



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

**Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica**

**Indagine termografica di attività  
respiratorie ordinarie e straordinarie**

Termographic investigation of ordinary and  
extraordinary respiratory activities

Relatore:  
**Prof. Valerio  
D'Alessandro**

Tesi di Laurea di:  
**Alessia Fiorucci**

Correlatore:  
**Ing. Luca  
Giammichele**

A.A. 2021/2022

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
<b>1 Stato dell'arte</b>	<b>5</b>
1.1 Trasmissione aerea delle particelle . . . . .	5
1.1.1 Dispositivi di protezione individuale . . . . .	8
1.2 Scambio di calore per irraggiamento . . . . .	10
1.2.1 Termografia infrarossa . . . . .	13
1.2.2 Analisi infrarossa dell'attività respiratoria . . . . .	17
<b>2 Set up sperimentale</b>	<b>19</b>
2.1 Strumentazione e procedura sperimentale . . . . .	19
2.1.1 Processamento immagini termiche . . . . .	20
2.2 Test preliminari . . . . .	22
<b>3 Risultati</b>	<b>26</b>
3.1 Soggetto 1 . . . . .	26
3.1.1 Acquisizioni frontali . . . . .	26
3.1.2 Acquisizioni laterali . . . . .	28
3.1.3 Confronto tra i risultati . . . . .	30
3.2 Soggetto 2 . . . . .	35
3.2.1 Acquisizioni frontali . . . . .	35
3.2.2 Acquisizioni laterali . . . . .	37
3.2.3 Confronti tra i risultati . . . . .	38
3.3 Soggetto 3 . . . . .	41
3.3.1 Acquisizioni frontali . . . . .	41
3.3.2 Acquisizioni laterali . . . . .	43
3.3.3 Confronto tra i risultati . . . . .	44
3.4 Confronto dei risultati tra i diversi soggetti . . . . .	46
<b>4 Conclusioni</b>	<b>52</b>

*INDICE*

3

**Bibliografia**

**54**

# Introduzione

Il presente lavoro si pone come obiettivo quello di mettere in evidenza, tramite termografia infrarossa, la trasmissione aerea delle particelle attraverso i comuni dispositivi di protezione individuale; quest'ultimi ormai divenuti parte integrante della nostra quotidianità a partire dalla diffusione della malattia COVID 19 nel 2020. Lo studio è stato incentrato sulle attività di respirazione ordinaria e del colpo di tosse; in particolare, si è voluto osservare come e quanto durante queste attività, il flusso espirato tende a diffondersi verso la parte posteriore del volto del soggetto in esame.

Il primo capitolo ospita una trattazione riguardo ai meccanismi di trasmissione aerea delle droplets e un'introduzione alla termografia infrarossa; nel secondo capitolo si espongono tutti gli aspetti riguardanti le modalità di acquisizione adottate; nel terzo capitolo vengono invece presentati e discussi i vari risultati ottenuti attraverso le prove effettuate; si conclude poi con l'ultimo capitolo che si compone delle considerazioni finali.

# Capitolo 1

## Stato dell'arte

A causa dello scoppio della pandemia da Sars-Cov2 ha acquistato particolare interesse lo studio di come e quanto le particelle respiratorie possano trasmettersi nell'area circostante un individuo, anche nel caso in cui questo indossi uno tra i dispositivi di protezione individuale più in uso.

La termografia infrarossa, nello specifico, ci può aiutare ad evidenziare la diffusione del cloud di particelle in termini di estensione e direzione.

### 1.1 Trasmissione aerea delle particelle

La malattia da coronavirus (**COVID-19**) è una patologia infettiva causata dal virus Sars-Cov2. Questa si diffonde rapidamente attraverso la trasmissione di particelle acquose (*droplets*), le quali possono essere prodotte naturalmente a seguito di processi fisiologici come la respirazione, lo starnuto e il colpo di tosse. La trasmissione avviene attraverso un soggetto infetto che produce un numero elevato di droplets, contenenti agenti patogeni, che poi si diffonde nell'aria raggiungendo altri soggetti (sani) nelle immediate vicinanze.

L'infezione tra due individui può avvenire secondo tre modalità:

- Le droplets espulse dal soggetto infetto raggiungono direttamente bocca, naso o occhi dell'altro individuo, a causa dell'elevata *quantità di moto* con cui queste vengono espulse;
- Attraverso un *contatto diretto* con droplets che si sono depositate su una superficie;
- A seguito dell'*inalazione* di particelle infette presenti nell'aria circostante.

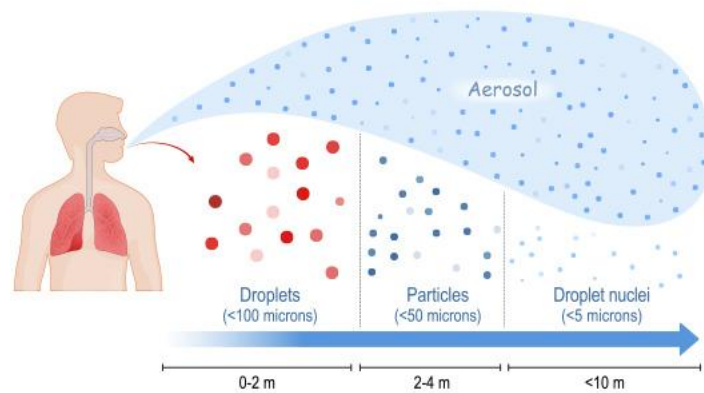
La produzione di queste particelle avviene tramite il fenomeno dell'**atomizzazione**. Il processo si sviluppa a seguito del passaggio di un flusso d'aria a velocità sufficientemente elevata su una superficie liquida. Questo provoca il distacco di parti di liquido che poi si spezzano in colonne di goccioline. In base alla localizzazione anatomica nel tratto respiratorio in cui questo fenomeno ha origine si ha lo sviluppo di particelle di diverse dimensioni [1]. Sono state infatti individuate tre modalità di produzione delle droplets in accordo alla loro distribuzione dimensionale:

- la "rottura" del film fluido bronchiolare sviluppa le goccioline prodotte durante la normale respirazione e sono quelle che possiedono diametro inferiore ( $d \leq 1\mu m$ );
- l'instabilizzazione e la frammentazione del film liquido presente nel tratto laringeo, produce goccioline di diametro intermedio ( $d \geq 1\mu m$ ) durante il parlato e il colpo di tosse;
- l'instabilizzazione e la frammentazione del film liquido presente nella cavità orale, produce infine le droplets che hanno diametro maggiore ( $d \geq 100\mu m$ ) durante i discorsi e la tosse [2].

Il processo di atomizzazione è anche governato da forze fisiche tra cui la tensione superficiale, la viscosità e le forze aerodinamiche; quindi le dimensioni delle goccioline formate dipendono fortemente dalle caratteristiche aerodinamiche del sistema di iniezione [3].

La diffusione dell'infezione dipende comunque da una serie di fattori quali *il numero di goccioline prodotte, la loro dimensione, il contenuto di agenti infettivi e la frequenza di esecuzione delle droplets*. Ad esempio infatti, lo starnuto e il colpo di tosse producono molte più goccioline rispetto al parlato e alla respirazione, ma quest'ultime avvengono con una frequenza maggiore [1].

E' stato osservato che nonostante durante l'attività respiratoria ordinaria vengano prodotte droplets in quantità limitata rispetto ad attività respiratorie straordinarie, il numero totale di particelle respiratorie prodotte nell'arco di tutta la giornata sia superiore a quelle emesse durante la tosse e lo starnuto. Inoltre vi è da aggiungere che mentre le goccioline più grandi possono percorrere distanze di pochi metri prima di stabilirsi al suolo, i nuclei più piccoli evaporati dalle particelle più grandi possono rimanere nell'aria per ore e disperdersi come una nuvola (Fig.1.1) [4]. Di conseguenza, nel primo caso si assiste ad una trasmissione della malattia agli individui presenti nelle immediate vicinanze, mentre nel secondo caso si può verificare una trasmissione su distanze maggiori.



