

■ **Andrea Bassani¹, Guillermo Duserm Garrido^{1,2}, Roberta Dordoni¹, Gianluca Giuberti¹, Spigno Giorgia^{1,2*}**

¹Università Cattolica del Sacro Cuore, Dipartimento di scienze e tecnologie alimentari per una filiera agro-alimentare sostenibile (DiSTAS), Via Emilia Parmense 84, 29122 Piacenza

²Università Cattolica del Sacro Cuore, CRAFT - Centro di Ricerca Analisi geoSpaziale e Telerilevamento, Via Emilia Parmense 84, 29122 Piacenza
*giorgia.spigno@unicatt.it

Settore agroalimentare

Modellazione e simulazione di processi di refrigerazione

Sia in Europa che in Italia i prodotti surgelati stanno riscontrando un continuo incremento di consumo fino ad un ritmo annuo del 2.7% per un valore di mercato di oltre 100 miliardi di euro.

I dati IAS riferiti al 2019 riportano un consumo nazionale pari a 849.900 tonnellate (+1.3% rispetto al 2018), corrispondente ad un consumo pro capite annuo di oltre 14 kg, per un valore di mercato complessivo stimato in 4.400/4.700 milioni di euro. I vegetali sono gli alimenti trainanti del settore insieme ad altri prodotti quali gli ittici, i piatti ricettati, i dessert, la frutta. Nel 2019 i vegetali hanno rappresentato più del 43% del Retail e sono tornati a crescere sia i vegetali semplici come i piselli, seguiti da spinaci, fagiolini e patate, sia le zuppe, i minestrone tal quali (a lunga cottura) e ricettati (a breve cottura) [1]. I surgelati sono prodotti in grado di mantenere nel tempo il valore nutritivo e le proprietà organolettiche dell'alimento di partenza riducendo così, come effetto secondario, lo spreco alimentare derivante dal deterioramento del prodotto stesso. Per questi motivi la catena del freddo e la sua gestione assumono un ruolo di fondamentale importanza per il mantenimento dell'efficienza del processo e della qualità del prodotto durante le fasi di lavorazione, surgelazione e conservazione, fino all'esposizione sui banchi di vendita ed il consumo finale. Una corretta gestione della catena del freddo deve quindi rispondere a molteplici obiettivi:

- L'incremento della sostenibilità della produzione ed il miglioramento della qualità del prodotto surgelato. In questo senso la gestione digitalizzata può consentire di monitorare le oscillazioni di temperatura, causa principale dei fenomeni degradativi a discapito della qualità e sicurezza del prodotto.
- Il corretto monitoraggio dell'igiene delle apparecchiature di raffreddamento e confezionamento che si può tradurre, anche in questo caso, in un controllo dei possibili punti critici, tra i quali la determinazione e gestione della temperatura di impianto e di prodotto.
- L'ottimizzazione dei consumi energetici. Una gestione digitaliz-

zata della catena del freddo può permettere, infatti, sia di raggiungere elevate efficienze grazie al tempestivo rilevamento di variazioni di temperature anomale, sia di aumentare l'efficacia di manutenzioni mirate.

In questo contesto, nell'ottica di rispondere ad alcuni degli obiettivi sopra descritti, si inserisce il progetto *CoACh (Cold management in Agro-food Chains: solutions for process digitalization*, <https://coachproject.it>). Il progetto, coordinato dal Prof. **Mirko Morini** (Università degli Studi di Parma), vede coinvolti diversi centri di ricerca universitari e alcuni partner industriali ed in particolare:

Centri di ricerca

- > SITEIA.PARMA: Centro Interdipartimentale sulla Sicurezza Tecnologie Innovazione Agroalimentare dell'Università degli Studi di Parma
- > CRAFT: Centro Ricerca Analisi Spaziale e Telerilevamento dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Piacenza
- > CIRI AGRO: Alma Mater Studiorum, Università di Bologna Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale Agroalimentare
- > CIRI ICT: Alma Mater Studiorum, Università di Bologna Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale ICT.
- > Romagna Tech S.C.P.A.

Partner industriali

- > Orogel Società Cooperativa Agricola
- > DNAPhone s.r.l.
- > Onit Group s.r.l.
- > Siram S.p.A.

