato è quello di analizzare la produzione, ed in particolare la configurazione del layout, di un impianto di LIB.

A causa dell'eterogeneità delle informazioni dei metodi per la produzione delle celle di batterie agli ioni di litio e la mancanza di una documentazione specifica del layout delle gigafactory esistenti, le informazioni necessarie sono state tratte da diverse fonti separate. In particolare, la maggior parte delle risorse e della loro allocazione all'interno dell'impianto fanno riferimento ad impianti pilota, ovvero impianti con una scala di produzione intermedia tra quella di laboratorio e quella industriale.

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 completi per essere utilizzate. Per questo, come abbiamo visto, ricoprono un ruolo centrale nella strategia di elettrificazione che si sta sviluppando negli ultimi anni. Concentrare tutte le fasi di produzione, a partire dalle materie prime, in un unico impianto, in una gigafactory, riduce notevolmente i costi ed i tempi di produzione. Inoltre, permette al produttore, o a quel Paese, di poter soddisfare la domanda di batterie agli ioni di litio, in costante crescita.

È importante ribadire che la sequenza dei processi presentati in questo studio e il tipo di prodotto delle celle LIB sono solo una tra le diverse opzioni esistenti. Nella vita reale, ci sono diversi modi per organizzare la produzione, la disposizione del layout produttivo e le scelte nella selezione dei materiali, nella sequenza di lavoro e nella selezione delle attrezzature.

Essendo, quindi, la produzione delle batterie agli ioni un tema ancora in fase di sviluppo, di cui pochi ne hanno pienamente conoscenza, è utile approfondire i principali fattori che caratterizzano la progettazione di una gigafactory, sia in termini di disposizione interna degli spazi che delle fasi di lavorazione. Questo studio non entra nelle specifiche chimiche di una batteria durante la sua produzione.

Anche se il lavoro è svolto principalmente per supportare le persone che conoscono l'industria, può essere letto anche da una persona che non ha familiarità con la produzione di LIB. È stato anche deciso di sviluppare uno studio un po' superficiale a causa del carattere ampio dell'argomento. Un grande impianto di LIB consiste in molti processi in ognuno dei quali potrebbe variare in base al tipo di cella prodotta (prismatica, cilindrica e pouch). Uno studio più approfondito della progettazione del layout di ogni singola fase di lavorazione avrebbe comportato più tempo e maggiore lunghezza del lavoro, e inoltre non avrebbe avuto alcun valore aggiunto allo scopo dello studio.

La prima domanda di ricerca "*Quale tipo di layout è adatto alla fabbrica di batterie agli ioni di litio?*" è discussa nella sezione 2.2. Dopo aver esaminato le caratteristiche dei diversi tipi di layout e i requisiti della fabbrica pianificata, il layout per prodotto è stata scelta come tipo di layout, come evidenzia il capitolo 2.2.5.

"*Come progettare un impianto per la produzione di LIB?*" è una domanda piuttosto ampia. È trattata principalmente nei capitoli 2.4 e 3.3 ma anche in 3.4. L'automazione di fabbrica non è una nuova tendenza, ma al giorno d'oggi, l'accelerazione dell'automazione è in continua crescita e accelererà ulteriormente. Se la sincronizzazione tra le operazioni fallisce nelle fasi critiche derivante da una errata progettazione dell'impianto, l'intera produzione si fermerà. Ecco perché si pone grande enfasi alla fase di progettazione del layout. In particolare, nel capitolo 2.4 viene descritta l'intera sequenza del processo produttivo di una gigafactory, mentre nel capitolo 3.3 viene riportato un esempio di come disposizione di queste ultime dovrebbe essere all'interno dell'impianto, considerando anche le fasi di logistica e movimentazione e dei magazzini. Tradizionalmente, il layout di un impianto per la produzione di celle cilindriche è meno complesso da progettare, in quanto una parte significativa delle fasi di lavorazione sono automatizzate.

Nel capitolo 3.4, vengono descritte alcune tecniche per determinare l'area del layout dell'impianto. La modellazione 3D risulta essere di particolare supporto nella fase di pianificazione del layout, in quanto permette di simulare un reale impianto produttivo ed ottimizzare la sua disposizione. Tuttavia, risulta essere una tecnica ancora poco applicabile a casi reali per via delle forti limitazioni dovute alla ridotta potenza di calcolo del software VC 4.0, per cui il modello BatPaC è quello che meglio si adatta alla progettazione attuale di una gigafactory.