**Figura 1.1:** Distanza percorsa dalle droplets in accordo alla loro distribuzione dimensionale.

Questa duplice diffusione interessa la modalità di trasmissione del virus attraverso deposizione su superfici. Questa può infatti avvenire sia per **sedimento gravitazionale** della gocciolina originale, sia per **deposizione diffusiva** del residuo della particella. Il potenziale di sopravvivenza dell'agente patogeno su una superficie dipende invece dalla natura della superficie stessa (in particolare dal suo contenuto di umidità), dalla tipologia di virus e dalla sua tolleranza alle condizioni di siccità [1].

Il trasporto di goccioline respiratorie può essere visualizzato attraverso due stadi: il primario è il flusso espiratorio che viene poi seguito dalla dispersione secondaria data dal flusso d'aria dell'ambiente. In generale, il fattore che contribuisce maggiormente alla dispersione e alla deposizione delle goccioline sembra essere la dimensione [2].

Per quanto concerne invece il contenuto di agenti patogeni all'interno delle droplets esso dipende in gran parte dal punto di tratto respiratorio dove questi hanno origine. I microrganismi patogeni tendono a trovarsi in luoghi specifici, come le tonsille e la laringe, mentre raramente nella parte anteriore della bocca [1].

E' importante inoltre sottolineare che la diffusione del clodud di particelle e la sopravvivenza degli agenti patogeni al suo interno dipende anche da fattori come la **temperatura** e l'**umidità relativa** dell'aria, considerando che queste grandezze nell'ambiente interno hanno sempre valori più bassi di quelli presenti nelle vie respiratorie [3]. Ad esempio, quando le goccioline evaporano diventano più piccole fornendo meno protezione al virus. In generale vale che i virus con un contenuto lipidico inferiore hanno una maggiore stabilità con un'alta umidità relativa; i virus che possiedono un involucro lipidico sono più stabili nell'aria secca, mentre i virus senza un involucro sono

più stabili nell'aria umida. Riguardo invece la temperatura, si è visto come tendenzialmente i virus mostrino un comportamento più stabile all'aria alle basse temperature. Quindi *le particelle virali presenti nell'aerosol rimangono infettive per periodi di tempo più lunghi durante la stagione fredda* (quando l'umidità bassa è più diffusa) piuttosto che durante l'estate [1].

### 1.1.1 Dispositivi di protezione individuale

Per dispositivo di protezione individuale (**DPI**) si intende una qualsiasi attrezzatura destinata ad essere indossata e tenuta dal lavoratore allo scopo di proteggerlo contro uno o più rischi suscettibili di minacciarne la sicurezza o la salute. In riferimento ai DPI utilizzati in ambito sanitario, i più impiegati sono quelli per la *protezione respiratoria, congiuntivale e delle mani*.

Di fronte alla rapida diffusione del COVID-19, le autorità sanitarie di tutto il mondo hanno introdotto due misure pratiche per attenuarne il rapido sviluppo: l'**utilizzo di mascherine** e il **distanziamento sociale**. La prima soluzione è quindi legata all'uso di un dispositivo di protezione individuale e si è dimostrata essere efficace come misura non farmaceutica nel ridurre la prevalenza di virus negli ambienti comunitari [5].

Vengono individuati nello specifico tre tipi principali di mascherine utilizzabili:

- Maschere FFP (Filtering Face Piece);
- Maschere facciali ad uso medico (mascherine chirurgiche);
- Maschere filtranti.

La produzione di ciascuna deve rispettare le normative tecniche di riferimento.

Prima di analizzare nello specifico i diversi tipi di prodotto presenti sul mercato va specificato che in generale le prestazioni di filtrazione di una mascherina sono determinate dalla sua microstruttura (diametro della fibra, spessore, porosità), densità di carica superficiale e condizioni ambientali (velocità dell'aria, diametro delle particelle di aerosol, temperatura e umidità) [6].

#### Maschere filtranti FFP

In base alla classificazione europea si distinguono in tipo 1 (**FFP1**), tipo 2 (**FFP2**) e tipo 3 (**FFP3**); la suddivisione è stata effettuata in relazione alla capacità filtrante di ognuna nei confronti di aerosol e goccioline, pari



rispettivamente a 80% , 94% e 98%. Questa categoria di mascherine può essere di tipo *riutilizzabile* (se contraddistinta dalla R) o di tipo *monouso* (se contraddistinta dalla lettera NR). Quest'ultime hanno una durata limitata che varia in base al loro utilizzo e ne viene richiesta la sostituzione quando si riscontra un'alta resistenza respiratoria.

Riguardo invece lo specifico utilizzo, le mascherine di tipo FFP2 e FFP3 devono essere impiegate nei reparti ospedalieri dove si trovano pazienti contagiati, dai soccorritori di pazienti contagiati e nelle guardie mediche. In particolare è raccomandato l'utilizzo di dispositivi con fattore di protezione FFP3 quando il patogeno è trasmissibile per via aerea e devono essere compiute delle manovre a rischio, mentre non è consigliato il suo impiego su pazienti contagiati in quanto *la presenza della valvola non impedisce comunque la trasmissione di agenti patogeni per via aerea* [7].

### Mascherine chirurgiche

Queste si presentano come maschere facciali lisce o pieghettate che vengono posizionate su naso e bocca e fissate alla testa tramite elastici. In relazione all'efficienza di filtrazione e alla resistenza respiratoria si classificano in tre tipi: **I**, **II** e **IIR**. I dispositivi di tipo II e IIR offrono una maggiore resistenza alla filtrazione batterica; la IIR è resistente anche agli spruzzi.

In generale il loro utilizzo è consigliato in tutte quelle circostanze in cui viene meno la possibilità di riuscire a mantenere un'adeguata distanza sociale. Più nello specifico, in accordo alle normative, quelle di tipo I possono essere indossate dai pazienti mentre quelle di tipo II sono destinate agli operatori sanitari solo nel caso in cui però non vengano effettuate operazioni che prevedano la generazione di aerosol; al contrario è necessario l'utilizzo di un dispositivo con un fattore di protezione più alto, come quelli descritti sopra.

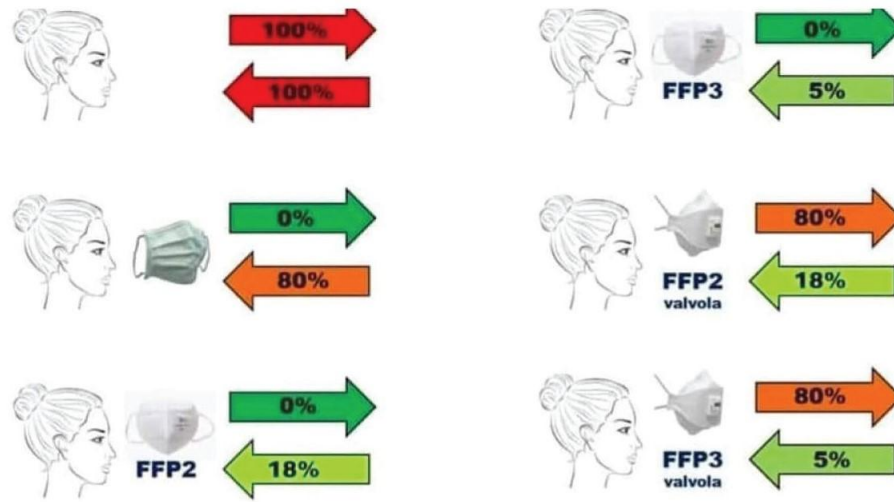
Le mascherine chirurgiche *non possono in alcun modo essere riutilizzate* nè essere sottoposte a pratiche di igienizzazione; anzi ne viene evidenziata la tendenza ad inumidirsi con conseguente diminuzione della capacità filtrante [7].

