



ANALISI DEI CONSUMI ENERGETICI DI STABILIMENTO E STUDIO TECNICO DEL PROCESSO DI FINISSAGGIO DEL WIRE CARRIER NELL'AZIENDA TESSITURA MABIEL SRL

Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

anno accademico 2017-2018



RELATORE

Prof. Salvatore Mancò

CANDIDATO

Antonio Zarzana

SOMMARIO

1	L'AZIENDA	1
1.1	IL WIRE CARRIER	3
2	IL PROCESSO PRODUTTIVO	6
2.1	IL REPARTO TELAI	9
2.2	IL REPARTO FORNI DI FINISSAGGIO	10
2.2.1	IL FORNO A GAS	11
2.2.2	IL FORNO A INFRAROSSI	14
2.2.3	IL FORNO PROTOTIPO A INFRAROSSI	14
2.3	IL REPARTO RIBOBINATURA	15
2.4	IL REPARTO TRAFILE	15
2.5	IL REPARTO IMBALLAGGIO	17
2.6	IL REPARTO MAGAZZINO	18
3	INQUADRAMENTO ENERGETICO DEL SISTEMA	19
3.1	UTILIZZO DELL'ENERGIA ELETTRICA	20
3.2	LA GESTIONE DELL'ENERGIA	23
3.2.1	ANALISI DEI CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA DELLO STABILIMENTO	25
3.2.1.1	CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DELLO STABILIMENTO	26
3.2.1.1.1	CALCOLO DELLA RETTA DI REGRESSIONE	28
3.2.1.1.2	STATISTICA DELLA REGRESSIONE	29
3.2.1.1.3	STUDIO DEI CONSUMI STORICI	37
4	IL SISTEMA DI GESTIONE DELLA QUALITÀ	40
4.1	PROCESSO DI PROGETTAZIONE E SVILUPPO	43
4.1.1	FASE DI PIANIFICAZIONE	45
4.1.2	FASE DI PROGETTAZIONE	46

4.1.3	SVILUPPO E VALIDAZIONE DEL PROCESSO	47
4.2	IL PROCESSO DI FINISSAGGIO	48
4.2.1	IPOSTESI DI CALCOLO	49
4.2.2	ANDAMENTO TEMPORALE DELLA TEMPERATURA	55
4.2.2.1	SCAMBIO TERMICO PER IRRAGGIAMENTO	57
4.2.2.2	SCAMBIO TERMICO PER CONVEZIONE	63
4.2.2.3	DIFFUSIONE DEL VAPORE D'ACQUA	68
4.2.3	IL PROFILO DI TEMPERATURA	72
4.2.3.1	SOLUZIONE CON METODO NUMERICO	75
4.2.3.2	ENERGIA TERMICA ASSORBITA DAL WIRE CARRIER	92
4.2.3.3	EFFICIENZA ENERGETICA DEL SISTEMA	98
4.2.4	ANALISI DI SENSITIVITÀ DEL MODELLO	104
4.2.4.1	VARIAZIONE DELLA VELOCITÀ DI TRAINO	105
4.2.4.2	VARIAZIONE DELLA QUANTITÀ DI COLLA INIZIALE	109
4.2.4.3	VARIAZIONE DELLE CONDIZIONI DELL'ARIA AMBIENTE	113
4.2.5	SVILUPPI FUTURI DEL SISTEMA	117
5	RISULTATI E CONCLUSIONI	123
6	BIBLIOGRAFIA	125

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 – Vista dall'alto dell'unità produttiva _____	2
Figura 1.2 – Pianta dell'edificio più esteso del sito produttivo _____	2
Figura 1.3 – Pianta dell'edificio meno esteso del sito produttivo _____	3
Figura 1.4 – Esempio di wire carrier. I fili neri sono fili di polipropilene, quelli bianchi sono di poliestere. Da notare la trama di filo metallico piegata a formare delle asole uguali tra loro. _____	3
Figura 1.5 – Guarnizione in gomma con wire carrier all'interno. _____	4
Figura 1.6 – Quote caratteristiche del wire carrier. _____	5
Figura 2.1 – Flusso dei materiali nei diversi reparti produttivi _____	7
Figura 2.2 – Ubicazione dei reparti nello stabilimento _____	8
Figura 2.3 – Sistema di svolgitura delle 6 bobine _____	12
Figura 2.4 – Vista dell'interno del forno di asciugatura _____	13
Figura 2.5 – Sistema tira pezza di riavvolgitura del nastro _____	13
Figura 2.6 – Immagine della trafila prima dell'immersione nel bagno _____	16
Figura 2.7 – Vista dei passaggi del filo nelle filiere immerse nel bagno _____	17
Figura 3.1 – Quota di potenza elettrica installata per reparto. Vengono considerati anche l'illuminazione, l'impianto per l'aria compressa e gli aerotermini installati. _____	21
Figura 3.2 – Quota di potenza elettrica installata per tipologia di apparecchiatura. _____	22
Figura 3.3 – Andamento giornaliero dei consumi di energia elettrica dello stabilimento nel periodo 01/01/2017 – 31/08/2018. _____	27
Figura 3.4 – Tabella di output della funzione Analisi dati – Regressione di Microsoft Excel _____	33
Figura 3.5 – Confronto tra andamento settimanale della produzione e dei consumi di energia elettrica _____	34
Figura 3.6 – Equazione caratteristica dello stabilimento. _____	35
Figura 3.7 – Cumulata dei residui _____	38
Figura 4.1 – Schema di processo aziendale. _____	41
Figura 4.2 – Schematizzazione del ciclo PDCA per un processo aziendale. _____	42

Figura 4.3 – Schema descrittivo del processo aziendale di Progettazione e sviluppo	44
Figura 4.4 – Fasi fondamentali per la progettazione e lo sviluppo del processo produttivo	45
Figura 4.5 – Quote caratteristiche del wire carrier	60
Figura 4.6 – Profilo di temperatura dell'articolo considerato	85
Figura 4.7 – Portata d'acqua evaporata in ogni fase per l'articolo considerato	86
Figura 4.8 – Umidità specifica del wire carrier nelle diverse fasi per l'articolo considerato	87
Figura 4.9 – Profilo di temperatura di tutti gli articoli	89
Figura 4.10 – Andamento dell'umidità del wire carrier per tutti gli articoli	91
Figura 4.11 – Energia termica assorbita dai diversi articoli	97
Figura 4.12 – Profilo di temperatura al variare della velocità	105
Figura 4.13 – Portata d'acqua evaporata al variare della velocità	106
Figura 4.14 – Umidità del wire carrier al variare della velocità.	107
Figura 4.15 – Energia termica assorbita al variare della velocità	108
Figura 4.16 – Andamento della temperatura al variare dell'umidità iniziale	109
Figura 4.17 – Portata d'acqua evaporata al variare dell'umidità iniziale del wire carrier	110
Figura 4.18 – Andamento dell'umidità del wire carrier al variare dell'umidità iniziale	111
Figura 4.19 – Andamento dell'energia termica assorbita al variare dell'umidità iniziale	112
Figura 4.20 – Andamento della temperatura al variare delle condizioni dell'aria ambiente	113
Figura 4.21 – Andamento della portata evaporata al variare delle condizioni dell'aria	114
Figura 4.22 – Andamento dell'umidità del wire carrier al variare delle condizioni ambiente	115
Figura 4.23 – Energia termica assorbita al variare delle condizioni ambiente	116
Figura 4.24 - Confronto dell'andamento della temperatura tra i due layout	117
Figura 4.25 - Confronto dell'andamento della portata evaporata tra i due layout	118

Figura 4.26 - Confronto dell'andamento dell'umidità del wire carrier tra i due layout

_____ 119

Figura 4.27 – Confronto dell'energia termica assorbita tra i due layout _____ 120

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3.1 – Riepilogo potenza elettrica installata per reparto. _____	20
Tabella 3.2 - Riepilogo potenza elettrica installata per il sistema di illuminazione.	21
Tabella 3.3 – Riepilogo potenza elettrica installata per impianto di aria compressa e aerotermi per il riscaldamento ambientale. _____	22
Tabella 3.4 – Potenza elettrica installata per tipologia di apparecchiature _____	22
Tabella 3.5 – Tabella di output analisi di regressione. _____	36
Tabella 4.1 – Risultati della prova di laboratorio sul residuo secco della colla. _	50
Tabella 4.2 – Risultati quantità di colla nel wire carrier _____	51
Tabella 4.3 – Tempi di percorrenza per ogni sezione del sistema di essiccazione _____	54
Tabella 4.4 – Percentuale del tempo impiegata per ogni sezione del sistema di essiccazione _____	54
Tabella 4.5 – Densità dei materiali. _____	56
Tabella 4.6 - Calore specifico a pressione costante dei materiali. _____	56
Tabella 4.7 – Diametro dei diversi tipi di filato _____	59
Tabella 4.8 - Temperatura dell'aria nelle diverse sezioni del sistema di essiccazione _____	63
Tabella 4.9 – Coefficienti di scambio termico per convezione dei fili di poliestere, polipropilene e della colla, al variare della temperatura dell'aria. _____	66
Tabella 4.10 – Coefficienti della correlazione di Hilbert _____	66
Tabella 4.11 – Coefficiente di diffusione al variare della temperatura dell'aria __	71
Tabella 4.12 – Quote caratteristiche dell'articolo considerato _____	84
Tabella 4.13 – Numero di fili di poliestere e polipropilene dell'articolo considerato _____	85
Tabella 4.14 – Energia termica assorbita dai diversi articoli _____	98
Tabella 4.15 – Potenza termica delle sezioni di preriscaldamento e di essiccazione __	98
Tabella 4.16 – Perdite per trasmissione dalla parete della sezione di preriscaldamento _____	101
Tabella 4.17 - Perdite per trasmissione dalla parete della sezione di essiccazione _____	101

Tabella 4.18 – Esempio configurazione reale del sistema di essiccazione	___	102
Tabella 4.19 – Performance delle diverse sezioni del sistema di essiccazione		102
Tabella 4.20 – Configurazione con articolo più energivoro	_____	103
Tabella 4.21 – Performance del sistema con configurazione con articolo più energivoro	_____	104
Tabella 4.22 – Velocità del traino del forno	_____	105
Tabella 4.23 – Energia termica assorbita dagli articolo per i due layout d’impianto	_____	121
Tabella 4.24 – Confronto dell’efficienza termica tra i due layout	_____	121

ABSTRACT

Il lavoro di tesi in azienda presso Tessitura Mabel srl è strutturato in due parti. La prima parte consiste nella presentazione dell'azienda, dei reparti produttivi e in una trattazione teorica sul sistema di gestione dell'energia. In questo ambito sono introdotti gli utilizzi di energia elettrica da parte dell'intero stabilimento, suddividendo i contributi legati ai diversi reparti produttivi. A partire dai dati storici dei consumi di energia elettrica dello stabilimento, è effettuata un'analisi statistica dei consumi in relazione ai volumi produttivi ottenendo la caratterizzazione energetica dello stabilimento. Il risultato più rilevante di questa trattazione è la quantificazione della quota fissa di energia elettrica consumata, di cui è possibile investigare la natura. L'altro dato rilevante deriva dal CUSUM, che permette di ottenere i periodi storici in cui i consumi dello stabilimento si sono scostati dalla caratteristica.

Nella seconda parte viene introdotto il sistema di qualità aziendale. In questo contesto viene analizzato dal punto di vista energetico il processo di finissaggio del Wire Carrier, che consiste nell'asciugatura della colla mediante un sistema ad aria alimentato a gas naturale. Lo scopo di questa trattazione è quello di ottenere una base scientifica sui fenomeni fisici coinvolti nel processo al fine di individuare il comportamento del Wire Carrier e della colla all'interno del sistema "forno" e analizzare come viene influenzata la qualità del prodotto, definita mediante i parametri di progetto. Le osservazioni finali sono rivolte alle metodologie per sviluppare il modello matematico usato e ad analizzare i consumi legati a questo processo produttivo, in modo da valutare le azioni necessarie per migliorare l'efficienza del sistema.

Thesis work in the company at Tessitura Mabel srl is structured in two parts. The first part is in the presentation of the company, of the production departments and a theoretical point of view on the energy management system. In this context, the electrical use are introduced by the entire plant, subdividing the contributions related to the various production departments. Starting from historical data on energy consumption, it is proposed a statistical analysis of energy consumptions in relation to production volumes, obtaining the energetic characterization of the plant. The most relevant result of this treatment is the quantification of the fixed amount of electricity

consumed, such that its nature can be investigated. Other relevant data derives from the CUSUM, which allows to achieve the historical periods in which the consumption of the plant is deviated from the characteristic.

In the second part, the company quality system is presented. In this context the Finishing process of the Wire Carrier is analyzed from an energy point of view. The purpose of this discussion is to obtain a scientific basis to manage quality problems of the operating system and to identify critical parameters. The final observations are aimed at the methodologies to develop the mathematical model used and to analyze the consumption related to this production process, in order to evaluate the actions necessary to improve the efficiency of the system.

This page is intentionally left blank

1 L'AZIENDA

L'azienda **Tessitura Mabel srl** fa parte del gruppo Martinetto, costituito anche dalle aziende **Remmert spa**, **Filmar srl**, **PMA srl** e **Nastrificio Veneto srl**. Tutte le aziende del gruppo operano nel campo dell'industria tessile, in particolare nella produzione di nastro tessuto per applicazioni in svariati settori, sia tecnici sia abbigliamento, moda, arredamento, biomedicali.

Tessitura Mabel srl con sede in via alle Fabbriche, 183 a Caselle Torinese (TO) opera nel settore dei nastri tessuti ad uso tecnico, in particolare produce il Wire Carrier (1).

Il Wire Carrier è un nastro tecnico costituito da una trama di filo metallico e un ordito di filato, tipicamente poliestere e polipropilene. Questo prodotto è un semilavorato che viene preparato in bobine e venduto ai produttori di guarnizioni in gomma o PVC per l'industria Automotive, usate ad esempio per le portiere degli autoveicoli.

Il sito produttivo di via alle Fabbriche, 183 si trova in un'area adibita a uso industriale ed è costituito da due edifici separati:

- il più esteso (circa 2100 mq) è composto da due piani, il piano terra ospita i reparti di accettazione materia prima, tessitura, finissaggio/incollaggio e ribobinatura, il primo piano ospita gli uffici e il refettorio;
- l'altro stabile di circa 520 mq ospita i reparti di trafilatura del filo di ferro e il magazzino.

La vista da satellite dell'unità produttiva nel suo complesso è riportata in Figura 1.1.





Figura 1.1 – Vista dall'alto dell'unità produttiva

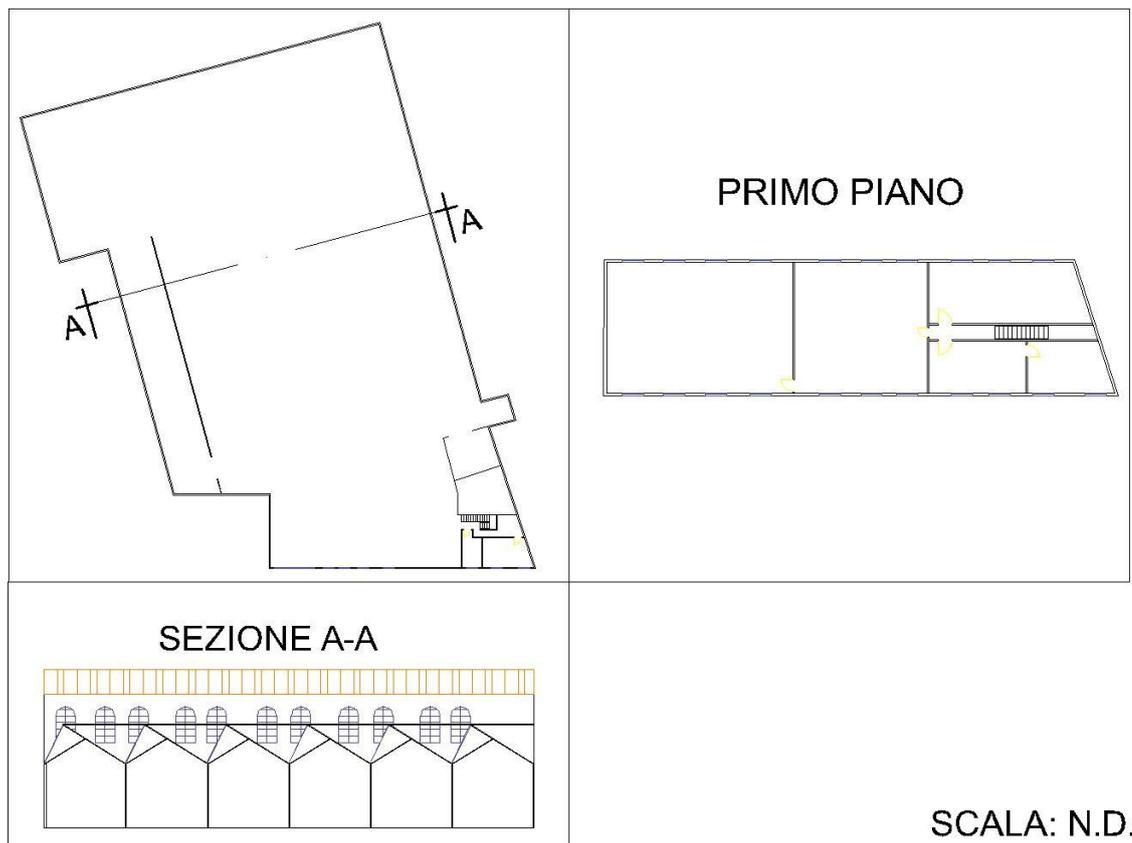


Figura 1.2 – Pianta dell'edificio più esteso del sito produttivo

STABILIMENTO 2



SCALA: N.D.

Figura 1.3 – Pianta dell'edificio meno esteso del sito produttivo

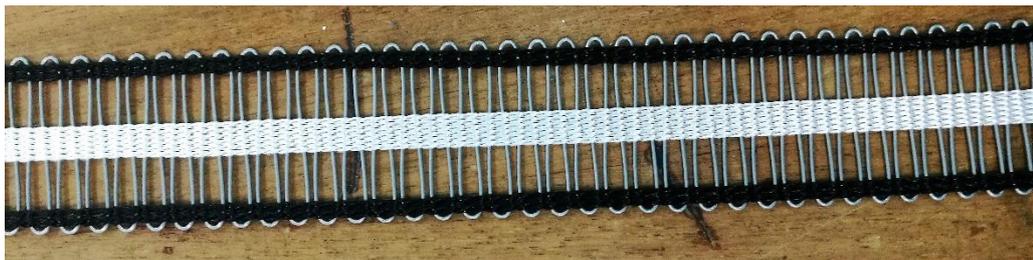
1.1 IL WIRE CARRIER

Il wire carrier è un nastro tecnico tessuto, utilizzato come armatura interna delle guarnizioni adoperate nell'industria automobilistica (es.: portiere delle auto, dei camion).

È costituito da una trama di filo metallico (acciaio zincato principalmente, ma anche acciaio INOX, alluminio) e un ordito di filato (tipicamente fibre sintetiche come polipropilene o poliestere).

Il filo metallico di trama viene piegato trasversalmente formando una serie di asole uguali tra loro; l'ordito viene tessuto longitudinalmente. A seconda dell'articolo e del cliente i fili di ordito sono in numero diverso e possono formare delle bande continue: tipicamente si ha una banda centrale più larga e due laterali più strette, ma esistono articoli con i fili di ordito spazati tra loro in maniera più o meno regolare..

In Figura 1.4 è raffigurato uno degli articoli prodotti dall'azienda.

**Figura 1.4** – Esempio di wire carrier. I fili neri sono fili di polipropilene, quelli bianchi sono di poliestere. Da notare la trama di filo metallico piegata a formare delle asole uguali tra loro.

Il wire carrier è un semilavorato che viene venduto in bobine e utilizzato direttamente nell'estrusore della gomma. Il nastro viene piegato a U o a V e, successivamente, entra nella linea di estrusione insieme alla gomma, formando così la guarnizione, come in Figura 1.5.



Figura 1.5 – Guarnizione in gomma con wire carrier all'interno.

Le dimensioni caratteristiche del nastro, riportate in Figura 1.6, sono:

- la **larghezza** (definita quota A);
- il **numero di asole per unità di lunghezza**, espressa in n° di asole per 10 cm;
- la **larghezza delle asole** (quota D), la **distanza tra le asole** (quota C) e il **passo** (quota E).

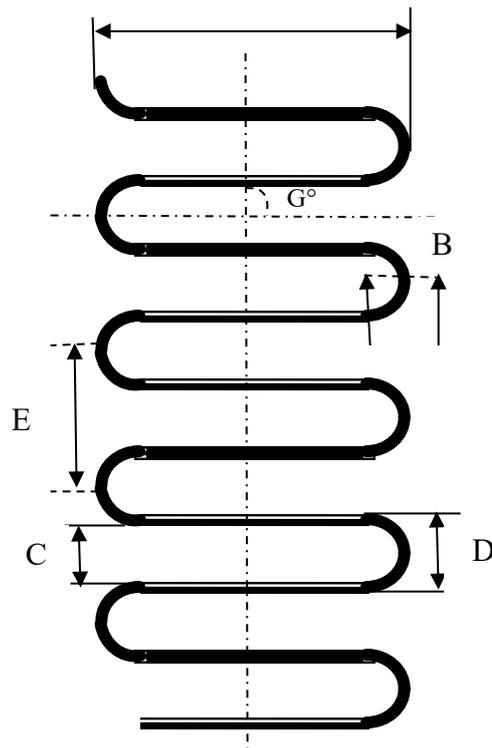


Figura 1.6 – Quote caratteristiche del wire carrier.

Valgono le seguenti relazioni:

$$\text{quota E} = \text{quota D} + \text{quota C} \text{ [mm]}$$

$$\text{passo} = \text{larghezza delle asole} + \text{distanza tra asole} \text{ [mm]}$$

Per garantire un migliore funzionamento del wire carrier nella linea di estrusione, è necessario che i fili di filato non si muovano e mantengano la posizione desiderata. Pertanto è necessario un processo di finissaggio del nastro, in cui viene applicata una colla per fissare i fili di ordito sulla trama di ferro. La colla è una resina acrilica in dispersione acquosa (copolimeri stirolo-acrilici autoreticolanti). Il nastro incollato deve quindi passare in un forno per garantire la polimerizzazione e l'asciugatura della colla.

2 IL PROCESSO PRODUTTIVO

La produzione in serie del wire carrier non è un processo continuo, ma è diviso in più fasi:

- **accettazione** della materia prima, cioè l'accettazione dei materiali che vengono lavorati per poter ottenere il prodotto finito, si tratta dunque di filati in fibre sintetiche, filo metallico e colla;
- **tessitura** del nastro, mediante telai meccanici;
- **finissaggio** del nastro, cioè il processo di termofissaggio della colla;
- **avvolgitura (ribobinatura) e controllo** del nastro, il nastro incollato e termofissato viene ribobinato per essere controllato e rimuovere i difetti;
- **imballaggio e immagazzinamento**, le bobine vengono imballate e poste in magazzino pronte per la spedizione al cliente.

Parte del filo di acciaio zincato usato come materia prima viene autoprodotta mediante un processo di trafilatura in cui il diametro del filo metallico viene ridotto, utilizzando delle trafilature a bagno, da 2,1 mm fino a 0,75 mm, per essere utilizzato nella produzione in tessitura. Lo scopo del processo di trafilatura è quello di ridurre il costo della materia prima acquistando dall'esterno un filo con diametro più spesso e quindi con costo inferiore, al netto delle spese accessorie necessarie per il processo di trafilatura.

Le relazioni tra le varie fasi produttive sono descritte in Figura 2.1 (2).

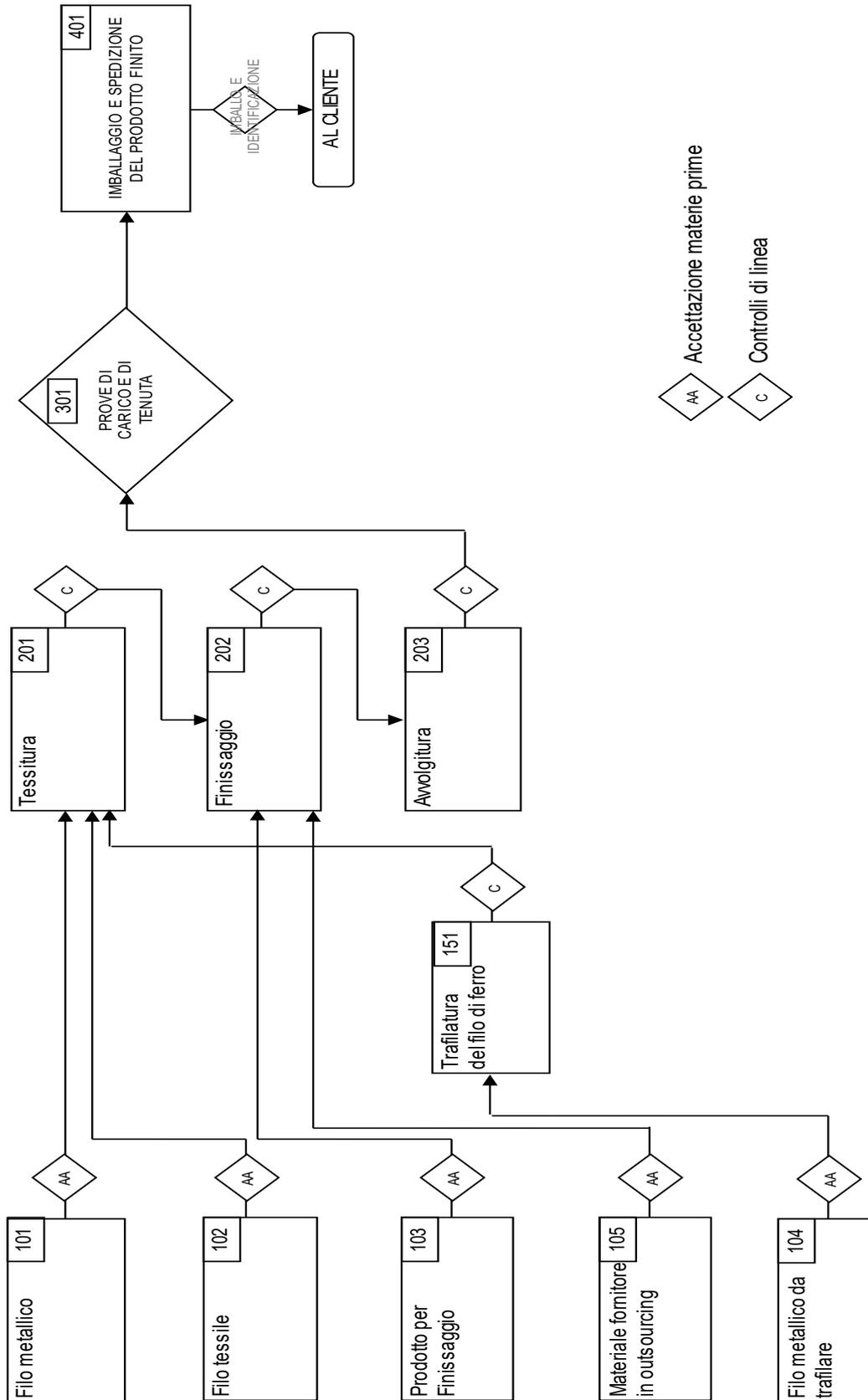


Figura 2.1 – Flusso dei materiali nei diversi reparti produttivi

Nello stabilimento di via alle Fabbriche è possibile distinguere diversi reparti produttivi, che permettono di concludere l'intero ciclo produttivo in un unico sito.

I reparti presenti nei due edifici dello stabilimento sono:

- il **reparto telai**, dove avviene il processo di tessitura del nastro;
- il **reparto forni di finissaggio**, in cui avviene il termofissaggio della colla sul nastro;
- il **reparto ribobinatura**, dove avviene il controllo qualità da parte dell'operatore, mediante ribobinatura;
- il **reparto trafilè**, dove avviene il processo di trafilatura del filo metallico destinato alla fornitura interna;
- il **reparto imballaggio**, in cui vengono imballate le bobine per essere spedite;
- il **magazzino**, in cui avviene lo stoccaggio del materiale in arrivo e in partenza.

L'ubicazione dei vari reparti all'interno dei due stabilimento è riportata nella pianta tematica di Figura 2.2.

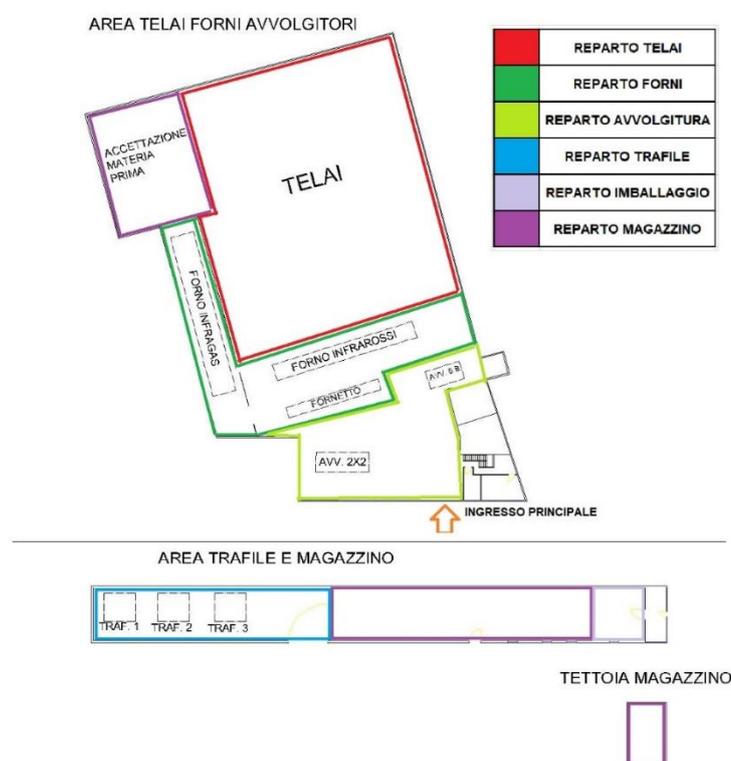


Figura 2.2 – Ubicazione dei reparti nello stabilimento

2.1 IL REPARTO TELAI

Il reparto telai è costituito da 37 telai a crochet, di cui 23 a 4 pezze e 14 a 2 pezze. Ogni pezza permette di produrre un articolo.

Il processo di tessitura consiste nell'intrecciare i fili di ordito, disposti parallelamente alla pezza, con i fili di trama, disposti in senso trasversale (3).

Nel caso del Wire Carrier il filo di trama è unico e costituito da filo di ferro, tipicamente di diametro 0,75 mm; i fili di ordito sono in un numero variabile a seconda dell'articolo. Il materiale che costituisce questi fili può essere polipropilene o poliestere. Non tutti gli articoli che vengono prodotti devono essere incollati nei forni di finissaggio, alcuni vengono venduti senza subire il processo di incollaggio.

2.2 IL REPARTO FORNI DI FINISSAGGIO

Il processo di finissaggio del Wire Carrier consiste nell'incollaggio dei fili di ordito sulla trama. Questo processo è necessario per evitare lo spostamento dei fili di ordito che potrebbe provocare diversi problemi nel processo di estrusione della plastica delle guarnizioni. L'evento più comune, in caso di spostamento, è la presenza di difetti nella guarnizione estrusa, nelle parti in cui è presente meno quantità di gomma.

Il processo di finissaggio avviene mediante dei forni di incollaggio, in cui viene spalmata la colla sul nastro e asciugata mediante dei forni asciugatori, con diverse tecnologie:

- n. 2 **forni a infrarossi**, in cui l'energia termica è fornita mediante lampade a infrarossi. La radiazione infrarossa permette il raggiungimento di temperature più elevate e consente una polimerizzazione più rapida della colla. Questa tecnologia è usata per tutti gli articoli contenente solo fili in poliestere, poiché possono raggiungere temperature più elevate, avendo una temperatura di fusione di circa 210°C.
- n. 1 **forno a gas**, una tecnologia più recente, in cui si raggiungono temperature più basse rispetto al forno a infrarossi e viene usato per tutti gli articoli contenenti polipropilene (temperatura di fusione di 180°C). Il forno a gas consiste in un sistema di essiccazione ad aria, alimentato da gas naturale, con una sezione di preriscaldamento, alimentata anch'essa a gas naturale.

Il materiale usato per incollare è una colla costituita da una resina polimerica in soluzione acquosa, diluita in acqua in proporzione 60% in peso di acqua e 40% di soluzione con resina. Alla colla viene aggiunto un colorante blu, in questo modo è possibile verificare ad occhio nudo se la quantità di colla depositata è sufficiente, in base alla colorazione dei fili di poliestere (che sono di colore bianco).

È fondamentale, in termini di qualità del prodotto, il controllo della quantità di colla poiché, come detto in precedenza, un difetto di colla provoca lo spostamento dei fili causando notevoli difficoltà nell'uso del wire carrier nell'estrusore della gomma,

invece un eccesso di colla, con formazione di grumi di colla sul wire carrier, è notevolmente dannoso in quanto provoca la formazione di bolle sulla superficie della guarnizione.

Le grandezze di riferimento per questo processo produttivo sono:

- **velocità del nastro e numero di passaggi** all'interno delle camere del forno, la combinazione dei due permette di stabilire la produttività e il tempo di permanenza del prodotto;
- **temperatura di esercizio** nelle diverse sezioni del forno;
- **quantità di colla** depositata sul nastro.

L'aspetto più critico è il controllo e la regolazione della quantità di colla, poiché non è disponibile un metodo di misura della quantità di colla depositata sul nastro. La quantità di colla viene stimata visivamente in termini di qualità del prodotto, oppure attraverso prove e misure di peso post-produzione.

2.2.1 IL FORNO A GAS

Il forno di finissaggio alimentato a gas naturale è il sistema di incollaggio del wire carrier più recente.

Esso consiste in un asciugatore ad aria, in cui l'aria esterna, riscaldata da pannelli radianti a gas, viene inviata nella camera del forno dove asciuga la colla a base d'acqua di cui il nastro è impregnato.

Il sistema permette di incollare contemporaneamente 6 articoli, pertanto è un sistema "a 6 pezzi". È costituito da diversi componenti:

- **sistema di svolgitura**, in cui le 6 bobine vengono svolte contemporaneamente;



Figura 2.3 – Sistema di svolgitura delle 6 bobine

- **vasca di incollaggio**, è un sistema costituito da una vasca con sensore di livello collegata a un serbatoio per la colla. Quando il livello scende sotto un valore di soglia, il sensore invia un segnale a una valvola pneumatica attivata ad aria compressa, che si apre e permette di riempire la vasca di colla;
- **sezione di preriscaldamento**, è costituito da una batteria di scambio termico alimentata a gas naturale con piastre catalitiche che permettono di raggiungere una temperatura di circa 80°C nella sezione;
- **sezione di asciugatura**, è una cabina in cui viene soffiata aria calda, riscaldata mediante scambio termico con piastre catalitiche. In questa regione si raggiunge una temperatura di 140°C.



Figura 2.4 – Vista dell'interno del forno di asciugatura

- **sezione di avvolgitura**, in cui il wire carrier incollato viene raccolto in 6 bobine e pronto per essere “ribobinato” prima della spedizione, questa sezione viene anche chiamata “tira pezza” perché mette a disposizione la forza motrice per movimentare il nastro attraverso tutta la linea produttiva.



Figura 2.5 – Sistema tira pezza di riavvolgitura del nastro

L'applicazione della colla avviene mediante un rullo dosatore che si immerge all'interno della vasca e, ruotando, trascina una certa quantità di colla. Il nastro, entrando in contatto con il rullo, assorbe la colla prima di entrare nella sezione di preriscaldamento. Quindi in base alla velocità di rotazione del rullo è possibile regolare la quantità di colla depositata, avendo fissato la velocità di percorrenza del nastro lungo il sistema di incollaggio.

2.2.2 IL FORNO A INFRAROSSI

La tecnologia di incollaggio ad infrarossi è la soluzione più tradizionale. Il sistema è del tutto simile al forno a gas in termini di componenti. Le differenze principali sono tre:

- l'alimentazione del processo di asciugatura è caratterizzata dalla radiazione infrarossa emessa da 9 speciali lampade, poste all'interno del forno che garantiscono il raggiungimento di temperature elevate e una polimerizzazione più veloce ed efficace della resina che è contenuta nel collante utilizzato;
- il numero di pezzi del forno è otto, pertanto è possibile incollare contemporaneamente otto articoli.

2.2.3 IL FORNO PROTOTIPO A INFRAROSSI

Il forno prototipo è un sistema in fase di studio che permette il finissaggio del nastro grazie a quattro lampade a infrarossi. Le particolarità di questo sistema, rispetto alle altre due tecnologie, sono:

- una grande **compattezza** in termini di volume occupato dal forno;
- una **velocità di produzione più elevata** (18-20 metri al minuto contro gli 11-13 metri al minuto delle altre tecnologie) dovuto al raggiungimento di una temperatura del wire carrier più alta;
- il sistema è **monopezza, adattabile a due pezzi**, quindi possono essere incollati massimo due articoli contemporaneamente;
- **migliore qualità** del prodotto finale.