4.2 Limitazioni Ricontrate

Ci sono state diverse sfide durante questo progetto. Una delle principali è la scarsità di informazioni sul settore. Le informazioni trovate sono spesso contraddittorie e non chiare, In particolare, è emersa la mancanza di informazioni sul layout interno di una gigafactory e pareri, legati al tema, da parte di esperti e professionisti del settore. I motivi di queste mancanze di informazioni o disallineamenti tra i vari documenti 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, o ancora produrre differenti tipologie di celle, il che implica notevolmente il processo di produzione e, di conseguenza, il layout dell'impianto.

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). Anche questo influenza notevolmente il processo e la disposizione dell'impianto, che non permette una completa ed accurata analisi dello stesso.

La terza differenza è il volume di produzione, in quanto la produzione di una fabbrica di grandi volumi può essere resa più efficiente.

In una nuova fabbrica, la produzione inizia di solito su piccola scala. Anche in un impianto automatizzato, ci sarà una fase di apprendimento prima che la fabbrica funzioni a pieno regime.

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. La seconda fase che richiede ulteriori ricerche è la miscelazione degli elettroliti.

4.3 Passi e Sviluppi Futuri

Nei prossimi anni, ci sarà una grande crescita nel mercato delle celle al litio ad alte prestazioni. Ciò richiederà progressi significativi in termini di qualità, sicurezza, energia e densità di potenza, durata e costi. Questi obiettivi richiedono standard di qualità superiori, un alto grado di automazione, una logistica ben pianificata, tecnologie di produzione di alto livello e la massima efficienza delle risorse, che si traduce nell'ottimizzazione dell'interno impianto produttivo.

Lo sviluppo dinamico della tecnologia di produzione delle batterie richiede una flessibile pianificazione degli impianti di produzione. Gli impianti di produzione devono essere in grado di adattarsi alle dinamiche esterne e interne e rispondere in modo flessibile.

Allo stesso modo, un concetto di impianto di produzione modulare (reparti di produzione intercambiabili) è raccomandato per un facile adattamento ai progressi tecnologici e raggiungere una maggiore disponibilità fornendo ridondanza nella produzione parallela delle linee di produzione. La strategia high-tech del governo tedesco, come il progetto "Industria 4.0" può contribuire significativamente allo sviluppo di un impianto di produzione di batterie competitivo a livello mondiale.

Nel capitolo 3.3.5, viene descritto un impianto flessibile per la produzione di differenti tipologie di batterie al litio all'interno dello stesso impianto. Attualmente, non esiste nessuna documentazione che proponga uno studio del layout e della disposizione delle risorse di tale impianto, in quanto risulta essere una soluzione ancora in via di sviluppo. Si lascia ai futuri ricercatori lo studio della progettazione del layout di un impianto flessibile e come si differenzia dalle attuali soluzioni.

Inoltre, i costi legati alla fase di progettazione del layout 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, per cui si propone ai futuri ricercatori l'eventuale stima dei costi legati alla progettazione del layout per un impianto di LIB.

Bibliografia

Aydemir, M.; Bach, G.; Schröder, R.; Glodde, A.; Seliger, G.: Handhaben von Elektrodenfolien. In: wt online, Jg. 105, H. 9 2015, pp. 591-596.

Brand, M.J., Schmidt, P.A., Zaeh, M.F., and Jossen, A., ‘Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances’, J. Energy Storage 2015 (1), 7–14.

Brodd, R. J.; Tagawa, K.: Lithium-Ion Cell Production Processes. In: van Schalkwijk, W. A.; Scrosati, B. (Hrsg.): Advances in Lithium-Ion Batteries. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers 2002, pp. 267–288.

Cagliano Anna Corinna (2020e) Impianti Industriali - Studio del Plant Layout. Slide del corso. Politecnico di Torino, a.a. 2020-2021.

Chen, C.J., S.K. Ong, A.Y.C. Nee & Y.Q. Zhou, ‘Haptic-based Interactive Path Planning for a Virtual Robot’, Arm. International Journal of Interactive Design and Manufacturing 2010, pp.113-123

Collins, J. & R. Hussey (2009). Business research: a practical guide for undergraduate and postgraduate students. 3rd edition. London: Palgrave Macmillan.

Dai Q, Kelly JC, Gaines L. and WangM., ‘Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications’, Batteries 2019 (5), pp. 48.

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, International Journal of Production Research, 44(2), pp. 419–420.

Electric Drives Production Conference, 2013: Method for Quality Parameter Identification and classification in Battery Cell Production.

Ellingsen L A-W, Hung CR and Strømman AH 2017 Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions Transportation Research Part D: Transport and Environment 55, pp. 82–90.

Emilsson, E; Dahllöf, L. 'Lithium-Ion Vehicle Battery Production', 2019, 19-26.

Galante Giacomo (2018), Impianti Industriali - Layout dei sistemi produttivi. Slide del corso. Università degli Studi di Palermo, a.a. 2018-2019.