### Maschere filtranti

A questa categoria appartengono le comuni mascherine in tessuto. Questo prodotto non si configura nè come dispositivo di protezione individuale nè come dispositivo medico. Nonostante non siano richiesti test specifici o particolari autorizzazioni per l'immissione nel commercio di queste maschere, al produttore è comunque richiesta la garanzia che queste non arrechino danni o rischi aggiuntivi per il soggetto destinatario.

Le loro performance e capacità filtranti non sono prestabilite e variano in base alla *tipologia di tessuto, al numero di strati e al particolare processo di fabbricazione* utilizzato per la produzione.

A causa di tutte queste variabili, le mascherine filtranti possono essere impiegate solo a scopo **precauzionale** e vengono classificate come dispositivo *non riutilizzabile* [7, 8].



**Figura 1.2:** Capacità filtrante dei diversi tipi di dispositivi di protezione individuale

La pandemia COVID-9 ha normalizzato l'utilizzo della mascherina, che viene quindi associata a benefici per la salute. Difatti questi dispositivi garantiscono la limitazione della diffusione di alcune malattie delle vie respiratorie (Fig.1.2) e riducono l'esposizione al particolato; al contrario però, l'utilizzo della mascherina ha aumentato la probabilità di inalare contaminanti come le microplastiche [5].

## 1.2 Scambio di calore per irraggiamento

Il fenomeno dell'irraggiamento è un meccanismo di scambio termico che consiste nel trasferimento di energia tra due corpi *sottoforma di onde elettromagnetiche* prodotte a causa del moto per agitazione termica di particelle cariche. A differenza delle altre modalità di propagazione del calore (quella conduttiva e quella convettiva), questa non necessita di un contatto diretto tra gli scambiatori e neanche di un mezzo fisico per propagarsi.

L'energia trasportata da un'onda elettromagnetica è descritta dall'**equazione di Plank** ed è caratterizzata dalla frequenza  $\nu$  e dalla lunghezza d'onda  $\lambda$ :

$$\varepsilon = h\nu = h\frac{C}{\lambda} \quad (1.1)$$

dove con  $C$  si indica la velocità della luce nel vuoto ( $3 \cdot 10^8 m/s$ ), ossia la stessa con cui l'onda elettromagnetica trasporta l'energia; mentre  $h$  si riferisce alla costante di Planck ( $6,6256 \cdot 10^{-34} Js$ ).

L'irraggiamento è un fenomeno che si presenta ad ogni temperatura che sia superiore allo zero assoluto. Nello specifico, i corpi a temperatura ambiente emettono una radiazione che cade nel campo dell'infrarosso [9].

Quando una radiazione termica interagisce con la materia si hanno tre effetti principali: *assorbimento, riflessione e trasmissione*. L'entità di ciascun contributo dipende sia dalle caratteristiche della superficie che dalla radiazione incidente stessa:

$$E_{inc} = E_{rifl} + E_{ass} + E_{trasm} \quad (1.2)$$

con

$E_{inc}$  = energia emessa da un'altra sorgente di radiazione e incidente sulla superficie del corpo in esame;

$E_{rifl}$  = energia riflessa dalla superficie del corpo in esame

$E_{ass}$  = energia assorbita dal corpo in esame

$E_{trasm}$  = energia che fuoriesce dal corpo dopo averlo attraversato

Dividendo ogni contributo dell'equazione (1.2) per il termine  $E_{inc}$  si ha

$$\frac{E_{inc}}{E_{inc}} = \frac{E_{rifl}}{E_{inc}} + \frac{E_{ass}}{E_{inc}} + \frac{E_{trasm}}{E_{inc}} \quad (1.3)$$

da cui

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (1.4)$$

Dove  $\alpha$  rappresenta il coefficiente di riflessione,  $\rho$  quello di assorbimento e infine  $\tau$  quello di trasmissione. Questi coefficienti rappresentano delle vere e proprie caratteristiche del materiale che ne indicano rispettivamente la capacità di riflettere, assorbire e trasmettere la radiazione incidente [10].

### Corpo nero

Il concetto di corpo nero viene introdotto per valutare l'emissione spettrale di una superficie reale, in quanto esso rappresenta una **superficie ideale** di riferimento. Con il termine corpo nero si intende infatti un corpo ideale che gode delle seguenti proprietà:

- Assorbe tutta la radiazione incidente, da qualunque direzione e a qualunque lunghezza d'onda;
- Ad una fissata temperatura e lunghezza d'onda nessuna superficie può emettere più energia di un corpo nero;
- E' un *emettitore diffuso*, in quanto la radiazione emessa è la stessa in tutte le direzioni.

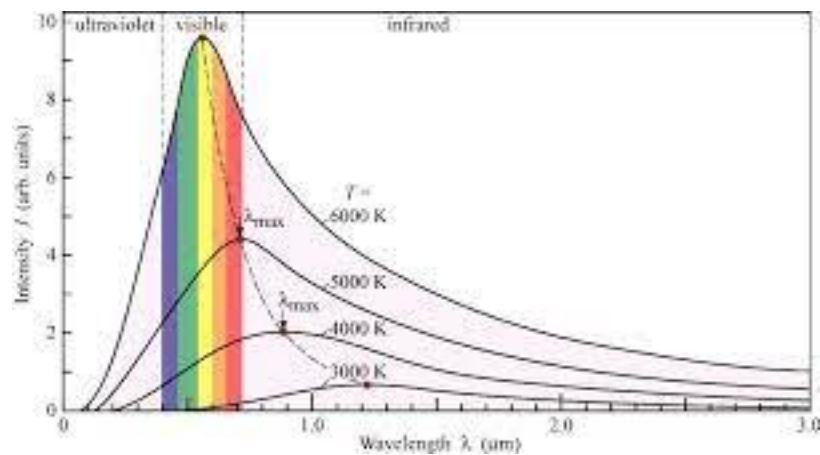
La potenza emessa da un corpo nero alla temperatura assoluta  $T$  per un'unità di superficie emittente è descritta dalla **legge di Stefan-Boltzmann**:

$$E_n(T) = \sigma T^4 \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1.5)$$

dove  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$  rappresenta la costante di Stefan-Boltzmann.

Per il calcolo invece della lunghezza d'onda per la quale si raggiunge il massimo del potere emissivo spettrale del corpo nero nota la temperatura assoluta  $T$  del corpo nero risulta utile l'utilizzo della **legge dello spostamento di Wien** (Fig.1.3) [11]:

$$\lambda_{max,em} T = 2897,8 \quad [\mu m \cdot K] \quad (1.6)$$



**Figura 1.3: Radiazione del corpo nero.** Il grafico mostra come all'aumentare della temperatura il massimo di emissione si sposta verso lunghezze d'onda minori e quindi verso energie maggiori.

### Irraggiamento termico da superfici reali

Come già anticipato, il caso del corpo nero rappresenta un modello ideale che si differenzia da una superficie reale in quanto questa non è nè perfettamente assorbente nè perfettamente emittente. In questo caso è stata introdotta un grandezza adimensionale, l'**emissività**, che confronta la capacità di emettere di una superficie reale a quella che avrebbe un corpo nero alla stessa temperatura superficiale e lunghezza d'onda:

$$\varepsilon(T, \lambda) = \frac{E(T, \lambda)}{E_b(T, \lambda)} = \frac{E(T, \lambda)}{\sigma T^4} \quad (1.7)$$

Come evidenziato in precedenza, lo scambio termico per irraggiamento dipende sia dalla lunghezza d'onda che dalla direzione e dalla temperatura; nelle applicazioni pratiche si utilizza però l'approssimazione secondo cui le superfici emittenti, o comunque comprese in un campo radiante, emettono in maniera perfettamente diffusa (ovvero la radiazione emessa non dipende dalla direzione). Inoltre, le proprietà dei materiali (coefficiente di assorbimento, riflessione e trasmissione) sono considerate indipendenti dalla lunghezza d'onda. Tali superfici sono dette **corpi grigi** (Fig. 1.4).