2.3 IL REPARTO RIBOBINATURA

L'ultima fase produttiva consiste nel "ribobinare" il nastro, ovvero avvolgere il nastro in delle bobine pronte per essere spedite. Durante questa fase del processo produttivo, l'operatore controlla contemporaneamente due pezze svolgendo altrettante bobine. Il suo compito è quello di verificare la natura dei difetti segnalati, occuparsi della riparazione oppure effettuare una giunta. La giunta consiste nell'eliminazione del tratto di wire carrier difettoso e nel ricongiungere le due estremità di nastro con fili di kevlar utilizzando una macchina da cucire automatica. Una volta effettuata la giunta, deve essere saldato anche il filo di ferro tra le due estremità interrotte.

Le postazioni di ribobinatura sono due. I macchinari utilizzati in questo reparto sono:

- un **avvolgitore 2X2**, in cui è possibile caricare 4 bobine per volta;
- un **avvolgitore a 6 bobine**;
- due **macchine da cucire** per effettuare le giunte;
- due **puntatrici**, per saldare i fili di ferro interrotti.

2.4 IL REPARTO TRAFILE

Il processo di trafilatura del filo di ferro è finalizzato alla produzione di filo di ferro con diametro 0,75 mm (utilizzato nella produzione del wire carrier) a partire da un filo di ferro di diametro 2,1 mm.

La produzione del filo è quindi destinata esclusivamente all'autoconsumo e la scelta di produrre questo tipo di filo autonomamente è dettata dalla convenienza economica: il filo con diametro 2,1 mm ha un costo nettamente inferiore rispetto al filo con diametro 0,75 mm e al netto degli altri costi di produzione, il risparmio ottenuto permette di recuperare l'investimento sui macchinari in un tempo brevissimo.

I macchinari che costituiscono il reparto di trafilatura sono:

- tre trafilare a bagno;
- una puntatrice per saldare il ferro in caso di interruzione o rottura.

Il processo di trafilatura a bagno consiste nella riduzione progressiva del diametro del filo mediante il passaggio attraverso un certo numero di filiere. Si tratta quindi di deformare il filo ottenendo sia una riduzione del diametro sia un allungamento

del filo stesso. Tutte le filiere, eccetto la prima, sono immerse in un bagno di acqua e lubrificante che funge anche da refrigerante per il filo che ovviamente si riscalda. Il bagno pertanto deve necessariamente essere raffreddato, utilizzando un gruppo frigorifero.

In Figura 2.6 è riportata un'immagine delle filiere fuori dal bagno.

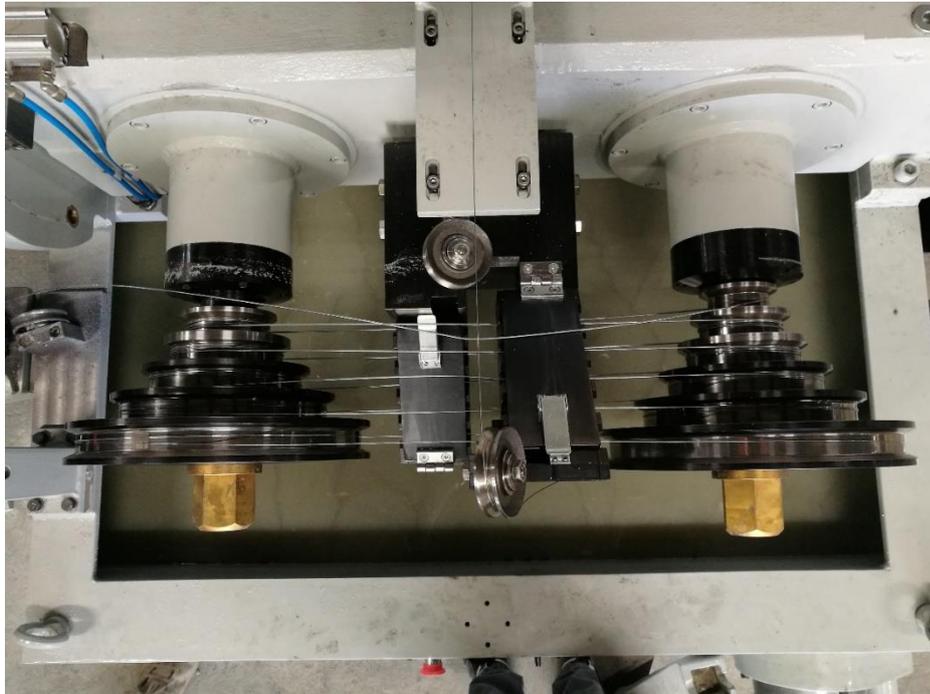


Figura 2.6 – Immagine della trafila prima dell'immersione nel bagno

In Figura 2.7 è riportato il passaggio del filo all'interno delle filiere, viste fuori dal bagno.



Figura 2.7 – Vista dei passaggi del filo nelle filiere immerse nel bagno

I parametri di riferimento del processo di trafilatura del ferro sono:

- **velocità** del filo, che è possibile regolare fino a un massimo di 8 m/s ed è strettamente legato alla produttività del reparto;
- **diametro finale** del filo;
- **quantità** di filo **per bobina**, il sistema si blocca quando la bobina raccoglie la quantità fissata di filo, tipicamente 500 kg.

È stata pianificata l'introduzione di una quarta trafila a bagno per incrementare l'autoproduzione di filo metallico.

2.5 IL REPARTO IMBALLAGGIO

Una volta che il wire carrier viene controllato e “ribobinato”, è necessario preparare le bobine per le spedizioni. Il processo di imballaggio consiste nel disporre la bobina su una pedana di legno ed avvolgerla con cellophane e materiale per assorbire gli urti.

2.6 IL REPARTO MAGAZZINO

Il magazzino è il luogo in cui le bobine vengono disposte prima di essere spedite ai clienti. Nel magazzino, le bobine vengono opportunamente identificate mediante etichettatura che contiene diverse informazioni:

- codice dell'articolo;
- codice cliente;
- cliente;
- data di produzione;
- quantità di prodotto.

3 INQUADRAMENTO ENERGETICO DEL SISTEMA

Nel seguente Capitolo verrà analizzato complessivamente dal punto di vista energetico lo stabilimento.

L'approvvigionamento di energia dall'esterno consiste esclusivamente nell'acquisto di energia elettrica dalla Rete di Trasmissione Nazionale e di gas naturale.

Il gas naturale viene utilizzato per:

- il **riscaldamento** degli ambienti dello stabilimento (compresi gli uffici), mediante due caldaie a condensazione da 120 kW (per lo stabilimento) installate a Settembre 2018 e una piccola caldaia da 22 kW per l'acqua calda sanitaria e il riscaldamento degli uffici;
- l'alimentazione del **forno a gas**, usato per il finissaggio del wire carrier.

L'energia elettrica viene utilizzata per:

- il funzionamento di tutte le **attrezzature produttive** in stabilimento, principalmente dispositivi meccanici movimentati da motori elettrici, forni, ecc..;
- l'**illuminazione** degli ambienti;
- l'**alimentazione** delle lampade dei forni;
- la **produzione di vettori energetici secondari**, come l'aria compressa per gli attuatori pneumatici o l'acqua refrigerata delle trafilate.

3.1 UTILIZZO DELL'ENERGIA ELETTRICA

Il driver principale per i diversi utilizzi in ambito produttivo è quindi l'energia elettrica.

In Tabella 3.1 è riportato un riepilogo della potenza elettrica installata per reparto (è esclusa nella trattazione la potenza elettrica legata all'illuminazione e all'aria compressa).

REPARTO	MOTORI ELETTRICI		MACCHINARI		
	POTENZA INSTALLATA [kW]	NUMERO	POTENZA INSTALLATA [kW]	NUMERO	TIPOLOGIA
TELAI	110,41	224	43,2	3	Forni di finissaggio a bordo macchina
FORNI	17,18	32	58,5	13	Lampade a infrarossi
RIBOBINATURA	7,1	4	4	1	Pressa per scarto
			25,6	2	Puntatrici
TRAFILE	163,5	7	4	1	Gruppo frigo per bagno delle trafilè
totale	298,2	267	135,3	20	

Tabella 3.1 – Riepilogo potenza elettrica installata per reparto.

I motori elettrici sono senza dubbio i componenti più rilevanti dal punto di vista dell'assorbimento energetico e del numero di unità installate. Sono tutti motori dotati di inverter per la regolazione del numero di giri.

Un altro aspetto rilevante è la potenza installata nel reparto trafilè. In questo caso il dato non è molto significativo per identificare i consumi del reparto perché l'elevata potenza elettrica dei motori di questi macchinari è dovuta alla presenza di una coppia di spunto molto alta. Nel normale funzionamento questi motori lavoreranno con un coefficiente di utilizzazione molto basso: a seguito di una prova sul ciclo di lavoro, è stato evidenziato che una trafilè assorba in media 14,4 kW e quindi tutto il reparto 43,2 kW, nettamente inferiore alla potenza installata.

Si può quindi stabilire, in termini di potenze installate, la quota che ogni reparto occupa rispetto agli altri, come riportato in Figura 3.1.

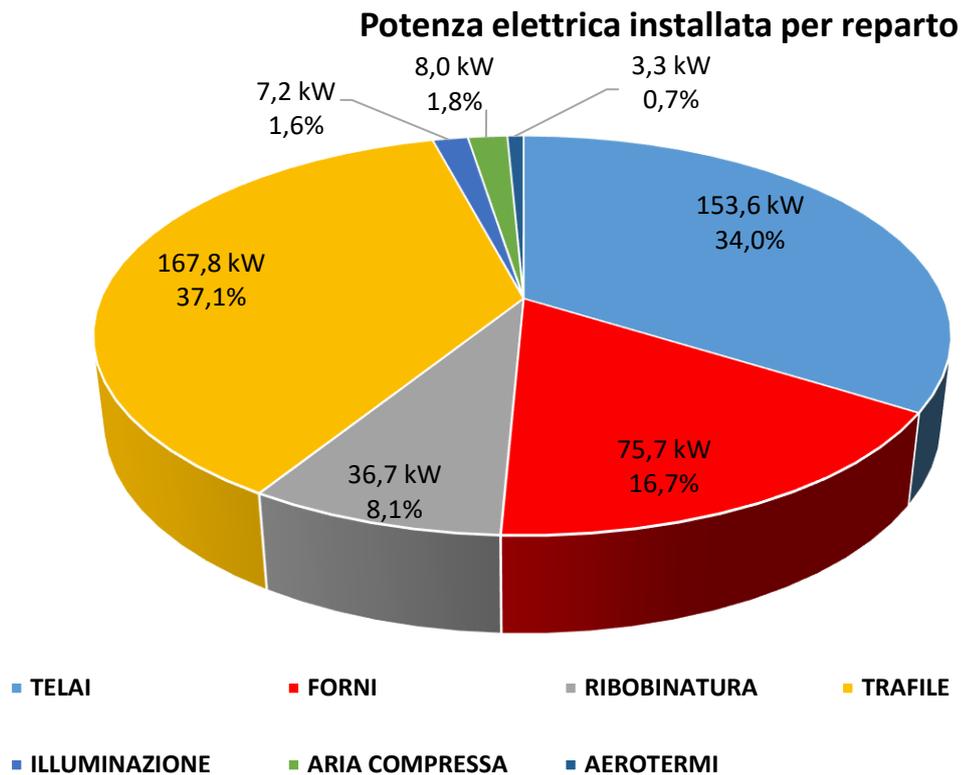


Figura 3.1 – Quota di potenza elettrica installata per reparto. Vengono considerati anche l’illuminazione, l’impianto per l’aria compressa e gli aerotermi installati.

Il dettaglio dei componenti e delle potenze installate per l’impianto ad aria compressa, l’illuminazione dei locali e gli aerotermi è riportata in Tabella 3.2 e Tabella 3.3.

ILLUMINAZIONE			
LOCALE	N° LAMPADE	POTENZA SINGOLA LAMPADA [kw]	POTENZA TOTALE [Kw]
Stabilimento	14	0,036	5,244
	74	0,058	
	28	0,016	
Uffici	9	0,072	0,648
Magazzino	35	0,036	1,26

Tabella 3.2 - Riepilogo potenza elettrica installata per il sistema di illuminazione.

Unità di produzione	Vettore energetico prodotto	Numero	Potenza totale installata [kW]
Compressore dell'aria	aria compressa	2	8
Aerotermi	aria calda riscaldamento	11	3,3

Tabella 3.3 – Riepilogo potenza elettrica installata per impianto di aria compressa e aerotermi per il riscaldamento ambientale.

Pertanto la situazione si traduce in quella espressa in Tabella 3.4 e Figura 3.2.

ATTREZZATURE	POTENZA ELETTRICA INSTALLATA [kW]
Motori elettrici	302,2
Lampade illuminazione	7,2
Lampade forni	101,7
Compressori aria	8,0
Gruppo frigo	4,0
Aerotermi	3,3
Macchinari ausiliari	25,9
totale	452,2

Tabella 3.4 – Potenza elettrica installata per tipologia di apparecchiature

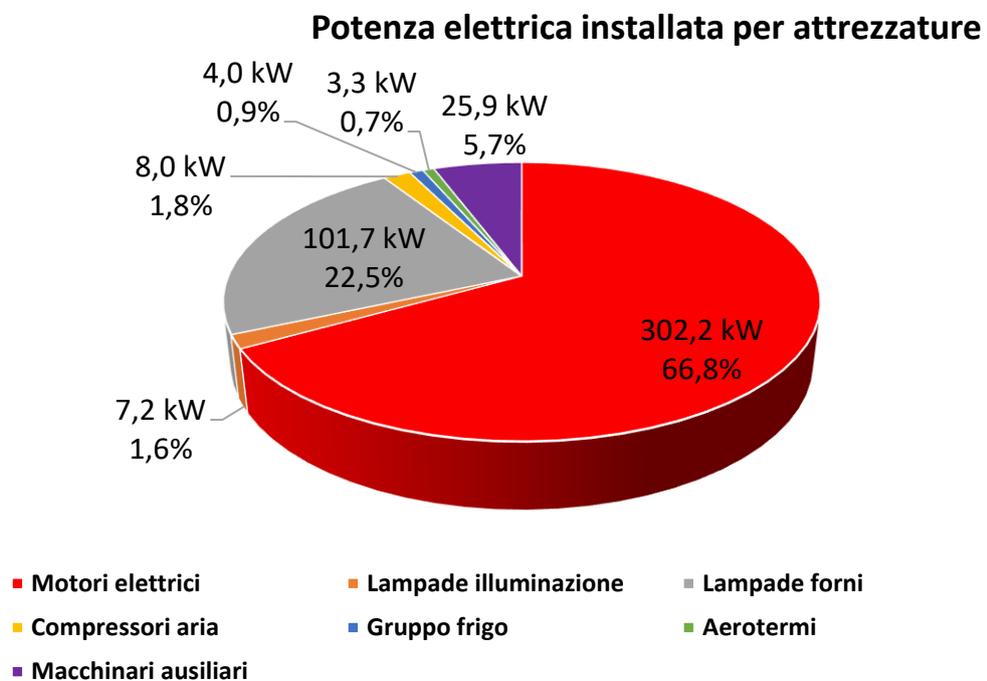


Figura 3.2 – Quota di potenza elettrica installata per tipologia di apparecchiatura.

Come riportato in Figura 3.2 le attrezzature più significative in termini di potenza installata (e presumibilmente anche di consumi energetici in quanto sono componenti strettamente correlati alla produzione e quindi sempre in funzione quando le macchine sono accese) sono i motori elettrici, con ben il 66,8% della potenza elettrica totale installata. Gli altri componenti energivori sono le lampade dei forni con il 22,5%. A differenza dei motori elettrici, le lampade dei forni hanno fattore di utilizzazione prossimo al 100% perché tutta la potenza elettrica assorbita viene dissipata in radiazione infrarossa disponibile per il wire carrier e la regolazione non è modulante: quando le lampade sono accese, lavorano in condizioni nominali.

3.2 LA GESTIONE DELL'ENERGIA

Il sistema di gestione dell'energia è regolato dai requisiti della norma internazionale ISO 50001 e, come altri sistemi di gestione (ad esempio il sistema di gestione della qualità), è basato sulla metodologia Plan-Do-Check-Act (ciclo PDCA) che ha come obiettivo il raggiungimento del miglioramento continuo.

Tutte le azioni intraprese per il sistema di gestione dell'energia devono rispettare una politica energetica aziendale stabilita e definita dalla Direzione che deve essere appropriata all'uso dell'energia dell'azienda, deve impegnarsi al miglioramento continuo delle prestazioni energetiche e deve stabilire gli obiettivi da raggiungere (4).

Nel contesto della politica energetica quindi può svilupparsi il sistema di gestione nelle diverse fasi del ciclo PDCA:

- **Plan:** la pianificazione energetica si basa sulla raccolta di dati sui consumi e gli usi dell'energia da parte dell'azienda e, una volta identificate le aree di uso significativo dell'energia e le opportunità per il miglioramento delle prestazioni, permette di costruire la energy baseline dell'attività produttiva e attraverso degli indicatori di prestazione, monitorare le performance energetiche per stabilire gli obiettivi e verificarne il raggiungimento. Nel caso in cui avviene il mancato raggiungimento dei target, è necessario predisporre dei piani d'azione che devono includere i metodi, le scadenze, i mezzi e le responsabilità necessari al raggiungimento degli obiettivi. L'energy baseline è costruita in base a una opportuna revisione energetica ed è

un aspetto fondamentale del controllo di gestione dell'energia perché permette di stabilire la prestazione reale ed attuale degli impianti e di stimare i consumi futuri di energia da parte dei sistemi produttivi. Diventa dunque fondamentale mantenere aggiornati i dati e modificare i modelli quando si verificano cambiamenti rilevanti nei processi o nei sistemi energetici.

- **Do:** consiste nell'attuazione e nel funzionamento del sistema di gestione dell'energia. Oltre al controllo operativo dei sistemi, cioè applicare le attività derivate dai piani d'azione legate agli usi significativi dell'energia per il raggiungimento degli obiettivi, è necessario che l'organizzazione formi tutto il personale legato agli usi significativi dell'energia in merito alle metodologie di lavoro da seguire, comunicare e controllare le informazioni necessarie a descrivere il sistema di gestione dell'energia, predisporre la documentazione tecnica richiesta e considerare le opportunità di miglioramento delle prestazioni energetiche dei sistemi attraverso modifiche a impianti, sistemi e processi significativi dal punto di vista degli usi e consumi di energia.
- **Check:** comprende tutte le attività di monitoraggio e analisi delle prestazioni energetiche, che vengono quindi registrate. In questa fase vengono predisposti anche audit interni, al fine di identificare eventuali aree in cui non vengono seguite le procedure stabilite in fase di pianificazione e controllo operativo e verificare che il sistema di gestione sia coerente ai requisiti della norma. Nel caso in cui vengano individuate delle non-conformità, l'organizzazione deve attuare azioni preventive e correttive al fine di risolvere i problemi e garantire che problemi della stessa natura non si verifichino in futuro.
- **Act:** consiste nel riesame dei contenuti del sistema di gestione dell'energia da parte della Direzione. In questa fase, a partire dai dati raccolti dal riesame, vengono pianificate le eventuali modifiche alla politica energetica dell'azienda e a tutto ciò che rientra nelle responsabilità della Direzione. In questo modo è possibile chiudere il

cerchio del ciclo e garantire che il sistema punti al miglioramento continuo delle prestazioni.

È necessario che il sistema di gestione dell'energia sia parte integrante del sistema di gestione aziendale (5) ed è quindi opportuno controllare i costi energetici secondo le strategie di gestione usate dall'azienda.

La base di questa strategia nella visione più classica è quella di attribuire delle responsabilità per il raggiungimento degli obiettivi, non correlandola soltanto al rispetto delle regole. Questo meccanismo manageriale è denominato *controllo di gestione*.

Il controllo di gestione si sviluppa in più fasi:

- **definizione degli obiettivi**, attraverso la predisposizione del budget, cioè prevedendo gli scenari economici e finanziari in cui l'azienda opera si programmano gli obiettivi per le diverse aree manageriali, individuando le risorse necessarie al raggiungimento degli scopi prefissati.
- **rilevamento dei risultati**, attraverso il sistema informativo aziendale si misurano i risultati raggiunti dalle diverse aree, distinguendo i dati secondo i diversi centri di responsabilità.
- **calcolo degli scostamenti**, permette di confrontare i risultati raggiunti rispetto agli obiettivi prefissati.

3.2.1 ANALISI DEI CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA DELLO STABILIMENTO

L'energia elettrica rappresenta per l'azienda la principale fonte di energia in termini sia economici sia dei consumi. Come riportato nel paragrafo 3.1 si può notare che l'energia elettrica è prevalentemente utilizzata da motori elettrici, ma notevoli sono anche gli assorbimenti del reparto forni di finissaggio.

Nell'ambito della gestione dell'energia, occorre determinare il background energetico del sistema. Partendo quindi dalla già citata analisi degli usi dell'energia elettrica, si può adesso stabilire l'energy baseline dello stabilimento attraverso la costruzione della caratteristica energetica dello stabilimento.

3.2.1.1 CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DELLO STABILIMENTO

La caratterizzazione energetica dello stabilimento è uno strumento fondamentale per stimare statisticamente il consumo di una fonte d'energia da parte dello stabilimento, ma soprattutto per prevedere e monitorare i costi legati al consumo d'energia. In questo modo diventa uno strumento molto importante in ambito gestionale.

Sebbene spesso l'impatto dei costi energetici sia meno significativo rispetto ad altri costi (ad esempio quello delle materie prime, nel caso di una realtà produttiva), bisogna comunque evitare di considerarli delle spese generali.

Infatti, i consumi energetici sono sempre dipendenti da uno o più fattori interni all'organizzazione che vengono definiti "*energy drivers*". (6) Definire la relazione che esiste tra consumi energetici ed *energy drivers* permette quindi di ottenere la valutazione dei consumi, e quindi dei costi, energetici una volta note le variabili che li influenzano (tipicamente sono parametri che l'organizzazione pianifica in ambito gestionale, ad esempio i volumi produttivi, i turni lavorati, ...).

Nel caso specifico di Mabiél, viene analizzato il consumo di energia elettrica in relazione ai volumi produttivi. Ciò deriva dall'analisi degli usi dell'energia che hanno evidenziato come il reparto produttivo sia strettamente legato all'energia elettrica consumata. Le misure di energia elettrica disponibili sono quelle del contatore di energia elettrica dello stabilimento.

I dati ottenuti dal distributore di energia elettrica sono delle misure di consumi di energia elettrica campionate ogni 15 minuti. In Figura 3.3 è riportato l'andamento dei consumi di energia elettrica giornalieri nel periodo che va dal 1 Gennaio 2017 al 31 Agosto 2018.

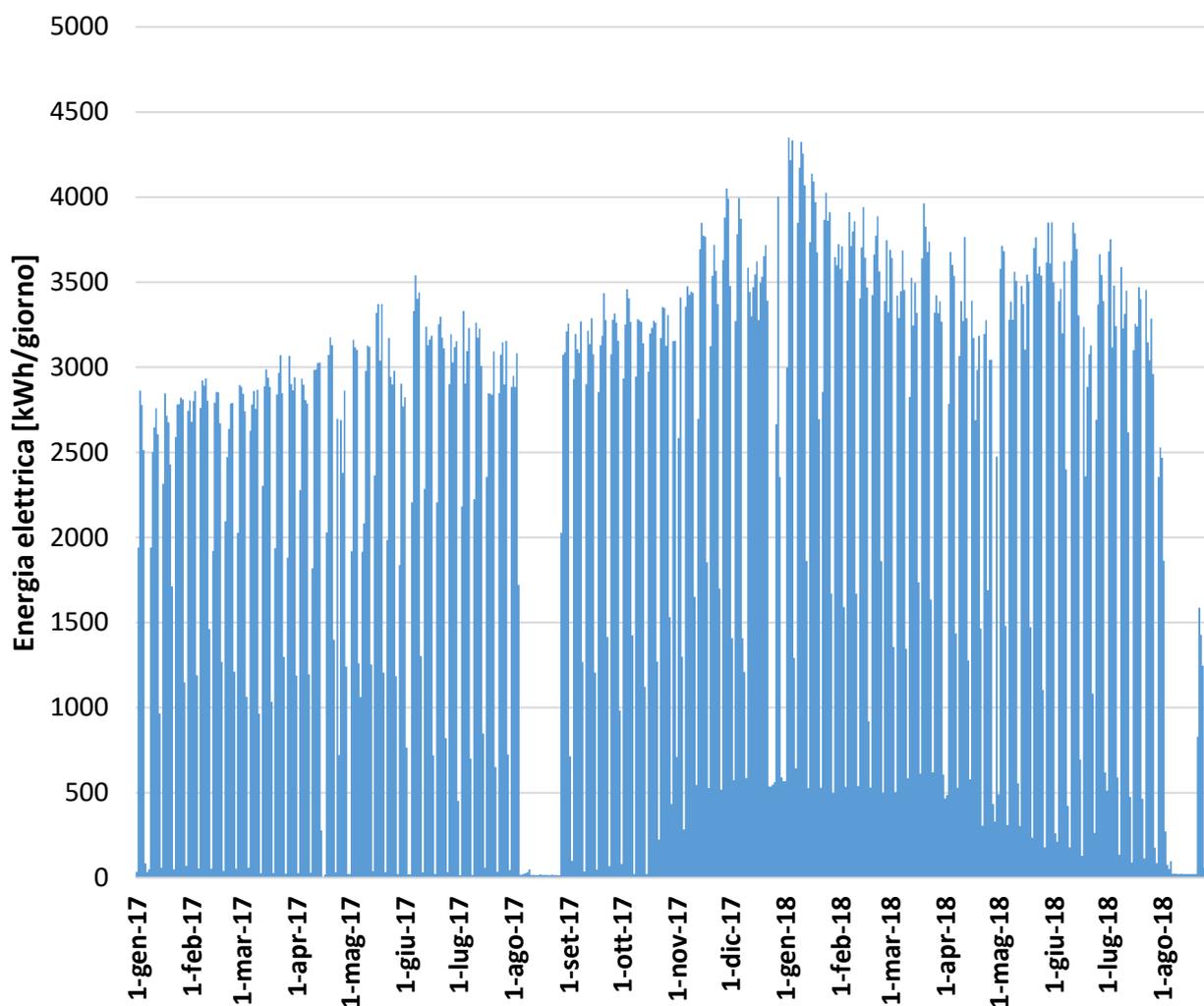


Figura 3.3 – Andamento giornaliero dei consumi di energia elettrica dello stabilimento nel periodo 01/01/2017 – 31/08/2018.

Osservando attentamente il grafico dei consumi di energia elettrica, si può vedere come a partire da un certo momento, orientativamente circa fine Ottobre 2017, si ha un residuo di energia elettrica fissa consumata in ogni momento, anche quando lo stabilimento risulta essere chiuso. Ciò dovrebbe risultare anche dalla caratterizzazione energetica dello stabilimento.

Una volta noti i dati sui consumi di energia elettrica, è necessario metterli in relazione agli energy drivers identificati preventivamente, in questo caso i volumi prodotti. La relazione tra volumi prodotti ed energia elettrica consumata è ottenuto da un'analisi di regressione, strumento statistico che permette di interpolare i dati e valutare se la relazione ottenuta è statisticamente significativa oppure no.

Dall'analisi statistica dei dati si ottiene una regressione lineare del tipo

$$E = C_0 + C_1 \cdot V \left[\frac{kWh}{periodo} \right]$$

dove

E è l'energia consumata;

C₀ è l'intercetta della caratterizzazione energetica;

C₁ è la pendenza della retta;

V è il volume produttivo.

Il termine C₀ può anche essere visto come il consumo fisso di energia, presente anche quando i volumi prodotti sono nulli.

Il termine C₁ è una stima dell'efficienza del sistema produttivo, in quanto definisce la quantità di energia necessaria per produrre un'unità di prodotto finito.

Per il calcolo dell'equazione caratteristica dello stabilimento è stato usato lo strumento di Excel *Regressione*, disponibile nella scheda *Dati* utilizzando il componente aggiuntivo *Analisi dati*.

Il componente aggiuntivo di Excel effettua una analisi statistica sulla regressione lineare semplice per valutare se la retta caratteristica ottenuta (in particolare l'intercetta e la pendenza) è statisticamente significativa.

3.2.1.1.1 CALCOLO DELLA RETTA DI REGRESSIONE

La retta di regressione è una relazione lineare che lega i consumi di energia elettrica agli energy driver. Il risultato che si ottiene calcolando i consumi attraverso questa espressione non equivale alla misura reale dell'energia a causa di (7):

- altri fattori che influenzano il consumo rispetto al solo energy driver considerato;
- errore di misura;
- casualità dovuta all'imprevedibilità dei fenomeni naturali.

Considerando dunque n punti sperimentali a cui corrispondono una coppia di valori misurati di energia elettrica ed energy driver (chiamando rispettivamente E_i e V_i) in un dato periodo di tempo, è possibile costruire una stima dell'intercetta e della pendenza della retta di regressione usando il metodo dei minimi quadrati:

$$\tilde{c}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V}) \cdot (E_i - \bar{E})}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}} \right]$$

dove

\tilde{c}_1 è la stima della pendenza della retta di regressione;

V_i è la i-esima misura dei volumi produttivi nell'intervallo di tempo definito;

E_i è la i-esima misura dell'energia elettrica consumata nell'intervallo di tempo definito;

\bar{V} è la media aritmetica delle n misure campionate dei volumi produttivi;

\bar{E} è la media aritmetica delle n misure campionate dell'energia elettrica consumata.

$$\tilde{c}_0 = \bar{E} - \tilde{c}_1 \cdot \bar{V} \text{ [kWh]}$$

dove

\tilde{c}_0 è la stima dell'intercetta della retta di regressione;

\tilde{c}_1 è la stima della pendenza della retta di regressione;

\bar{V} è la media aritmetica delle n misure campionate dei volumi produttivi;

\bar{E} è la media aritmetica delle n misure campionate dell'energia elettrica consumata.

3.2.1.1.2 STATISTICA DELLA REGRESSIONE

Nota dunque la relazione che lega energy driver ed energia consumata, ottenuta dall'interpolazione dei dati campionati in certo periodo di tempo, è necessario stabilire se l'equazione della retta sia attendibile e in grado di spiegare il comportamento del sistema, non soltanto degli n punti sperimentali considerati.

Bisogna dunque effettuare un'analisi statistica sui parametri della retta di regressione. Si possono usare due approcci: il test d'ipotesi o il p-value.

Il test d'ipotesi consiste nello stabilire se è possibile rifiutare un'affermazione, detta *ipotesi nulla*, in favore dell'ipotesi alternativa. Il risultato di un test d'ipotesi può dunque essere di rifiutare oppure di non potere rifiutare l'ipotesi nulla. Nota la distribuzione teorica di una statistica test, si determina un intervallo tale per cui l'area sottesa dalla densità di probabilità sia pari a $1-\alpha$ con α che rappresenta il *livello di*

significatività, ossia la probabilità di errore tollerabile nel rifiutare l'ipotesi nulla quando questa è vera (solitamente si accetta un livello di fiducia, cioè $1-\alpha$, pari al 95%). Nel caso in cui la statistica test utilizzata per spiegare il fenomeno di cui si vuole rifiutare l'ipotesi nulla cada al di fuori dell'intervallo definito dalla curva densità di probabilità, l'ipotesi nulla può essere rifiutata con livello di fiducia pari a α .

Il p-value è il minimo valore di α che porta al rifiuto dell'ipotesi nulla, in altre parole consiste nel determinare l'ampiezza massima dell'intervallo di fiducia. Se dall'analisi effettuata sui dati sperimentali risulta che il parametro considerato sia fuori da questo intervallo, l'ipotesi nulla può essere rifiutata con una probabilità di non sbagliare pari a $1 - p\text{-value}$. A differenza del caso del test d'ipotesi, il livello di significatività non è fissato a priori, pertanto questa analisi consente di valutare effettivamente con che livello di fiducia si può rifiutare l'ipotesi nulla a favore dell'alternativa (non è detto che sia pari ad α). Si può usare l'informazione relativa al calcolo del p-value imponendo un criterio che porta al rifiuto dell'ipotesi nulla: ad esempio si può scegliere di voler rifiutare l'ipotesi nulla con livello di fiducia di almeno il 95%, ciò significa che si può rifiutare l'ipotesi nulla se $p\text{-value} \leq 5\%$.

Nel caso della retta di regressione, si può effettuare un'analisi p-value sulle stime dell'intercetta e del coefficiente angolare della retta. La distribuzione di probabilità dei due parametri è la *distribuzione t di Student*, ciò si verifica se i residui sono:

- **normalmente distribuiti**;
- **non autocorrelati**, ossia nessuna relazione lineare tra i residui al tempo t e i residui al tempo $t-1$;
- **media uguale a zero**;
- **identica varianza**.

In questa analisi si suppone che siano verificate le ipotesi precedenti e i residui sono calcolati come

$$r_i = E_i - \tilde{E}_i$$

dove

r_i è la stima dei residui;

E_i è l' i -esima misura dei consumi di energia elettrica;

\tilde{E}_i è il consumo di energia elettrica calcolata con la retta di regressione trovata.

Considerando le assunzioni precedenti, il prossimo passo consiste nel verificare che la stima dei parametri della retta di regressione si possa ritenere statisticamente attendibile per spiegare la relazione tra volumi produttivi ed energia elettrica consumata dal sistema.

Per quanto riguarda il coefficiente angolare della retta, l'ipotesi nulla che si vuole rifiutare è:

$$H_0: \tilde{c}_1 = 0$$

Rifiutare l'ipotesi che il coefficiente angolare sia nullo significa ammettere che esiste una relazione lineare tra energia consumata e volumi produttivi. Il valore reale del coefficiente angolare della retta di regressione apparterrà con una probabilità pari a $1 - \alpha$ a un intervallo centrato in \tilde{c}_1 che viene definito *intervallo di fiducia*.

Per questa analisi viene usata una statistica test che segue la distribuzione t di Student con n-2 gradi di libertà calcolata come segue

$$t_{\text{calc}} = \frac{\tilde{c}_1 - 0}{s \cdot \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}}}$$

dove

\tilde{c}_1 è la stima del coefficiente angolare della retta di regressione;

s è la stima della deviazione standard calcolata come

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n - 2}}$$

V_i è la i-esima misura dei volumi produttivi;

\bar{V} è la media aritmetica degli n dati sperimentali V_i ;

E_i è la i-esima misura dei consumi di energia elettrica;

\bar{E} è la media aritmetica degli n dati sperimentali E_i .

Analogamente per quanto riguarda l'intercetta, l'ipotesi nulla sarà

$$H_0: \tilde{c}_0 = 0$$

Rifiutare l'ipotesi nulla, significa avere un'intercetta diversa da 0, cioè dei consumi non dipendenti dai volumi prodotti, che si presentano anche quando non ci sono volumi prodotti. Nel caso in cui il p-value sia maggiore del 5%, non si può rifiutare l'ipotesi nulla, pertanto potrebbe essere opportuno effettuare la stessa analisi considerando l'intercetta uguale 0, ossia retta di regressione passante per l'origine. Il procedimento è del tutto simile al caso precedente, con l'intercetta che segue una distribuzione t di student con n-2 gradi di libertà. L'unica differenza sta nel calcolo della statistica test:

$$t_{\text{calc}} = \frac{\tilde{c}_0 - 0}{s \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{V}^2}{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}}}$$

In entrambi i casi il p-value sarà uguale a α tale che

$$t_{n-2, 1-\alpha} = |t_{\text{calc}}|$$

ottenibile in letteratura mediante tabelle della distribuzione cumulativa t di Student con n-2 gradi di libertà oppure, nota la distribuzione di probabilità, valutare l'area sottesa alla funzione, che sarà pari a 1 - p-value, intersecata con il valore sulle ascisse della statistica test.

Esistono numerosi software statistici che svolgono automaticamente tutta l'analisi sulla significatività dei parametri della retta di regressione. Sicuramente uno dei più usati è Microsoft Excel, che implementa l'analisi attraverso un componente aggiuntivo di analisi dati. Una volta installato il programma, nella scheda *Dati* alla voce *Analisi dati*, si apre una finestra con una serie di possibili funzioni da utilizzare. Scegliendo la funzione *Regressione* si effettua esattamente il procedimento descritto in precedenza con il calcolo del p-value.

L'analisi di regressione effettuata da Excel necessita soltanto dei dati sperimentali in input, in particolare sull'asse X bisogna inserire i dati misurati relativi all'energy driver (in questo caso i volumi prodotti) e sull'asse Y i valori misurati di energia elettrica. L'output della funzione è una tabella come quella in Figura 3.4.