Nel corso del progetto alcuni prodotti di origine vegetale surgelati sono stati caratterizzati affrontando il rapporto tra catena del freddo e produzione in termini di variazioni qualitative dei prodotti. Tecnologie innovative di studio di processo e relativo controllo di-



gitalizzato verranno finalizzate alla stabilizzazione di prodotto e al miglioramento della gestione energetica di processo. Il progetto, infatti, ha come obiettivo finale lo sviluppo di un prototipo di un sistema integrato per la gestione ottimizzata della catena del freddo in un processo di trasformazione di prodotti vegetali e la sua validazione in ambiente industriale. Tale prototipo presenterà una componente innovativa sia nell'hardware (essendo basato su una rete IoT per l'acquisizione di misure online e su sensoristica offline integrata mediante piattaforma cloud) sia sul software (essendo la gestione sia del processo, sia della rete di trasmissione dati, basata su algoritmi che ne ottimizzano le prestazioni). Il progetto in corso sta dando, inoltre, dei risultati intermedi che possono trovare interessanti applicazioni anche in altri settori. Questi risultati possono essere classificati come metodologie e riguardano:

- l'analisi del processo e la capacità di individuare le criticità in relazione al rapporto tra produzione e catena del freddo;
- lo sviluppo di modelli per la simulazione del processo di refrigerazione e surgelazione;
- lo sviluppo di algoritmi di ottimizzazione della gestione del freddo;
- lo sviluppo di algoritmi di ottimizzazione della gestione delle reti.

Il ruolo del centro di ricerca CRAFT all'interno del progetto riguarda lo sviluppo di un modello matematico inerente la fase di surgelazione di processi di trasformazione vegetale. L'obiettivo è quello sviluppare una metodologia di modellazione e strutturare una piattaforma che permetterà di avere una analisi completa delle condizioni

operative del processo andando a prevedere, inoltre, alcuni indici di performance dell'impianto (KPIs, *Key Performance Indicators*). Questo modello matematico verrà utilizzato in combinazione con algoritmi di ottimizzazione (sviluppati da SITEIA.PARMA) al fine di gestire nella maniera energeticamente più conveniente la produzione dell'aria usata come fluido di raffreddamento da parte del partner industriale Orogel. In particolare, il modello permetterà di verificare gli effetti delle variazioni sull'aria prodotta, per esempio in termini di umidità relativa o temperatura, sul prodotto stesso, garantendo sempre il mantenimento delle caratteristiche di surgelazione. Dovendo essere incluso in un processo di ottimizzazione, il modello, basato su bilanci di massa ed energia, deve richiedere uno sforzo computazionale basso (ovvero tempi di calcolo ridotti), mantenendo al tempo stesso una buona accuratezza nella valutazione dei parametri chiave, come per esempio, la temperatura nel tempo nel punto termicamente sfavorito dell'alimento. In letteratura esistono diversi modelli matematici per simulare il processo di refrigerazione, che possono essere riassunti in tre categorie: modelli empirici, modelli teorici, modelli misti. I primi si basano su formule empiriche per la valutazione sia del tempo di congelamento, sia delle diverse proprietà associate come per esempio la frazione di ghiaccio, la frazione di acqua legata e il coefficiente di trasferimento termico convettivo [3]. Questi modelli hanno tempi di risoluzioni molto rapidi, però è possibile valutare un unico parametro, ovvero il tempo di congelamento. Al contrario, i modelli teorici, che si ba-

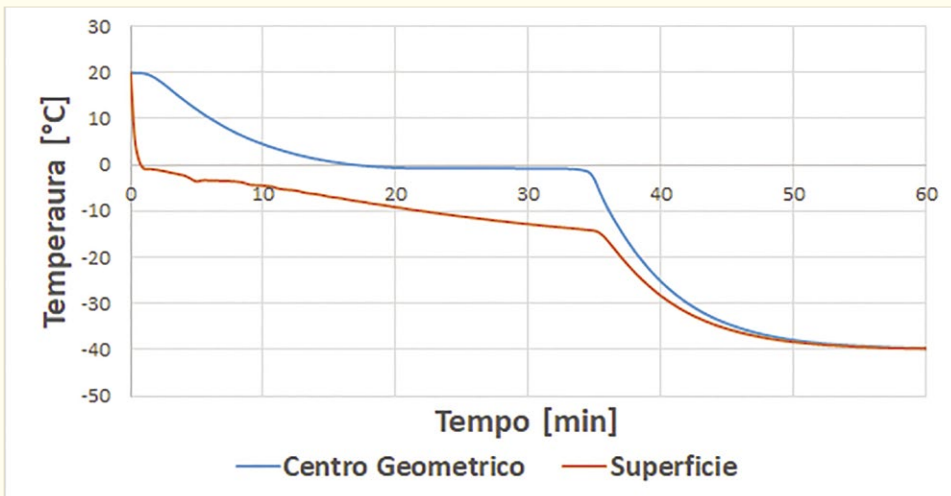


Figura 1A | Variazione della temperatura nel tempo nel centro geometrico e sulla superficie dell'alimento.