Nota l'emissività di un corpo grigio basta moltiplicarla per l'emissione totale del corpo nero per ottenere l'emissione globale del corpo grigio stesso [11]:

$$E(T) = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1.8)$$

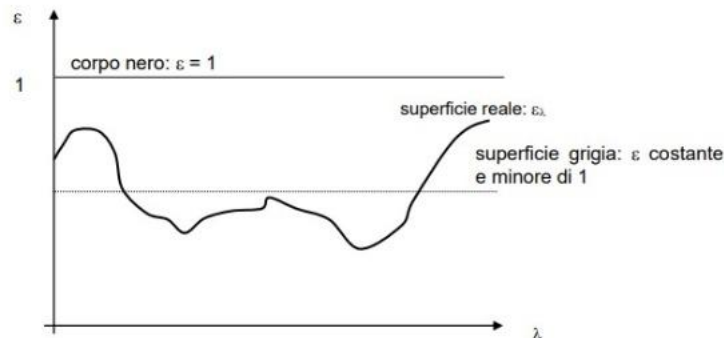
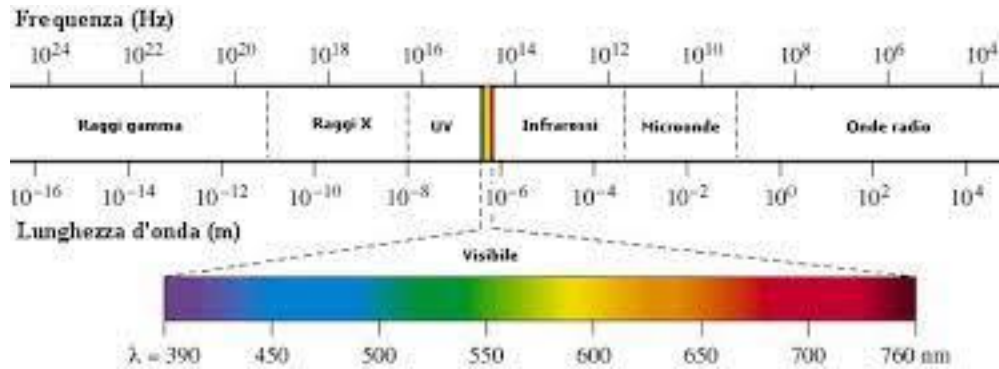


Figura 1.4: Confronto tra le emissività di diverse superfici.

#### 1.2.1 Termografia infrarossa

La termografia è una tecnica di analisi non distruttiva che si basa sull'acquisizione di immagini nell'infrarosso (Fig.1.5) e permette di misurare la

radiazione emessa da un qualsiasi corpo a una temperatura maggiore dello zero assoluto. Con il termine termografia infrarossa si intende quindi la *visualizzazione bidimensionale della misura d'irraggiamento* [12].



**Figura 1.5: Spettro elettromagnetico.**

L'utilizzo di una **termocamera** consente di effettuare controlli di tipo termografico non distruttivi e non intrusivi. L'acquisizione delle immagini avviene come già anticipato nel campo dell'infrarosso, a lunghezze d'onda comprese tra i  $2\mu m$  e i  $13\mu m$ , che vengono generalmente suddivise in:

- short wave (SW) comprese nell'intervallo  $[2 \div 5]\mu m$ ;
- long wave (LW) comprese nell'intervallo  $[8 \div 13]\mu m$ .

La radiazione infrarossa viene fortemente assorbita dal vapore acqueo e dall'anidride carbonica presente nell'atmosfera. Quest'ultima è maggiormente trasparente all'infrarosso nella banda spettrale compresa tra  $[3 \div 5,6]\mu m$  e  $[7,5 \div 14]\mu m$ ; tra questi due intervalli vi è una zona relativamente opaca in cui l'atmosfera assorbe tutte le radiazioni presenti (Fig. 1.6) [13].

L'elemento fondamentale in una termocamera è rappresentato dal **sen-  
sore**, che ne condiziona le prestazioni e le potenzialità di utilizzo ed è anche la componente che in maniera maggiore influisce sul costo. E' rappresentato da una matrice bidimensionale (FPA: Focal Plane Array) costituita da un reticolo di singoli rilevatori (*detector*) identici. Ogni singolo detector si comporta come un trasduttore che rileva l'intensità di radiazione infrarossa che l'ottica focalizza su di esso e la invia al sistema elettronico di elaborazione dell'immagine.

Nelle termocamere di ultima generazione si sono affermate due classi di sensori:

- sensori bolometrici, che appartengono alla famiglia dei sensori termici;

- sensori fotoelettrici, che appartengono alla famiglia dei sensori quantici.

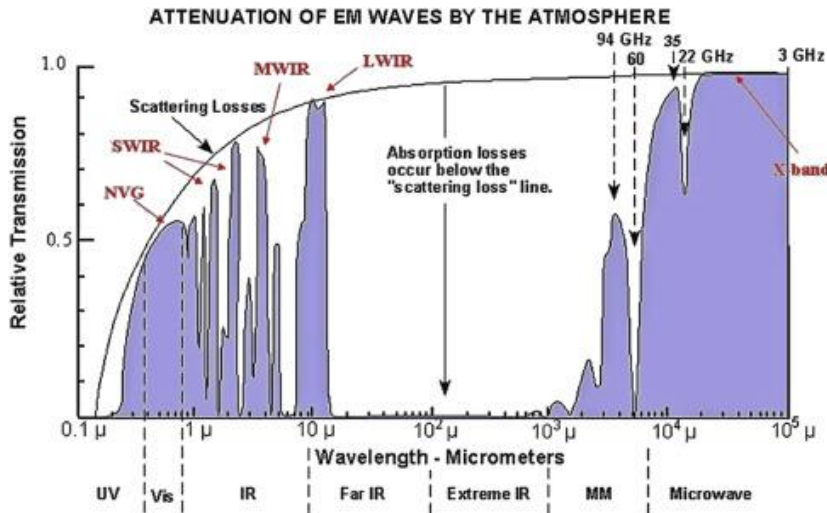


Figura 1.6: Attenuazione atmosferica nello spettro elettromagnetico.

I **sensori bolometrici** sono dei termistori che quando vengono investiti dalla radiazione subiscono un riscaldamento che ha come conseguenza la modifica della conduttività elettrica del materiale. La variazione di corrente prodotta dalla radiazione incidente può essere rilevata per ottenere una misura della temperatura. Le principali caratteristiche di questi dispositivi possono essere così riassunte:

- Hanno una risoluzione termica e dei costi minori rispetto ai sensori fotoelettrici;
- Sono sensibili ad un ampio range di lunghezze d'onda, in particolare quelle comprese nelle LW infrared;
- Non necessitano di un sistema di raffreddamento e sono perciò impiegati nelle termocamere portatili [14].

I **sensori fotonici** invece, come già suggerito dal nome, lavorano in accordo al fenomeno dell'effetto fotoelettrico; sono direttamente sensibili alla radiazione, la quale produce una differenza di potenziale che è direttamente proporzionale alla radiazione stessa. Rispetto ai precedenti presentano le seguenti proprietà:

- Hanno una risposta più rapida in quanto non hanno bisogno di riscaldamento;

- Hanno una risoluzione termica più elevata;
- Necessitano di un sistema di raffreddamento. [14].