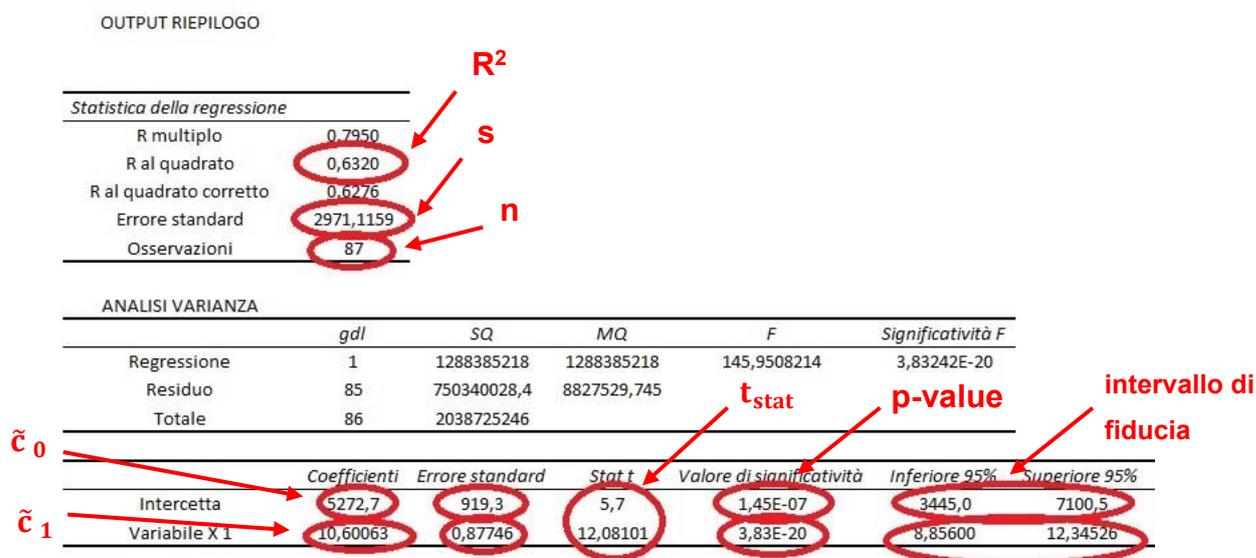


Figura 3.4 – Tabella di output della funzione Analisi dati – Regressione di Microsoft Excel

Nel caso dell'azienda Tessitura Mabiél srl, bisogna fare delle osservazioni riguardanti i tempi di campionamento dei dati misurati. I dati di energia elettrica sono disponibili con intervalli di campionamento non inferiori a un quarto d'ora, sono misurati mediante un contatore ed è possibile richiederli direttamente al distributore di energia elettrica. Per quanto riguarda i dati dei volumi prodotti, la situazione è diversa. Infatti non sono presenti degli strumenti di misura che monitorino in tempo reale la produzione (ad eccezione dei forni di finissaggio che hanno i "contametri" su ogni pezza e mostrano la misura dei metri prodotti su un display). L'unico dato che si può ottenere è dunque la produzione giornaliera delle bobine, effettuata attraverso un modulo compilato dagli operatori del reparto di ribobinatura, in cui viene registrata la data, il tipo di articolo, il numero di giunte, il numero identificativo della bobina e la quantità di wire carrier per ogni bobina. A partire da questo dato e considerando lo scarto percentuale, calcolato settimanalmente, è possibile stabilire la produzione effettiva dello stabilimento. Bisogna osservare che, durante l'avvolgitura, non viene riavvolto soltanto il materiale prodotto durante la giornata, ma è frequente che la bobina sia formata da parti prodotte con diversi giorni di differenza. Pertanto bisogna considerare un tempo di campionamento abbastanza lungo per poter smaltire lo sfasamento tra misure di energia elettrica e dati di produzione. Dal punto di vista statistico si deve però tenere conto del numero di osservazioni sperimentali: maggiore

è il numero di campionamenti, più affidabile sarà la statistica osservata, quindi ciò porta a scegliere tempi di campionamento più corti, contrariamente all'osservazione precedente.

È stato scelto dunque di considerare una settimana come tempo di campionamento, in modo da tentare di assorbire lo sfasamento tra dati di produzione e misure di energia, mantenendo un numero non troppo basso di osservazioni. Ciò comporta comunque un certo sfasamento, che è possibile notare in Figura 3.5.

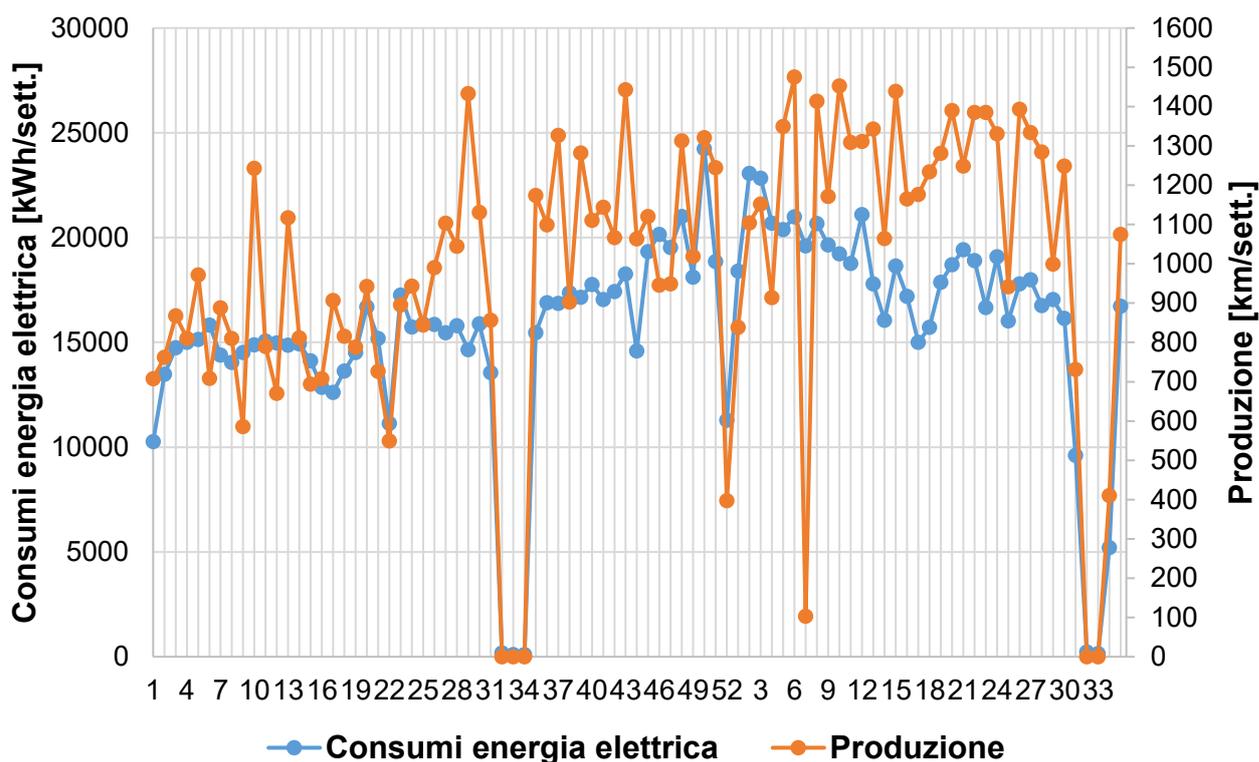


Figura 3.5 – Confronto tra andamento settimanale della produzione e dei consumi di energia elettrica

Dalla Figura 3.5 è possibile osservare che in presenza di picchi di consumo di energia elettrica, non sempre corrisponde un picco nella produzione (ad esempio per le settimane 10-13) e spesso è visibile uno sfasamento di qualche settimana o uno smorzamento dei picchi. Invece è facile notare che l'andamento qualitativo delle due curve è molto simile.

Il prossimo passo consiste quindi nel costruire la retta di regressione, mettendo in relazione i punti sperimentali campionati nello stesso passo temporale (nella stessa settimana). Utilizzando la funzione *Regressione* di Excel è possibile ottenere l'equazione caratteristica, riportata

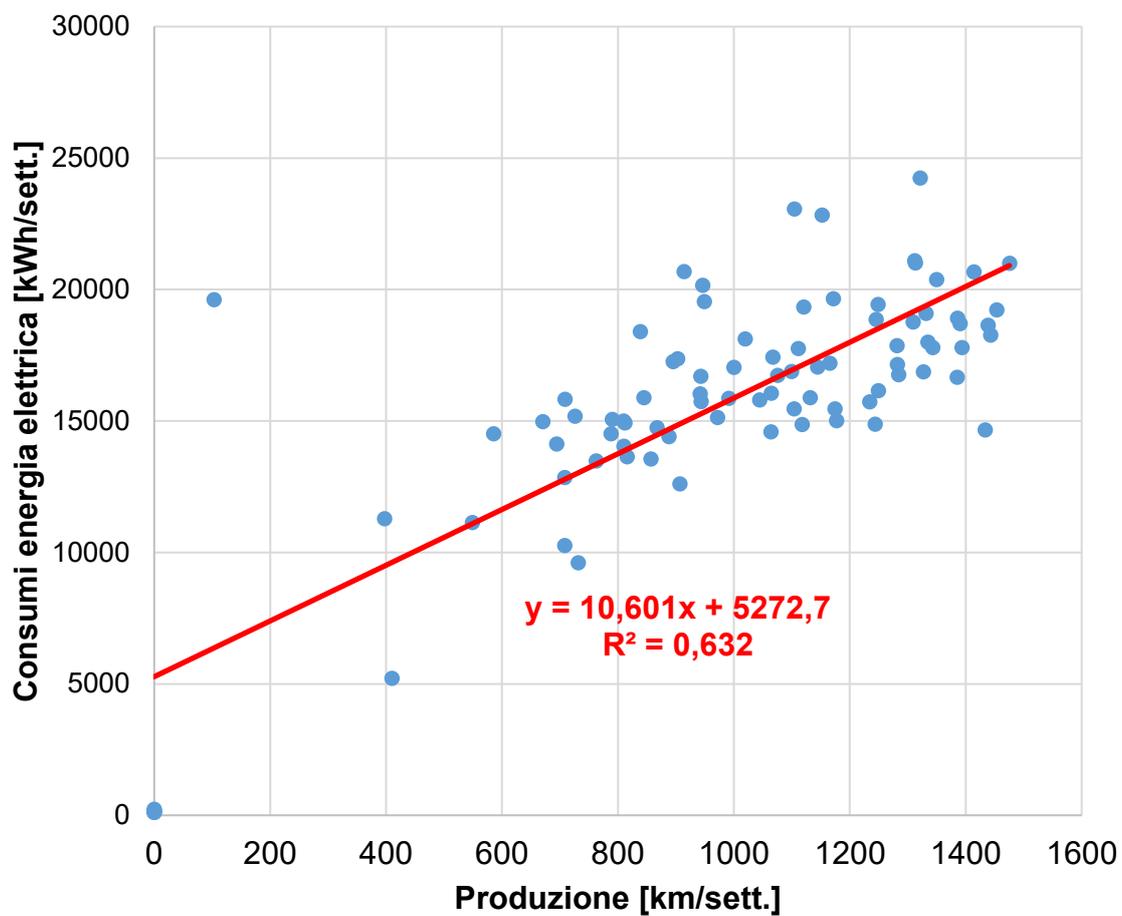


Figura 3.6 – Equazione caratteristica dello stabilimento.

Dall'analisi di regressione risulta dunque l'output in Tabella 3.5.

Statistica della regressione	
R multiplo	0,7950
R al quadrato	0,6320
R al quadrato corretto	0,6276
Errore standard	2971,1
Osservazioni	87

ANALISI VARIANZA					
	gdl	SQ	MQ	F	Sign. F
Regressione	1	1288385218	1288385218	145,95	3,83E-20
Residuo	85	750340028,4	8827529,745		
Totale	86	2038725246			

	Coeff.	Errore standard	Stat t	Valore di significatività	Inferiore 95%	Superiore 95%
Intercetta	5272,7	919,3	5,7	1,45E-07	3445,0	7100,5
Variabile X 1	10,601	0,87746	12,081	3,83E-20	8,85600	12,34526

Tabella 3.5 – Tabella di output analisi di regressione.

L'analisi di regressione mostra come l'equazione caratteristica trovata sia affidabile, infatti il p-value dell'intercetta e del coefficiente angolare sono molto bassi e nettamente inferiori al 5%. Ne consegue che si può ragionevolmente utilizzare la relazione

$$E = 5272,7 + 10,601 \cdot V \left[\frac{kWh}{settimana} \right]$$

per stimare l'energia elettrica consumata dallo stabilimento, noti i volumi prodotti.

Osservando i dati sperimentali dal grafico in Figura 3.6, si può notare una rilevante dispersione dei dati attorno al loro valore medio, verosimilmente rappresentato dalla retta di interpolazione. Ciò è spiegato dall'elevato valore di errore standard, che è anche una stima della deviazione standard, che infatti ammonta a più della metà dell'intercetta del grafico. Probabilmente questa dispersione dei dati è una conseguenza delle osservazioni precedenti che riguardavano lo sfasamento temporale tra consumi di energia elettrica e produzione. Ne deriva pertanto che anche gli intervalli di fiducia, che indicano l'intervallo in cui si trova con una probabilità del

95% il valore esatto dell'intercetta e del coefficiente angolare, sono relativamente ampi.

Un altro aspetto importante è il valore dell'intercetta che definisce l'energia consumata dallo stabilimento anche quando la produzione è ferma. Considerando che lo stabilimento lavora su 3 turni per 5 giorni a settimana, $5272,7 \left[\frac{kWh}{settimana} \right]$ equivale a una potenza media assorbita di 44 kW. Ciò può essere dovuto al fatto che, anche quando la produzione è ferma, qualche macchinario continua a consumare energia. Questa quota fissa di consumo è nettamente visibile dall'andamento dei consumi di energia elettrica giornalieri Gennaio 2017-Settembre 2018 di Figura 3.3. Si può notare come a partire da fine Ottobre 2017 vi sia un notevole incremento della quota fissa di consumo. Da un'analisi storica degli avvenimenti è emerso infatti che in quel periodo è stato installato un piccolo impianto a pompe di calore per il riscaldamento degli ambienti del reparto produttivo. Questo impianto, ormai dismesso, era in funzione in maniera continua, anche nei giorni di chiusura, pertanto è plausibile che la quota fissa di consumo sia dovuta a questa applicazione: ciò è avvalorato anche dallo stesso ordine di grandezza tra potenza elettrica media assorbita relativa alla quota fissa di consumo e potenza elettrica installata per le pompe di calore.

3.2.1.1.3 STUDIO DEI CONSUMI STORICI

Il periodo di tempo considerato per la caratterizzazione energetica è relativamente ampio, da Gennaio 2017 a Settembre 2018. In questo periodo possono essersi verificati degli eventi che hanno modificato la caratteristica del sistema, quindi l'equazione caratteristica potrebbe risultare non perfettamente idonea a descrivere la realtà.

Per verificare se sono avvenute modifiche sostanziali al sistema, può essere usato uno strumento statistico di studio dei residui chiamato CUSUM. Il CUSUM consiste nel valutare come variano nel tempo i residui calcolati come

$$r_i = E_i - \tilde{E}_i$$

dove

r_i è la stima dei residui;

E_i è l'i-esima misura dei consumi di energia elettrica;

\tilde{E}_i è il consumo di energia elettrica calcolata con la retta di regressione trovata.

attraverso il calcolo della cumulata dei residui, definita come

$$\sum_{i=1}^n r_i = \sum_{i=1}^n E_i - \tilde{E}_i$$

Applicando queste definizioni allo stabilimento di Mabiell, si ottiene il grafico di Figura 3.7.

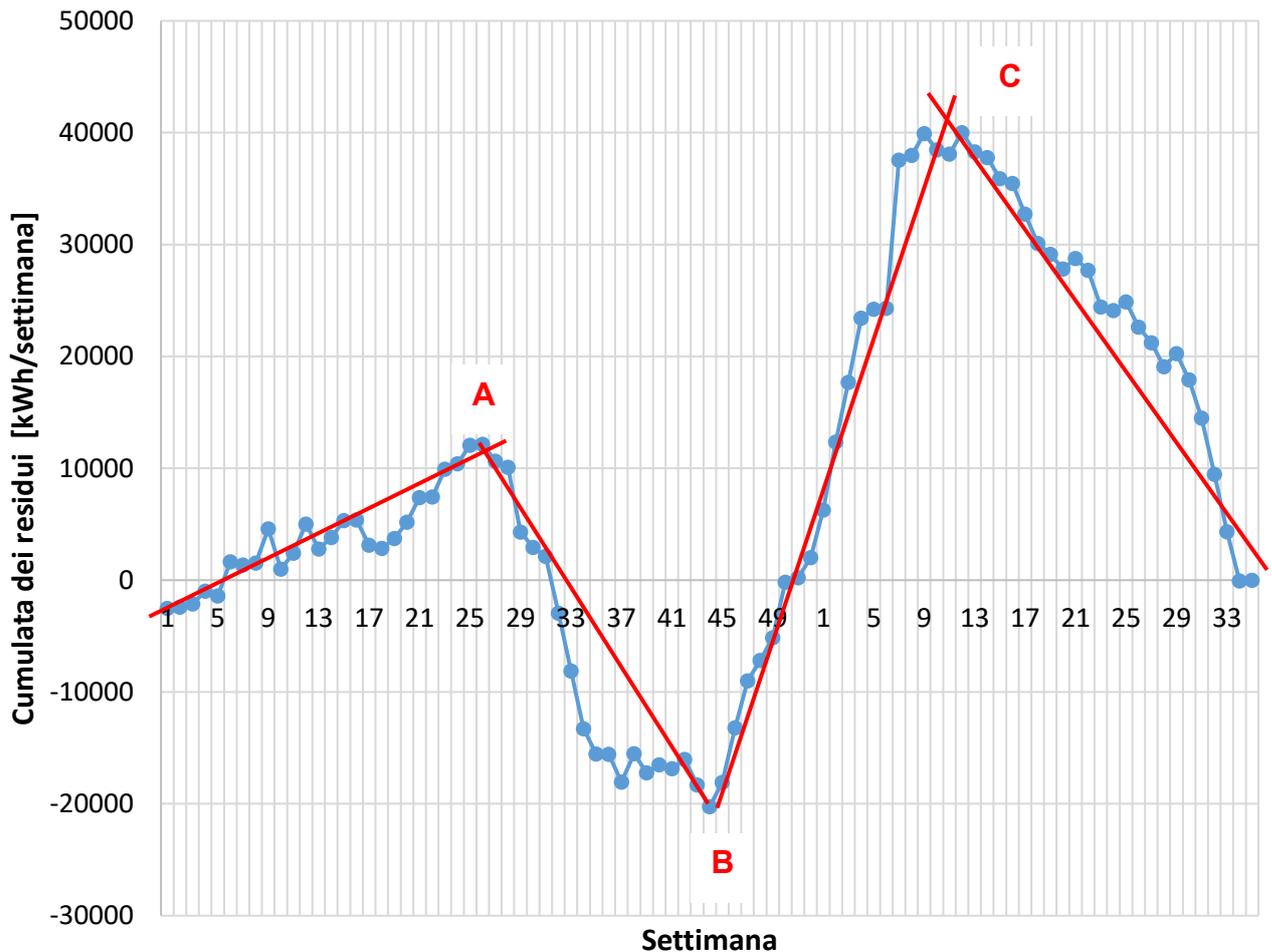


Figura 3.7 – Cumulata dei residui

La prima osservazione che si può notare è che il CUSUM si annulla, a meno di approssimazioni, in corrispondenza dell'ultimo punto del grafico. Questa è una diretta conseguenza del metodo dei minimi quadrati usato per la costruzione dell'equazione caratteristica, che ipotizza la media dei residui (quindi anche la somma) pari a zero.

L'andamento della cumulata dei residui permette di identificare le deviazioni dei consumi reali rispetto a quelli previsti. Avere ampie deviazioni significa che l'equazione caratteristica non spiega correttamente il reale andamento dei consumi, pertanto è facile che ci sia stato un cambiamento nel sistema. La cumulata dei residui inoltre dipende molto dalla dispersione dei dati, quanto più i dati sono dispersi attorno al valor medio, tanto è facile che il CUSUM segnali deviazioni sostanziali.

Dal grafico di Figura 3.7 si possono notare quattro periodi in cui si hanno delle deviazioni rispetto alla caratteristica trovata in corrispondenza dei nodi:

- **periodo I**, da 1 Gennaio 2017 a 2 Luglio 2017, **nodo A**;
- **periodo II**, da 3 Luglio 2017 a 12 Novembre 2017, **nodo B**;
- **periodo III**, da 13 Novembre 2017 a 11 Marzo 2018, **nodo C**;
- **periodo IV**, da 12 Marzo 2018 a 30 Settembre 2018.

I periodi I e II, hanno deviazioni più sostenute. Si può ipotizzare che esse siano dettate principalmente dall'alta dispersione dei dati rispetto al valore medio dell'equazione caratteristica.

Il periodo III presenta un andamento crescente della cumulata dei residui, con una differenza massima di 40.000 kWh/settimana nell'ultimo punto del periodo. L'andamento crescente descrive un aumento dei consumi reali rispetto a quello previsto dall'equazione caratteristica. Il motivo di questa deviazione deriva probabilmente dal fatto che risale a questo periodo l'installazione delle pompe di calore che hanno aumentato verosimilmente la quota fissa (l'intercetta) dei consumi di energia elettrica.

Il periodo IV ha esattamente il comportamento opposto rispetto al periodo precedente, infatti la curva decresce vertiginosamente, indicando una diminuzione dei consumi rispetto alla retta caratteristica. In questo caso questo comportamento potrebbe essere spiegato dalle conseguenze di una strategia aziendale. Con l'acquisizione di uno stabilimento in Albania, infatti, è stato deciso dalla dirigenza di spostare una parte dei macchinari, principalmente telai, nel nuovo stabilimento. Questo potrebbe aver modificato la caratteristica dello stabilimento.

4 IL SISTEMA DI GESTIONE DELLA QUALITÀ

L'azienda Tessitura Mabel srl è certificata **ISO 9001** e **IATF 16949:2016**. Le due norme tecniche riguardano i requisiti per il Sistema di Gestione per la Qualità: la differenza tra le due norme è che la IATF 16949:2016 riguarda i sistemi per la qualità della produzione di serie e delle parti di ricambio nell'automotive. Essenzialmente, la norma IATF segue i requisiti della ISO 9001, entrando maggiormente nel dettaglio in alcuni di questi oppure aggiungendo requisiti supplementari: si tratta quindi di una norma più "stringente" rispetto alla ISO 9001, infatti quando un'azienda viene certificata IATF 16949, di solito, contestualmente ottiene anche la certificazione secondo ISO 9001.

Come specificato nel Manuale del Sistema Gestione Qualità (8) di Tessitura Mabel, lo scopo del sistema è quello di:

- fornire prodotti e servizi che soddisfino i requisiti del cliente e cogenti in maniera regolare;
- consolidare la fiducia dei mercati e accrescere le possibilità di business;
- raggiungere gli obiettivi e i risultati attesi con la pianificazione e il controllo dei processi industriali;
- accrescere la soddisfazione del cliente.

Come nel caso del Sistema di Gestione dell'Energia, anche il Sistema di Gestione della Qualità si basa sul ciclo PDCA. In particolare, l'approccio usato è quello di focalizzarsi sulla gestione dei processi aziendali con ragionamenti basati sull'analisi del rischio. Tramite il ciclo PDCA, si garantisce la sostenibilità del miglioramento continuo.

L'applicazione del *risk based thinking* consiste nel comprendere il contesto dell'organizzazione e valutare i rischi e le opportunità attraverso gli opportuni strumenti, per pianificare e attuare i processi del sistema di gestione per la qualità (9). L'approccio per processi si basa sull'organizzazione del sistema di gestione della qualità considerando aree aziendali con un input e un output e studiarne le correlazioni. Si può schematizzare un processo aziendale come in Figura 4.1 (9).

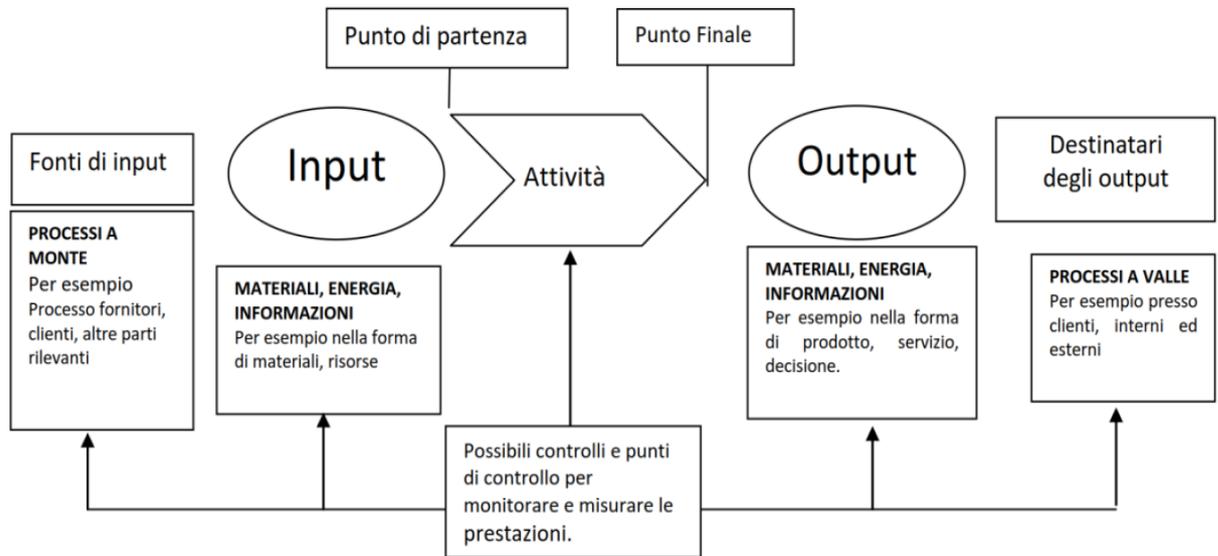


Figura 4.1 – Schema di processo aziendale.

Per ogni processo aziendale dunque, viene applicato il ciclo PDCA con l'obiettivo di assicurare il miglioramento continuo del processo aziendale stesso e di tutto il sistema.

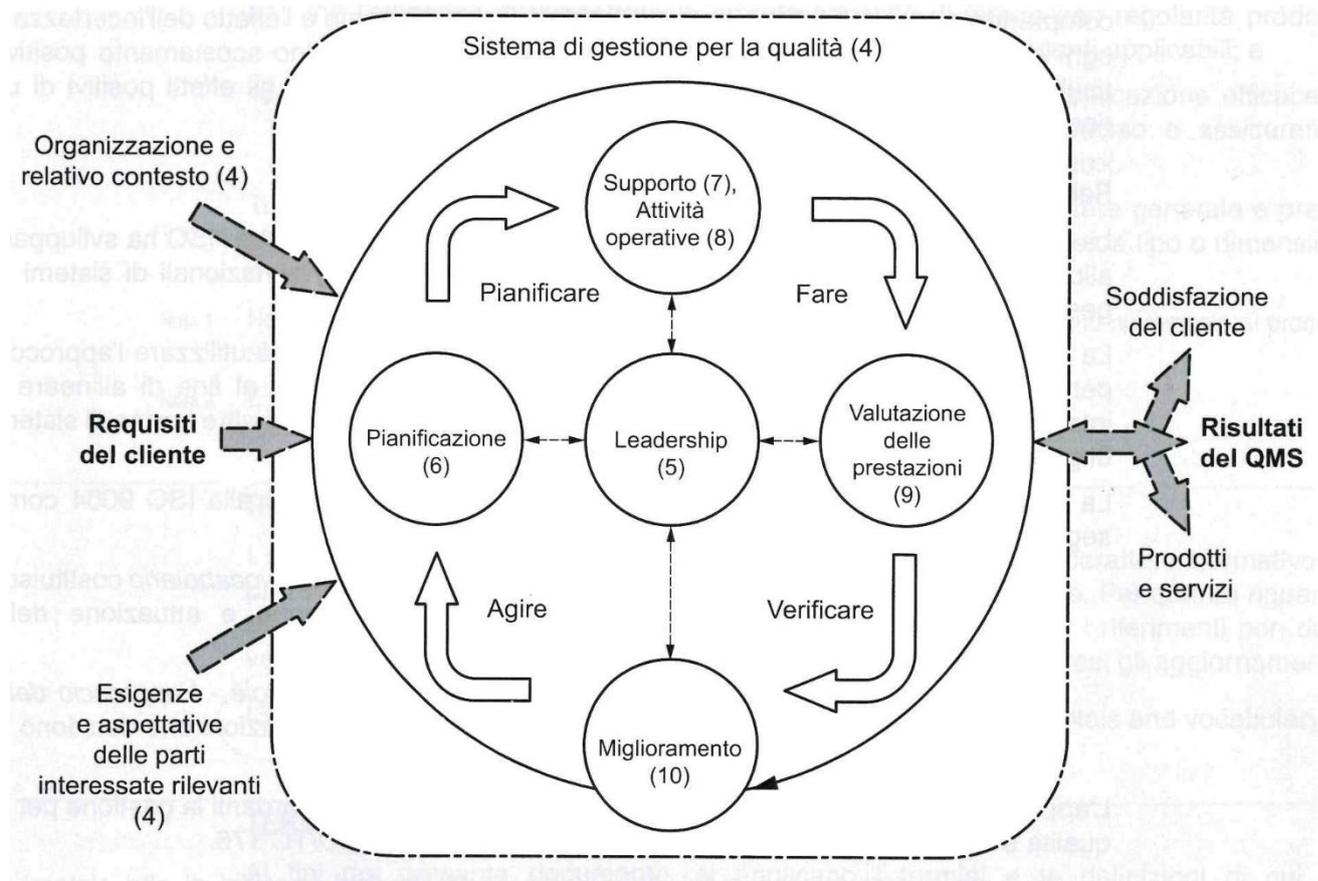


Figura 4.2 – Schematizzazione del ciclo PDCA per i processi aziendali.

Ogni processo aziendale ha come input elementi come:

- requisiti del cliente;
- esigenze delle parti interessate;
- organizzazione e relativo contesto.

Per leadership si intende l'assunzione della responsabilità da parte dell'alta dirigenza dell'efficacia del sistema di gestione della qualità e la definizione di una politica aziendale sugli obiettivi da raggiungere da parte dell'organizzazione. Dopo l'analisi del rischio e delle opportunità per ogni processo aziendale, si passa alla pianificazione delle azioni da intraprendere per ottenere il raggiungimento degli obiettivi prefissati. Le attività operative possono così essere effettuate, garantendo che tutte le risorse necessarie (in termini di materiali, informazioni, documenti) siano garantite. Le attività operative devono essere monitorate per poterne valutare l'efficacia. Le prestazioni così monitorate vengono analizzate per creare un piano di miglioramento e far sì che gli obiettivi posti in fase di pianificazione vengano soddisfatti.

Se gli obiettivi non vengono raggiunti, bisogna pianificare nuove azioni; viceversa, bisogna porre nuovi obiettivi per garantire il miglioramento continuo e l'impegno dell'alta dirigenza a stabilire un solido sistema di gestione della qualità.

4.1 PROCESSO DI PROGETTAZIONE E SVILUPPO

Tessitura Mabel srl non esegue progettazione del prodotto poiché l'azienda lavora su commessa: è il cliente a progettare il prodotto ed affidare la realizzazione all'azienda. La progettazione riguarda quindi il processo produttivo sia dei macchinari, sia del sistema di controllo e logistico, in modo da garantire che la realizzazione del prodotto avvenga secondo i requisiti richiesti dal cliente committente.

Il metodo usato da Mabel per la gestione della progettazione del processo produttivo è chiamato APQP (Advanced Product Quality Planning) e consiste in un insieme di attività che garantiscono (10):

- una pianificazione anticipata;
- identificazione in tempo utile dei cambiamenti necessari al processo;
- di indirizzare in anticipo i problemi potenziali alle aree di competenza.

Il processo di Progettazione e Sviluppo è descritto dallo schema in Figura 4.3.

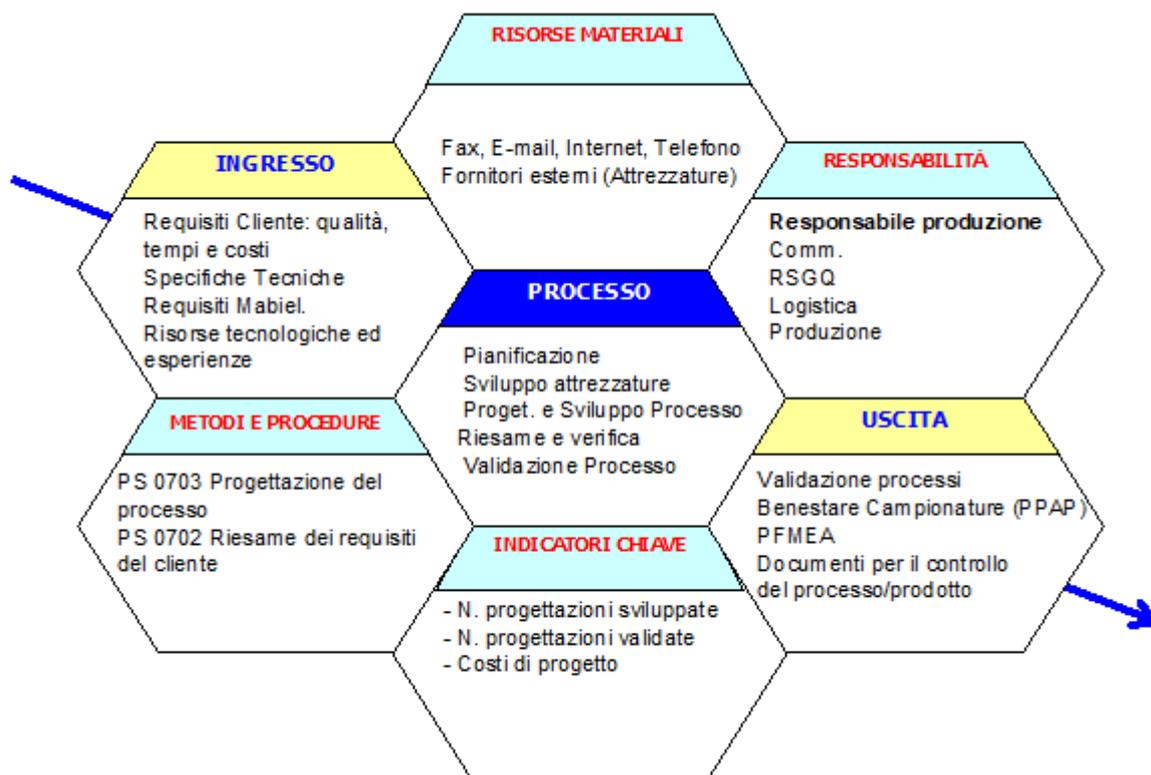


Figura 4.3 – Schema descrittivo del processo aziendale di Progettazione e sviluppo

Le modalità con cui viene progettato il processo produttivo per un determinato prodotto sono descritte dalla procedura PS 0703 del Sistema di Gestione della Qualità di Mabel.

Questo documento riporta le responsabilità per ogni area e le modalità operative che portano alla realizzazione del prodotto a partire dalla progettazione e sviluppo del processo. Si possono distinguere quattro macrofasi riportate in Figura 4.4 che, a partire dalla pianificazione delle attività, porta alla produzione in serie.

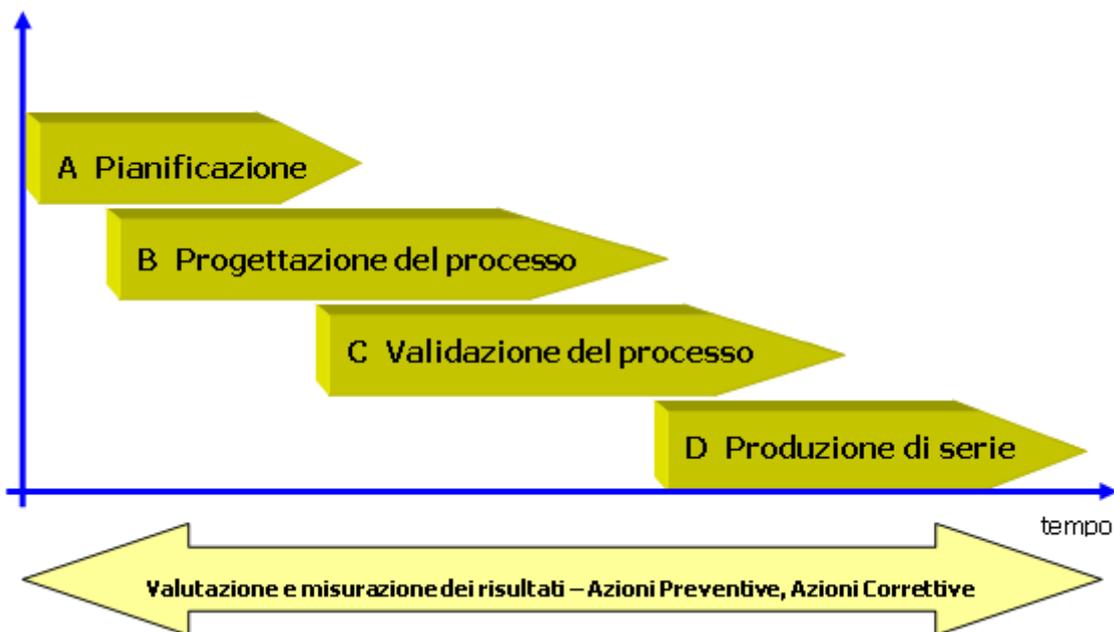


Figura 4.4 – Fasi fondamentali per la progettazione e lo sviluppo del processo produttivo

4.1.1 FASE DI PIANIFICAZIONE

La pianificazione della fase di progettazione parte dalla raccolta delle richieste e delle esigenze del cliente attraverso specifiche tecniche, disegni o campioni. In seguito si passa alla pianificazione delle attività necessarie a mettere a punto il nuovo prodotto o processo produttivo.