Heimes, H., Kampker, A., Lienemann, C., Locke, M., and Offermanns, C. (2019a). Lithium-ion Battery Cell Production Process (VDMA Battery Production), available at https://www.researchgate.net/publication/330902286_Lithiumion_Battery_Cell_Production_Process.

Jinasena A., Burheim O.S., Strømman A.H.: 'A Flexible Model for Benchmarking the Energy Usage of Automotive Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing', Batteries 2021, 7(1).

K.G. Gallagher, P.A. Nelson, and D.W. Dees, "Simplified Calculation of the Area Specific Impedance for Battery Design," Journal of Power Sources 2011.

Kallitsis, E.; Korre, A.; Kelsall, G.; Kupfersberger, M.; Nie, Z. Environmental life cycle assessment of the production in China of lithium-ion batteries with nickel-cobalt-manganese cathodes utilising novel electrode chemistries. J. Clean. Prod. 2020, 254, 1200679.

Kamper, A. et al., 'Evaluation of a Remanufacturing for Lithium Ion Batteries from Electric Cars', World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering 2016 (10), doi: 10.5281/zenodo.1128215

Kassatly, S.: The lithium-ion battery industry for electric vehicles. M.Sc.: Dept. of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts, 2010.

Kurfer, J.; Westermeier, M.; Tammer, C.; Reinhart, G.: Production of large-area lithium-ion cells – Preconditioning, cell stacking and quality assurance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2012, 61(1), pp.1–4

Kurland, S.D., ‘Energy use for GWh-scale lithium-ion battery production’, *Environ. Res. Commun.* 2020, 2, 012001.

Kustersa, K.A., Pratsinisa, S.E., Thomab, S.G., and Smith, D.M. (1994). Energy size reduction laws for ultrasonic fragmentation. *Powder Technol.* 80, pp. 253–263.

Kraytsberg, A., and Ein-Eli, Y. (2016). Conveying advanced Li-ion battery materials into practice the impact of electrode slurry preparation skills. *Adv. Energy Mater.* 6, 1600655.

Kronthaler, M, Kudfer, J., Wiedenmann, R., ‘Laser Cutting in the Production of Lithium Ion Cells’, *Physics Procedia* 39, pp. 213–224, doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.032.

Hannan, M. A. et al: ‘State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations’, *IEEE Access* 2018, 6(1), pp.19362-19378

Haverila, M. Uusi-Rauva, E., Kouri, I. & M. A. (2009) *Teollisuustalous*. 6th editio. 119 Tampere, Suomi: Hämeen Kirjapaino Oy.

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.

Liu Y., Zhang R., Wang J., Wang Y. (2021), ‘Current and future lithium-ion battery manufacturing’, *iScience*, 24, pp. 1-17.

Maiser, E.; Michaelis, S.; Müller, D.; Kampker, A. et al.: *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030*. Hrsg.: VDMA Batterieproduktion, Frankfurt am Main, Deutschland, 2020

Masik, S., T. Schulze, M. Raab & M. Lemessi (2016). Comprehensive 3D Visualization of Simulated Processes in Virtual Factories. *Int'l Conf. Modeling, Sim. and Vis. Methods*.

Nelson, P.A.; Ahmed, S.; Gallagher, K.G.; Dees, D.W. Cost savings for manufacturing lithium batteries in a flexible plant. *J. Power Sources* 2015, 283, 506–516.

Novarese Carlo (2019), “A Li-ion cell production overview”.

Peters J F and Weilm2018 Providing a common base for life cycle assessments of Li-ion batteries *Journal of Cleaner Production* 171, pp. 704–13.

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.

Saunders, M., P. Lewis & A. Thornhill (2016). *Research Methods for Business Students*. 6th Ed. Pearson Education Limited.

Schmitz, M. & S. Wenzel, ‘Using 3D Visualization in the Context of Discrete-Event Simulation - Significance and Development Trends’, *Proceedings of Simulation in Produktion und Logisti*, 2013.

Schmidt, O.; Thomitzek, M.; Röder, F.; Thiede, S. Modeling the impact of manufacturing uncertainties on lithium-ion batteries. *J. Electrochem. Soc.* 2020, 167, 1–15.

Sheng, Y., ‘Investigation of Electrolyte Wetting in Lithium Ion Batteries: Effects of Electrode Pore Structures and Solution’, *University of Wisconsin* 2015.

Simon, R.: ‘Facilities of a lithium-ion battery production plant’; *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications* 2018, pp.227-235.

Stich, M., Pandey, N., and Bund, A. (2017), ‘Drying and moisture resorption behaviour of various electrode materials and separators for lithium-ion batteries’, *J. Power Sources* 364, pp. 84–91.