I principali sistemi di raffreddamento adottati in ordine di sviluppo tecnologico sono:

- Vaporizzazione di azoto liquido o elio liquido;
- Espansione di Argon o altri gas;
- Refrigeratori termoelettrici ad effetto Peltier;
- Apparatı di refrigerazione multistadio a ciclo Stirling [15].

### NEDT (Noise Equivalent Differential Temperature)

Con l'acronimo NEDT si fa riferimento alla *sensibilità termica* del sensore. In particolare esso esprime la minima differenza di temperatura percepibile dalla termocamera, espressa come differenza di potenziale. Differenze di temperatura inferiore al valore NEDT non sono rilevabili in un'immagine termica in quanto sono inferiori al rumore di fondo.

Per superfici ad emissività unitaria si ha:

$$\Delta T_{min} = NEDT = \frac{\Delta V_{min}}{k \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) \cdot \frac{\delta E(\lambda, T_s)}{\delta T} \cdot \Delta A \cdot d\lambda} \quad (1.9)$$

Per quanto descritto, la termocamera presenterà una maggiore precisione tanto più il valore NEDT sarà basso. Esso non ha nulla a che fare con la precisione di misura, dato che non riguarda la precisione di misura di un singolo punto, ma la differenza di temperatura tra due punti della stessa immagine [15].

### IFOV (Instantaneous Field Of View)

Il campo di vista istantaneo rappresenta l'angolo solido monitorato dal singolo rilevatore di un sensore FPA. Indica la capacità di un'ottica di vedere e misurare la temperatura di un'area puntiforme all'interno di un'immagine termica. Essendo una misura di spazio, questa viene calcolata in *mrad*, milliradiani.

Il campo di vista totale di una termocamera ad una certa distanza  $d$  dall'oggetto, ha dimensione verticale e orizzontale espresse rispettivamente dalle grandezze  $VFOV$  e  $HFOV$ :

$$VFOV = 2d \tan\left(\frac{\theta_x}{2}\right) \quad (1.10)$$



$$HFOV = 2d \tan\left(\frac{\theta_y}{2}\right) \quad (1.11)$$

Mentre la risoluzione geometrica ad una distanza  $d$  dall'oggetto è data dall' $I\text{FOV}$ :

$$I\text{FOV}_x = \frac{H\text{FOV}}{N\text{Pixel}_x} \quad I\text{FOV}_y = \frac{V\text{FOV}}{N\text{Pixel}_y} \quad (1.12)$$

Essa rappresenta il numero di pixel in un'immagine termica. Questa grandezza influenza la qualità dell'informazione poichè ci dà indicazione su quanto più piccoli sono gli oggetti che è possibile inquadrare ad ogni distanza. Più piccolo è l' $I\text{FOV}$ , migliori saranno le prestazioni della termocamera per un dato  $\text{FOV}$ . L' $I\text{FOV}$  per una termocamera dipende quindi da:

- numero di pixel del sensore;
- apertura del fascio ottico della lente, ovvero  $\text{FOV}$  [15].

### Frame Rate

La frequenza di acquisizione rappresenta il numero massimo di immagini termiche acquisibili in sequenza nell'unità di tempo. E' un parametro fondamentale nel caso di acquisizioni di oggetti in movimento oppure nell'eventualità in cui l'operatore muova lo strumento durante la misurazione. Le termocamere con un frame rate  $\geq 60\text{Hz}$  ricoprono la maggior parte delle applicazioni [15].

### 1.2.2 Analisi infrarossa dell'attività respiratoria

Sin dall'inizio dello scoppio della pandemia è apparsa evidente l'esigenza di effettuare controlli sperimentali sull'effettiva funzionalità delle mascherine. Sono state impiegate diverse tecniche per la visualizzazione del flusso respiratorio in uscita dai differenti dispositivi di protezione ([16],[17]), la maggior parte delle quali si presenta come una metodologia invasiva e non sicura per il paziente. Di fronte a queste problematiche gli studi sono stati eseguiti su manichini e polmoni simulati piuttosto che su persone vere [16]. E' opportuno sottolineare che l'estrapolazione del flusso respiratorio simulato, oltre alla difficoltà di replicazione, rappresenta uno scenario che in parte si discosta da quello reale.

Si è mostrato invece interessante l'impiego della termografia infrarossa, la quale si presenta come una tecnica completamente non invasiva e sicura per essere utilizzata su persone vere. L'abilità delle termocamere di visualizzare flussi di gas sotto certe condizioni porta ad un potenziale approccio per sfruttare l'acquisizione infrarossa. In particolare, a causa della banda

di assorbimento del biossido di carbonio intorno ai  $4,3 \mu m$  ogni variazione della sua concentrazione è rilevabile da termocamere che lavorano nelle onde medie dell'infrarosso ( $3 \div 5 \mu m$ ). La misura di questa variazione rappresenta infatti uno dei due approcci che possono essere impiegati per lo studio delle caratteristiche della respirazione attraverso termocamere; il secondo meccanismo propone lo studio dell'incremento della temperatura della pelle vicino alle narici a causa della periodica espirazione di aria calda dai polmoni [16].

La funzione respiratoria consiste in cicli di inspirazione ed espirazione durante i quali si verificano degli scambi di calore tra i flussi d'aria e le narici. Questi scambi generano un segnale termico periodico o semiperiodico in prossimità delle narici che oscilla tra valori alti (durante l'espirazione) e bassi valori (durante l'inspirazione). Questo fenomeno può essere visualizzato attraverso acquisizioni termografiche. Negli studi respiratori classici un termistore è posizionato vicino alle narici in modo tale da poter catturare questo processo; la termografia si comporta quindi come un termistore virtuale poichè cattura lo stesso fenomeno ma a distanza. La stima della frequenza respiratoria misurata con questa tecnica è molto accurata come mostrato dal confronto tra i flussi d'aria monitorati con immagini termiche e con termistori oro-nasali (coefficiente di correlazione  $k = 0,92$ ) [18].

Studi precedenti hanno dimostrato come la presenza di una qualsiasi mascherina protettiva durante queste acquisizioni faciliti l'utilizzo delle tecniche basate sull'infrarosso per monitorare il numero di respiri al minuto e la loro variabilità [16].

C'è da sottolineare però che il metodo termografico individua solamente l'incremento di biossido di carbonio nell'aria prodotta durante l'espirazione. Sebbene anche le droplets possano emettere e diffondere la radiazione infrarossa, le termocamere non riescono a distinguere le sorgenti di radiazioni (gas, aerosol o droplets). Poichè la grandezza delle particelle in aria ha ordini di grandezza maggiori rispetto alle molecole d'aria, come la  $CO_2$ , la loro dinamica non segue interamente quella dell'aria espirata [16].

# Capitolo 2

## Set up sperimentale

Alla luce di quanto appena descritto, la termografia infrarossa rappresenta un metodo efficace per lo studio del flusso respiratorio. In questo capitolo vengono descritte nello specifico tutte le modalità e le strumentazioni adottate durante le prove effettuate.

### 2.1 Strumentazione e procedura sperimentale

In questo studio è stato utilizzato un approccio ad infrarossi per catturare il flusso espirato durante la respirazione e il colpo di tosse. In particolare è stata misurata la variazione termica in prossimità del volto dei soggetti in esame sia senza mascherina che durante l'utilizzo di un dispositivo di protezione individuale (mascherina chirurgica e mascherina FFP2).