In questa fase viene eseguita l'analisi di fattibilità, che consiste nel verificare la fattibilità della realizzazione del nuovo processo o prodotto:

- verifica della conformità dei disegni alle norme nazionali e internazionali, alle specifiche interne della produzione, ai documenti particolari;
- le caratteristiche geometriche con relative tolleranze possono essere realizzate dai macchinari e dalle risorse disponibili;
- il processo è in grado di garantire che il prodotto sia in controllo, utilizzando gli opportuni strumenti statistici dell'affidabilità dei sistemi di controllo;
- le quantità richieste sono producibili secondo la capacità produttiva e le risorse umane attuali;
- le risorse logistiche sono adeguate alla produzione;

- i costi previsti delle risorse necessarie alla produzione sono sostenibili;
- l'attuale controllo statistico del processo è sufficiente per garantire una continuità e conformità di produzione accettabile.

Una volta che il risultato dell'analisi di fattibilità ha avuto esito positivo sia in termini tecnici sia in termini economici, vengono definiti o eventualmente aggiornati il layout del sistema, il flow chart (come quello di Figura 2.1) e le matrici di rischio.

La matrice di rischio è lo strumento usato dall'azienda per determinare i principali fattori di rischio di ogni processo aziendale, attraverso l'FMEA (Failure Mode and Effect Analysis). Questo strumento si fonda sul risk analysis thinking definito dalla norma e permette di valutare il rischio generato da alcuni eventi per stabilire quale di questi è il più critico. Per ogni fattore di rischio legato a una attività, si definiscono le cause, i controlli attuali, i documenti del sistema di gestione interessati e si valuta qualitativamente il rischio, attraverso una scala numerata che definisce le probabilità di accadimento e la gravità del danno. Per ogni fattore di rischio vengono stabilite delle misure per mitigarne gli effetti sull'organizzazione. Le matrici di rischio sono un valido strumento anche per la tracciabilità delle azioni implementate per mitigare i fattori di rischi perché vengono aggiornate continuamente quando si verifica un evento incidentale non previsto o previsto e non risolto efficacemente con gli strumenti previsti.

Tutte le attività di pianificazione sono registrate in appositi moduli in modo da tener traccia di ciò che viene stabilito.

4.1.2 FASE DI PROGETTAZIONE

In questa fase devono essere stabilite le risorse necessarie alla produzione del nuovo prodotto e le modalità operative per ottenere continuamente un prodotto conforme.

A partire dai macchinari e dalla strumentazione esistente, considerati idonei dall'analisi di fattibilità, viene verificato che il sistema di controllo sia capace di gestire il processo produttivo. Viene quindi redatta una versione preliminare del Piano di Controllo, che consiste nella determinazione dei controlli sul prodotto e delle procedure necessarie in tutte le fasi della produzione, a partire dall'accettazione della materia prima fino ai controlli finali e la spedizione.

Vengono inoltre identificate le caratteristiche speciali, anche in relazione alle richieste del cliente, ed aggiornate le istruzioni di lavoro e le procedure relative a ogni reparto di produzione. Viene predisposto uno studio preliminare di capability del processo, utilizzando un metodo statistico denominato generalmente SPC (Statistical Process Control) che permette di definire le deviazioni del processo produttivo misurando le caratteristiche critiche del prodotto e verificare che esse siano accettabili. L'SPC è un controllo statistico continuo del processo (attraverso carte di controllo, analisi di capability, ...) permettendo il miglioramento continuo del processo produttivo in quanto individua il momento in cui il processo produttivo devia dalla naturale deviazione dei parametri. In questo caso è possibile agire repentinamente comprendendo le cause della deviazione e attuando azioni correttive.

4.1.3 SVILUPPO E VALIDAZIONE DEL PROCESSO

In questa fase viene aggiornata definitivamente tutta la documentazione riguardante la realizzazione del prodotto, in base ai risultati della fase di progettazione.

I dati di input sono:

- la FMEA (matrice di rischio) del processo produttivo;
- il piano di controllo (Control plan) preliminare;
- le istruzioni di processo;
- il flusso dei materiali (flow chart) e il layout;
- le caratteristiche di imballaggio;
- il piano di analisi del sistema di misura (MSA), cioè la pianificazione dei controlli statistici sul sistema di misura, considerando sia gli strumenti di misura che gli operatori che li usano, si analizzano statisticamente le deviazioni sulle misure delle stesse caratteristiche per capire quali siano le fonti di variazioni;

Da questa fase della progettazione emerge:

- la revisione del layout dell'organizzazione, suddivisione in fasi del processo produttivo dall'accettazione delle materie prime alla spedizione al cliente finale;
- la revisione del flow chart, che indica i flussi di materiali e risorse tra le varie fasi del processo produttivo;

- la definizione dei parametri di funzionamento delle macchine;
- la revisione del piano di emergenza;
- la revisione e la determinazione del piano di manutenzione;
- il completamento del FMEA in cui verranno inseriti i nuovi fattori di rischio identificati in fase di progettazione;
- la conferma degli strumenti usati per la rintracciabilità del prodotto.

L'ultimo passo di questa fase è la validazione del processo produttivo attraverso le analisi statistiche di controllo del processo e del sistema di misurazione (MSA definitiva), il Control Plan definitivo. In questo modo è possibile iniziare il processo di approvazione da parte del cliente attraverso il PPAP (Production Part Approval Process).

Durante la fase di approvazione del prodotto, il cliente viene seguito e si stabilisce una comunicazione per verificare che esso sia soddisfatto della qualità del prodotto. Si analizza e si valutano i feedback e, attraverso l'analisi delle cause di eventuali non conformità (con metodologie di problem solving), si pianificano le azioni correttive che possono riguardare qualsiasi fase di progettazione e sviluppo del prodotto, anche di carattere manageriale. L'obiettivo resta quindi sempre il miglioramento continuo del sistema, sia dal punto di vista tecnico sia manageriale.

4.2 IL PROCESSO DI FINISSAGGIO

Nel contesto del Sistema di Gestione della Qualità e nella fase di progettazione e sviluppo del processo produttivo, assume un ruolo determinante la caratterizzazione dei processi produttivi, sia con un approccio statistico come quello evidenziato nel paragrafo 3.2.1.1 riguardante la gestione dell'energia sia attraverso uno studio tecnico dei fenomeni fisici coinvolti nelle diverse fasi di lavorazione.

Un caso molto interessante in termini di criticità della qualità finale del prodotto è il processo di finissaggio del wire carrier, in particolare il sistema di incollaggio attraverso l'essiccatore alimentato a gas naturale verrà analizzato nel dettaglio.

Lo studio tecnico sul sistema di essiccazione si colloca dunque nella fase di progettazione e di fattibilità poiché può essere utilizzato sia come base per l'analisi dei sistemi a diversa tecnologia (forno a infrarossi) sia come strumento di pianificazione, in quanto permette di predire se una determinata configurazione del sistema o un

particolare articolo, saranno caratterizzati da un livello di qualità accettabile per la soddisfazione del cliente.

In termini di qualità finale del prodotto, l'aspetto più critico di questo processo produttivo è il grado di incollaggio dei fili che dipende dalla quantità di colla e dalla capacità del forno di polimerizzarla correttamente.

In quest'ottica, vengono analizzati nel dettaglio dal punto di vista del wire carrier i fenomeni fisici che avvengono all'interno delle camere di essiccazione del forno. L'obiettivo è avere uno strumento di analisi dell'efficienza teorica del sistema e della capacità del sistema di soddisfare lo standard di qualità finale del prodotto.

4.2.1 IPOTESI DI CALCOLO

Per studiare il comportamento del wire carrier all'interno dell'essiccatore è stato predisposto un calcolo del profilo di temperatura lungo il percorso di una porzione di nastro all'interno del forno.

I materiali di cui è composto il wire carrier sono:

- **filo di ferro zincato** con diametri variabili da 0,50 mm a 0,90 mm, sebbene il più largamente usato sia il filo con diametro 0,75 mm;
- **filo tessuto di polipropilene**, con titolo 500 den, 850 den e 1100 dTex.

Il titolo è la densità lineare, in particolare $1 \text{ den} = 1 \frac{\text{g}}{9 \text{ km di filo}}$ e $1 \text{ dTex} =$

$$1 \frac{\text{g}}{10 \text{ km di filo}};$$

- **filo tessuto in poliestere**, con titolo 1100 dTex oppure 1670 dTex;
- **colla**, soluzione formata da acqua e resina acrilica.

Per stabilire la composizione della colla sono state eseguite delle prove di essiccazione in laboratorio, seguendo l'istruzione IS 0736 "Rilevazione residuo secco della colla" del Sistema di Qualità di Mabel. La prova consiste nel preriscaldare il forno di prova a $140^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, preparare dei campioni da circa 3 grammi di colla su appositi supporti con filtri. Una volta inseriti i campioni nel forno e mantenuti dentro la camera a 140°C per 5 minuti, tutta l'acqua evapora e misurando il peso è possibile stabilire la percentuale di residuo secco della colla.

I risultati della prova sono riassunti in Tabella 4.1.

Campionatura	Peso iniziale [g]	Peso finale [g]	% parte secca
1	3,029	0,901	29,75%
2	4	1,295	32,38%
3	3,25	0,973	29,94%
4	3,637	1,104	30,35%
5	3,155	0,942	29,86%
6	3	0,905	30,17%
7	3,191	0,964	30,21%
8	3,331	1,007	30,23%
9	3,046	0,925	30,37%
10	3,236	0,973	30,07%
media			30,33%

Tabella 4.1 – Risultati della prova di laboratorio sul residuo secco della colla.

Nei calcoli successivi viene quindi utilizzato una percentuale in peso pari al 30% di resina acrilica e 70% di acqua.

Il processo di finissaggio deve dunque garantire che tutta la colla applicata sul wire carrier si “asciughi” completamente mantenendo i fili di poliestere e polipropilene ben saldi sulla trama di filo di ferro. In altre parole, tutta l’acqua depositata tramite la colla deve evaporare all’interno dell’essiccatore.

Per descrivere completamente le proprietà termofisiche del wire carrier, serve dunque conoscere la quantità di colla applicata su ciascun articolo per definire l’umidità del prodotto all’ingresso del sistema di essiccazione. Poiché non è disponibile un dato analitico della quantità di colla necessaria affinché i fili siano perfettamente incollati, è necessario procedere attraverso prove sperimentali. Si tratta di confrontare il peso tra un prodotto ritenuto ben incollato e il suo peso prima dell’applicazione della colla (dato analitico dipendente da alcune grandezze critiche dell’articolo), la differenza di peso sarà la quantità di resina acrilica applicata. Nota la quantità di residuo secco, è possibile stabilire quindi la quantità di colla, usando la composizione trovata dalle prove di Tabella 4.1.

In particolare

$$m_{i,colla} = \frac{m_{wc,con\ colla} - m_{wc,senza\ colla}}{\% \text{ parte secca}}$$

dove

$m_{i,colla}$ è la massa di colla all'ingresso del sistema di essiccazione;

$m_{wc,con\ colla}$ è la massa misurata del campione di wire carrier con colla essiccata;

$m_{wc,senza\ colla}$ è la massa calcolata del campione di wire carrier considerato senza applicazione di colla;

% parte secca è il residuo secco della colla.

$$x_i = \frac{(1 - \% \text{ parte secca}) \cdot m_{i,colla}}{m_{wc,con\ colla}}$$

dove

x_i è l'umidità specifica del wire carrier;

(1 - % parte secca) è la quota di colla composta da acqua;

$m_{i,colla}$ è la massa di colla all'ingresso del sistema di essiccazione;

$m_{wc,con\ colla}$ è la massa misurata del campione di wire carrier con colla essiccata.

Applicando queste formule a 5 articoli diversi si ottengono i risultati in Tabella

4.2.

ARTICOLO	$m_{wc,senza\ colla}$ [g/m]	$m_{wc,con\ colla}$ [g/m]	% parte secca	$m_{i,colla}$ [g/m]	$\frac{m_{i,colla}}{m_{wc,con\ colla}}$ [%]	X_i [%]
1	29,332	31,096	30%	5,88	20,05%	14,03%
2	26,702	28,232	30%	5,10	19,10%	13,37%
3	33,926	36,377	30%	8,17	24,08%	16,86%
4	33,857	35,782	30%	6,42	18,95%	13,27%
5	25,523	28,01	30%	8,29	32,48%	22,74%
media						16,05%

Tabella 4.2 – Risultati quantità di colla nel wire carrier

La quantità di colla è una grandezza molto variabile e fortemente dipendente da alcune caratteristiche critiche dell'articolo considerato. In questa trattazione si

considera un'umidità specifica del wire carrier all'ingresso del sistema di essiccazione pari al 15% in peso.

Il sistema di essiccazione a gas naturale considerato è costituito da due camere separate a diversa temperatura. Entrambe le camere sono alimentate da pannelli catalitici che permettono di disperdere i fumi nell'ambiente senza rischi per la sicurezza e la salute. Comunque entrambe le camere di essiccazione sono dotate di un camino per dispersione in atmosfera dei fumi e dell'acqua evaporata.

Le due camere di essiccazione sono:

- una sezione di preriscaldamento, mantenuta a temperatura pari a 80°C, in questa sezione il wire carrier passa davanti una serie di pannelli catalitici per una certa lunghezza del percorso, posti specularmente tra loro;
- una sezione di essiccazione, mantenuta a temperatura pari a 140°C, in questa sezione il wire carrier è riscaldato da aria calda che viene riscaldata dai pannelli catalitici in una camera separata dal percorso del wire carrier. Pertanto il materiale "non vede" la superficie della piastra.

Tra le due sezioni del sistema di essiccazione, il wire carrier esce fuori dal forno entrando in contatto con aria alla temperatura ambiente, raffreddandosi. La stessa cosa avviene durante la fase del preriscaldamento: il wire carrier percorre tutta l'altezza del forno, poi esce dal forno per un tratto non trascurabile, per poi proseguire di nuovo con la fase di preriscaldamento.

Si può riassumere il percorso del wire carrier all'interno del forno in questo modo:

- applicazione della colla;
- ingresso nella sezione di preriscaldamento e passaggio davanti la prima serie di piastre catalitiche;
- continuazione del percorso nella camera di preriscaldamento;
- uscita dalla sezione del preriscaldamento per favorire la distribuzione uniforme della colla ed evitare la formazione di residui;
- ingresso nella sezione di preriscaldamento;
- passaggio davanti la seconda serie di pannelli catalitici di preriscaldamento;
- uscita dalla sezione di preriscaldamento;

- ingresso nella sezione di essiccamento;
- uscita dalla sezione di essiccamento.

I parametri gestiti e tenuti sotto controllo nel processo sono le temperature delle camere nelle due sezioni del sistema di essiccamento, la velocità di percorrenza da parte del wire carrier e la quantità di colla applicata.

La velocità del wire carrier all'interno del sistema di essiccazione è fissata e pari a 11,5 metri per minuto. Conoscendo il percorso del materiale all'interno di ciascuna sezione, è possibile ottenere il tempo di percorrenza, ipotizzando che la velocità del wire carrier sia costante e uguale per ogni pezza del forno.

Il tempo di percorrenza è dunque calcolato come

$$t = \frac{l}{v_{wc}} \text{ [s]}$$

dove

t è il tempo di percorrenza;

l è la lunghezza del percorso;

v_{wc} è la velocità del wire carrier.

Calcolando il tempo di percorrenza del wire carrier per ogni sezione, è possibile stabilire teoricamente, in base ai fenomeni di scambio termico e di trasporto di materia, come evolve la temperatura del wire carrier all'interno del sistema di essiccazione. Si suppone che la temperatura sia omogenea per tutti i materiali che compongono il wire carrier (si trascura quindi la conduzione).

Dal percorso del materiale descritto in precedenza, si definiscono quindi le seguenti fasi:

- fase 1: passaggio del wire carrier davanti la prima serie di pannelli catalitici all'interno della sezione di preriscaldamento;
- fase 2: passaggio nella sezione di preriscaldamento con aria a 80°C;
- fase 3: percorso fuori forno con aria a temperatura ambiente;
- fase 4: passaggio nella sezione di preriscaldamento con aria a 80°C;
- fase 5: passaggio davanti la seconda serie di pannelli catalitici all'interno della sezione di preriscaldamento;

- fase 6: percorso fuori forno tra le due sezioni del sistema di essiccazione;
- fase 7: passaggio nella sezione di essiccazione con aria a 140°C.

I tempi di percorrenza sono riportati in Tabella 4.3.

	l [m]	vwc [m/s]	t [s]
fase 1	0,500	0,192	2,61
fase 2	1,480	0,192	7,72
fase 3	3,201	0,192	16,70
fase 4	1,480	0,192	7,72
fase 5	0,500	0,192	2,61
fase 6	1,940	0,192	10,12
fase 7	38,781	0,192	202,34
totale	47,882		249,82

Tabella 4.3 – Tempi di percorrenza per ogni sezione del sistema di essiccazione

Il tempo impiegato dal wire carrier nelle diverse sezioni del sistema è riportato in forma percentuale in Tabella 4.4.

	tempo impiegato
fase preriscaldamento	8%
percorso fuori forno	11%
fase di essiccazione	81%

Tabella 4.4 – Percentuale del tempo impiegata per ogni sezione del sistema di essiccazione

Il percorso fuori dal forno, dal punto di vista dei tempi di percorrenza, non è trascurabile. In questa fase, il wire carrier entra in contatto con aria a temperatura ambiente, raffreddandosi. Ciò avrà sicuramente un impatto sia in termini energetici sia in termini qualitativi, poiché ci si aspetta che in questa fase la portata di evaporazione dell'acqua decresca.

4.2.2 ANDAMENTO TEMPORALE DELLA TEMPERATURA

Per calcolare l'andamento temporale della temperatura del wire carrier nel sistema di essiccazione è necessario valutare tutti i fenomeni fisici che avvengono nelle diverse fasi dell'essiccazione.

In generale, per problemi di questo tipo è possibile utilizzare l'equazione di conservazione dell'energia per ogni istante di tempo t (11).

$$\rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{\text{conv}} + \dot{q}_{\text{irr}} - \dot{q}_{\text{evap}} \text{ [W]}$$

dove

ρ è la densità del materiale;

V è il volume occupato dal materiale;

c_p è il calore specifico a pressione costante del materiale;

T è la temperatura;

t è il tempo;

\dot{q}_{conv} è la potenza scambiata per convezione;

\dot{q}_{irr} è la potenza scambiata per irraggiamento;

\dot{q}_{evap} è la potenza necessaria all'evaporazione dell'acqua.

Nel caso del wire carrier, è necessario considerare i diversi tipi di materiale che ne fanno parte, come riportato all'inizio del paragrafo 4.2.1. L'equazione quindi diventa

$$(\rho_{fe} \cdot V_{fe} \cdot c_{p,fe} + \rho_{pes} \cdot V_{pes} \cdot c_{p,pes} + \rho_{pp} \cdot V_{pp} \cdot c_{p,pp} + \rho_{colla} \cdot V_{colla} \cdot c_{p,colla}) \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{\text{conv}} + \dot{q}_{\text{irr}} - \dot{q}_{\text{evap}} \text{ [W]}$$

dove

ρ è la densità del materiale;

V è il volume occupato dal materiale;

c_p è il calore specifico a pressione costante del materiale;

T è la temperatura;

t è il tempo;

\dot{q}_{conv} è la potenza scambiata per convezione;

\dot{q}_{irr} è la potenza scambiata per irraggiamento;

\dot{q}_{evap} è la potenza necessaria all'evaporazione dell'acqua;

il pedice "fe" indica il ferro;

il pedice "pes" indica il poliestere;

il pedice "pp" indica il polipropilene;

il pedice "colla" indica la soluzione di acqua e resina acrilica.

I parametri che dipendono dal tempo in questa equazione sono:

- la temperatura del wire carrier;
- le proprietà della colla, perché quando l'acqua evapora, se ne modifica la composizione;
- $\dot{q}_{\text{conv}} + \dot{q}_{\text{irr}}$ poiché dipendono dalla temperatura del wire carrier e dalla fase dell'essiccazione considerata;
- \dot{q}_{evap} perché dipende dalla portata d'acqua che evapora, che non è costante.

Le proprietà dei materiali sono riportate in Tabella 4.5 e in Tabella 4.6.

ρ_{fe} [kg/m ³]	ρ_{pes} [kg/m ³]	ρ_{pp} [kg/m ³]	ρ_{w} [kg/m ³]	ρ_{secco} [kg/m ³]
7800	1380	910	1000	1107,5

Tabella 4.5 – Densità dei materiali.

$c_{p,\text{fe}}$ [J/kg/K]	$c_{p,\text{pes}}$ [J/kg/K]	$c_{p,\text{pp}}$ [J/kg/K]	$c_{p,\text{w}}$ [J/kg/K]	$c_{p,\text{secco}}$ [J/kg/K]
450	1900	1870	4186	300

Tabella 4.6 - Calore specifico a pressione costante dei materiali.

Con il pedice "w" si intende l'acqua e con il pedice "secco" si intende la resina acrilica che compone la colla.

I fenomeni fisici che avvengono all'interno del sistema di essiccazione e contribuiscono alla variazione della temperatura e all'energia termica assorbita dal wire carrier sono:

- lo scambio termico per **irraggiamento** con le piastre catalitiche nella sezione di preriscaldamento;
- lo scambio termico per **convezione** con l'aria nelle due sezioni del sistema di essiccazione e nel percorso fuori dal forno;

- l'evaporazione dell'acqua contenuta nella colla applicata grazie ai fenomeni di **diffusione del vapore d'acqua** nella corrente di aria.

4.2.2.1 SCAMBIO TERMICO PER IRRAGGIAMENTO

Lo scambio termico per irraggiamento è un fenomeno che coinvolge due superfici che hanno diversa temperatura tra loro. A differenza degli altri meccanismi di trasmissione del calore, l'irraggiamento non necessita di un mezzo di propagazione (esiste anche se tra le due superficie vi è il vuoto). Il meccanismo di scambio termico consiste nell'emissione di energia da parte di una superficie a una certa temperatura dovuta all'oscillazione degli elettroni della materia che la compone. Queste oscillazioni sono sostenute dall'energia interna della materia e, quindi, dalla temperatura della superficie stessa (12). Il flusso termico netto va dalla superficie a temperatura maggiore verso quella a temperatura minore e si verifica sempre, per qualsiasi superficie. L'energia trasmessa per irraggiamento non è trasportata dalla materia, la sua propagazione è dunque dovuta ad onde elettromagnetiche.

Nel caso del sistema di essiccazione considerato, lo scambio termico per irraggiamento riguarda tutto il percorso del wire carrier all'interno delle diverse sezioni del forno. In particolare, l'irraggiamento avviene tra wire carrier e piastre catalitiche nella sezione di preriscaldamento e tra wire carrier e pareti delle camere di essiccazione del forno, sia nella fase di preriscaldamento sia nella fase finale di essiccazione.

Nel modello di calcolo del profilo di temperatura, si suppone trascurabile l'effetto dello scambio termico per irraggiamento tra pareti e wire carrier perché il fenomeno fisico prevalente è lo scambio termico per convezione, pertanto si considera lo scambio termico per irraggiamento soltanto al passaggio del materiale davanti le piastre catalitiche della sezione di preriscaldamento (fase 1 e fase 5).

La potenza termica scambiata da una superficie per irraggiamento è proporzionale alla quarta potenza della temperatura (espressa in Kelvin).

La potenza netta scambiata tra piastra catalitica, considerata come corpo nero, e wire carrier è data dalla relazione

$$\dot{q}_{irr} = F_{irr} \cdot \sigma \cdot S_{irr} \cdot (T_{piastra}^4 - T^4) \text{ [W]}$$

dove

F_{irr} è il fattore di vista;

σ è la costante di Stefan-Boltzmann pari a $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$;

S_{irr} è la superficie del wire carrier coinvolta nello scambio termico per irraggiamento;

$T_{piastra}$ è la temperatura superficiale della piastra catalitica;

T è la temperatura del wire carrier.

Il fattore di vista F_{irr} è definito come “la frazione di radiazione termica emessa dalla superficie i intercettata dalla superficie j ” (13). È dunque un parametro geometrico che indica la porzione della superficie del wire carrier interessata dalla radiazione termica emessa dalla piastra catalitica. Nel caso in esame, il wire carrier passa parallelamente alla piastra, pertanto la porzione della superficie interessata dalla relazione è la metà della superficie totale, cioè F_{irr} è pari a 0,5.

La superficie del wire carrier è pari alla somma delle superfici del filo di ferro e del filato, sottraendo la porzione di ferro non vista dalla piastra poichè è presente la tessitura del filo. Per determinare la superficie del filato è necessario conoscere il diametro del filo, che dipende dalla densità del materiale di cui è composto e dal titolo (densità lineare). Dalla definizione di titolo in ambito tessile è possibile ricavare il diametro dei fili utilizzati nel processo di tessitura:

$$d_{pp/pes} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot \text{titolo}}{\pi \cdot \rho_{pp/pes}}} \text{ [m]}$$

dove

d è il diametro del filo considerato;

titolo rappresenta la densità espressa in dTex;

ρ è la densità del materiale di cui è costituito il filato.

Per i filati usati in tessitura con titolo riportato nel paragrafo 4.2.1, si ottengono le dimensioni riportate in Tabella 4.7.

Materiale	ρ [kg/m³]	titolo [dTex]	d [mm]
Polipropilene	910	550	0,277
		945	0,364
		1100	0,392
Poliestere	1380	1100	0,319
		1670	0,393

Tabella 4.7 – Diametro dei diversi tipi di filato

Il diametro del filo di ferro è una caratteristica dell'articolo ed è definito in fase di progettazione dal cliente committente.

Per proseguire nella trattazione è necessario considerare un'unità funzionale, ovvero una porzione di wire carrier che viene analizzata lungo l'intero percorso all'interno del sistema di essiccazione. Si è deciso di considerare 10 cm di wire carrier: da qui in avanti, nella trattazione, tutte le grandezze calcolate sono riferite a questa unità funzionale.

Nel processo di tessitura, i fili di ordito (poliestere o polipropilene) sono intrecciati sul filo di trama (ferro). Anche il filo di ferro è piegato a formare un certo numero di asole, caratteristica definita in fase di progettazione dal committente.

La lunghezza del filo di ferro per 10 cm di wire carrier è data dalla relazione

$$L_{fe} = \left[\pi \cdot (q_D - d_{fe}) + 2 \cdot \frac{q_A - q_D - d_{fe}}{\cos \alpha} \right] \cdot \frac{N_{as}}{2} \text{ [m]} \text{ con } \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{q_D - d_{fe} - q_C}{2 \cdot (q_A - q_D)} \right)$$

dove

L_{fe} è la lunghezza del filo di ferro in 10 cm di wire carrier;

q_A è la quota A, ossia la larghezza del wire carrier;

q_C è la quota C, ossia la larghezza della base di un'asola;

q_D è la quota D, ossia la larghezza di un'asola;

d_{fe} è il diametro del filo di ferro;

N_{as} è il numero di asole per 10 cm di wire carrier;

α è l'inclinazione del ramo di filo di ferro che costituisce l'asola e la retta perpendicolare alla mezzieria del wire carrier che giace sul piano in cui è contenuto il wire carrier.

Le grandezze geometriche caratteristiche del wire carrier sono riportate in Figura 4.5.

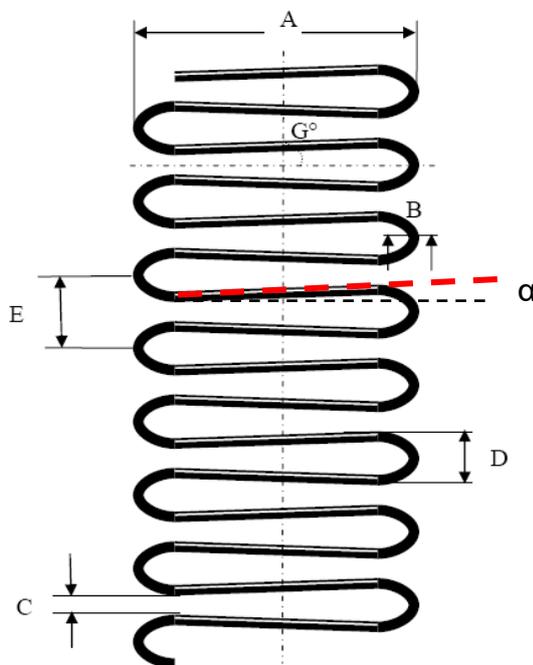


Figura 4.5 – Quote caratteristiche del wire carrier

Il filato è invece tessuto in direzione trasversale rispetto alle asole. La geometria seguita dal filo è molto complessa, si può semplificare considerando che il filo formi un'asola centrata in corrispondenza dell'asola del filo di ferro, all'interno della quale si intersecano i due rami (di lunghezza pari alla quota D) dell'asola successiva. Il filo passa poi attorno al filo di ferro. Questa struttura si verifica ogni volta che il filato interseca la trama, quindi quattro volte per asola. La lunghezza di ogni filo sarà pertanto

$$L_{pp/pes} = \left[2 \cdot (2 \cdot q_D + \pi \cdot d_{pp/pes}) + \pi \cdot \frac{d_{fe}}{2} \right] \cdot \frac{N_{as}}{2} [m]$$

dove

$L_{pp/pes}$ è la lunghezza del filo di polipropilene o poliestere in 10 cm di wire carrier;

q_D è la quota D, ossia la larghezza di un'asola;

$d_{pp/pes}$ è il diametro del filo di polipropilene o poliestere;

d_{fe} è il diametro del filo di ferro;

N_{as} è il numero di asole per 10 cm di wire carrier.

La lunghezza del filo di ordito in 10 cm di wire carrier dunque varia leggermente in base al titolo del filato, poiché è diverso il diametro del filo stesso.

Nota dunque la lunghezza per l'unità funzionale considerata è possibile calcolare la superficie di scambio termico per ogni materiale, come la superficie laterale di un cilindro con diametro di base pari al diametro del filo

$$S_{fe} = \pi \cdot d_{fe} \cdot L_{fe} [m^2]$$

dove

S_{fe} è la superficie del filo di ferro per 10 cm di wire carrier;

d_{fe} è il diametro del filo di ferro;

L_{fe} è la lunghezza del filo di ferro in 10 cm di wire carrier.

$$S_{pp/pes} = \pi \cdot d_{pp/pes} \cdot L_{pp/pes} \cdot N_{pp/pes} \text{ [m}^2\text{]}$$

dove

$S_{pp/pes}$ è la superficie del filo di polipropilene e poliestere per 10 cm di wire carrier;

$d_{pp/pes}$ è il diametro del filo di polipropilene e poliestere;

$L_{pp/pes}$ è la lunghezza del filo di polipropilene e poliestere in 10 cm di wire carrier;

$N_{pp/pes}$ è il numero di fili di polipropilene e poliestere.

La superficie del wire carrier coinvolta nello scambio termico sarà la somma delle superfici dei fili sottraendo la porzione di filo metallico “non visto” dalla superficie della piastra catalitica.

$$S_{irr} = S_{fe} + S_{pes} + S_{pp} - 6 \cdot \pi \cdot d_{fe} \cdot d_{pp} \cdot N_{pp} \cdot \frac{N_{as}}{2} - 6 \cdot \pi \cdot d_{fe} \cdot d_{pes} \cdot N_{pes} \cdot \frac{N_{as}}{2} \text{ [m}^2\text{]}$$

dove

S_{irr} è la superficie di wire carrier irraggiata;

S_{fe} è la superficie del filo di ferro per 10 cm di wire carrier;

S_{pes} è la superficie del filo di poliestere per 10 cm di wire carrier;

S_{pp} è la superficie del filo di polipropilene per 10 cm di wire carrier;

d_{fe} è il diametro del filo di ferro;

d_{pp} è il diametro del filo di polipropilene;

N_{pp} è il numero di fili di polipropilene;

d_{pes} è il diametro del filo di poliestere;

N_{pes} è il numero di fili di poliestere.

La temperatura superficiale delle piastre catalitiche è un dato di progetto dichiarato dal costruttore ed è pari a 500°C.

4.2.2.2 SCAMBIO TERMICO PER CONVEZIONE

Lo scambio termico per convezione consiste nel trasferimento di calore tra una superficie e un fluido che si muove rispetto ad essa. Nel caso in esame, il fluido in movimento è aria che può riscaldare o raffreddare la superficie del wire carrier a seconda delle condizioni e dei fenomeni fisici che avvengono durante il percorso del materiale. Il wire carrier si muove alla velocità di traino del forno nel flusso d'aria, pertanto si parla di trasmissione del calore per convezione forzata, dove il moto relativo del fluido rispetto alla superficie avviene con velocità pari alla velocità di traino del sistema.

La potenza scambiata per convezione è calcolata con la relazione

$$\dot{q}_{\text{conv}} = h \cdot S_{\text{conv}} \cdot (T_{\text{aria}} - T) \text{ [W]}$$

dove

\dot{q}_{conv} è la potenza termica scambiata per convezione;

h è il coefficiente di scambio termico per convezione;

S_{conv} è la superficie del wire carrier coinvolta nello scambio termico;

T_{aria} è la temperatura dell'aria;

T è la temperatura della superficie del wire carrier.

La temperatura dell'aria dipende dalla sezione del sistema di essiccazione in cui si trova il wire carrier. Si possono distinguere dunque i casi riportati in Tabella 4.8, supponendo che nella fase 1 e nella fase 5 sia trascurabile il contributo dovuto allo scambio termico per convezione per via della presenza delle piastre catalitiche che irradiano la superficie del wire carrier.

	Sezione	T_{aria} [°C]
fase 2	preriscaldamento	80
fase 3	fuori forno	T _{amb}
fase 4	preriscaldamento	80
fase 6	fuori forno	T _{amb}
fase 7	essiccazione	140

Tabella 4.8 - Temperatura dell'aria nelle diverse sezioni del sistema di essiccazione

La temperatura ambiente è considerata pari al caso invernale con riscaldamento in funzione, ossia 18°C.

Il coefficiente di scambio termico h determina il flusso di calore per unità di superficie che provoca una variazione di temperatura di 1°C . È una grandezza fisica che dipende dalla geometria della superficie, dalle proprietà termofisiche e dalla velocità del flusso d'aria.

Per il calcolo del coefficiente di scambio termico si utilizzano delle correlazioni empiriche della forma

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot l_{\text{car}}}{\lambda_{\text{aria}}} = f(\text{Re}, \text{Pr})$$

dove

Nu è il numero di Nusselt;

h è il coefficiente di scambio termico;

l_{car} è la lunghezza caratteristica che dipende dalla geometria della superficie;

λ_{aria} è la conducibilità termica dell'aria, che dipende dalla temperatura;

Re è il numero di Reynolds;

Pr è il numero di Prandtl.

Il numero di Nusselt è un numero adimensionale che indica il rapporto fra la quantità di calore scambiata per convezione e la quantità di calore che scambierebbe la superficie se scambiasse calore per conduzione con il fluido, ossia con il fluido in quiete (14).

Il numero di Reynolds si calcola come

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{aria}} \cdot v \cdot l_{\text{car}}}{\mu_{\text{aria}}}$$

dove

ρ_{aria} è la densità dell'aria, dipendente dalla temperatura;

v è la velocità del flusso d'aria;

l_{car} è la lunghezza caratteristica che dipende dalla geometria della superficie;

μ_{aria} è la viscosità dinamica dell'aria, dipendente dalla temperatura.

Questa grandezza indica il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosse.

Il numero di Prandtl è calcolato come

$$Pr = \frac{c_{p,aria} \cdot \mu_{aria}}{\lambda_{aria}}$$

dove

$c_{p,aria}$ è il calore specifico a pressione costante dell'aria;

μ_{aria} è la viscosità dinamica dell'aria, dipendente dalla temperatura;

λ_{aria} è la conducibilità termica dell'aria, che dipende dalla temperatura.

Questa grandezza indica il rapporto tra la capacità del fluido di trasmettere quantità di moto e la capacità di trasmettere calore (14).

L'approccio utilizzato per definire lo scambio termico con il wire carrier è quello di considerare i materiali che lo compongono e calcolare il coefficiente di scambio termico per ciascun componente.

I materiali coinvolti nello scambio termico sono dunque i fili di poliestere, i fili di polipropilene, la colla e il filo di ferro.