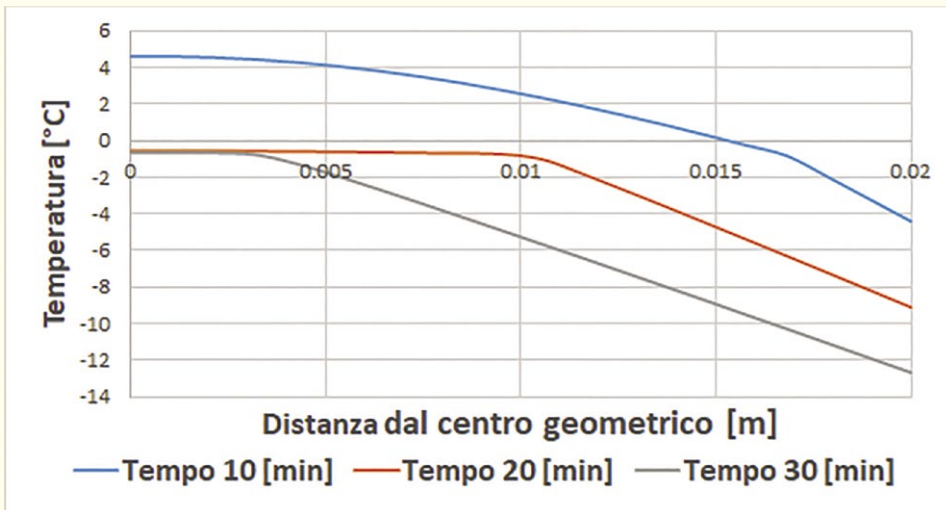


Figura 1B | Variazione della temperatura in funzione della distanza dal centro geometrico a tre diversi tempi.

sano sulla risoluzione dell'equazione del calore in 3-D, permettono di calcolare, attraverso la risoluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali, anche le proprietà connesse quali il coefficiente di scambio termico convettivo o la temperatura di inizio del congelamento. Questi modelli, risolti attraverso l'utilizzo della fluidodinamica computazionale, richiedono però tempi di calcolo elevati [2]. I modelli misti, infine, come dice il nome stesso, sfruttano alcune delle peculiarità di ciascuna delle due categorie precedenti. In particolare, utilizzano formule empiriche per la valutazione delle

proprietà, mentre risolvono l'equazione di diffusione del calore in una dimensione, permettendo così di valutare l'andamento di temperatura all'interno dell'alimento [4]. In questo modo sono modelli che risultano abbastanza accurati e al contempo hanno un tempo di risoluzione basso rendendoli adatti allo scopo del progetto. Tuttavia, questi modelli presentano delle lacune, risolte nel corso del progetto, come per esempio l'impossibilità di valutare la variazione di temperature per oggetti finiti, pur semplici, come un parallelepipedo o un cilindro a cui è possibile assimilare gli alimenti (si pensi per esempio al cubetto di spinacio o alla patatina fritta). Una volta selezionata la tipologia di modello, un altro aspetto chiave è stata la valutazione delle proprietà dell'alimento (e.g. calore specifico, conducibilità, densità etc.). Queste proprietà dipendono fortemente dalla composizione chimica dell'alimento e dalla sua temperatura. In generale, quindi, è difficile produrre un database determinato sperimentalmente per tutte le possibili condizioni e composizioni degli alimenti. Si è allora deciso di definire le diverse tipologie di alimenti sulla base dei loro costituenti principali, ovvero acqua, proteine, grassi, carboidrati, fibre e ceneri. A partire da questi è possibile calcolare, con una certa affidabilità, le proprietà dell'alimento in funzione della temperatura [5]. È sicuramente limitante definire un alimento come una miscela dei suoi costituenti principali, però questo permette di essere flessibili al fine sia di ottimizzare energeticamente il processo, sia di ridurre potenzialmente i tempi di congelamento. Inoltre, la definizione dell'alimento in base ai suoi costituenti permette una rapida caratterizzazione del cibo stesso attraverso l'utilizzo di metodi analitici rapidi e largamente convalidati. Per esempio, grazie a questo modello, potrebbe essere possibile adattare i tempi di congelamento in funzione dei