L'esperimento è stato condotto in una stanza di laboratorio opportunamente raffreddata ed ha richiesto il coinvolgimento di tre soggetti, due maschi e una femmina. Prima di ogni acquisizione è stata effettuata la lettura dei valori di **temperatura** e **umidità relativa**, poichè non tutti i filmati sono stati catturati lo stesso giorno. Il segnale elettromagnetico rilevato dalla termocamera non è semplicemente la radiazione termica della materia osservata ma comprende anche la radiazione riflessa dai corpi, la radiazione trasmessa attraverso i corpi ed è soggetto ad assorbimento da parte dell'atmosfera; la distanza dalla sorgente, l'umidità e la temperatura ambiente sono pertanto valori di cui è necessario tenere conto. La distanza e l'umidità influenzano la quantità di radiazione assorbita o emessa da parte dell'atmosfera mentre la temperatura ambientale è associata alla quantità di radiazione riflessa o trasmessa dai corpi, a loro volta caratterizzati da una riflessività e trasmissività caratteristiche [19].

Nello specifico le acquisizioni sono avvenute in due giornate distinte, durante le quali sono stati misurati i seguenti parametri: il primo set di acquisizioni è avvenuto ad una temperatura di 19°C con un'umidità relativa del 44%, mentre nella seconda giornata, che ha coinvolto gli altri due soggetti, è stata registrata una temperatura di 27°C e un'umidità relativa del 40%.

Durante le prove i partecipanti si trovavano seduti di fronte (e di lato) ad un telo nero, impiegato come sfondo termico uniforme, ad una distanza di 150 cm dalla termocamera. Questa lunghezza si è mantenuta costante per tutte le acquisizioni e per tutti i soggetti. E' stato inoltre richiesto ai soggetti di riuscire a mantenere per quanto possibile una posizione fissa, nonostante alcuni movimenti della testa fossero incontrollabili, specialmente durante il colpo di tosse.

Le acquisizioni delle immagini termiche sono state effettuate con una camera FLIR A655. Questo modello di termocamera dispone di 640x480 sensori microbolometrici non raffreddati in un range spettrale di  $[7,5 \div 14,0] \mu m$ . Poichè in questo studio la termocamera è stata impiegata per evidenziare le variazioni termiche indotte dall'aria espirata sulla temperatura dell'ambiente, l'accuratezza della prova è profondamente influenzata dalla sensibilità termica del sensore (NEDT); la termocamera in questione, nello specifico, rende visibili le differenze di temperatura di soli 30mK.

Le diverse acquisizioni sono state effettuate seguendo la stessa procedura per tutti i soggetti e viene di seguito presentata. All'inizio sono state catturate le immagini termiche sul piano frontale senza mascherina. Il soggetto è stato invitato ad effettuare due respiri profondi seguiti successivamente, dopo un intervallo di pochi secondi, da due colpi di tosse. La stessa sequenza è stata ripetuta mentre il soggetto indossava, una dopo l'altra, una mascherina chirurgica e una mascherina di tipo FFP2. Ogni volta la mascherina è stata indossata correttamente coprendo naso e bocca del soggetto in esame. Sono state sempre utilizzate mascherine nuove.

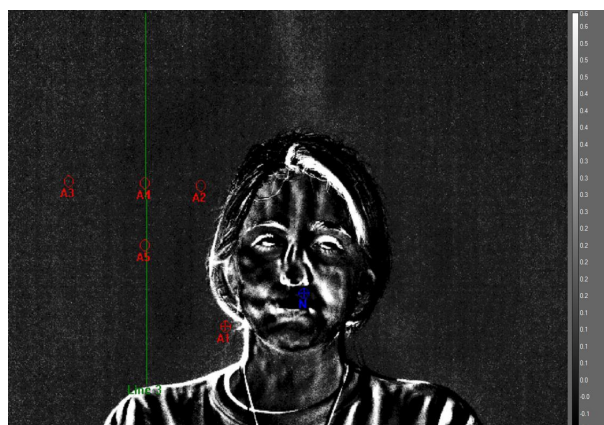
Questa identica procedura è stata poi mantenuta per tutte le acquisizioni effettuate di profilo.

### 2.1.1 Processamento immagini termiche

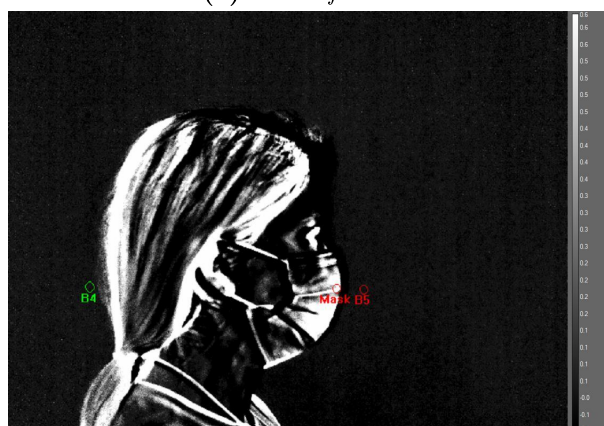
Nessuna mascherina di quelle trattate in questo studio ci garantisce una protezione completamente ermetica e di conseguenza una parte dell'aria espirata esce tra le piccole aperture che sono presenti tra il dispositivo stesso e il viso. Sono state proprio queste fuoriuscite il fulcro delle nostre analisi.

La post produzione è avvenuta con l'utilizzo del programma FLIR Research IR Max. Questo ci ha permesso di individuare e mettere in evidenza il cloud di particelle in uscita dai diversi dispositivi di protezione. A tal

proposito sono state scelte la palette e le scale di temperatura che meglio hanno permesso di far risaltare il flusso espirato. Il contrasto è stato inoltre rafforzato applicando l'operazione di sottrazione d'immagini; in particolare, dopo diverse prove, l'estrazione del primo frame di ogni acquisizione ci ha permesso di ottenere un risultato ottimale.



(a) Piano frontale



(b) Piano laterale

**Figura 2.1:** Le immagini mostrano la disposizione dei ROI scelta per le acquisizioni effettuate sui due piani (a) e (b).

La diffusione del flusso in uscita dalle mascherine è stato studiato utilizzando diversi **ROI (Region Of Interest)** disposti in maniera ripetuta per tutti i soggetti (Fig. 2.1). Nello specifico, per quanto riguarda le acquisizioni frontali, sono stati selezionati cinque ROI nell'area destra di diffusione delle particelle espirate, mentre uno è stato applicato al di sotto della narice sinistra (Fig. 2.1a). Quest'ultimo ci è servito per dimostrare l'incremento di temperatura della pelle intorno alla regione d'interesse a causa della perio-

dica espirazione di aria calda dai polmoni. Nel caso in cui i soggetti stavano indossando una mascherina, essendo queste in genere fabbricate con materiali a basso calore specifico, si è visto che esse rispondono rapidamente alle disomogeneità del flusso termico riflettendo correttamente l'attività respiratoria. Una disposizione diversa è stata invece scelta per le immagini laterali; il primo ROI è stato posizionato davanti al viso del soggetto, il secondo dietro la nuca appena sopra il collo e il terzo, infine, in prossimità della narice, senza mai però sovrapporsi alla pelle del soggetto (Fig. 2.1b).

I ROI utilizzati avevano la forma di un cerchio che racchiude un certo numero di pixel al suo interno; di questi è stato preso come riferimento il valore medio delle variazioni di temperatura registrate. Di conseguenza il loro utilizzo è stato propedeutico per estrarre i dati che, opportunamente elaborati e graficati su Excel, ci hanno permesso di effettuare considerazioni e confronti tra le acquisizioni dei diversi soggetti. Questi dati sono stati estratti a seguito della visualizzazione, attraverso dei *temporal plot*, dell'andamento delle differenze di temperatura in funzione del tempo.

Altre informazioni sono state invece estratte utilizzando una linea tracciata a partire dall'inizio dell'immagine fino alla spalla del soggetto, avendo cura che questa attraversasse il centro del cloud (Fig. 2.1a). In questo caso, utilizzando un *profile plot*, abbiamo ottenuto l'andamento delle differenze di temperatura in funzione dei pixel dei frame dell'immagine selezionati. Questa operazione ci ha permesso di ricavare informazioni riguardo alla dinamica di diffusione del cloud, in particolare della sua estensione nei tre casi (senza mascherina, con mascherina chirurgica, con mascherina FFP2) e tra i diversi soggetti. Questa particolare analisi è stata effettuata solamente per le acquisizioni frontali.