Per quanto riguarda i fili di poliestere e i fili di polipropilene, si considera come un flusso d'aria che passa su una superficie piana (lastra piana) pari alla superficie laterale del cilindro con base uguale al diametro del filo e lunghezza pari alla lunghezza del filo in 10 cm di wire carrier. Questa assunzione deriva dalla particolare geometria del filo tessuto, che forma una superficie finale molto simile a una lastra. Per calcolare la superficie della colla, si considera che essa venga applicata uniformemente sui fili di poliestere e polipropilene e ne aderisca perfettamente. La superficie è dunque approssimata come un cilindro cavo, con spessore parete di spessore pari allo spessore della colla. Nota la massa della colla media per ogni filo e la sua densità, si ottiene la superficie considerando che la quantità di colla si disponga uniformemente per tutta la lunghezza del filo considerato.

La correlazione usata per il filo di poliestere, di polipropilene e la colla è una correlazione per flusso d'aria su lastra piana isoterma (15). Si distinguono due relazioni in funzione del tipo di moto, laminare o turbolento:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{con } Re < 5 \cdot 10^5 \text{ moto laminare}$$

$$Nu = 0,0296 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{con } Re > 5 \cdot 10^5 \text{ moto turbolento}$$

Re, Pr e quindi Nu dipendono dalla temperatura dell'aria. Il coefficiente di scambio termico sarà calcolato come

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda_{aria}}{L_{car}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

dove

Nu è il numero di Nusselt ricavato per ogni temperatura dell'aria;

λ_{aria} è la conducibilità termica dell'aria, che dipende dalla temperatura;

L_{car} è la lunghezza della lastra piana, in questo caso pari all'unità funzionale di 10 cm di wire carrier.

I risultati del calcolo sono riportati in Tabella 4.9.

T _{aria} [°C]	Re	Pr	Nu	λ_{aria} [W/m/K]	h [W/m ² /K]
18	1285,48	0,716	21,29	0,02549	5,428
80	915,93	0,708	17,91	0,0299	5,355
140	696,50	0,703	15,58	0,03394	5,288

Tabella 4.9 – Coefficienti di scambio termico per convezione dei fili di poliestere, polipropilene e della colla, al variare della temperatura dell'aria.

Per il filo di ferro, si assume una geometria cilindrica della superficie. Ne consegue che la lunghezza caratteristica per il calcolo del numero di Reynolds e del coefficiente di scambio termico tramite il numero di Nusselt diventa il diametro del filo di ferro. la correlazione utilizza riguarda il flusso di aria su un cilindro e viene usata la correlazione di Hilpert (15) per fluidi con $Pr \geq 0,7$:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

I coefficienti C e m dipendono dal numero di Reynolds e sono riportati in Tabella 4.10.

Re	C	m
$0,4 \leq Re < 4$	0,989	0,33
$4 \leq Re < 40$	0,911	0,385
$40 \leq Re < 4000$	0,683	0,466
$4000 \leq Re < 40000$	0,193	0,618
$Re \geq 40000$	0,027	0,805

Tabella 4.10 – Coefficienti della correlazione di Hilbert

Come nel caso precedente, una volta noto il numero di Nusselt si procede a calcolare il coefficiente di scambio termico per il filo di ferro, considerando come

lunghezza caratteristica il diametro del filo stesso, grandezza definita in fase di progetto dal committente. Anche in questo caso si avrà un coefficiente di scambio termico per ogni temperatura dell'aria.

Il calcolo delle superfici di scambio termico per convezione per quanto riguarda il filo di ferro e il filo di poliestere è uguale al caso dell'irraggiamento, quindi:

$$S_{fe} = \pi \cdot d_{fe} \cdot L_{fe} \text{ [m}^2\text{]}$$

dove

S_{fe} è la superficie del filo di ferro per 10 cm di wire carrier;

d_{fe} è il diametro del filo di ferro;

L_{fe} è la lunghezza del filo di ferro in 10 cm di wire carrier.

$$S_{pp/pes} = \pi \cdot d_{pp/pes} \cdot L_{pp/pes} \cdot N_{pp/pes} \text{ [m}^2\text{]}$$

dove

$S_{pp/pes}$ è la superficie del filo di polipropilene e poliestere per 10 cm di wire carrier;

$d_{pp/pes}$ è il diametro del filo di polipropilene e poliestere;

$L_{pp/pes}$ è la lunghezza del filo di polipropilene e poliestere in 10 cm di wire carrier;

$N_{pp/pes}$ è il numero di fili di polipropilene e poliestere.

Per quanto riguarda la superficie della colla, bisogna considerare la superficie laterale del cilindro cavo che ha diametro maggiore pari al diametro dei fili di poliestere e polipropilene (funzione del titolo) e due volte lo spessore della colla, funzione del volume di colla medio per ogni filo.

$$S_{colla} = \pi \cdot (d_{pp/pes} + 2 \cdot s_{colla}) \cdot L_{pp/pes} \cdot N_{pp/pes} \text{ [m}^2\text{]}$$

dove

S_{colla} è la superficie della colla per 10 cm di wire carrier;

$d_{pp/pes}$ è il diametro del filo di polipropilene e poliestere;

s_{colla} è lo spessore di colla medio per ogni filo;

$L_{pp/pes}$ è la lunghezza del filo di polipropilene e poliestere in 10 cm di wire carrier;

$N_{pp/pes}$ è il numero di fili di polipropilene e poliestere.

Lo spessore di colla medio per ogni filo è calcolato come

$$s_{\text{colla}} = \sqrt{m_{\text{colla}} \cdot \frac{N_{\text{pp/pes}}}{N_{\text{pp}} + N_{\text{pes}}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot L_{\text{pp/pes}} \cdot \rho_{\text{colla}}} + \frac{d_{\text{pp/pes}}^2}{4} - \frac{d_{\text{pp/pes}}}{2}} \quad [\text{m}]$$

dove

s_{colla} è lo spessore di colla medio per ogni filo;

m_{colla} è la massa di colla;

$N_{\text{pp/pes}}$ è il numero di fili di polipropilene e poliestere con il titolo considerato;

N_{pp} è il numero totale di fili di polipropilene;

N_{pes} è il numero totale di fili di polipropilene;

$L_{\text{pp/pes}}$ è la lunghezza dei fili di polipropilene e poliestere;

ρ_{colla} è la densità della colla;

$d_{\text{pp/pes}}$ è il diametro del filo di polipropilene e poliestere.

Lo spessore della colla varia dunque al variare del titolo del filato. Ogni filo con titolo diverso, avrà un diverso spessore di colla.

4.2.2.3 DIFFUSIONE DEL VAPORE D'ACQUA

L'evaporazione per diffusione del vapore d'acqua in aria è un fenomeno fisico che avviene a qualsiasi temperatura e molto diffuso in natura, basti pensare all'evaporazione dell'acqua della superficie del mare che origina le piogge.

La driving force di questo fenomeno è la differenza di concentrazione tra il vapore acqueo contenuto nell'aria in prossimità del wire carrier e la concentrazione del vapore acqueo nell'aria del flusso.

Assumendo che l'aria in prossimità del wire carrier sia a temperatura pari a quella del wire carrier e che il vapore acqueo saturi l'aria in queste condizioni, è possibile calcolare la portata d'acqua evaporata tramite la legge di Fick monodimensionale per materia isotropa:

$$\dot{m}_{\text{evap}} = K_m \cdot S_{\text{colla}} \cdot (\rho_{\text{wv,a,wc}} - \rho_{\text{wv,a,f}}) \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

dove

\dot{m}_{evap} è la portata d'acqua che evapora;

K_m è il coefficiente di diffusione, che esprime la velocità in cui avviene l'evaporazione;

S_{colla} è la superficie della colla, supponendo che sia uguale all'interfaccia acqua/aria;

$\rho_{\text{wv,a,wc}}$ è la densità del vapore acqueo in aria in prossimità del wire carrier;

$\rho_{\text{wv,a,f}}$ è la densità del vapore acqueo in aria nella sezione attraversata dal wire carrier.

Raccogliendo a fattor comune la densità dell'aria, si ottiene la relazione

$$\dot{m}_{\text{evap}} = K_m \cdot S_{\text{colla}} \cdot \rho_{\text{aria}} (x_{\text{wv,a,wc}} - x_{\text{wv,a,f}}) \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

dove

\dot{m}_{evap} è la portata d'acqua che evapora;

K_m è il coefficiente di diffusione, che esprime la velocità in cui avviene l'evaporazione;

S_{colla} è la superficie della colla, supponendo che sia uguale all'interfaccia acqua/aria;

ρ_{aria} è la densità dell'aria, dipendente dalla temperatura;

$x_{\text{wv,a,wc}}$ è l'umidità specifica del vapore acqueo in aria in prossimità del wire carrier;

$x_{\text{wv,a,f}}$ è l'umidità specifica del vapore acqueo in aria nella sezione attraversata dal wire carrier.

Bisogna osservare che l'umidità specifica all'interno del sistema di essiccazione varia via via che l'acqua evapora. Per semplicità di trattazione si suppone che tutto il vapore evaporato durante l'essiccazione venga espulso verso l'esterno, pertanto l'umidità dell'aria all'interno delle sezioni del sistema è costante.

Assumendo che l'evaporazione dell'acqua sia l'evaporazione di una pozza con interfaccia tra acqua e aria pari alla superficie della colla, si può ottenere il coefficiente di diffusione con la correlazione di McKay-Matsugu (16), che esprime il coefficiente K_m in funzione del numero di Schmidt, della velocità dell'aria e della lunghezza caratteristica, in questa analisi ipotizzata pari all'unità funzionale di wire carrier:

$$K_m = 0,004786 \cdot v^{0,78} \cdot L_{car}^{-0,11} \cdot Sc^{0,67} \left[\frac{m}{s} \right]$$

dove

K_m è il coefficiente di diffusione;

v è la velocità del flusso d'aria;

L_{car} è la lunghezza caratteristica;

Sc è il numero di Schmidt.

Il numero di Schmidt è l'analogo del numero di Prandtl per il trasporto di materia, si calcola infatti come

$$Sc = \frac{\mu_{aria}}{\rho_{aria} \cdot d_m}$$

dove

Sc è il numero di Schmidt;

μ_{aria} è la viscosità dinamica dell'aria, dipendente dalla temperatura;

ρ_{aria} è densità dell'aria, che dipende dalla temperatura;

d_m è coefficiente di diffusività della materia, che in questo caso è pari a $2,8 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$.

Il coefficiente K_m dipende dalla temperatura, il suo valore per ogni temperatura dell'aria considerata è riportato in

T_{aria} [°C]	Sc	v [m/s]	L_{car} [m]	K_m [m/s]
18	0,5325	11	0,10	0,02624
80	0,7474			0,03292
140	0,98281			0,03956

Tabella 4.11 – Coefficiente di diffusione al variare della temperatura dell'aria

L'umidità specifica dell'aria si calcola come rapporto tra la pressione parziale di vapore acqueo e la pressione ambiente.

La pressione di saturazione del vapore acqueo è calcolata con la seguente relazione

$$p_{wv,sat} = 6,11 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T}{237,7 + T}} \cdot 100 \text{ [Pa]}$$

dove

$p_{wv,sat}$ è la pressione di saturazione del vapore in aria;

T è la temperatura dell'aria espressa in °C.

L'aria in prossimità del wire carrier è in condizioni di saturazione, pertanto la pressione parziale del vapore acqueo è quella di saturazione calcolata con la relazione precedente

$$x_{wv,a,wc} = \frac{p_{wv,a,sat}}{p_{amb}} \left[\frac{\text{kg}_{vap}}{\text{kg}_{aria secca}} \right]$$

dove

$x_{wv,a,wc}$ è l'umidità specifica del vapore acqueo in aria in prossimità del wire carrier;

$p_{wv,a,sat}$ è la pressione di saturazione del vapore in aria calcolata alla temperatura del wire carrier;

p_{amb} è la pressione ambiente.

Supponendo che l'aria all'interno del sistema di essiccazione venga riscaldata con una trasformazione isotitolo, l'umidità specifica dell'aria all'interno delle sezioni del sistema di essiccazione è uguale a quella dell'aria ambiente. La pressione parziale del vapore in aria non satura si può ricavare conoscendo l'umidità relativa, definita come

il rapporto tra pressione parziale del vapore e pressione parziale del vapore in condizioni di saturazione alla stessa temperatura.

Si calcola l'umidità specifica dell'aria di essiccazione come

$$x_{wv,a,f} = \varphi \cdot \frac{p_{wv,f,sat}}{p_{amb}} \left[\frac{\text{kg}_{vap}}{\text{kg}_{aria\ secca}} \right]$$

dove

$x_{wv,a,wc}$ è l'umidità specifica del vapore acqueo in aria in prossimità del wire carrier;

φ è l'umidità relativa dell'aria alla temperatura ambiente;

$p_{wv,f,sat}$ è la pressione di saturazione del vapore in aria calcolata alla temperatura ambiente;

p_{amb} è la pressione ambiente.

L'umidità specifica dell'aria di essiccazione sarà costante, uguale a quella dell'aria ambiente e pari a $0,01017 \frac{\text{kg}_{vap}}{\text{kg}_{aria\ secca}}$.

L'umidità specifica dell'aria in prossimità del wire carrier in condizione di saturazione dipende dalla temperatura del wire carrier.

4.2.3 IL PROFILO DI TEMPERATURA

Per conoscere il profilo di temperatura del wire carrier, bisogna applicare le relazioni trovate nel paragrafo precedente in base ai fenomeni fisici che avvengono in ogni sezione.

L'evoluzione della temperatura durante il percorso del wire carrier è la soluzione dell'equazione differenziale riportata in paragrafo 4.2.2. Il volume di ciascun componente è calcolato come

$$V_{fe} = \pi \cdot \frac{d_{fe}^2}{4} \cdot L_{fe} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove

V_{fe} è il volume del ferro in 10 cm di wire carrier;

d_{fe} è il diametro del filo di ferro;

L_{fe} è la lunghezza del filo di ferro in 10 cm di wire carrier.

$$V_{pp} = \pi \cdot \frac{d_{pp}^2}{4} \cdot L_{pp} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove

V_{pp} è il volume del polipropilene in 10 cm di wire carrier;

d_{pp} è il diametro del filo di polipropilene, variabile in base al titolo del filo;

L_{pp} è la lunghezza del filo di polipropilene in 10 cm di wire carrier.

$$V_{pes} = \pi \cdot \frac{d_{pes}^2}{4} \cdot L_{pes} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove

V_{pes} è il volume del poliestere in 10 cm di wire carrier;

d_{pes} è il diametro del filo di poliestere, variabile in base al titolo del filo;

L_{pes} è la lunghezza del filo di poliestere in 10 cm di wire carrier.

$$V_{colla} = \frac{m_{colla}}{\rho_{colla}} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove

V_{colla} è il volume di colla in 10 cm di wire carrier;

m_{colla} è la massa di colla in 10 cm di wire carrier;

ρ_{colla} è la densità della colla.

Considerando la velocità del traino di 11,5 metri per minuti e i corrispondenti tempi di percorrenza di Tabella 4.3, le equazioni differenziali da risolvere sono:

- **fase 1**; $0 < t \leq t_1$: il wire carrier passa davanti la prima piastra catalitica, lo scambio termico per convezione è trascurabile

$$A \cdot \frac{dT}{dt} = F_{irr} \cdot \sigma \cdot S_{irr} \cdot (T_{piastra}^4 - T^4) - \dot{m}_{evap} \cdot h_{evap}$$

$$\text{con } A = (\rho_{fe} \cdot V_{fe} \cdot c_{p,fe} + \rho_{pes} \cdot V_{pes} \cdot c_{p,pes} + \rho_{pp} \cdot V_{pp} \cdot c_{p,pp} + \rho_{colla} \cdot V_{colla} \cdot c_{p,colla})$$

- **fase 2;** $t_1 < t \leq t_2$: il wire carrier passa all'interno della sezione del preriscaldamento, supponendo trascurabile l'irraggiamento tra wire carrier e pareti della sezione

$$A \cdot \frac{dT}{dt} = H_{80^\circ\text{C}} \cdot (T_{\text{aria},80^\circ\text{C}} - T) - \dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}$$

$$\text{con } H_{80^\circ\text{C}} = (h_{\text{fe},80^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{fe}} + h_{\text{pes},80^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{pes}} + h_{\text{pp},80^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{pp}} + h_{\text{colla},80^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{colla}})$$

- **fase 3;** $t_2 < t \leq t_3$: il wire carrier passa fuori dal forno

$$A \cdot \frac{dT}{dt} = H_{18^\circ\text{C}} \cdot (T_{\text{aria},18^\circ\text{C}} - T) - \dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}$$

$$\text{con } H_{18^\circ\text{C}} = (h_{\text{fe},18^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{fe}} + h_{\text{pes},18^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{pes}} + h_{\text{pp},18^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{pp}} + h_{\text{colla},18^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{colla}})$$

- **fase 4;** $t_3 < t \leq t_4$: il wire carrier passa all'interno della sezione del preriscaldamento, supponendo trascurabile l'irraggiamento tra wire carrier e pareti della sezione

$$A \cdot \frac{dT}{dt} = H_{80^\circ\text{C}} \cdot (T_{\text{aria},80^\circ\text{C}} - T) - \dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}$$

$$\text{con } H_{80^\circ\text{C}} = (h_{\text{fe},80^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{fe}} + h_{\text{pes},80^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{pes}} + h_{\text{pp},80^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{pp}} + h_{\text{colla},80^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{colla}})$$

- **fase 5;** $t_4 < t \leq t_5$: il wire carrier passa davanti la seconda piastra catalitica, lo scambio termico per convezione è trascurabile

$$A \cdot \frac{dT}{dt} = F_{\text{irr}} \cdot \sigma \cdot S_{\text{irr}} \cdot (T_{\text{piastra}}^4 - T^4) - \dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}$$

- **fase 6;** $t_5 < t \leq t_6$: il wire carrier passa fuori dal forno

$$A \cdot \frac{dT}{dt} = H_{18^\circ\text{C}} \cdot (T_{\text{aria},18^\circ\text{C}} - T) - \dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}$$

$$\text{con } H_{18^\circ\text{C}} = (h_{\text{fe},18^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{fe}} + h_{\text{pes},18^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{pes}} + h_{\text{pp},18^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{pp}} + h_{\text{colla},18^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{colla}})$$

- **fase 7**; $t_6 < t \leq t_7$: il wire carrier passa all'interno della sezione di essiccazione, supponendo trascurabile l'irraggiamento tra wire carrier e pareti della sezione

$$A \cdot \frac{dT}{dt} = H_{140^\circ\text{C}} \cdot (T_{\text{aria},140^\circ\text{C}} - T) - \dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}$$

$$\text{con } H_{140^\circ\text{C}} = (h_{\text{fe},140^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{fe}} + h_{\text{pes},140^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{pes}} + h_{\text{pp},140^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{pp}} + h_{\text{colla},140^\circ\text{C}} \cdot S_{\text{colla}})$$

4.2.3.1 SOLUZIONE CON METODO NUMERICO

Per la soluzione delle equazioni differenziali si è optato per l'uso di un metodo numerico alle differenze finite.

La derivata della temperatura rispetto al tempo può essere approssimata con il rapporto incrementale

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t}$$

dove

T_i è la temperatura del wire carrier all'istante t_i ;

T_{i-1} è la temperatura del wire carrier all'istante t_{i-1} ;

Δt è il time step usato per l'approssimazione.

Il problema considerato nel paragrafo 4.2.3 è della forma:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = f(T) \\ T(t=0) = T_{\text{amb}} \end{cases}$$

Poiché la funzione $f(T)$ non è lineare in quanto sia l'irraggiamento che la portata d'acqua evaporata non dipendono linearmente dalla temperatura, viene usato un metodo numerico esplicito per la soluzione, in modo che è possibile risolvere il problema conoscendo il valore della temperatura all'istante di tempo precedente a quello considerato. Il metodo usato è il metodo esplicito di Eulero

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} = f(T)$$

$$T_i = T_{i-1} + \Delta t \cdot f(T_{i-1})$$

L'incognita è T_i ed è facilmente calcolabile conoscendo la temperatura all'istante di tempo precedente. A una estrema semplicità nel calcolo della soluzione attraverso il metodo di Eulero, si contrappone il fatto che questo metodo abbia un errore rispetto alla soluzione reale che cresce linearmente con Δt . Ciò comporta che a parità di errore, il tempo computazione ottenuto con il metodo di Eulero è superiore rispetto all'uso di metodi impliciti, in quanto richiede più passi temporale per implementare la soluzione.

Il Δt utilizzato in questa trattazione è pari a 0,05 s che consente di avere un buon compromesso tra tempo computazionale e precisione della soluzione.

La massa iniziale di colla è calcolata sapendo che

$$m_{\text{tot}} = m_{\text{fe}} + m_{\text{pp}} + m_{\text{pes}} + m_{\text{colla},t=0s} \text{ [kg]}$$

dove

m_{tot} è la massa di 10 cm di wire carrier;

m_{fe} è la massa del ferro;

m_{pp} è la massa del polipropilene;

m_{pes} è la massa del poliestere;

$m_{\text{colla},t=0s}$ è la massa della colla all'ingresso del sistema di essiccazione.

e che

$$m_{\text{colla},t=0s} = \frac{x_{i,t=0s} \cdot (m_{\text{fe}} + m_{\text{pp}} + m_{\text{pes}})}{1 - x_{s,\text{colla},t=0s}} \text{ [kg]}$$

dove

$m_{\text{colla},t=0s}$ è la massa della colla all'ingresso del sistema di essiccazione;

m_{fe} è la massa del ferro;

m_{pp} è la massa del polipropilene;

m_{pes} è la massa del poliestere;

$x_{i,t=0s}$ è l'umidità del wire carrier all'ingresso del sistema di essiccazione;

$x_{s,\text{colla},t=0s}$ è la percentuale in massa di resina acrilica nella colla, all'ingresso del sistema di essiccazione.

Nota la massa iniziale di colla, è possibile calcolare la massa iniziale di acqua come

$$m_{\text{acqua},t=0s} = (1 - x_{s,\text{colla},t=0s}) * m_{\text{colla},t=0s}[\text{kg}]$$

dove

$m_{\text{acqua},t=0s}$ è la massa di acqua all'ingresso del sistema di essiccazione;

$m_{\text{colla},t=0s}$ è la massa della colla all'ingresso del sistema di essiccazione;

$x_{s,\text{colla},t=0s}$ è la percentuale in massa di resina acrilica nella colla, all'ingresso del sistema di essiccazione.

Ricordando inoltre che

$$T(t = 0) = T_{\text{amb}} = 18^{\circ}\text{C}$$

$$A_i = (\rho_{fe} \cdot V_{fe} \cdot c_{p,fe} + \rho_{pes} \cdot V_{pes} \cdot c_{p,pes} + \rho_{pp} \cdot V_{pp} \cdot c_{p,pp} + \rho_{\text{colla},i} \cdot V_{\text{colla},i} \cdot c_{p,\text{colla},i})$$

$$H_{18^{\circ}\text{C},i} = (h_{fe,18^{\circ}\text{C}} \cdot S_{fe} + h_{pes,18^{\circ}\text{C}} \cdot S_{pes} + h_{pp,18^{\circ}\text{C}} \cdot S_{pp} + h_{\text{colla},18^{\circ}\text{C}} \cdot S_{\text{colla},i})$$

$$H_{80^{\circ}\text{C},i} = (h_{fe,80^{\circ}\text{C}} \cdot S_{fe} + h_{pes,80^{\circ}\text{C}} \cdot S_{pes} + h_{pp,80^{\circ}\text{C}} \cdot S_{pp} + h_{\text{colla},80^{\circ}\text{C}} \cdot S_{\text{colla},i})$$

$$H_{140^{\circ}\text{C},i} = (h_{fe,140^{\circ}\text{C}} \cdot S_{fe} + h_{pes,140^{\circ}\text{C}} \cdot S_{pes} + h_{pp,140^{\circ}\text{C}} \cdot S_{pp} + h_{\text{colla},140^{\circ}\text{C}} \cdot S_{\text{colla},i})$$

Si possono calcolare le soluzioni numeriche delle equazioni differenziali che descrivono il problema considerato:

- **fase 1**; $0 < t \leq t_1$: $A \cdot \frac{dT}{dt} = F_{irr} \cdot \sigma \cdot S_{irr} \cdot (T_{piastra}^4 - T^4) - \dot{m}_{evap} \cdot h_{evap}$

$$f(T) = \frac{F_{irr} \cdot \sigma \cdot S_{irr}}{A} \cdot (T_{piastra}^4 - T^4) - \frac{\dot{m}_{evap} \cdot h_{evap}}{A}$$

$$T_i = T_{i-1} + \Delta t \cdot f(T_{i-1})$$

$$= T_{i-1} + \Delta t \cdot \left[\frac{F_{irr} \cdot \sigma \cdot S_{irr}}{A_{i-1}} \cdot (T_{piastra}^4 - T_{i-1}^4) - \frac{\dot{m}_{evap,i-1} \cdot h_{evap}}{A_{i-1}} \right] [^{\circ}C]$$

La portata di acqua che evapora all'istante di tempo t_{i-1} è calcolata come

$$\dot{m}_{evap,i-1} = K_{m,80^{\circ}C} \cdot S_{colla,i-1} \cdot \rho_{aria,80^{\circ}C} (x_{wv,a,wc,T_{i-1}} - x_{wv,a,f}) \left[\frac{kg}{s} \right]$$

dove

$$x_{wv,a,wc,T_{i-1}} = \frac{p_{wv,a,sat,T_{i-1}}}{p_{amb}}$$

e

$$p_{wv,a,sat,T_{i-1}} = 6,11 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T_{i-1}}{237,7 + T_{i-1}}} \cdot 100 [Pa]$$

Evaporando, la quantità d'acqua nella colla diminuisce: aumenta la concentrazione di parte secca modificando la densità, il volume e il calore specifico della colla. Inoltre, diminuirà anche la superficie della colla utile sia allo scambio termico sia alla diffusione:

$$m_{evap,i} = \dot{m}_{evap,i-1} \cdot \Delta t [kg]$$

dove

$m_{evap,i}$ è la massa d'acqua evaporata tra gli istanti t_{i-1} e t_i ;

$\dot{m}_{evap,i-1}$ è la portata d'acqua evaporata tra gli istanti t_{i-1} e t_i ;

Δt è l'intervallo di tempo tra t_{i-1} e t_i .

La massa d'acqua per ogni passo temporale si calcola come

$$m_{\text{acqua,wc},i} = m_{\text{acqua,wc},i-1} - m_{\text{evap},i} \text{ [kg]}$$

dove

$m_{\text{acqua,wc},i}$ è la massa d'acqua nel wire carrier all'istante t_i ;

$m_{\text{acqua,wc},i-1}$ è la massa d'acqua nel wire carrier all'istante t_{i-1} ;

$m_{\text{evap},i}$ è la massa d'acqua evaporata tra l'istante t_i e l'istante t_{i-1} .

Il volume della colla si calcola come

$$V_{\text{colla},i} = V_{\text{colla},i-1} - \frac{m_{\text{evap},i}}{\rho_{\text{acqua}}} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove

$V_{\text{colla},i}$ è il volume occupato dalla colla nel wire carrier all'istante t_i ;

$V_{\text{colla},i-1}$ è il volume occupato dalla colla nel wire carrier all'istante t_{i-1} ;

$m_{\text{evap},i}$ è la massa d'acqua evaporata tra l'istante t_i e l'istante t_{i-1} ;

ρ_{acqua} è la densità dell'acqua liquida.

La massa della colla si calcola come

$$m_{\text{colla},i} = m_{\text{colla},i-1} - m_{\text{evap},i} \text{ [kg]}$$

dove

$m_{\text{colla},i}$ è la massa della colla all'istante t_i ;

$m_{\text{colla},i-1}$ è la massa della colla all'istante t_{i-1} ;

$m_{\text{evap},i}$ è la massa d'acqua evaporata tra l'istante t_i e l'istante t_{i-1} .

La densità della colla dunque si modifica e viene calcolata come

$$\rho_{\text{colla},i} = \frac{m_{\text{colla},i}}{V_{\text{colla},i}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

dove

ρ_{colla} è la densità della colla all'istante t_i ;

$m_{\text{colla},i}$ è la massa della colla all'istante t_i ;

$V_{\text{colla},i}$ è il volume occupato dalla colla nel wire carrier all'istante t_i .

Ne consegue che la percentuale in massa della resina acrilica aumenta e si calcola come

$$x_{s,\text{colla},i} = 1 - \frac{m_{\text{acqua},\text{wc},i}}{m_{\text{colla},i}} \text{ parte secca della colla}$$

dove

$x_{s,\text{colla},i}$ è la percentuale in massa di resina acrilica nella colla, all'istante t_i ;

$m_{\text{acqua},\text{wc},i}$ è la massa d'acqua nel wire carrier all'istante t_i ;

$m_{\text{colla},i}$ è la massa della colla all'istante t_i .

Il nuovo calore specifico della colla si calcola come

$$c_{p,\text{colla},i} = x_{s,\text{colla},i} \cdot c_{p,\text{resina}} + (1 - x_{s,\text{colla},i}) \cdot c_{p,\text{acqua}} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

dove

$c_{p,\text{colla},i}$ è il calore specifico della colla all'istante t_i ;

$x_{s,\text{colla},i}$ è la percentuale in massa di resina acrilica nella colla, all'istante t_i ;

$c_{p,\text{resina}}$ è il calore specifico della resina acrilica;

$c_{p,\text{acqua}}$ è il calore specifico dell'acqua.

La nuova superficie della colla, che dipende dalla sua massa e dalla densità si calcola come

$$S_{colla,i} = \pi \cdot (d_{pp/pes} + 2 \cdot s_{colla,i}) \cdot L_{pp/pes} \cdot N_{pp/pes} \text{ [m}^2\text{]}$$

dove

$S_{colla,i}$ è la superficie della colla all'istante t_i ;

$d_{pp/pes}$ è il diametro del filo di polipropilene e poliestere;

$s_{colla,i}$ è lo spessore di colla medio all'istante t_i , calcolata per i fili di ogni titolo;

$L_{pp/pes}$ è la lunghezza del filo di polipropilene e poliestere in 10 cm di wire carrier, calcolata per i fili di ogni titolo;

$N_{pp/pes}$ è il numero di fili di polipropilene e poliestere.

Lo spessore di colla medio per ogni filo è calcolato come

$$s_{colla,i} = \sqrt{m_{colla,i} \cdot \frac{N_{pp/pes}}{N_{pp} + N_{pes}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot L_{pp/pes} \cdot \rho_{colla,i}} + \frac{d_{pp/pes}^2}{4} - \frac{d_{pp/pes}}{2}} \text{ [m]}$$

dove

$s_{colla,i}$ è lo spessore di colla medio all'istante t_i per i fili di ogni titolo;

$m_{colla,i}$ è la massa di colla all'istante t_i ;

$N_{pp/pes}$ è il numero di fili di polipropilene e poliestere con il titolo considerato;

N_{pp} è il numero totale di fili di polipropilene;

N_{pes} è il numero totale di fili di polipropilene;

$L_{pp/pes}$ è la lunghezza dei fili di polipropilene e poliestere;

$\rho_{colla,i}$ è la densità della colla all'istante t_i ;

$d_{pp/pes}$ è il diametro del filo di polipropilene e poliestere.

- **fase 2;** $t_1 < t \leq t_2$: $A \cdot \frac{dT}{dt} = H_{80^\circ\text{C}} \cdot (T_{\text{aria},80^\circ\text{C}} - T) - \dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}$

$$f(T) = \frac{H_{80^\circ\text{C}}}{A} \cdot (T_{\text{aria},80^\circ\text{C}} - T) - \frac{\dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}}{A}$$

$$T_i = T_{i-1} + \Delta t \cdot f(T_{i-1}) = T_{i-1} +$$

$$\Delta t \cdot \left[\frac{H_{80^\circ\text{C},i-1}}{A_{i-1}} \cdot (T_{\text{aria},80^\circ\text{C}} - T_{i-1}) - \frac{\dot{m}_{\text{evap},i-1} \cdot h_{\text{evap}}}{A_{i-1}} \right] [^\circ\text{C}]$$

Tutte le altre proprietà si calcolano con le stesse relazioni della fase 1.

- **fase 3;** $t_2 < t \leq t_3$: $A \cdot \frac{dT}{dt} = H_{18^\circ\text{C}} \cdot (T_{\text{aria},18^\circ\text{C}} - T) - \dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}$

$$f(T) = \frac{H_{18^\circ\text{C}}}{A} \cdot (T_{\text{aria},18^\circ\text{C}} - T) - \frac{\dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}}{A}$$

$$T_i = T_{i-1} + \Delta t \cdot f(T_{i-1}) = T_{i-1} +$$

$$\Delta t \cdot \left[\frac{H_{18^\circ\text{C},i-1}}{A_{i-1}} \cdot (T_{\text{aria},18^\circ\text{C}} - T_{i-1}) - \frac{\dot{m}_{\text{evap},i-1} \cdot h_{\text{evap}}}{A_{i-1}} \right] [^\circ\text{C}]$$

Tutte le altre proprietà si calcolano con le stesse relazioni della fase 1.

- **fase 4;** $t_3 < t \leq t_4$: $A \cdot \frac{dT}{dt} = H_{80^\circ\text{C}} \cdot (T_{\text{aria},80^\circ\text{C}} - T) - \dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}$

$$f(T) = \frac{H_{80^\circ\text{C}}}{A} \cdot (T_{\text{aria},80^\circ\text{C}} - T) - \frac{\dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{\text{evap}}}{A}$$

$$T_i = T_{i-1} + \Delta t \cdot f(T_{i-1}) = T_{i-1} +$$

$$\Delta t \cdot \left[\frac{H_{80^\circ\text{C},i-1}}{A_{i-1}} \cdot (T_{\text{aria},80^\circ\text{C}} - T_{i-1}) - \frac{\dot{m}_{\text{evap},i-1} \cdot h_{\text{evap}}}{A_{i-1}} \right] [^\circ\text{C}]$$

Tutte le altre proprietà si calcolano con le stesse relazioni della fase 1.

- **fase 5**; $t_4 < t \leq t_5$: $A \cdot \frac{dT}{dt} = F_{irr} \cdot \sigma \cdot S_{irr} \cdot (T_{piastra}^4 - T^4) - \dot{m}_{evap} \cdot h_{evap}$

$$f(T) = \frac{F_{irr} \cdot \sigma \cdot S_{irr}}{A} \cdot (T_{piastra}^4 - T^4) - \frac{\dot{m}_{evap} \cdot h_{evap}}{A}$$

$$\begin{aligned} T_i &= T_{i-1} + \Delta t \cdot f(T_{i-1}) \\ &= T_{i-1} + \Delta t \\ &\quad \cdot \left[\frac{F_{irr} \cdot \sigma \cdot S_{irr}}{A_{i-1}} \cdot (T_{piastra}^4 - T_{i-1}^4) - \frac{\dot{m}_{evap,i-1} \cdot h_{evap}}{A_{i-1}} \right] [^\circ C] \end{aligned}$$

Tutte le altre proprietà si calcolano con le stesse relazioni della fase 1.

- **fase 6**; $t_5 < t \leq t_6$: $A \cdot \frac{dT}{dt} = H_{18^\circ C} \cdot (T_{aria,18^\circ C} - T) - \dot{m}_{evap} \cdot h_{evap}$

$$f(T) = \frac{H_{18^\circ C}}{A} \cdot (T_{aria,18^\circ C} - T) - \frac{\dot{m}_{evap} \cdot h_{evap}}{A}$$

$$\begin{aligned} T_i &= T_{i-1} + \Delta t \cdot f(T_{i-1}) = T_{i-1} + \\ &\quad \Delta t \cdot \left[\frac{H_{18^\circ C,i-1}}{A_{i-1}} \cdot (T_{aria,18^\circ C} - T_{i-1}) - \frac{\dot{m}_{evap,i-1} \cdot h_{evap}}{A_{i-1}} \right] [^\circ C] \end{aligned}$$

Tutte le altre proprietà si calcolano con le stesse relazioni della fase 1.

- **fase 7**; $t_6 < t \leq t_7$: $A \cdot \frac{dT}{dt} = H_{140^\circ C} \cdot (T_{aria,140^\circ C} - T) - \dot{m}_{evap} \cdot h_{evap}$

- Finchè la massa d'acqua nel wire carrier è maggiore di 0

$$f(T) = \frac{H_{140^\circ C}}{A} \cdot (T_{aria,140^\circ C} - T) - \frac{\dot{m}_{evap} \cdot h_{evap}}{A}$$

$$\begin{aligned} T_i &= T_{i-1} + \Delta t \cdot f(T_{i-1}) = T_{i-1} + \\ &\quad \Delta t \cdot \left[\frac{H_{140^\circ C,i-1}}{A_{i-1}} \cdot (T_{aria,140^\circ C} - T_{i-1}) - \frac{\dot{m}_{evap,i-1} \cdot h_{evap}}{A_{i-1}} \right] [^\circ C] \end{aligned}$$

Tutte le altre proprietà si calcolano con le stesse relazioni della fase 1.