Sun, X.; Luo, X.; Zhang, Z.; Meng, F.; Yang, J. Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. *J. Clean. Prod.* 2020, 273, 123006.

Thomitzek, M.; Schmidt, O.; Röder, F.; Krewer, U.; Herrmann, C.; Thiede, S. Simulating Process-Product Interdependencies in Battery Production Systems. *Procedia CIRP* 2018, 72, 346–351.

Weeber, M.; Wanner, J.; Schlegel, P.; Birke, K.P.; Sauer, A. Methodology for the Simulation based Energy Efficiency Assessment of Battery Cell Manufacturing Systems. *Procedia Manuf.* 2020, 43, pp. 32–39.

Westermeier M., Reinhart G., Steber M., ‘Complexity management for the start-up in lithium-ion cell production’, *Procedia CIRP* 2014, pp. 131.

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.

X. M. Zhu, X. L. Liu, W.W. Deng, L. F. Xiao, H. X. Yang, and Y. L. Cao, ‘Perylenediimide dyes as a cheap and sustainable cathode for lithium ion batteries’ *Mater. Lett.*, vol. 175, no. 2, pp. 191–194, 2016.

Xia, Y., Zhou, Y. and Yoshio, M. (2011) ‘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.

Xie, W. & N.V. Sahinidis, ‘A Branch-and-bound Algorithm for the Continuous Facility Layout Problem’, *Computers and Chemical Engineering* 2008, pp.1016-1028.

Yuan C., Deng Y., Li T., Yang F. ‘Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles’, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66 2017, pp. 53-56.

Zäh, M.F., Schmitz, P., Westermeier, M.: Produktionsforschung für den elektrischen Antriebsstrang. In: Produktionskongress 2014, München, 2014, pp. 98-110.

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.

Zwicker, M.F.R., Moghadam, M., Zhang, W., and Nielsen, C.V. (2020). Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining. J. Adv. Joining Process. 1, 100017.

Sitografia

Babcock & Wilcox (2018) Babcock & Wilcox (2018), “Solvent Recovery Adsorption and Distillation Systems”, available at: <http://www.babcock.com/media/documents/resources/megtecauxiliarybulletins/solvent-recovery-adsorptionand-distillation-systems-english-e301-2023-low-res.ashx>.

Cristantemi Michelle (2021), “Non solo Tesla: che cos'è e come funziona una Gigafactory per la produzione di batterie”, Lumi4Innovation, available at: <https://www.innovationpost.it/2021/09/24/non-solo-tesla-che-cose-e-come-funziona-una-gigafactory-per-la-produzione-di-batterie/>.

Bracht, U., D. Geckler, & S. Wenzel. (2011), “Digitale Fabrik”, Springer Berlin Heidelberg, available at: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-540-88973-1>.

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-bassoimpatto-ambientale/le-batterie-al-litio>.

Flash Battery (2020), “CELLE AL LITIO: DIFFERENZE, UTILIZZI E COME SCEGLIERE LE MIGLIORI”, available at: <https://www.flashbattery.tech/celle-litio-batterieindustriali/>.

GEESUN Automation Technology (2014), “Products”, available at: www.geesun.com/en/product_show.asp?id=11.

HI-MECHA CORPORATION (2014), “Electrode Stacking Machine”, Hi-Mecha Company Inc., Japan, available at: www.himecha.co.jp/english/denseki.html.

Industrie 4.0: <https://www.hightech-strategie.de/de/59>.

IEA (2021), “Global EV Outlook 2021”, Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/7d7e049e-ce64-4c3f-8f236e2f529f31a8/Global_EV_Outlook_2019.pdf.

Licoccia Silvia (2013), “Batterie” - Università degli Studi di Tor Vergata. Available at: <http://didattica.uniroma2.it/files/index/insegnamento/148670-%0AChimica-Per-Lenergia>.

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.

MOTUS, Benedetti L. e Jusef Hassoun (2020), 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>.

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>.

Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018 R. Korthauer (ed.), Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications, https://doi.org/10.1007/978-3-662-53071-9_18.

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-degasand-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.batteryequipments.com/large-automatic-lithium-battery-electrode-die-cutting-machine-forpouch-cell_p568.html.

Visual Components (2018a), “Getting started with visual components”, available at: <http://academy.visualcomponents.com/courses/getting-started/>.

Visual Components (2018b), “About visual components software”, available at: <https://www.visualcomponents.com/about-us/>.

Westkämper E, D. Spath, C. Constantinescu, & J. Lentz (2013), “Digitale Produktion”, Springer Berlin Heidelberg, 2013, available at: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-20259-9>.