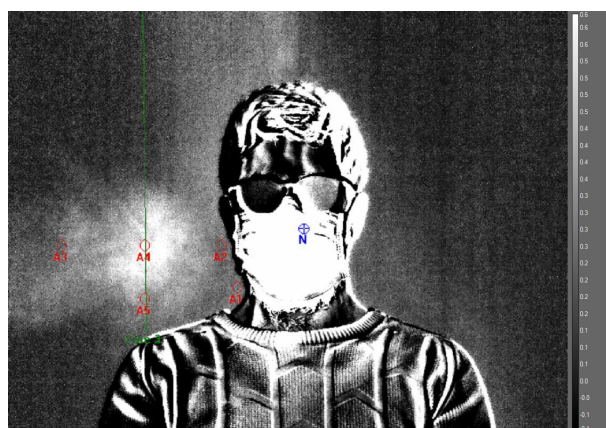
## 2.2 Test preliminari

Prima dei test veri e propri è stato necessario effettuare delle acquisizioni preliminari per stabilire i parametri ottimali per le prove.

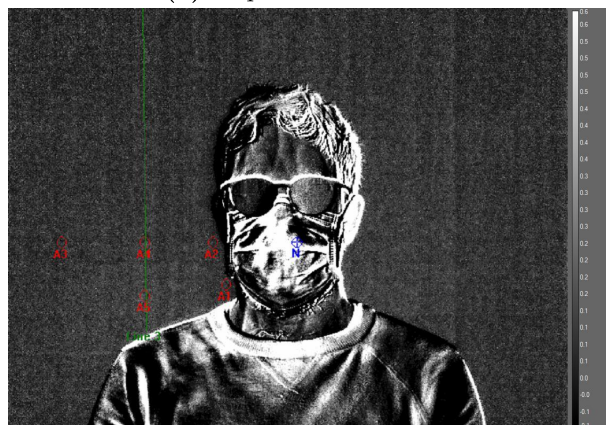
Come prima cosa abbiamo ritenuto fondamentale l'utilizzo di un telo nero come sfondo. Confrontando diverse immagini termiche con e senza schermo (Fig. 2.2), abbiamo notato che nel secondo caso risultava difficile l'individuazione del flusso in uscita dalle mascherine. Questo problema è riconducibile alle caratteristiche intrinseche della termocamera stessa. Come anticipato nel capitolo precedente, la banda di assorbimento del biossido di carbonio (principale componente del flusso d'aria espirato) è di circa  $4,3\mu m$ . In questo studio abbiamo invece utilizzato una camera che lavora nell'intervallo di lunghezze d'onda  $[7,5 \div 14,0] \mu m$ . L'utilizzo del telo è stato fondamentale

perchè ci ha permesso di individuare l'aumento di temperatura su di esso data dall'aria più calda espirata. Nel caso contrario invece, a causa della superficie di appoggio metallica altamente riflettente sullo sfondo, non è stato possibile cogliere il riscaldamento.

Un ulteriore conferma di quanto appena detto ci è stata fornita sperimentalmente confrontando prove effettuate a distanze diverse dallo schermo posteriore (Fig.2.3). Mantenendo fissa la posizione della termocamera, la seduta è stata spostata in avanti a 120 cm dalla stessa.



(a) *Acquisizione con telo*

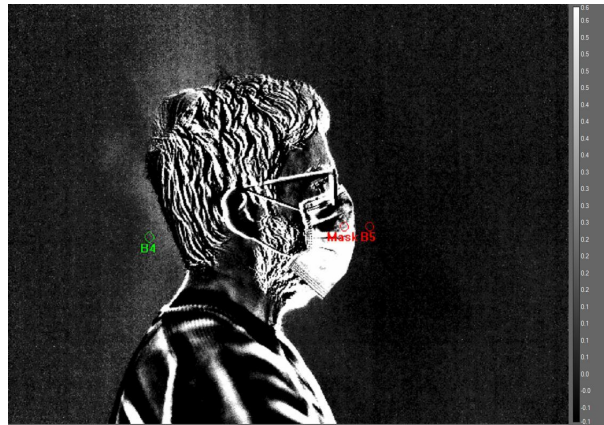


(b) *Acquisizione senza telo*

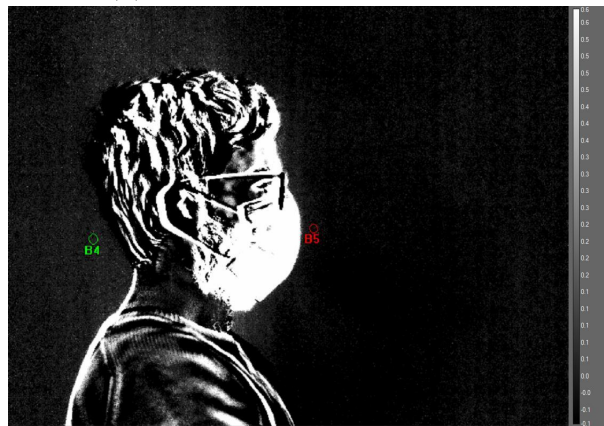
**Figura 2.2:** La figura mostra il confronto tra le due acquisizioni nell'istante immediatamente successivo al primo colpo di tosse.

I filmati termici ottenuti non hanno portato a risultati evidenti, a riprova del fatto che la posizione ottimale risultava essere quella per cui il soggetto si trovava con il volto il più vicino possibile allo sfondo, in modo tale da poter

visualizzare il riscaldamento sullo schermo prodotto dalle fuoriuscite di flusso attraverso le aperture laterali delle mascherine.



(a) *Acquisizione vicina allo sfondo*



(b) *Acquisizione lontano dallo sfondo*

**Figura 2.3**

Durante questa fase di prime acquisizioni è avvenuta anche la calibrazione della funzione **NUC** (*Non Uniformity Correction*). Questo è un parametro standard per le termocamere con sensori microbolometrici FPA. Uno svantaggio di questi sensori è la tendenza alla "deriva" durante il funzionamento, ovvero alla variazione nella loro risposta all'energia emessa dall'oggetto. Questo causa la formazione di aree nell'immagine con pixel che appaiono inspiegabilmente caldi o freddi, comportando una misura della temperatura non accurata. Il NUC è la funzione che consente la periodica correzione di questi effetti resettando l'immagine tramite l'allineamento di tutti i pixel del sensore allo stesso valore; questa operazione può essere automatica o manuale e deve essere ripetuta ad intervalli regolari [15]. Per evitare quindi delle



distorsioni nelle immagini acquisite, questa funzione è stata modificata da automatica a manuale ed eseguita all'inizio di ogni prova.

# Capitolo 3

## Risultati

In questo capitolo vengono presentati e discussi in maniera dettagliata tutti i dati estrapolati dalle diverse prove effettuate, con annessi i confronti tra i punti più interessanti che sono stati individuati.

### 3.1 Soggetto 1

Il primo soggetto sottoposto allo studio è stato un maschio. L'acquisizione è avvenuta in un ambiente raffreddato ad una temperatura di 19°C e con un'umidità relativa del 44%.