- Quando tutta l'acqua evapora

$$f(T) = \frac{H_{140^{\circ}C}}{A} \cdot (T_{\text{aria},140^{\circ}C} - T)$$

$$T_i = T_{i-1} + \Delta t \cdot f(T_{i-1}) = T_{i-1} +$$

$$\Delta t \cdot \frac{H_{140^{\circ}C}}{A} \cdot (T_{\text{aria},140^{\circ}C} - T) [^{\circ}C]$$

Le proprietà riguardanti la colla sono uguali alla sola parte secca poiché

$$x_{s,\text{colla},i} = 1$$

Va sottolineato che il calcolo di tutte le grandezze che dipendono dalle dimensioni dei fili di poliestere e polipropilene devono essere eseguiti per ogni filo di titolo diverso, poiché come risulta dalla Tabella 4.7, il diametro del filo dipende dal suo titolo.

Per il calcolo dell'andamento di temperatura del wire carrier è stato preso in considerazione un articolo, le cui dimensioni caratteristiche sono riportate in Tabella 4.12.

q_A [mm]	q_D [mm]	q_C [mm]	N_{as} [n°/10 cm]	d_{fe} [mm]
28	5	1,06	33	0,75

Tabella 4.12 – Quote caratteristiche dell'articolo considerato

Il numero di fili di poliestere e polipropilene è riportato in Tabella 4.13.

$N_{pp,500 \text{ den}}$	$N_{pp,850 \text{ den}}$	$N_{pp,1100 \text{ dTex}}$	$N_{pes,1100 \text{ dTex}}$	$N_{pes,1670 \text{ dTex}}$
0	2	0	0	4

Tabella 4.13 – Numero di fili di poliestere e polipropilene dell'articolo considerato

Applicando e risolvendo le equazioni discusse in precedenza per ogni fase, si ottiene il profilo di temperatura riportato in Figura 4.6.

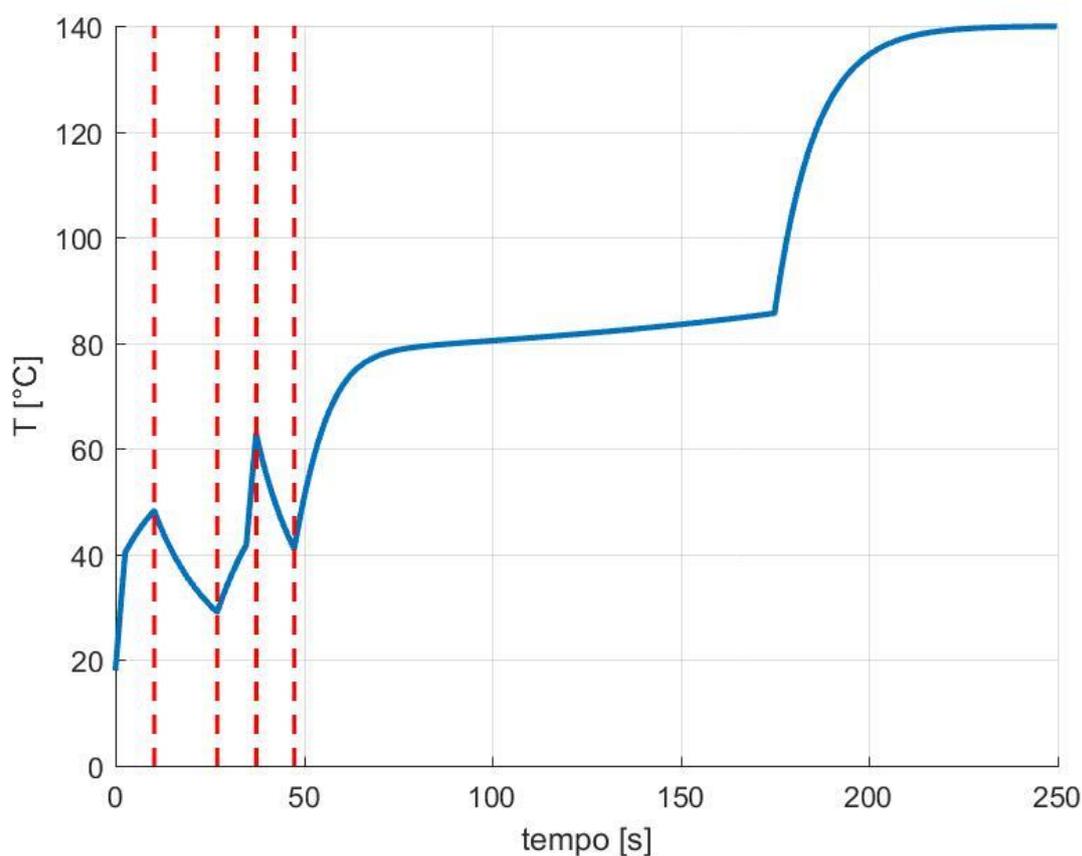


Figura 4.6 – Profilo di temperatura dell'articolo considerato

Le linee verticali tratteggiate di Figura 4.6 indicano le seguenti aree:

- I fase del preriscaldamento, fase 1 e fase 2;
- I percorso fuori dal forno, fase 3;
- Il fase del preriscaldamento, fase 4 e fase 5;
- Il percorso fuori dal forno, fase 6;
- fase di essiccazione, fase 7.

Si può notare come la temperatura cresce velocemente e in brevissimo tempo al passaggio davanti le piastre catalitiche. Il percorso fuori dal forno, invece fa decrescere drammaticamente la temperatura. Ne consegue che nelle fasi di riscaldamento, il sistema di essiccazione deve fornire la quantità di calore persa durante il percorso fuori dal forno. Un'altra osservazione da segnalare riguarda il percorso nella sezione di essiccazione. Si può notare che la temperatura, per un tratto significativo, cresce lentamente e rimane sotto la temperatura di ebollizione dell'acqua: questa è una conseguenza dell'evaporazione per diffusione, tutta l'acqua evapora per diffusione.

Per capire la quantità di acqua che evapora in ogni sezione e analizzare l'efficacia dell'essiccazione bisogna guardare il grafico riportato in Figura 4.7.

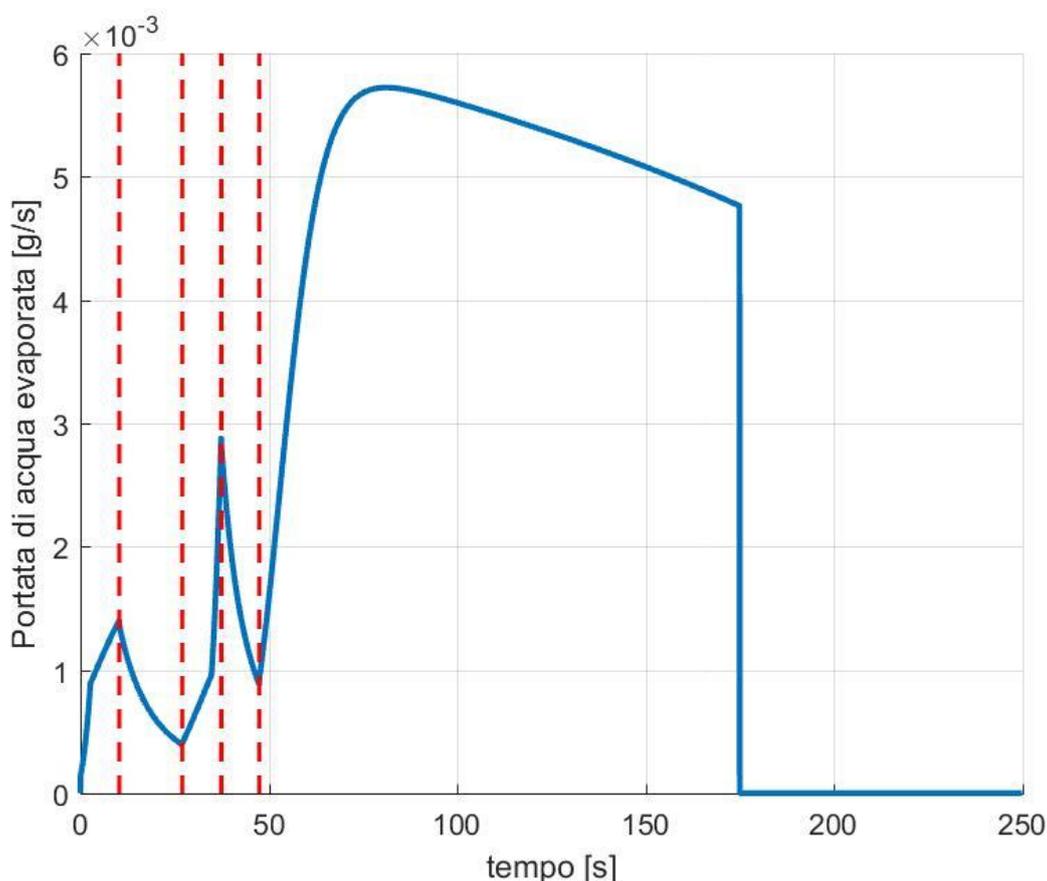


Figura 4.7 – Portata d'acqua evaporata in ogni fase per l'articolo considerato

La portata di acqua evaporata è strettamente dipendente dalla temperatura del wire carrier nelle diverse sezioni. Pertanto, l'effetto di avere un considerevole tempo di permanenza fuori dal forno non solo determina un aumento della quantità di

energia che il sistema deve fornire al materiale, ma anche diminuisce la portata di vapore che evapora nella sezione di preriscaldamento. Si può osservare inoltre che, nella fase di essiccazione, la portata cresce fino a un massimo e poi decresce fino ad annullarsi: questo fenomeno è dovuto alla dipendenza dalla temperatura dell'evaporazione che provoca un aumento della portata all'aumentare della temperatura, quando poi l'acqua contenuta nel wire carrier supera una certa soglia, la superficie di evaporazione è via via sempre più piccola, riducendo la portata evaporata.

L'effetto di questo comportamento ricade dunque sulla quantità d'acqua presente nel wire carrier, come riportato in Figura 4.8.

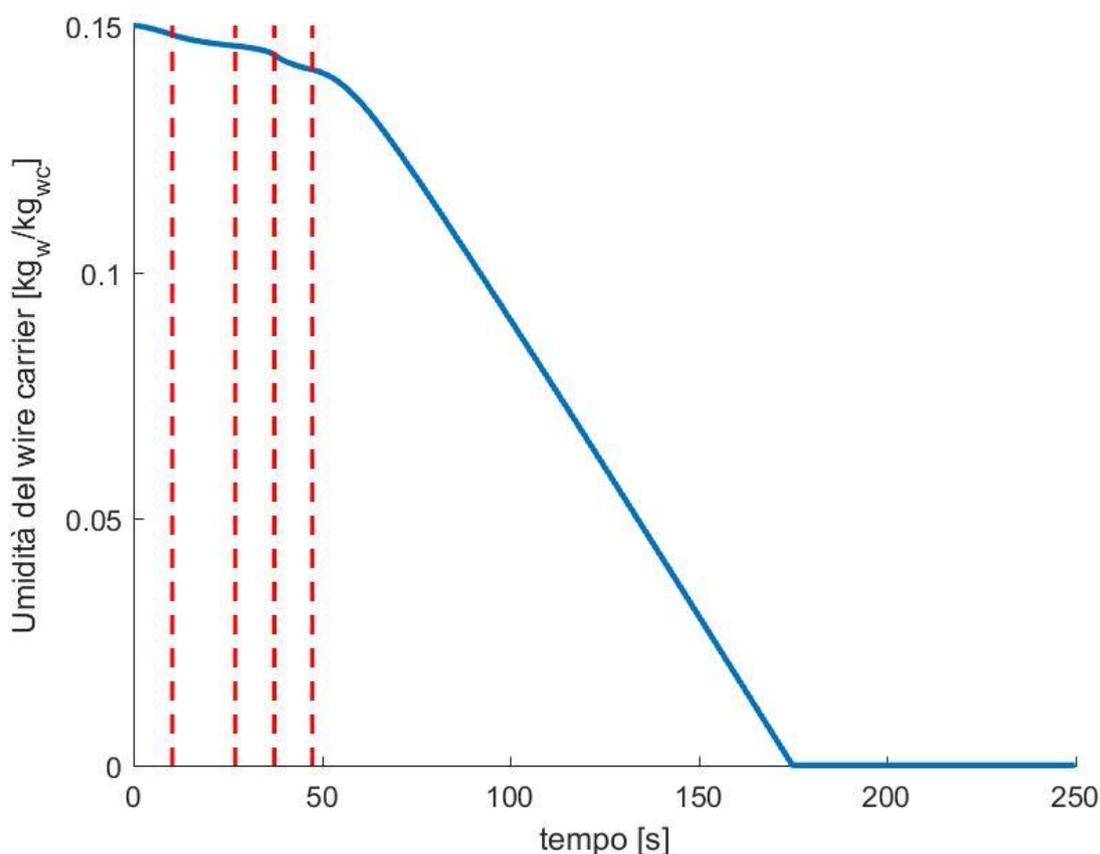


Figura 4.8 – Umidità specifica del wire carrier nelle diverse fasi per l'articolo considerato

Si può osservare che la massa d'acqua contenuta nel wire carrier diminuisce poco in fase di preriscaldamento. Ne consegue quindi che la sezione di preriscaldamento non è molto efficace ai fini dell'evaporazione dell'acqua. La causa è sicuramente la lunghezza del percorso fuori dal forno che non permette di mantenere una temperatura

media del wire carrier nella sezione tale da garantire un'adeguata evaporazione dell'acqua. Il motivo per il quale si è reso necessario questo percorso, è che con il layout d'impianto attuale consente alla colla di distribuirsi adeguatamente sulla superficie del wire carrier e attraversando una zona fredda permette di ridurre lo sporco dei rulli all'interno del forno che potrebbe causare problemi di qualità legati alla presenza di residui di colla, che se non correttamente rilevate provocano danni al prodotto finale del cliente. Inoltre, diminuire lo sporco comporta anche una riduzione dei tempi di fermo macchina dovuti alla pulizia del forno, aumentandone la produttività.

Estendendo l'analisi a tutti gli articoli che possono essere incollati tramite questo sistema di essiccazione, si ottengono i profili di temperatura in Figura 4.9



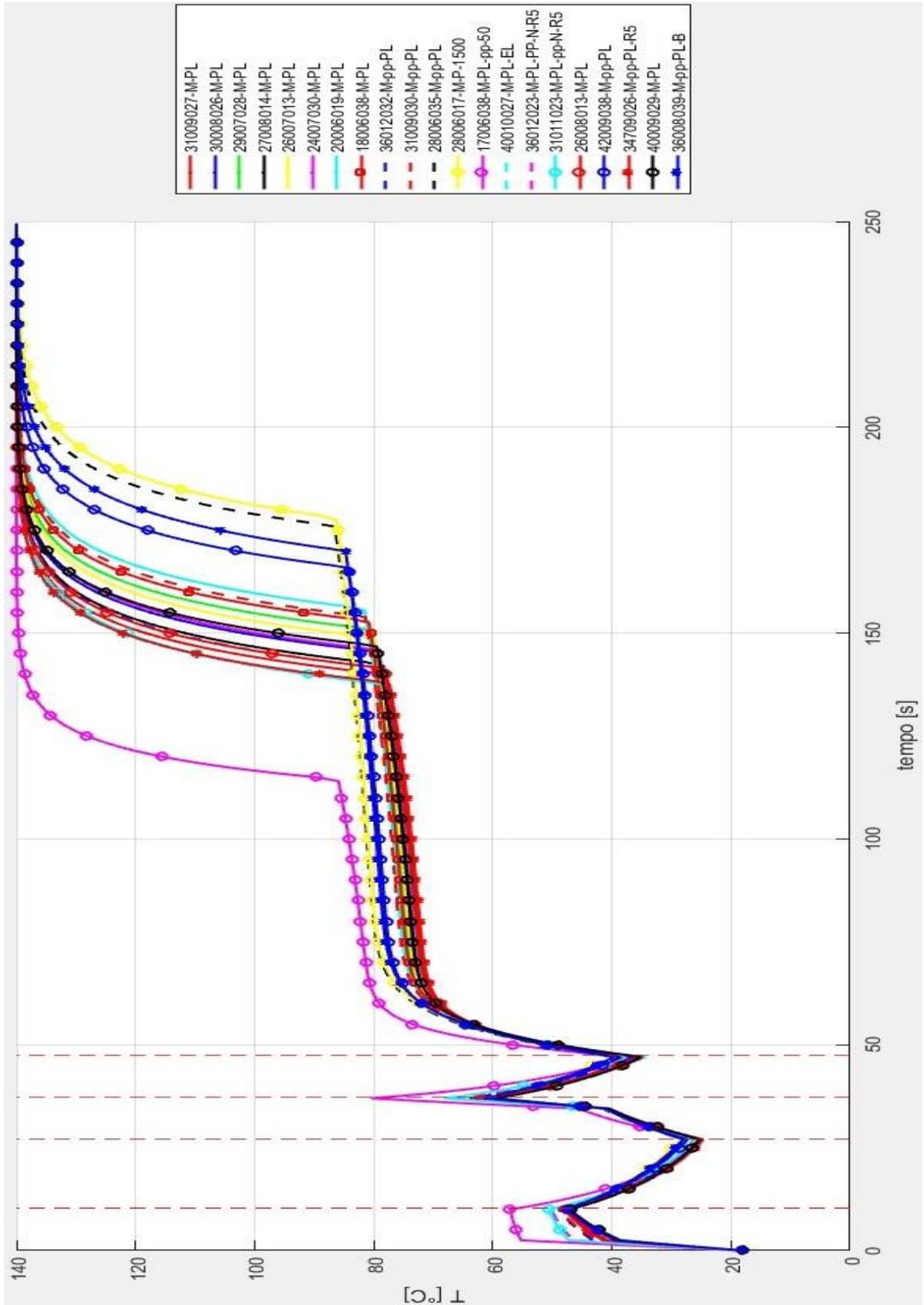


Figura 4.9 – Profilo di temperatura di tutti gli articoli

Si può osservare come l'andamento qualitativo della temperatura per tutti gli articoli sia uguale. Alcuni articoli raggiungono temperature più alte, principalmente per l'irraggiamento, ciò è dovuto al termine A dell'equazione, che racchiude i contributi legati alla massa e alle proprietà termiche dei materiali che li compongono. Più è basso il termine A, cioè più leggero è l'articolo oppure più è alta la quota parte di ferro in termini di massa (che ha calore specifico più basso di tutti), maggiori saranno le temperature raggiunte dal wire carrier nello scambio termico. L'aumento della temperatura media del wire carrier, genera un aumento della velocità di essiccazione. Pertanto per questi articoli il tempo necessario all'essiccazione è più basso.

Ciò si traduce in una pendenza maggiore (in termini assoluti) della curva di Figura 4.10 che descrive l'andamento dell'umidità del wire carrier per tutti gli articoli.

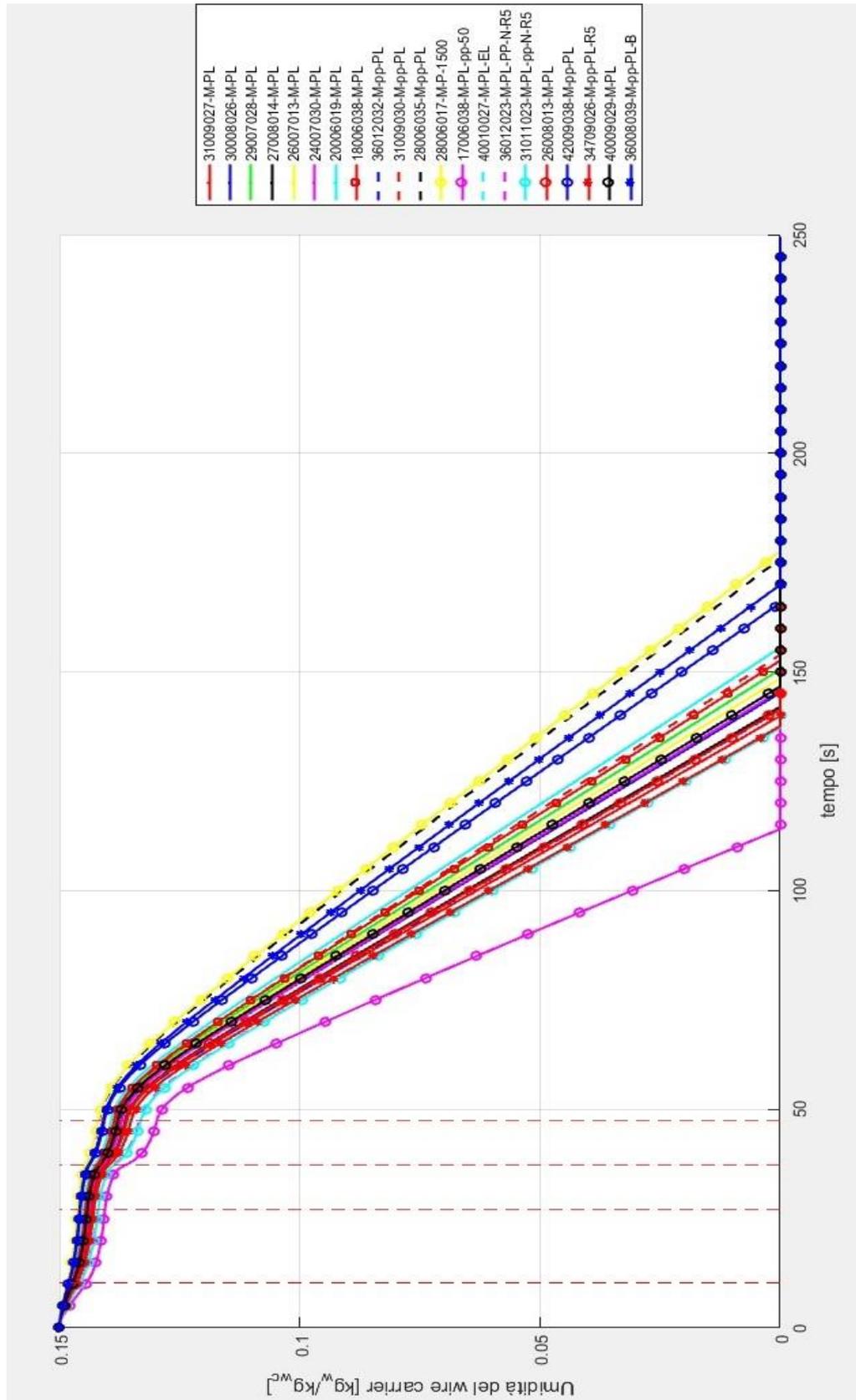


Figura 4.10 – Andamento dell’umidità del wire carrier per tutti gli articoli

4.2.3.2 ENERGIA TERMICA ASSORBITA DAL WIRE CARRIER

Per conoscere l'efficienza del sistema in termini energetici è necessario conoscere l'energia termica assorbita dal wire carrier nel percorso all'interno delle sezioni riscaldate del sistema di essiccazione, escludendo i passaggi fuori dal forno.

Di seguito si considera quindi l'energia associata a tre fasi:

- **fase A:** è la prima fase del preriscaldamento che include le fasi 1 e 2 definite nel paragrafo 4.2.1;
- **fase B:** è la seconda fase del preriscaldamento che include le fasi 4 e 5 definite nel paragrafo 4.2.1;
- **fase C:** è la fase di essiccazione che coincide con la fase 7 definita nel paragrafo 4.2.1.

L'energia termica assorbita dal wire carrier è composta da:

- energia termica assorbita dalla **parte secca** (ferro, polipropilene, poliestere e resina acrilica) per passare dalla temperatura di ingresso alla temperatura di uscita della fase presa in esame;
- energia termica assorbita dalla **parte umida** (acqua) per passare dalla temperatura di ingresso alla temperatura di uscita della fase presa in esame e per evaporare.

Per quanto riguarda l'energia termica assorbita dalla parte secca, note le temperature di ingresso e di uscita da ciascuna sezione dal modello esposto nel paragrafo 4.2.3, è possibile calcolarla, riferendosi a ogni metro di wire carrier, come

$$q_{s,A} = (m_{fe} \cdot c_{p,fe} + m_{pp} \cdot c_{p,pp} + m_{pes} \cdot c_{p,pes} + x_{s,colla,t=0s} \cdot m_{colla,t=0s} \cdot c_{p,resina}) \cdot (T_{A,out} - T_{A,in}) \left[\frac{J}{m} \right]$$

dove

$q_{s,A}$ è l'energia termica assorbita dalla parte secca del wire carrier nella fase A;

m_{fe} è la massa di ferro;

$c_{p,fe}$ è il calore specifico del ferro;

m_{pp} è la massa di polipropilene;

$c_{p,pp}$ è il calore specifico del polipropilene;

m_{pes} è la massa di polipropilene;

$c_{p,pes}$ è il calore specifico del polipropilene;

$x_{s,colla,t=0s}$ è la percentuale in peso di resina acrilica nella colla all'ingresso del sistema;

$m_{colla,t=0s}$ è la massa di colla all'ingresso del sistema;

$c_{p,resina}$ è il calore specifico della resina acrilica;

$T_{A,out}$ è la temperatura all'uscita della fase A;

$T_{A,in}$ è la temperatura all'ingresso della fase A.

$$q_{s,B} = (m_{fe} \cdot c_{p,fe} + m_{pp} \cdot c_{p,pp} + m_{pes} \cdot c_{p,pes} + x_{s,colla,t=0s} \cdot m_{colla,t=0s} \cdot c_{p,resina}) \cdot (T_{B,out} - T_{B,in}) \left[\frac{J}{m} \right]$$

dove

$q_{s,B}$ è l'energia termica assorbita dalla parte secca del wire carrier nella fase B;

m_{fe} è la massa di ferro;

$c_{p,fe}$ è il calore specifico del ferro;

m_{pp} è la massa di polipropilene;

$c_{p,pp}$ è il calore specifico del polipropilene;

m_{pes} è la massa di polipropilene;

$c_{p,pes}$ è il calore specifico del polipropilene;

$x_{s,colla,t=0s}$ è la percentuale in peso di resina acrilica nella colla all'ingresso del sistema;

$m_{colla,t=0s}$ è la massa di colla all'ingresso del sistema;

$c_{p,resina}$ è il calore specifico della resina acrilica;

$T_{B,out}$ è la temperatura all'uscita della fase B;

$T_{B,in}$ è la temperatura all'ingresso della fase B.

$$q_{s,C} = (m_{fe} \cdot c_{p,fe} + m_{pp} \cdot c_{p,pp} + m_{pes} \cdot c_{p,pes} + x_{s,colla,t=0s} \cdot m_{colla,t=0s} \cdot c_{p,resina}) \cdot (T_{C,out} - T_{C,in}) \left[\frac{J}{m} \right]$$

dove

$q_{s,C}$ è l'energia termica assorbita dalla parte secca del wire carrier nella fase C;

m_{fe} è la massa di ferro;

$c_{p,fe}$ è il calore specifico del ferro;

m_{pp} è la massa di polipropilene;

$c_{p,pp}$ è il calore specifico del polipropilene;

m_{pes} è la massa di polipropilene;

$c_{p,pes}$ è il calore specifico del polipropilene;

$x_{s,colla,t=0s}$ è la percentuale in peso di resina acrilica nella colla all'ingresso del sistema;

$m_{colla,t=0s}$ è la massa di colla all'ingresso del sistema;

$c_{p,resina}$ è il calore specifico della resina acrilica;

$T_{C,out}$ è la temperatura all'uscita della fase C;

$T_{C,in}$ è la temperatura all'ingresso della fase C.

Per quanto riguarda l'energia termica assorbita come calore sensibile e calore latente dall'acqua deve essere calcolata per ogni passo temporale perché l'evaporazione non avviene a temperatura costante.

$$q_{A,w} = \sum_{t_i=t_{A,in}}^{t_{A,out}} [m_{acqua,t_i} \cdot c_{p,acqua} \cdot (T_{t_i} - T_{t_{i-1}}) + m_{evap,t_i} \cdot h_{evap}] \left[\frac{J}{m} \right]$$

dove

$q_{A,w}$ è l'energia termica assorbita dalla parte umida del wire carrier nella fase A;

$t_{A,in}$ è l'istante di tempo in cui il wire carrier entra nella fase A;

$t_{A,out}$ è l'istante di tempo in cui il wire carrier esce dalla fase A;

m_{acqua,t_i} è la massa di acqua nel wire carrier all'istante t_i ;

$c_{p,acqua}$ è il calore specifico dell'acqua;

T_{t_i} è la temperatura del wire carrier all'istante t_i ;

$T_{t_{i-1}}$ è la temperatura del wire carrier all'istante t_{i-1} ;

m_{evap,t_i} è la massa d'acqua evaporata tra l'istante t_{i-1} e l'istante t_i ;

h_{evap} è il calore di evaporazione dell'acqua.

$$q_{B,w} = \sum_{t_i=t_{B,in}}^{t_{B,out}} [m_{acqua,t_i} \cdot c_{p,acqua} \cdot (T_{t_i} - T_{t_{i-1}}) + m_{evap,t_i} \cdot h_{evap}] \left[\frac{J}{m} \right]$$

dove

$q_{B,w}$ è l'energia termica assorbita dalla parte umida del wire carrier nella fase B;

$t_{B,in}$ è l'istante di tempo in cui il wire carrier entra nella fase B;

$t_{B,out}$ è l'istante di tempo in cui il wire carrier esce dalla fase B;

m_{acqua,t_i} è la massa di acqua nel wire carrier all'istante t_i ;

$c_{p,acqua}$ è il calore specifico dell'acqua;

T_{t_i} è la temperatura del wire carrier all'istante t_i ;

$T_{t_{i-1}}$ è la temperatura del wire carrier all'istante t_{i-1} ;

m_{evap,t_i} è la massa d'acqua evaporata tra l'istante t_{i-1} e l'istante t_i ;

h_{evap} è il calore di evaporazione dell'acqua.

$$q_{C,w} = \sum_{t_i=t_{C,\text{in}}}^{t_{C,\text{out}}} [m_{\text{acqua},t_i} \cdot c_{p,\text{acqua}} \cdot (T_{t_i} - T_{t_{i-1}}) + m_{\text{evap},t_i} \cdot h_{\text{evap}}] \left[\frac{\text{J}}{\text{m}} \right]$$

dove

$q_{C,w}$ è l'energia termica assorbita dalla parte umida del wire carrier nella fase C;

$t_{C,\text{in}}$ è l'istante di tempo in cui il wire carrier entra nella fase C;

$t_{C,\text{out}}$ è l'istante di tempo in cui termina l'evaporazione dell'acqua;

m_{acqua,t_i} è la massa di acqua nel wire carrier all'istante t_i ;

$c_{p,\text{acqua}}$ è il calore specifico dell'acqua;

T_{t_i} è la temperatura del wire carrier all'istante t_i ;

$T_{t_{i-1}}$ è la temperatura del wire carrier all'istante t_{i-1} ;

m_{evap,t_i} è la massa d'acqua evaporata tra l'istante t_{i-1} e l'istante t_i ;

h_{evap} è il calore di evaporazione dell'acqua.

I risultati di questo calcolo per tutti gli articoli sono riportati in Figura 4.11

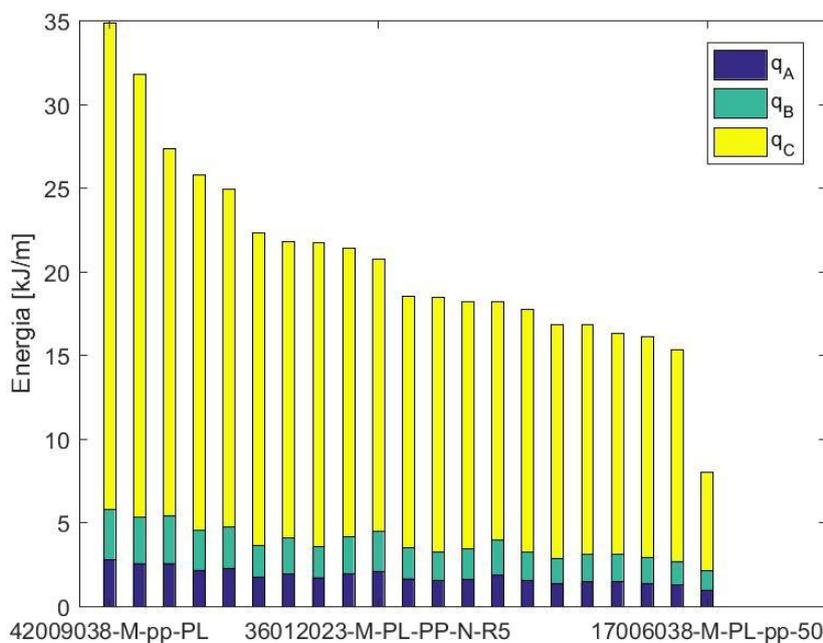


Figura 4.11 – Energia termica assorbita dai diversi articoli

I dati del grafico di Figura 4.11 sono riportati in Tabella 4.14.

Articolo	q_A [kJ/m]	q_B [kJ/m]	q_C [kJ/m]	q_{tot} [kJ/m]
42009038-M-pp-PL	2,787	3,024	29,059	34,871
36008039-M-pp-PL-B	2,570	2,780	26,464	31,813
36012032-M-pp-PL	2,572	2,875	21,896	27,343
40009029-M-PL	2,168	2,385	21,224	25,777
40010027-M-PL-EL	2,257	2,516	20,170	24,942
28006017-M-P-1500	1,751	1,881	18,675	22,307
31009030-M-pp-PL	1,943	2,145	17,741	21,829
28006035-M-pp-PL	1,717	1,852	18,204	21,772
34709026-M-pp-PL-R5	1,976	2,208	17,230	21,413
36012023-M-PL-PP-N-R5	2,102	2,373	16,270	20,744
31009027-M-PL	1,655	1,839	15,030	18,524
29007028-M-PL	1,562	1,716	15,212	18,489
27008014-M-PL	1,626	1,805	14,782	18,213
31011023-M-PL-pp-N-R5	1,874	2,118	14,220	18,213
30008026-M-PL	1,540	1,701	14,538	17,780
20006019-M-PL	1,381	1,506	13,980	16,867
24007030-M-PL	1,484	1,642	13,718	16,844
26008013-M-PL	1,467	1,629	13,256	16,352
26007013-M-PL	1,383	1,524	13,200	16,107
18006038-M-PL	1,289	1,412	12,674	15,375
17006038-M-PL-pp-50	0,975	1,171	5,876	8,022

Tabella 4.14 – Energia termica assorbita dai diversi articoli

4.2.3.3 EFFICIENZA ENERGETICA DEL SISTEMA

Per definire l'efficienza energetica del sistema è necessario conoscere la potenza termica disponibile per il preriscaldamento e per la sezione di essiccazione. Dai rilievi sui consumi di gas naturale, si osserva che il sistema lavora sempre a potenza nominale quando in funzione, anche se la produzione è ferma. Può essere calcolata la potenza termica delle due sezioni dai dati di targa delle piastre catalitiche, i risultati sono riportati in Tabella 4.15

Q_{pre} [kW]	22,294
Q_{ess} [kW]	24,152

Tabella 4.15 – Potenza termica delle sezioni di preriscaldamento e di essiccazione

Già da questi dati si può constatare come le due potenze termiche siano molto simili tra loro e, considerato che l'energia termica assorbita in fase di preriscaldamento è

nettamente inferiore rispetto alla fase di essiccazione, si può concludere che la sezione meno efficiente è senza dubbio la prima.

La potenza termica che il wire carrier richiede sarà ricavabile come

$$P_{th,pre} = (q_A + q_B) \cdot v \text{ [kW]}$$

dove

$P_{th,pre}$ è la potenza termica richiesta in fase di preriscaldamento da un articolo;

q_A è la somma tra energia termica assorbita dalla parte secca e dalla parte umida in fase A;

q_B è la somma tra energia termica assorbita dalla parte secca e dalla parte umida in fase B;

v è la velocità in metri per secondo del wire carrier.

$$P_{th,ess} = q_C \cdot v \text{ [kW]}$$

dove

$P_{th,ess}$ è la potenza termica richiesta in fase di essiccazione da un articolo;

q_C è la somma tra energia termica assorbita dalla parte secca e dalla parte umida in fase C;

v è la velocità in metri per secondo del wire carrier.

Conoscendo la configurazione delle pezze del forno è quindi possibile stabilire l'efficienza termica di ciascuna sezione come

$$\eta_{th,pre} = \frac{P_{th,tot,pre}}{\dot{Q}_{pre}}$$

dove

$\eta_{th,pre}$ è l'efficienza della sezione di preriscaldamento;

$P_{th,tot,pre}$ è la potenza termica richiesta in fase di preriscaldamento da tutti gli articoli presenti nel forno;

\dot{Q}_{pre} è la potenza termica della sezione di preriscaldamento.

$$\eta_{th,ess} = \frac{P_{th,tot,ess}}{\dot{Q}_{ess}}$$

dove

$\eta_{th,ess}$ è l'efficienza della sezione di essiccazione;

$P_{th,tot,ess}$ è la potenza termica richiesta in fase di essiccazione da tutti gli articoli presenti nel forno;

\dot{Q}_{ess} è la potenza termica della sezione di essiccazione.