proprietà, mentre risolvono l'equazione di diffusione del calore in una dimensione, permettendo così di valutare l'andamento di temperatura all'interno dell'alimento [4]. In questo modo sono modelli che risultano abbastanza accurati e al contempo hanno un tempo di risoluzione basso rendendoli adatti allo scopo del progetto. Tuttavia, questi modelli presentano delle lacune, risolte nel corso del progetto, come per esempio l'impossibilità di valutare la variazione di temperature per oggetti finiti, pur semplici, come un parallelepipedo o un cilindro a cui è possibile assimilare gli alimenti (si pensi per esempio al cubetto di spinacio o alla patatina fritta). Una volta selezionata la tipologia di modello, un altro aspetto chiave è stata la valutazione delle proprietà dell'alimento (e.g. calore specifico, conducibilità, densità etc.). Queste proprietà dipendono fortemente dalla composizione chimica dell'alimento e dalla sua temperatura. In generale, quindi, è difficile produrre un database determinato sperimentalmente per tutte le possibili condizioni e composizioni degli alimenti. Si è allora deciso di definire le diverse tipologie di alimenti sulla base dei loro costituenti principali, ovvero acqua, proteine, grassi, carboidrati, fibre e ceneri. A partire da questi è possibile calcolare, con una certa affidabilità, le proprietà dell'alimento



diversi lotti di uno stesso alimento da dover congelare e non solo in funzione delle diverse tipologie di alimento. Una volta selezionate le proprietà e definite le leggi empiriche, è stato sviluppato un codice in Matlab per la risoluzione dell'equazione differenziale della diffusione del calore. A titolo di esempio sono riportati alcuni dei possibili risultati che si possono ottenere dal modello utilizzato, come la variazione della temperatura in funzione del Etempo nel centro geometrico dell'alimento e sulla superficie (**Figura 1-A**) e in funzione della distanza dal centro geometrico in un certo istante di tempo (**Figura 1-B**).

In conclusione, quindi, il modello sviluppato nell'ambito del progetto Coach è efficiente (ovvero richiede tempi di calcolo ragionevolmente rapidi), flessibile (potendo rappresentare diverse tipologie di alimento) ed al tempo stesso accurato qualora l'alimento considerato possa essere assimilato ad una figura geometrica definita (es. cilindro sfera o parallelepipedo). Tale modello può essere utilizzato sia per cercare di ridurre il tempo di congelamento dell'alimento, sia per ottimizzare energeticamente il processo e la

produzione dell'aria fredda o, in generale, del fluido di raffreddamento. A riguardo, è interessante evidenziare come il processo di surgelazione possa essere incluso in un programma di ottimizzazione energetica che comprenda anche le fasi successive, quali per esempio il trasporto e lo stoccaggio. In quest'ottica, preferendo magari non modificare le condizioni di processo nella fase di surgelazione, il prodotto surgelato può essere anche utilizzato come accumulatore di energia da sfruttare nelle fasi successive, sempre garantendo la qualità dell'alimento. Nonostante ci siano diversi studi a riguardo, questo tipo di approccio può essere ancora migliorato sia dal punto di vista delle proprietà empiriche, sia per quanto riguarda le forme geometriche ammesse per poter definire un alimento.

Ringraziamenti

La ricerca è stata condotta nell'ambito del progetto CoACH finanziato dai Fondi europei della Regione Emilia-Romagna – Programma POR FESR 2014-2020.

Bibliografia

- [1] www.istitutisurgelati.it/wp-content/uploads/2020/06/IIAS_REPORT_CONSUMI_2019.pdf
- [2] Zhao, Y., & Takhar, P. S. (2017). Freezing of foods: mathematical and experimental aspects. *Food engineering reviews*, 9(1), 1-12.
- [3] Ham, Q. T. (1986). Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. *International Journal of Food Science & Technology*, 21(2), 209-219.
- [4] Ferreira, S. R., & Rojas, L. O. A. (2019). Freezing times using time derivative of temperature on surface of foods. *International Journal of Refrigeration*, 98, 436-443.
- [5] Pham, Q. T. (2014). *Food freezing and thawing calculations*. Springer.