Le perdite termiche del forno sono da ricondurre alle perdite a parete e alle perdite a camino. Si può dunque affermare che

$$\dot{Q}_{pre} = P_{th,tot,pre} + \dot{Q}_{par,pre} + \dot{Q}_{c,pre} \text{ [kW]}$$

dove

\dot{Q}_{pre} è la potenza termica della sezione di preriscaldamento;

$P_{th,tot,pre}$ è la potenza termica richiesta in fase di preriscaldamento da tutti gli articoli presenti nel forno;

$\dot{Q}_{par,pre}$ è la potenza termica persa per trasmissione dalla parete;

$\dot{Q}_{c,pre}$ è la potenza termica persa a camino.

$$\dot{Q}_{ess} = P_{th,tot,ess} + \dot{Q}_{par,ess} + \dot{Q}_{c,ess} \text{ [kW]}$$

dove

\dot{Q}_{ess} è la potenza termica della sezione di essiccazione;

$P_{th,tot,ess}$ è la potenza termica richiesta in fase di essiccazione da tutti gli articoli presenti nel forno;

$\dot{Q}_{par,ess}$ è la potenza termica persa per trasmissione dalla parete;

$\dot{Q}_{c,ess}$ è la potenza termica persa a camino.

Le pareti delle due sezioni sono costituite da due strati di spessore 9 cm di acciaio tra le quali vi è un pannello da 15 cm di lana di roccia come isolante.

Si può calcolare la potenza persa per trasmissione dalla parete come

$$\dot{Q}_{\text{par}} = U \cdot S_{\text{par}} \cdot (T_{\text{sez}} - T_{\text{amb}}) \text{ [W]}$$

dove

\dot{Q}_{par} è la potenza termica persa per trasmissione dalla parete;

U è la trasmittanza termica delle pareti;

S_{par} è la superficie delle pareti;

T_{sez} è la temperatura della sezione del sistema di essiccazione;

T_{amb} è la temperatura ambiente

Per la sezione di preriscaldamento le perdite per trasmissione di calore da parete sono riportate in Tabella 4.16.

U_{par} [W/m²/K]	0,234
T_{amb} [°C]	18
T_{pre} [°C]	80
S_{par,pre} [m²]	6,93
Q_{par,pre} [kW]	0,100

Tabella 4.16 – Perdite per trasmissione dalla parete della sezione di preriscaldamento

Le perdite di trasmissione dalle pareti del preriscaldamento ammontano allo 0,45% del totale.

Per la sezione di essiccazione le perdite per trasmissione di calore da parete sono riportate in Tabella 4.17.

U_{par} [W/m²/K]	0,234
T_{amb} [°C]	18
T_{ess} [°C]	140
S_{par,ess} [m²]	12,08
Q_{par,ess} [kW]	0,345

Tabella 4.17 - Perdite per trasmissione dalla parete della sezione di essiccazione

Le perdite di trasmissione dalle pareti della sezione di essiccazione ammontano al 1,43% del totale.

Le perdite a camino di ogni sezione equivalgono dunque alla differenza tra la potenza termica della sezione e la somma della potenza termica assorbita nella sezione considerata dal wire carrier in tutte le pezze del forno e le perdite a parete di ogni sezione.

L'efficienza varia dunque a seconda del carico del forno. In base alla scelta del materiale da incollare è possibile ottenere efficienze diverse.

Considerando una reale configurazione delle pezze del sistema di essiccazione come in Tabella 4.18, si può valutare l'efficienza reale del sistema.

Articolo	q_{A+B} [kJ/m]	q_c [kJ/m]
42009038-M-pp-PL	5,811	29,059
40009029-M-PL	4,554	21,224
40009029-M-PL	4,554	21,224
28006017-M-P-1500	3,632	18,675
27008014-M-PL	3,431	14,782
20006019-M-PL	2,887	13,980
Potenza totale [kW]	4,766	22,798

Tabella 4.18 – Esempio configurazione reale del sistema di essiccazione

Si ottengono dunque i valori riguardanti la quota di perdita a parete, di perdita a camino e di efficienza di ogni sezione, riportati in Tabella 4.19.

$\frac{\dot{Q}_{par,pre}}{\dot{Q}_{pre}}$	0,45%
$\frac{\dot{Q}_{c,pre}}{\dot{Q}_{pre}}$	78,17%
η_{pre}	21,38%
$\frac{\dot{Q}_{par,ess}}{\dot{Q}_{ess}}$	1,43%
$\frac{\dot{Q}_{c,ess}}{\dot{Q}_{ess}}$	4,18%
η_{ess}	94,39%
η_{tot}	59,35%

Tabella 4.19 – Performance delle diverse sezioni del sistema di essiccazione

Si può notare come la sezione di preriscaldamento sia fortemente poco efficiente dal punto di vista energetico, infatti l'efficienza è bassa ed è elevata la quota di energia termica persa a camino: ciò significa che il calore disponibile all'interno della sezione è poco sfruttato. Attraverso il calcolo dell'efficienza si può dunque mettere in relazione quantità legate all'energia con parametri qualitativi, infatti la scarsa efficienza termica di questa sezione corrisponde a una scarsa efficacia in termini di capacità di essiccazione della colla. La causa principale della scarsa efficienza di questa sezione è da ricercare in due fattori:

- il notevole tempo di permanenza fuori dal riscaldamento provoca un abbassamento della temperatura che ha la duplice conseguenza di aumentare il consumo energetico e di abbassare la capacità di evaporazione dell'acqua;
- probabilmente la potenza termica installata in questa sezione è troppo elevata in relazione alla potenza termica richiesta dal wire carrier, che ha un tempo di percorrenza relativamente basso in questa sezione.

Un'osservazione che bisogna fare è che se si considera una configurazione del forno con tutte le pezze occupate dall'articolo più energivoro si ottiene la situazione in Tabella 4.20.

Articolo	q_{A+B} [kJ/m]	q_c [kJ/m]
42009038-M-pp-PL	5,811	29,059
Potenza totale [kW]	6,683	33,418

Tabella 4.20 – Configurazione con articolo più energivoro

Questo caso genera le performance riportate in Tabella 4.21

$\frac{\dot{Q}_{par,pre}}{\dot{Q}_{pre}}$	0,45%
$\frac{\dot{Q}_{c,pre}}{\dot{Q}_{pre}}$	69,57%
η_{pre}	29,98%
$\frac{\dot{Q}_{par,ess}}{\dot{Q}_{ess}}$	1,43%
$\frac{\dot{Q}_{c,ess}}{\dot{Q}_{ess}}$	-39,80%
η_{ess}	138,37%
η_{tot}	86,34%

Tabella 4.21 – Performance del sistema con configurazione con articolo più energivoro

Si può notare che sebbene la sezione di preriscaldamento abbia ancora prestazioni scadenti, il rendimento della sezione di essiccazione supera l'unità: ciò significa che questa configurazione non può essere analizzata con il modello utilizzato in questa trattazione. La richiesta di energia del wire carrier nella sezione di essiccazione è troppo alta e non può essere soddisfatta dal sistema di essiccazione attuale. Una configurazione del forno di questo tipo, con il sistema attuale, determinerà un abbassamento della temperatura all'interno della sezione di essiccazione, fino a trovare un equilibrio tra potenza termica richiesta dal wire carrier e dispersioni, e probabilmente provocherebbe la mancata evaporazione di tutta l'acqua.

Bisogna precisare che questa configurazione del sistema di incollaggio è rarissima, finora mai verificata durante la vita di questo sistema di essiccazione.

4.2.4 ANALISI DI SENSITIVITÀ DEL MODELLO

In questo paragrafo verrà trattato il comportamento del wire carrier al variare di alcune condizioni operative. Verranno calcolate tutte le grandezze e i profili temporali variando i seguenti parametri:

- velocità di traino;
- quantità iniziale di colla;
- condizioni dell'aria ambiente.

4.2.4.1 VARIAZIONE DELLA VELOCITÀ DI TRAINO

Per verificare come la velocità del traino influenza il comportamento del wire carrier nel forno, viene applicato il modello in paragrafo 4.2.3, con il parametro velocità che assume i valori riportati in Tabella 4.22.

v_1 [m/min]	10
v_2 [m/min]	15
v_3 [m/min]	25
v_4 [m/min]	30

Tabella 4.22 – Velocità del traino del forno

Con l'aumento della velocità, diminuisce il tempo di percorrenza delle varie sezioni, pertanto tutti i seguenti grafici in funzione del tempo relativo, in modo da avere curve confrontabili tra loro in maniera più semplice. Il profilo di temperatura è riportato in Figura 4.12.

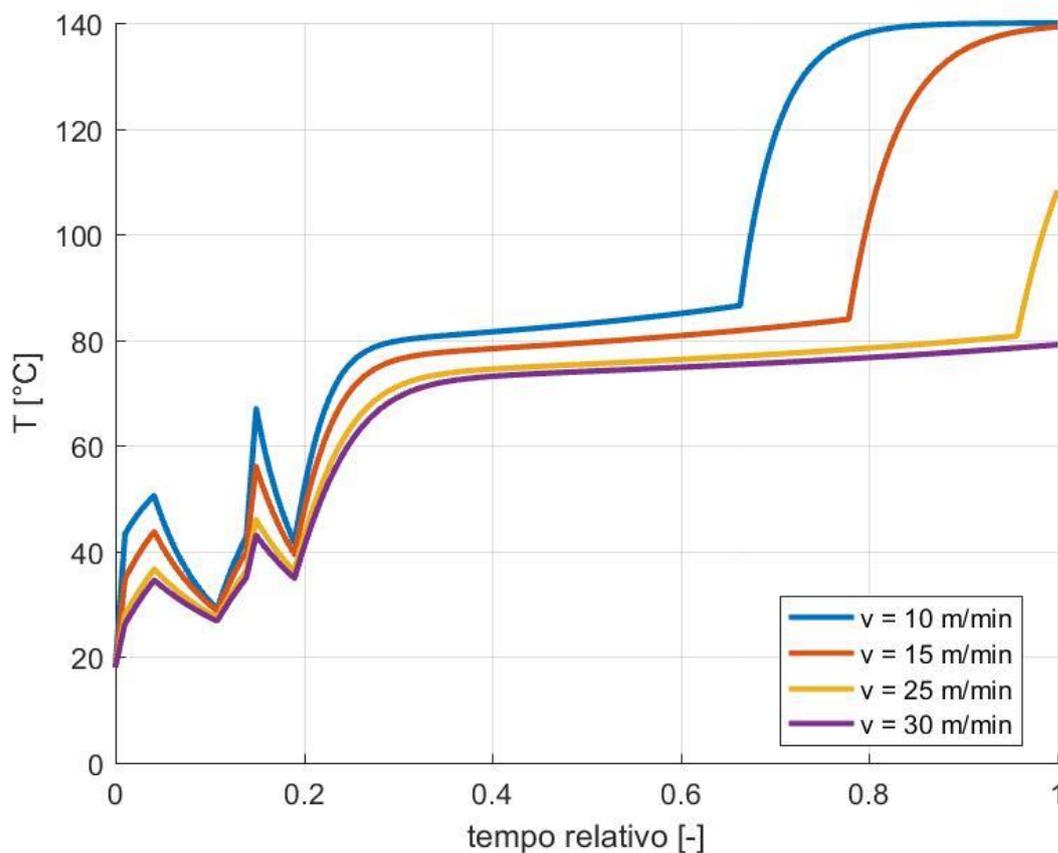


Figura 4.12 – Profilo di temperatura al variare della velocità

Si può notare come all'aumentare della velocità diminuisce il tempo di permanenza nelle sezioni riscaldate. Questo comporta quindi una diminuzione della temperatura raggiunta. Si può osservare anche che riducendo il tempo di permanenza a contatto con l'aria a temperatura ambiente, il wire carrier si raffredda per meno tempo, ma la temperatura in ingresso alla sezione di essiccazione diminuisce.

Ciò influenza sicuramente la capacità evaporativa in Figura 4.13.

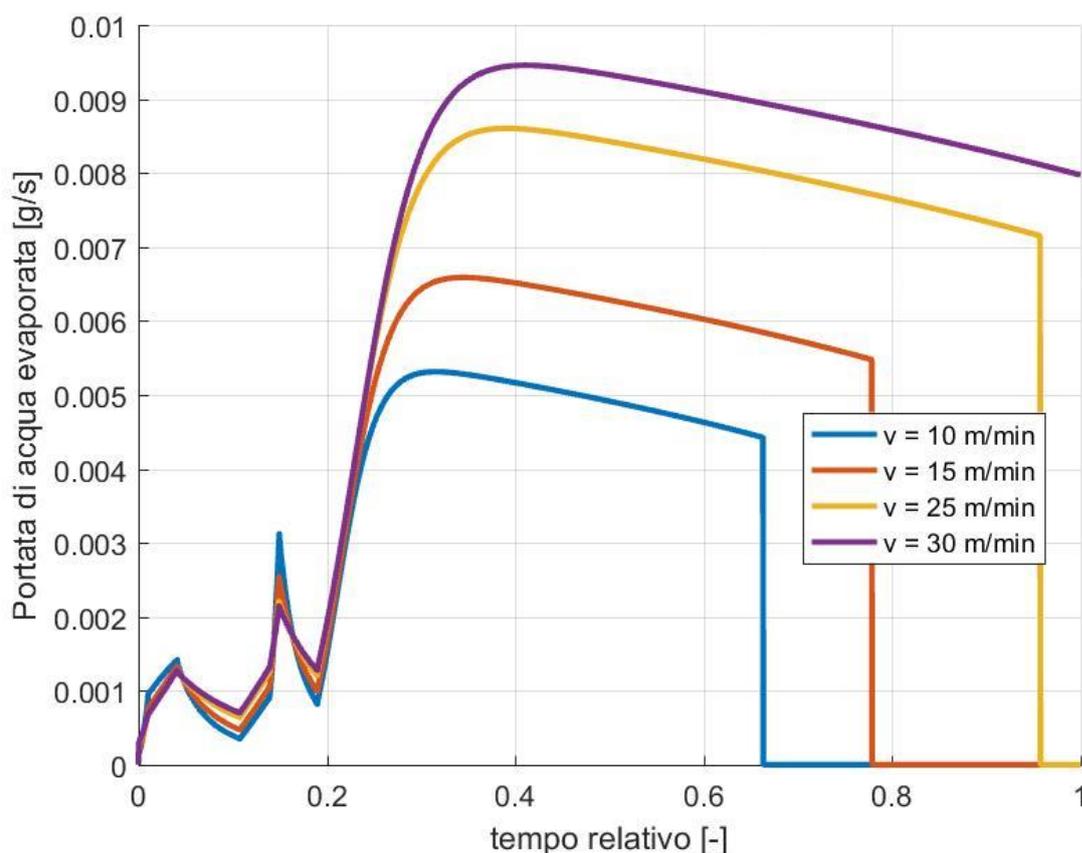


Figura 4.13 – Portata d'acqua evaporata al variare della velocità

Quando la velocità aumenta, la portata è maggiore nella sezione di essiccazione. Questo perché, sebbene la temperatura più bassa riduce la differenza di concentrazione del vapore in aria, la superficie della colla, dovuta alla quantità di colla maggiore che rimane nel wire carrier, invece è più alta.

Per velocità pari a 30 metri per minuto, la portata d'acqua evaporata non si annulla. Ciò significa che non evapora tutta l'acqua, come è possibile notare in Figura 4.14.

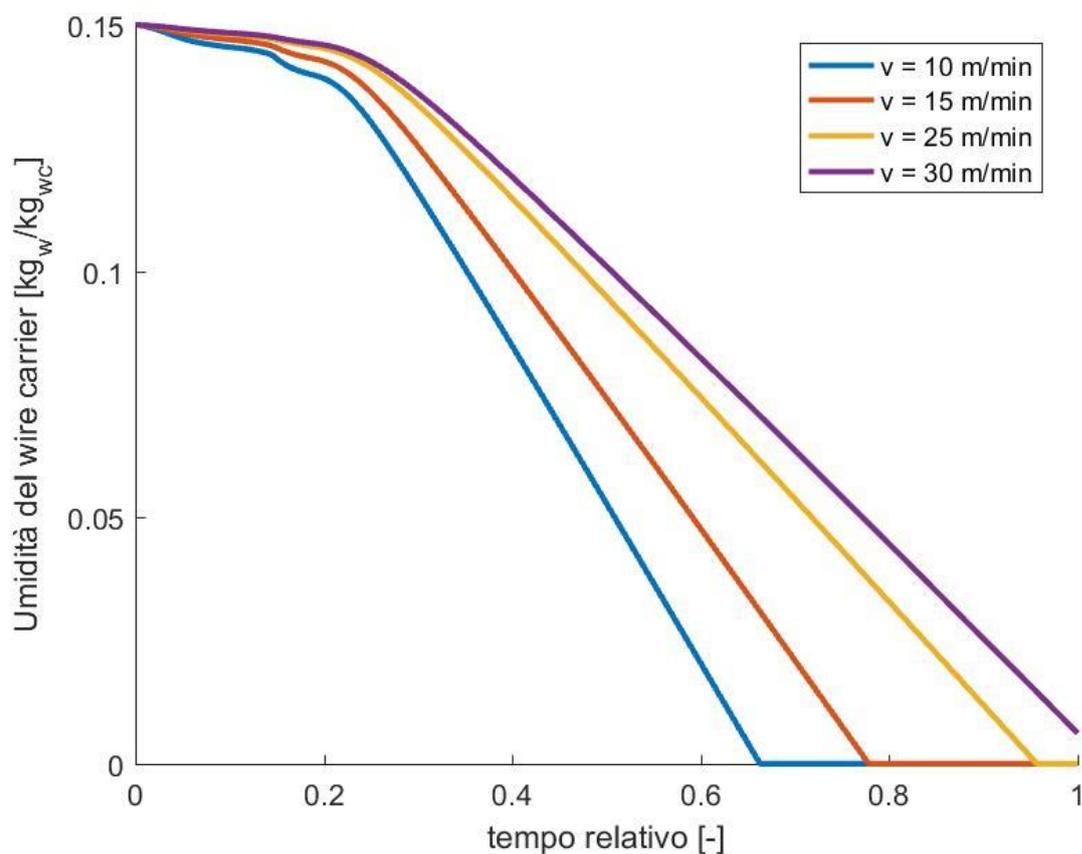


Figura 4.14 – Umidità del wire carrier al variare della velocità.

Sebbene la portata d'acqua evaporata sia maggiore all'aumentare della velocità, il wire carrier si asciuga più lentamente a parità di tempo; ciò è dovuto, come detto in precedenza, alla quantità di colla rimasta che aumenta la superficie di evaporazione, ma essendo più basso il tempo di permanenza, la quantità d'acqua nel wire carrier è maggiore.

Dal punto di vista energetico, i risultati sono riportati in Figura 4.15.

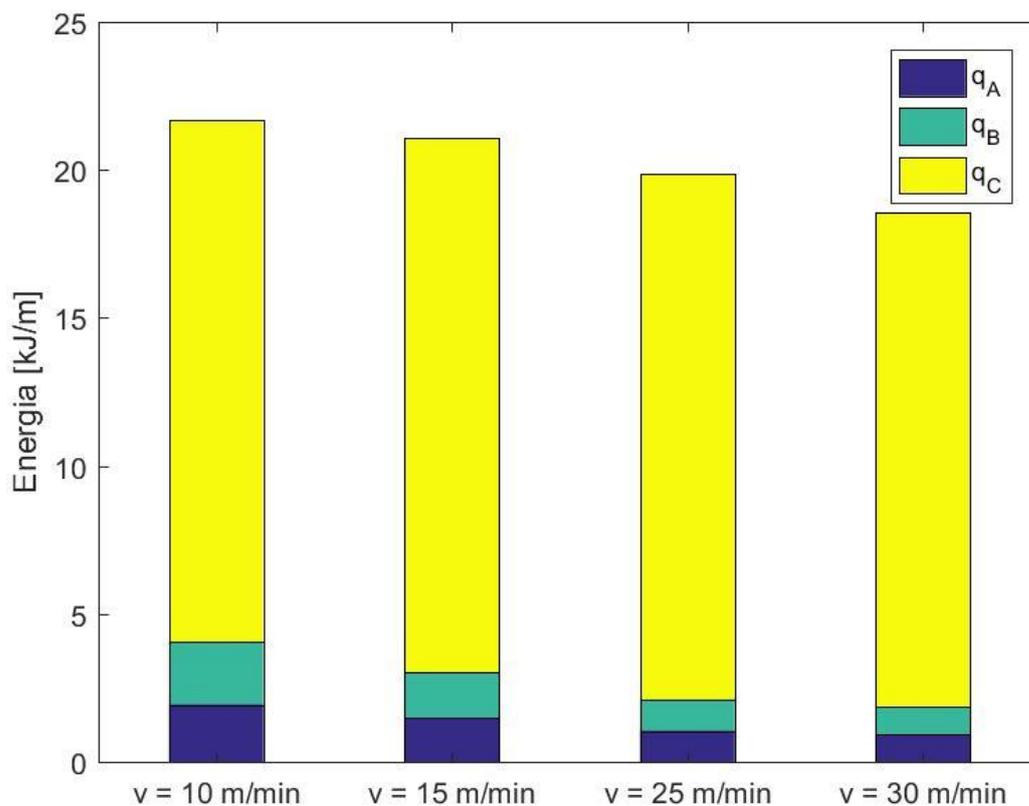


Figura 4.15 – Energia termica assorbita al variare della velocità

Aumentando la velocità, il preriscaldamento fornisce meno energia termica utile per via della temperatura e della massa d'acqua evaporata minori; complessivamente quindi l'energia termica fornita diminuisce all'aumentare della velocità.

4.2.4.2 VARIAZIONE DELLA QUANTITÀ DI COLLA INIZIALE

La variazione della quantità di colla iniziale provoca un aumento o diminuzione dell'umidità del wire carrier all'ingresso del sistema di essiccazione.

L'andamento della temperatura è riportato in Figura 4.16.

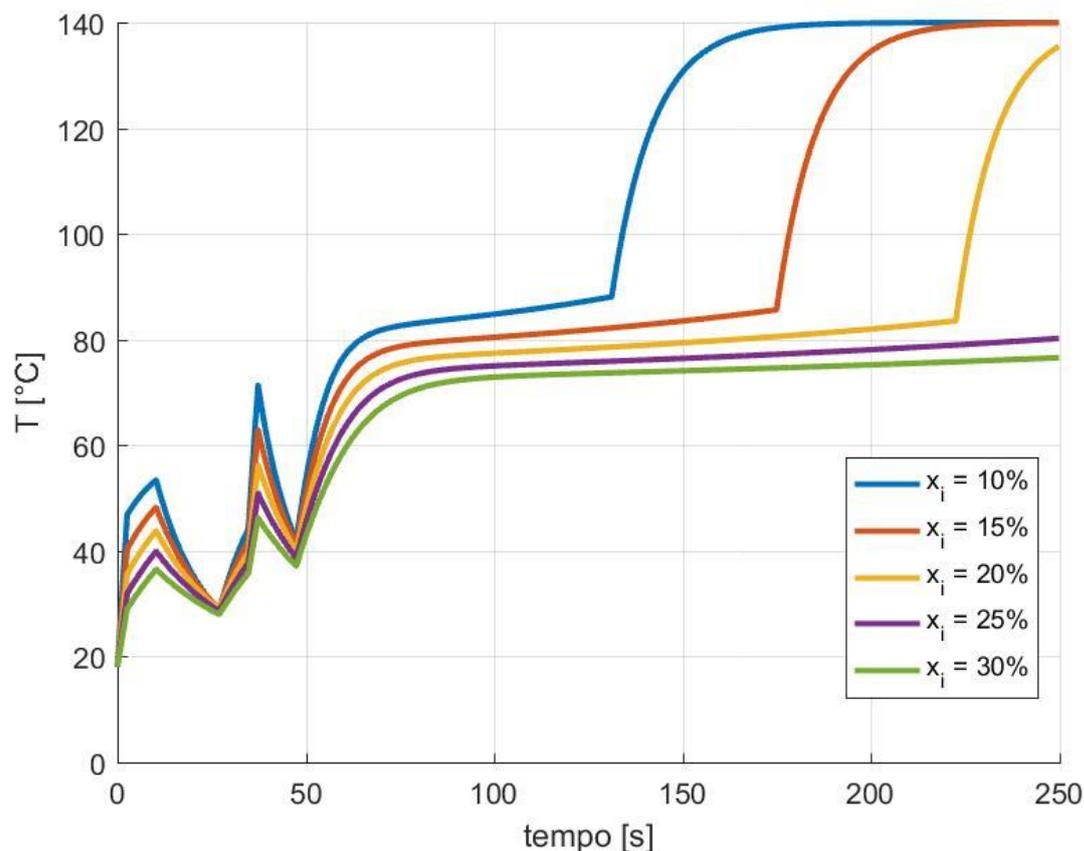


Figura 4.16 – Andamento della temperatura al variare dell'umidità iniziale

All'aumentare dell'umidità a parità di tempo la temperatura del wire carrier diminuisce. Il motivo di questo comportamento è legato alla maggiore quantità d'acqua contenuta nel wire carrier che, avendo un calore specifico più elevato rispetto agli altri componenti, provoca un innalzamento di temperatura più lento a parità di flusso termico assorbito.

In Figura 4.17 viene riportato l'andamento della portata d'acqua evaporata.

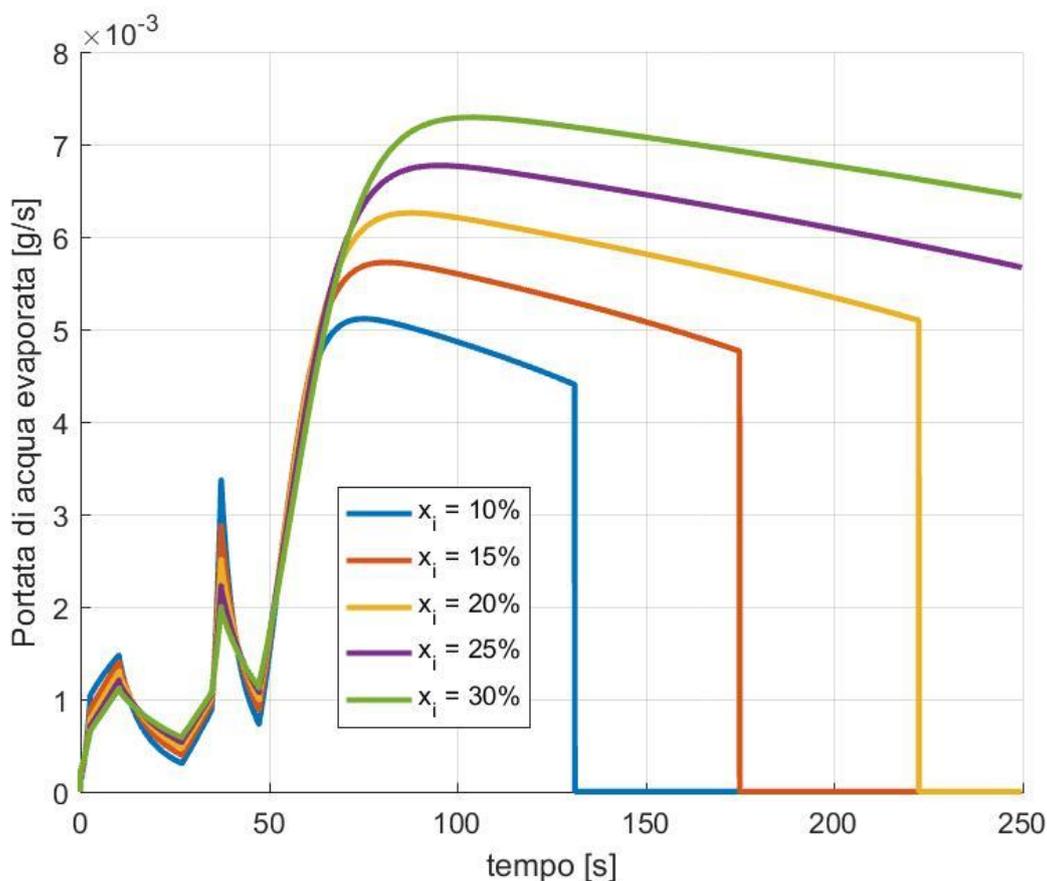


Figura 4.17 – Portata d'acqua evaporata al variare dell'umidità iniziale del wire carrier

La porta d'acqua evaporata nella sezione di preriscaldamento risulta diminuire all'aumentare dell'umidità iniziale, invece aumenta nella sezione di essiccazione. Il motivo è che nella prima parte del sistema, l'influenza dell'abbassamento della temperatura sulla portata d'acqua è più forte dell'effetto della maggiore superficie di evaporazione, pertanto la massa evaporata è minore per tassi di umidità iniziale più alti. Il fenomeno inverso accade a partire dal secondo percorso fuori dal forno.

L'umidità del wire carrier è riportato in Figura 4.18.

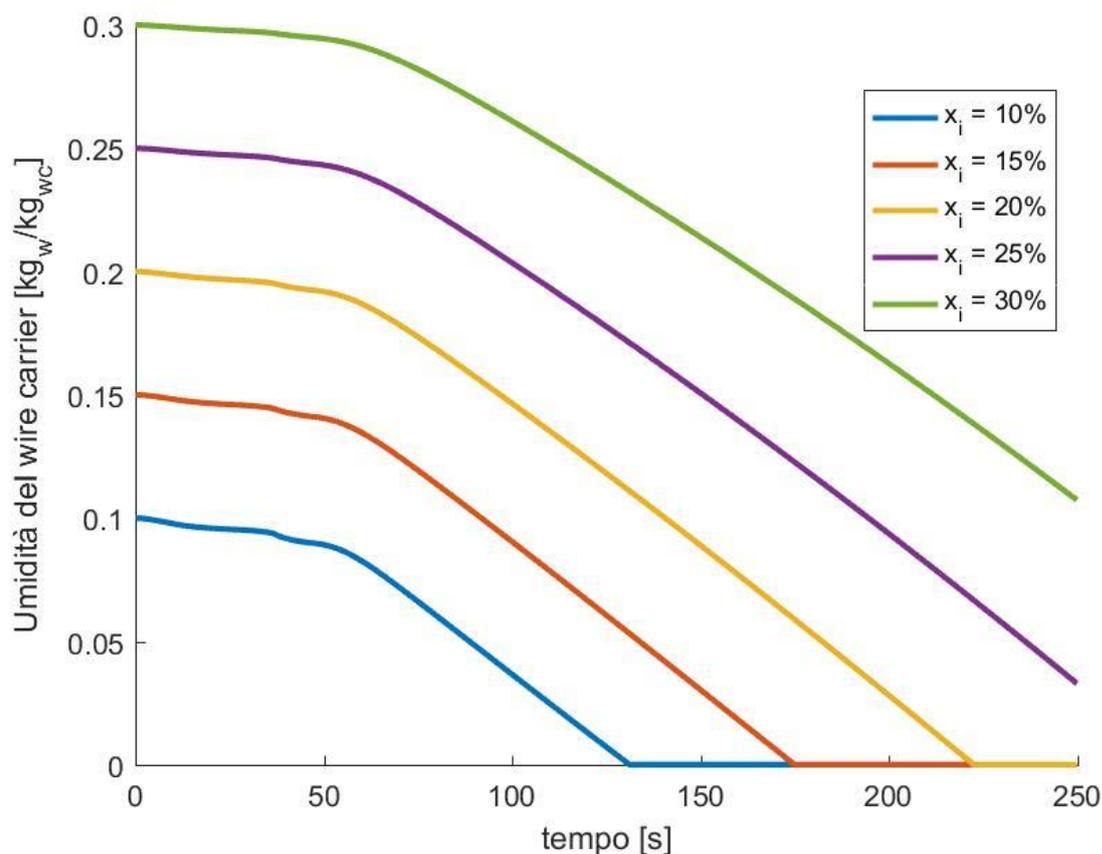


Figura 4.18 – Andamento dell'umidità del wire carrier al variare dell'umidità iniziale

Ne consegue dunque che l'andamento qualitativo dell'umidità del wire carrier è pressappoco simile per tutti i valori di umidità. La fine dell'evaporazione si sposta verso tempi più alti all'aumentare dell'umidità relativa e, nelle condizioni di umidità iniziale al 25% e al 30%, non avviene la completa evaporazione dell'acqua.

In termini energetici, i risultati dell'analisi sono riportati in Figura 4.19

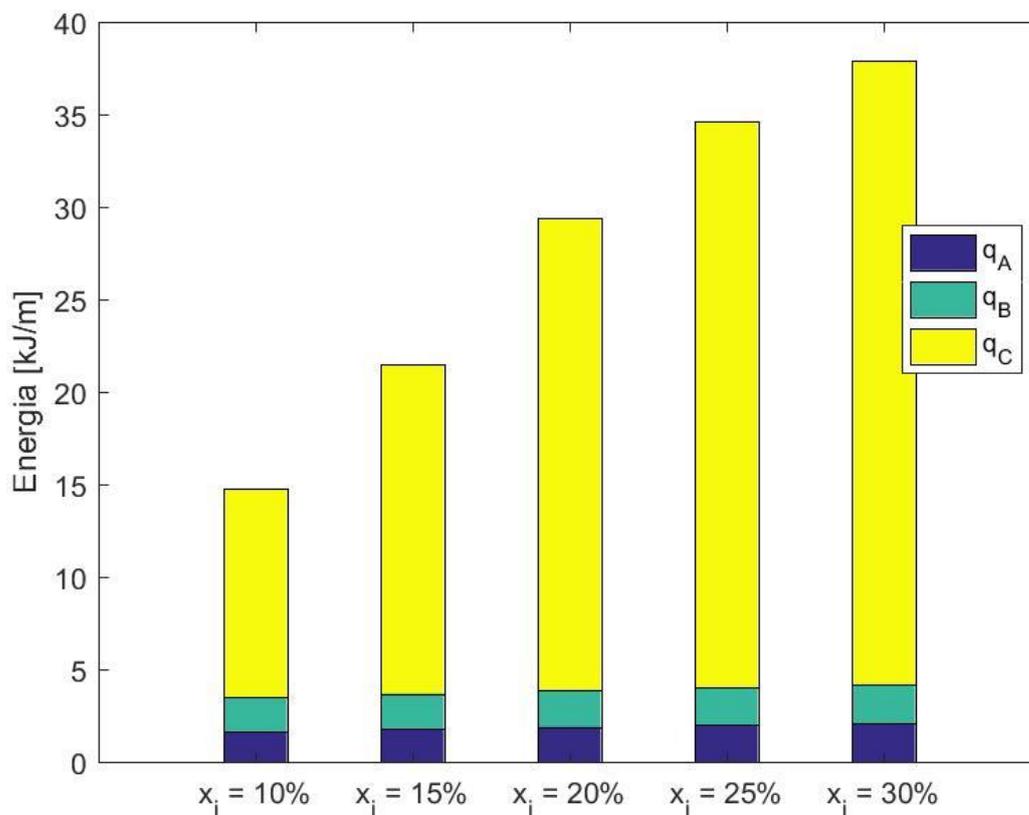


Figura 4.19 – Andamento dell'energia termica assorbita al variare dell'umidità iniziale

Sebbene l'energia assorbita nella fase di preriscaldamento sia pressappoco uguale al variare dell'umidità iniziale, l'energia assorbita dalla sezione di essiccazione aumenta. Anche se la temperatura del wire carrier è più bassa, l'aumento di energia termica assorbita è dovuto alla maggiore quantità d'acqua che evapora che assorbe più calore messo a disposizione dal flusso di aria calda.

4.2.4.3 VARIAZIONE DELLE CONDIZIONI DELL'ARIA AMBIENTE

Nel caso della valutazione del comportamento del wire carrier in funzione delle condizioni dell'aria ambiente si considerano due casi, corrispondenti pressappoco alle condizioni estive e invernali, cioè temperatura dell'aria a 18°C e umidità relativa 50% e temperatura dell'aria a 31°C e umidità relativa al 70%.

Il profilo di temperatura è riportato in Figura 4.20.

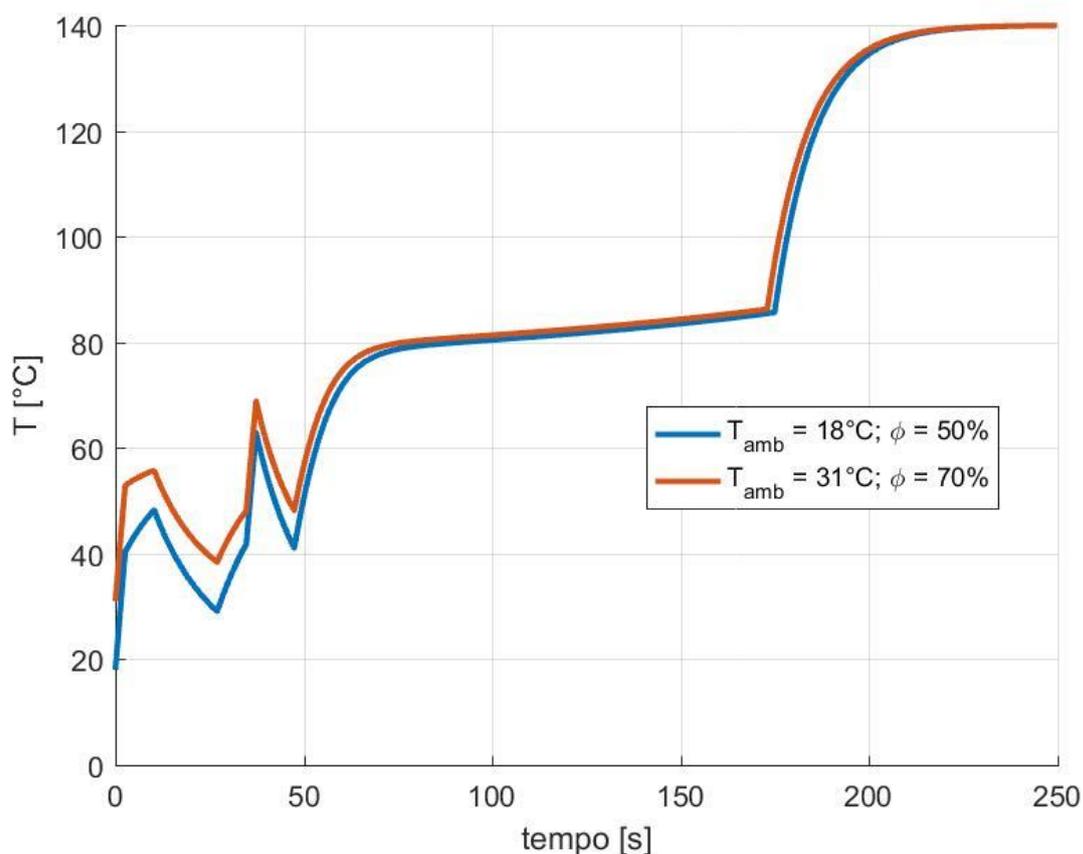


Figura 4.20 – Andamento della temperatura al variare delle condizioni dell'aria ambiente

Si può notare che la temperatura media del wire carrier è maggiore nelle condizioni estive, soprattutto nella fase di preriscaldamento. Inoltre nel percorso fuori forno si ha un raffreddamento più lento. L'evaporazione completa dell'acqua avviene qualche istante prima nel caso estivo rispetto a quello invernale.

La velocità dell'evaporazione dipende dalla portata d'acqua evaporata riportata in Figura 4.21.

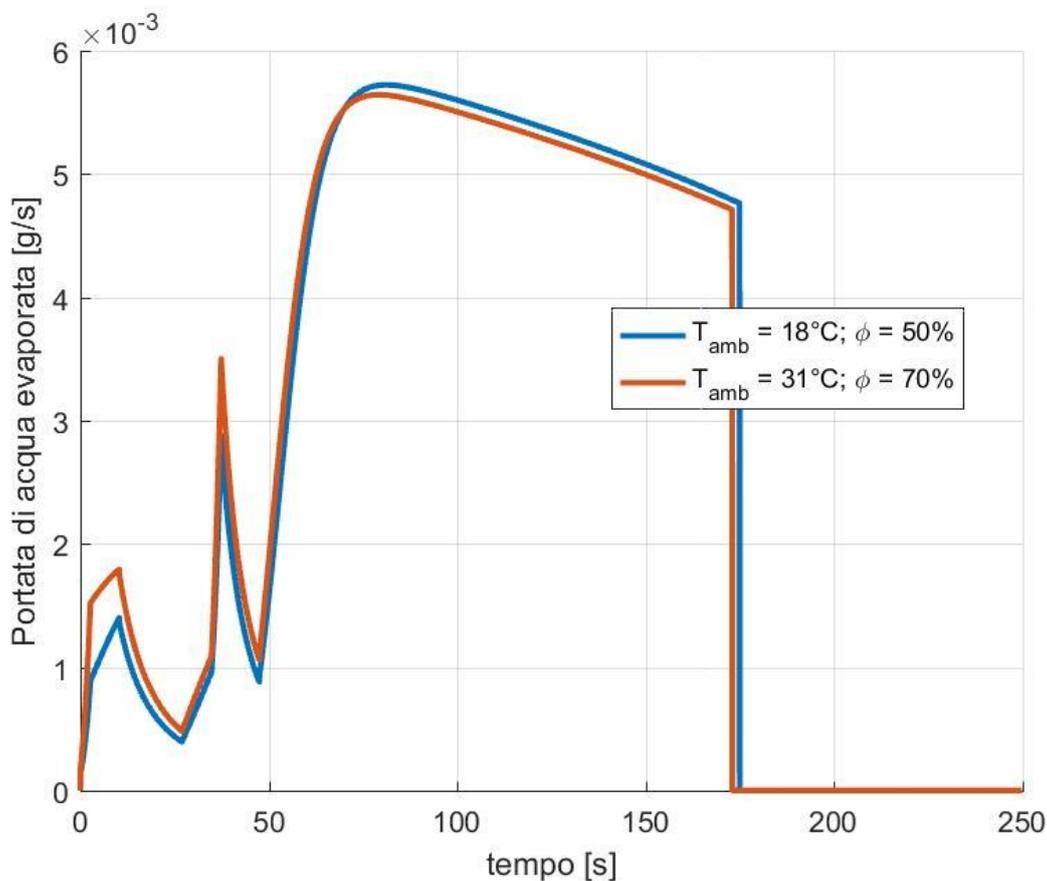


Figura 4.21 – Andamento della portata evaporata al variare delle condizioni dell'aria

La maggiore temperatura nella fase di preriscaldamento comporta un aumento della portata d'acqua evaporata nel caso estivo in questa fase, invece nella fase di essiccazione si ha uno smorzamento dovuto alla minore superficie di evaporazione della colla.

In termini di contenuto di umidità quindi, la situazione è descritta in Figura 4.22.

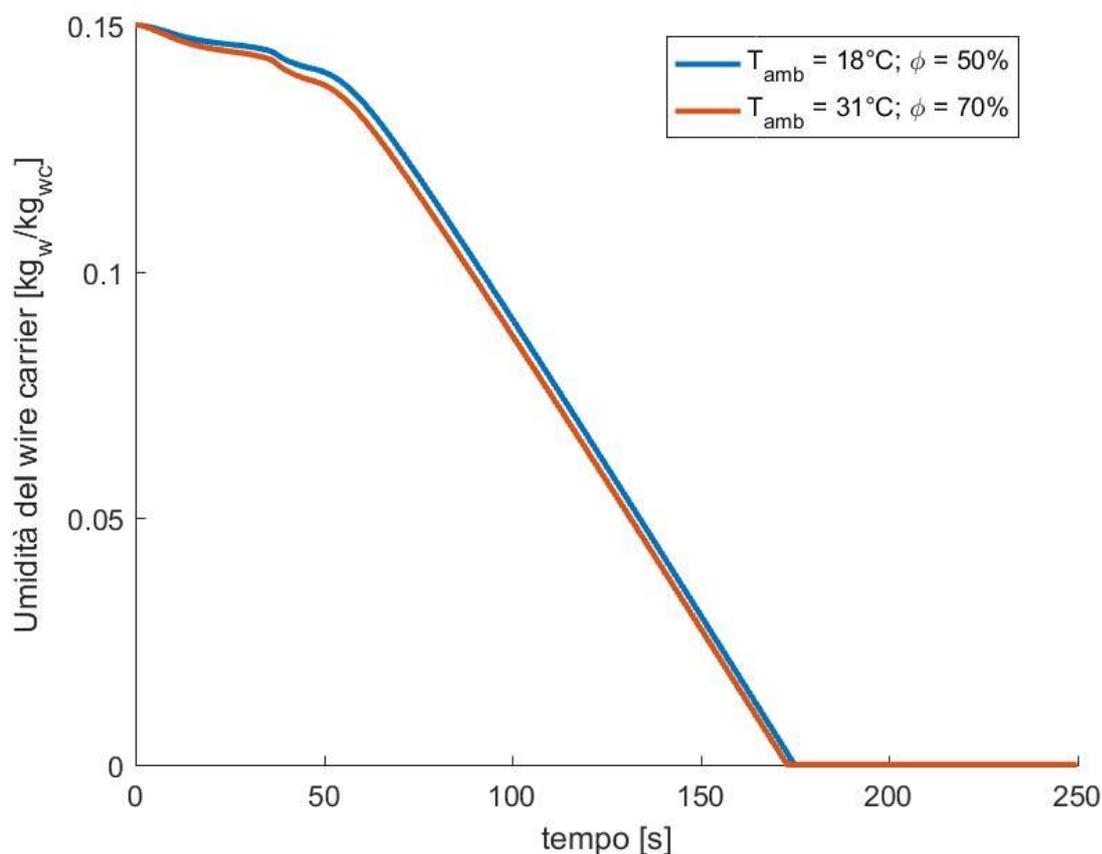


Figura 4.22 – Andamento dell'umidità del wire carrier al variare delle condizioni ambiente

Si osserva che la quantità d'acqua media contenuta nel wire carrier è minore nel caso estivo. Ciò è dovuto da una migliore efficacia del preriscaldamento perché in fase di essiccazione, l'andamento è molto simile nei due casi. Sebbene l'umidità dell'aria nel sistema di essiccazione sia maggiore nel caso estivo, l'incremento di temperatura del wire carrier permette comunque di avere una maggiore quantità d'acqua evaporata.

In termini energetici ciò si traduce nel comportamento in Figura 4.23.

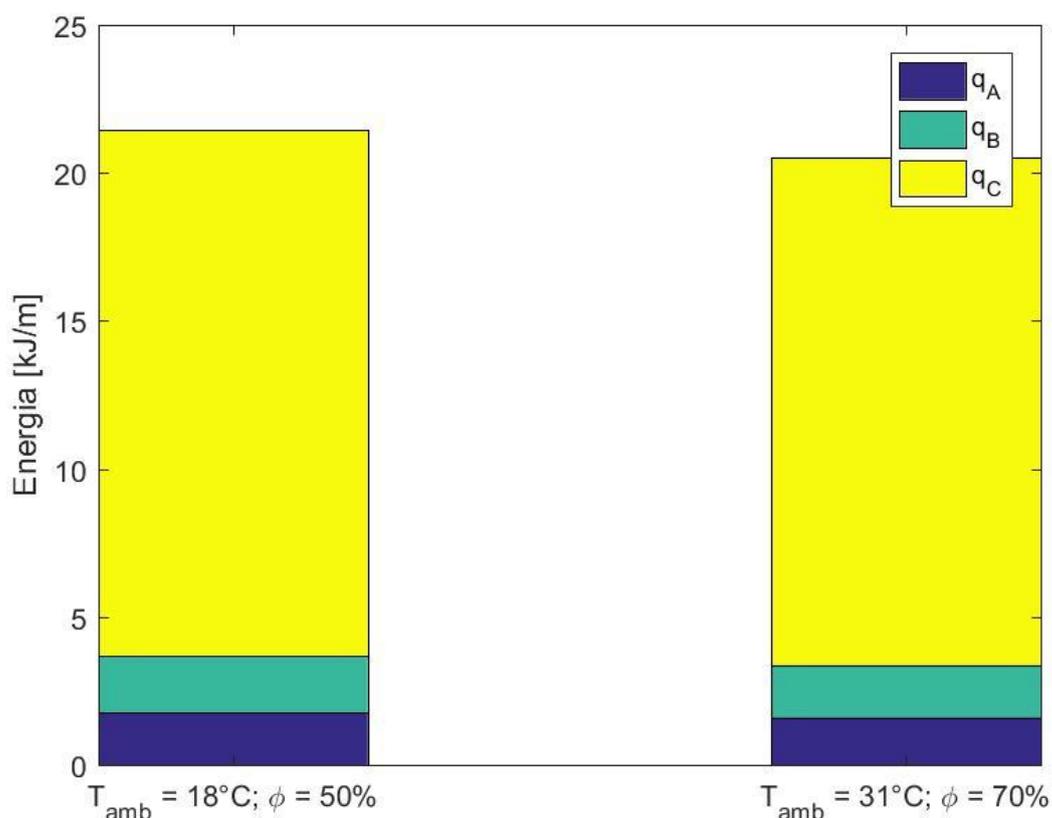


Figura 4.23 – Energia termica assorbita al variare delle condizioni ambiente

La temperatura esterna maggiore provoca un abbassamento dell'energia termica assorbita dal wire carrier, soprattutto nella fase di preriscaldamento, poiché nel percorso fuori dal forno, il materiale subisce un raffreddamento più lento e mantiene una temperatura di ingresso nel sistema di essiccazione più alta: il sistema deve riscaldare il materiale che si trova a una temperatura maggiore rispetto al caso invernale, pertanto ha un contenuto energetico iniziale più alto. Confrontando questa analisi con i consumi annui di gas naturale dello stabilimento, si può notare un accordo con questo dato, infatti i consumi di gas naturale sono minori quando la temperatura media esterna è più alta.

4.2.5 SVILUPPI FUTURI DEL SISTEMA

Dallo studio effettuato è emerso che il punto critico del sistema di essiccazione risulta essere la sezione di preriscaldamento, la cui efficacia è fortemente penalizzata da un notevole tempo di percorrenza fuori dal forno che causa un raffreddamento eccessivo del wire carrier.

Per aumentare l'efficacia del sistema, viene simulato il comportamento del wire carrier variando il layout del percorso del materiale. In particolare vengono messi a confronto due casi:

- il sistema di essiccazione con il layout attuale;
- il sistema di essiccazione ipotizzando che il percorso fuori dal forno nella fase del preriscaldamento sia spostato all'interno della sezione riscaldata a 80°C.

Il profilo di temperatura si modifica come in Figura 4.24.

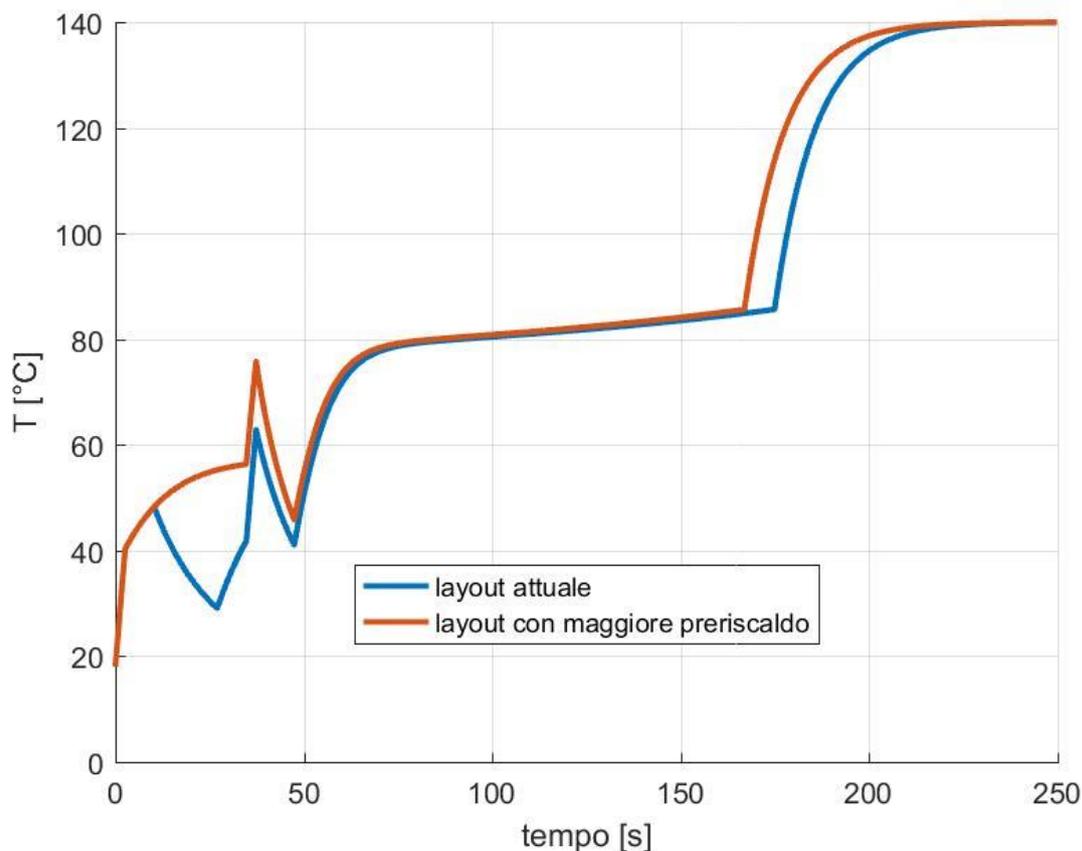


Figura 4.24 - Confronto dell'andamento della temperatura tra i due layout

Il riscaldamento del wire carrier prosegue dunque anche per gli istanti temporali in cui nel layout attuale si raffredda. Il percorso fuori dal forno tra le due sezioni invece non viene modificato, ciò si traduce dunque in un raffreddamento del materiale prima della fase di essiccazione che permette comunque di avere una temperatura di ingresso del materiale leggermente più alta.

La porta d'acqua evaporata è riportata in Figura 4.25.

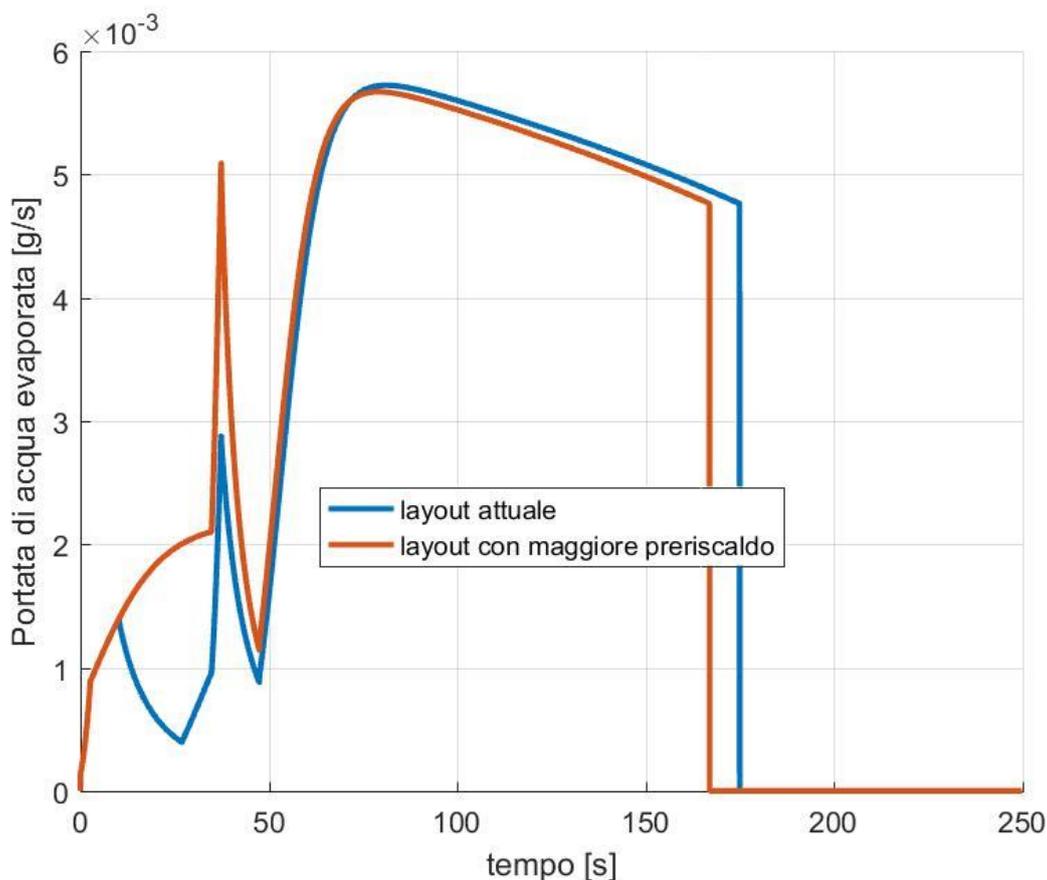


Figura 4.25 - Confronto dell'andamento della portata evaporata tra i due layout

Anche in questo caso la portata d'acqua evaporata nella sezione di preriscaldamento è nettamente superiore, ciò provoca uno smorzamento dell'andamento della portata nella fase di essiccazione e un tempo minore per l'evaporazione completa dell'acqua.

Pertanto l'umidità contenuta nel wire carrier subirà un andamento riportato in Figura 4.26.

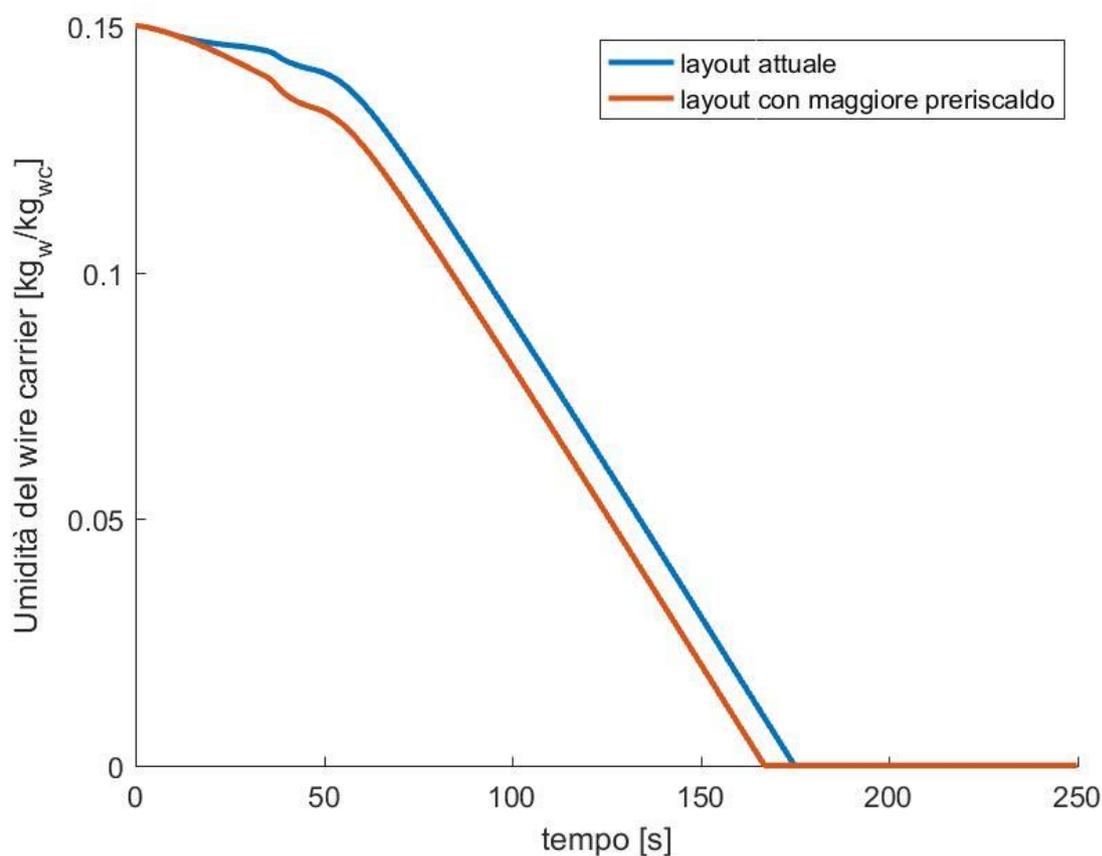


Figura 4.26 - Confronto dell'andamento dell'umidità del wire carrier tra i due layout

Si può notare come il contenuto dell'acqua nel wire carrier sia decisamente inferiore con il nuovo layout, soprattutto nelle fasi iniziali del transitorio, che corrispondono alla sezione di preriscaldamento. L'acqua quindi evapora più velocemente e il wire carrier si essicca completamente prima.

Questo modifica l'energia termica assorbita dal wire carrier come riportato in Figura 4.27.

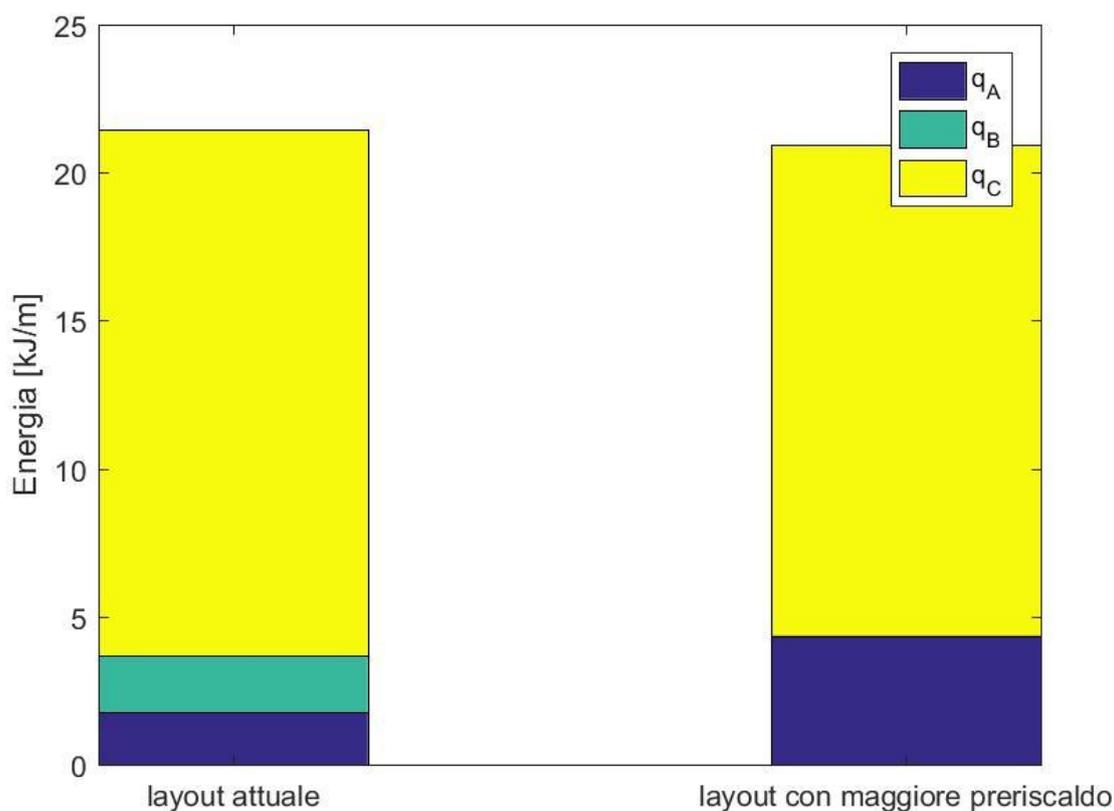


Figura 4.27 – Confronto dell'energia termica assorbita tra i due layout

Si può notare come aumenti il fabbisogno energetico della fase di preriscaldamento, mentre la fase di essiccazione richiede una quantità di energia minore, che comporta una diminuzione dell'energia termica totale assorbita. Con la modifica del layout dunque aumenta l'efficacia della fase di preriscaldamento perché, oltre a garantire un'evaporazione più veloce e una riduzione dei consumi energetici, permette anche di smorzare la capacità evaporativa della sezione di essiccazione, che nel layout attuale risulta fortemente sovraccaricata, soprattutto per alcune configurazioni delle pezze del forno che addirittura, in linea teorica, non permetterebbero la completa essiccazione della colla.

Considerando la configurazione delle pezze del forno riportate in Tabella 4.18, vengono confrontate le efficienze dei due layout, supponendo che non venga modificato il sistema di riscaldamento.

Il confronto dell'energia termica assorbita da ogni articolo tra i due layout è riportato in Tabella 4.23

Articolo	LAYOUT ATTUALE		NUOVO LAYOUT	
	qA+B [kJ/m]	qC [kJ/m]	qA+B [kJ/m]	qC [kJ/m]
42009038-M-pp-PL	5,811	29,059	7,023	26,961
40009029-M-PL	4,554	21,224	5,642	19,443
40009029-M-PL	4,554	21,224	5,642	19,443
28006017-M-P-1500	3,632	18,675	4,346	17,424
27008014-M-PL	3,431	14,782	4,215	13,484
20006019-M-PL	2,887	13,980	3,538	12,891
Potenza totale [kW]	4,766	22,798	5,828	21,016

Tabella 4.23 – Energia termica assorbita dagli articolo per i due layout d'impianto

Come previsto aumenta la potenza assorbita in fase di preriscaldamento e diminuisce in quella di essiccazione.

Dal punto di vista dell'efficienza, si ottengono i risultati di Tabella 4.24.

	LAYOUT ATTUALE	NUOVO LAYOUT
$\frac{\dot{Q}_{par,pre}}{\dot{Q}_{pre}}$	0,45%	0,45%
$\frac{\dot{Q}_{c,pre}}{\dot{Q}_{pre}}$	78,17%	73,41%
η_{pre}	21,38%	26,14%
$\frac{\dot{Q}_{par,ess}}{\dot{Q}_{ess}}$	1,43%	1,43%
$\frac{\dot{Q}_{c,ess}}{\dot{Q}_{ess}}$	4,18%	11,56%
η_{ess}	94,39%	87,02%
η_{tot}	59,35%	57,80%

Tabella 4.24 – Confronto dell'efficienza termica tra i due layout

Modificando il layout, si ottiene un aumento del 5% dell'efficienza del preriscaldamento, invece una diminuzione del 6% dell'efficienza della sezione di essiccazione, con aumento delle dispersioni a camino. Complessivamente dunque l'efficienza diminuisce.

Ciò è dovuto alla diminuzione dell'energia utile nella sezione di essiccazione, ma dipende dal fatto che non è stato considerato contestualmente un ridimensionamento del sistema di combustione. Infatti la modifica del layout è certamente efficace perché aumenta sensibilmente l'efficienza e l'efficacia evaporativa della sezione di preriscaldamento, ma contestualmente deve essere diminuita la potenza termica fornita alla sezione di essiccazione. Il miglioramento dell'efficienza del preriscaldamento comporta dunque una minore necessità di calore in fase di essiccazione.

Il miglioramento del layout è senza dubbio utile per ampliare il numero di configurazioni delle pezze del sistema che garantiscono la completa evaporazione dell'acqua, infatti aumentando l'energia termica disponibile in fase di preriscaldamento, viene diminuita l'energia assorbita in fase di essiccazione, in modo che gli articoli più energivori possano essere essiccati correttamente.

Altri miglioramenti possibili che non sono stati trattati in questo studio possono essere:

- spostamento del percorso fuori forno tra sezione di preriscaldamento e sezione di essiccazione all'interno delle camere riscaldate, in modo da eliminare il raffreddamento del wire carrier, diminuendo ulteriormente il consumo di gas naturale;
- ridimensionamento della potenza termica fornita alla sezione di preriscaldamento e alla sezione di essiccazione in base al layout scelto;
- aumento dei passaggi all'interno della sezione di preriscaldamento per aumentare l'energia termica utile in questa fase, data l'elevata quantità di calore disponibile e non sfruttato.

5 RISULTATI E CONCLUSIONI

In conclusione, attraverso questo studio viene messa in evidenza l'importanza della gestione dell'energia e della qualità ai fini del miglioramento continuo dell'organizzazione, con focus principale sul processo produttivo.

Per quanto riguarda la gestione dell'energia, dall'analisi dei consumi di energia elettrica dello stabilimento e dalla descrizione degli usi e delle potenze elettriche dei macchinari, è stato possibile costruire uno strumento che mette in relazione l'energia consumata con la produzione e tenere sotto controllo il loro andamento nel tempo per valutare i cambiamenti effettuati al sistema. Inoltre questo strumento può essere utilizzato in fase di pianificazione per prevedere come il sistema-stabilimento possa reagire ad eventuali cambiamenti, in termini di volumi di energia elettrica risparmiata oppure da acquistare, con evidenti conseguenze sul piano economico.

Dall'analisi dei consumi storici e il confronto con l'equazione caratteristica dei consumi di energia elettrica, è stato possibile verificare come i cambiamenti del sistema hanno influenzato le prestazioni dello stabilimento.

Dal punto di vista del sistema di gestione della qualità, già consolidato e certificato per l'azienda Tessitura Mabel srl, sono state presentate le affinità con il sistema di gestione dell'energia, essendo entrambi basati sulla filosofia del miglioramento continuo attraverso il ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act). Ponendo un'attenzione particolare al processo aziendale di Progettazione e sviluppo del processo produttivo e al metodo APQP (Advanced Product and Quality Planning), attraverso una simulazione numerica dello scambio termico, sono state valutate le prestazioni del sistema di essiccazione a gas naturale. In particolare, prendendo in considerazione tutti gli articoli coinvolti in questa fase del processo produttivo e poi successivamente un esempio di configurazione reale delle pezze del forno, sono state analizzate l'energia termica assorbita dagli articoli, la temperatura, la portata d'acqua evaporata e la quantità d'acqua contenuta nel wire carrier al variare di alcuni parametri critici:

- velocità di traino;
- quantità iniziale di colla;
- condizioni dell'aria ambiente.

La simulazione numerica del comportamento del wire carrier nel sistema di essiccazione ha permesso di identificare i punti critici dell'impianto e dei parametri operativi. Pertanto l'analisi si è spostata sulla valutazione delle prestazioni con il cambiamento del layout, spostando il percorso di raffreddamento all'interno della fase di preriscaldamento, mostrando un incremento del 5% dell'efficienza della sezione di preriscaldamento e una diminuzione dei consumi di gas naturale, dopo un corretto ridimensionamento della potenza termica fornita alle due sezioni dell'impianto.

Inoltre sono stati individuati altri miglioramenti possibili:

- spostamento del percorso fuori forno tra sezione di preriscaldamento e sezione di essiccazione all'interno delle camere riscaldate, in modo da eliminare il raffreddamento del wire carrier, diminuendo ulteriormente il consumo di gas naturale;
- ridimensionamento della potenza termica fornita alla sezione di preriscaldamento e alla sezione di essiccazione in base al layout scelto;
- aumento dei passaggi all'interno della sezione di preriscaldamento per aumentare l'energia termica utile in questa fase, data l'elevata quantità di calore disponibile e non sfruttato.

Infine, il modello numerico costruito è uno strumento utile e indispensabile:

- per valutare la fattibilità di nuovi prodotti, sostituendo gli attuali strumenti;
- costruire diagrammi di essiccazione per qualsiasi configurazione del forno e valutarne l'efficacia di essiccazione;
- per estendere il ragionamento ad altri sistemi di essiccazione, come il sistema ad infrarossi;
- mettere in relazione parametri energetici, e anche economici, con aspetti qualitativi come la quantità di colla e l'umidità residua del prodotto;
- per valutare i punti critici da tenere sotto controllo per le diverse configurazioni di utilizzo dell'impianto.

6 BIBLIOGRAFIA

1. Tessitura Mabel srl. Mabel. [Online] [Riportato: 28 Marzo 2018.]
<http://www.mabel.it/>.
2. —. Sistema di Gestione della Qualità.
3. *WIKIPEDIA: L'enciclopedia libera*. [Online] [Riportato: 31 05 2018.]
[https://it.wikipedia.org/wiki/Telaio_\(tessitura\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Telaio_(tessitura)).
4. ISO 50001:2001 "Energy Management systems".
5. Gabriele, Pietro, Giacone, Elena e Mancò, Salvatore. Capitolo 6: Controllo di gestione dell'energia. *Dispense del corso di Gestione dei Sistemi Energetici*. Torino : Politeko, 2016.
6. —. Capitolo 3 - Caratterizzazione dei consumi energetici. *Dispense del corso di Gestione dei Sistemi Energetici*. Torino : Politeko, 2016.
7. —. Appendice A - Richiami di statistica. *Dispense del corso di Gestione dei Sistemi Energetici*. Torino : Politeko, 2016.
8. Tessitura Mabel srl. *Manuale del Sistema di Gestione per la Qualità*. 2017.
9. UNI Ente italiano di normazione. *UNI EN ISO 9001:2015 - Sistemi di gestione per la qualità*. 2015.
10. SAI GLOBAL srl. *Corso Auditor interno IATF 16949:2016*. Torino : s.n., 2018.
11. Chapter 5 - Transient Conduction. [aut. libro] Frank P. Incropera, et al. *Introduction to Heat Transfer - sixth edition*. s.l. : John Wiley & Sons, inc., 2012.

12. Chapter 12 - Radiation: Processes and Properties. [aut. libro] Frank P. Incropera, et al. *Introduction to Heat Transfer - sixth edition*. s.l. : John Wiley & sons, inc., 2012.
13. Chapter 13: Radiation exchange between surfaces. [aut. libro] Frank P. Incropera, et al. *Introduction to Heat Transfer - sixth edition*. s.l. : John Wiley & sons, inc., 2012.
14. Felli, Mauro. *Lezioni di fisica tecnica II*. s.l. : Morlacchi, 2004.
15. Chapter 7 - External Flow. [aut. libro] Frank P. Incropera, et al. *Foundation of Heat Transfer - sixth edition*. s.l. : John Wiley & sons, inc., 2012.
16. MacKay, Donald e Matsugu, Ronald S. *Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water*. s.l. : The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1973.