#### 3.1.1 Acquisizioni frontali

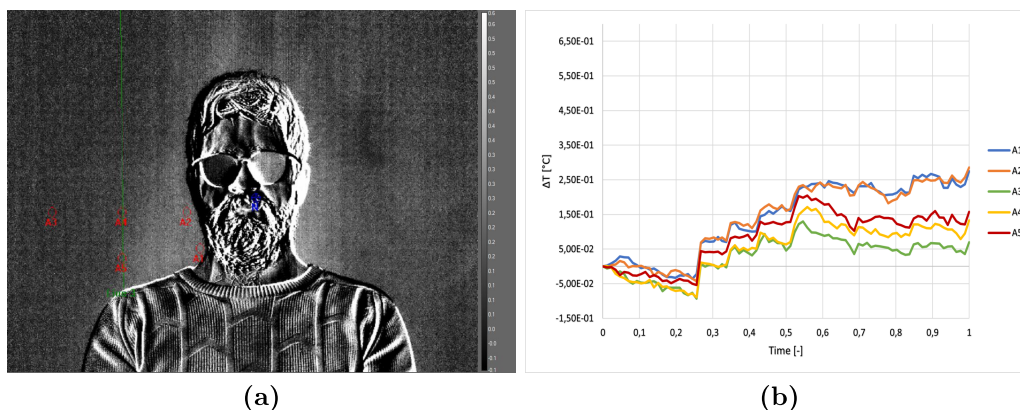
Il primo set di acquisizioni, come poi è avvenuto anche per gli altri due soggetti a seguire, è stata effettuata sul piano frontale. Analizziamo quindi nello specifico i risultati ottenuti nei tre diversi casi (senza mascherina, con mascherina chirurgica e con mascherina FFP2).

##### Senza mascherina

Nella Fig. 3.1b è riportato l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (Fig. 3.1a) in funzione del tempo opportunamente adimensionalizzato. Questa operazione è stata effettuata per permettere successivamente di ottenere visivamente dei confronti migliori tra i risultati dei diversi soggetti ed è avvenuta nel seguente modo:

$$time = \frac{t_x}{t_{finale}} \quad (3.1)$$

dove  $t_x$  indica il particolare istante di tempo considerato e  $t_{finale}$  indica l'istante di tempo finale..



**Figura 3.1:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) nel caso senza mascherina.

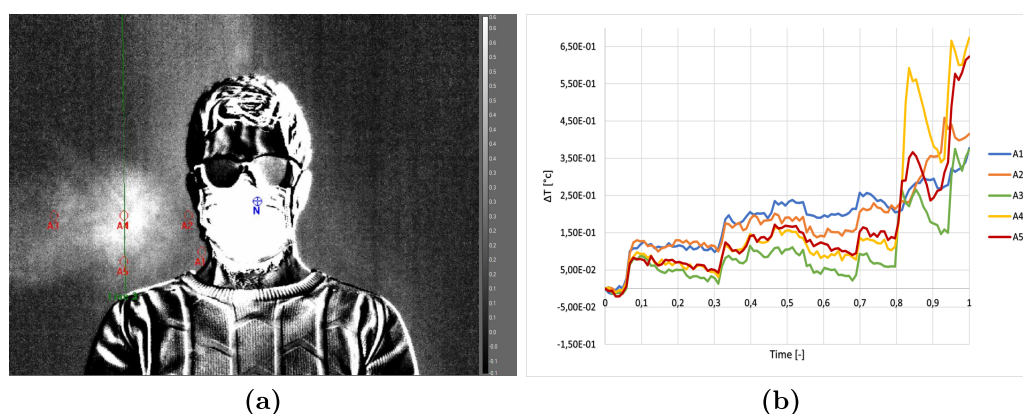
Il grafico (Fig. 3.1b) mostra che la dinamica di diffusione delle particelle espirate nel caso in cui non si indossi alcuna mascherina è tale per cui, con gli strumenti a disposizione, nessuna variazione termica sostanziale è rilevabile dai filmati acquisiti. Questa conclusione infatti, come vedremo, si manterrà costante per tutti i soggetti.

### Mascherina chirurgica

Diversi invece sono i risultati che sono stati ottenuti indossando una mascherina di tipo chirurgica. Proprio per la sua conformazione e per quanto descritto nel Cap. 1.1.1, questo dispositivo provoca delle fuoriuscite significative che sono evidenziate nella Fig. 3.2a. Il grafico nella Fig. 3.2b mostra che incrementi di temperatura maggiori si osservano in prossimità di A4 e A5; infatti questi sono i punti che sono stati posizionati proprio al centro del cloud di particelle.

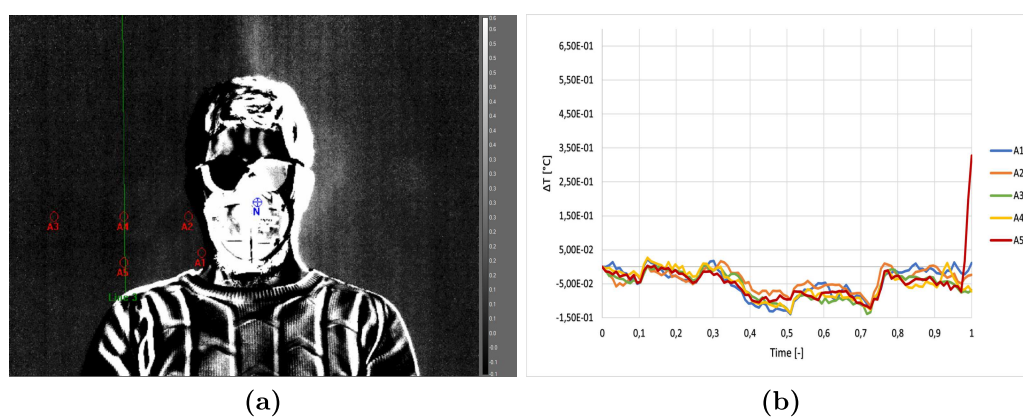
### Mascherina FFP2

Indossando una mascherina di tipo FFP2 invece si sono riscontrati dei risultati piuttosto diversi rispetto a quelli trovati con la mascherina chirurgica. Come evidenziato dal grafico (Fig. 3.3b), infatti, le variazioni di temperatura individuate nelle zone prossime al volto sono molto limitate; questo è dovuto al fatto che la mascherina FFP2, oltre ad un grado di protezione maggiore,



**Figura 3.2:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina chirurgica.

offre una forma che si adatta meglio, in questo caso, alla conformazione del viso del soggetto in esame.



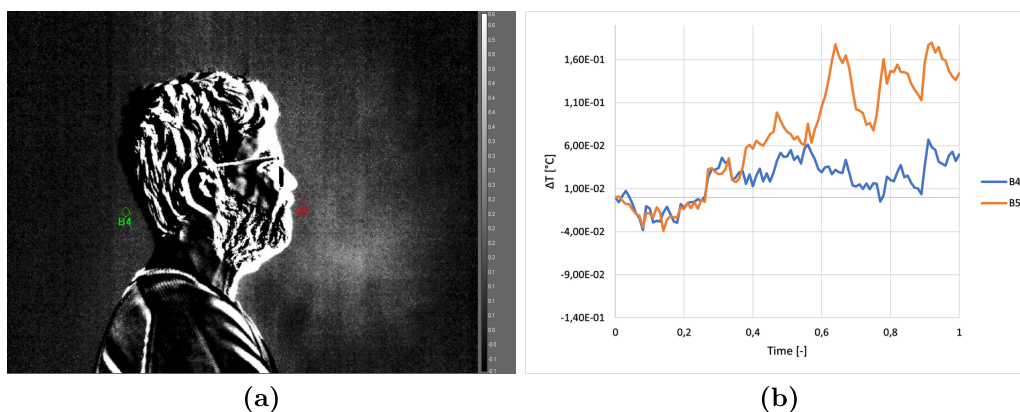
**Figura 3.3:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina FFP2.

### 3.1.2 Acquisizioni laterali

Dopo le prime acquisizioni appena descritte, il secondo set di prove si è svolto richiedendo al soggetto di posizionarsi di profilo alla termocamera.

### Senza mascherina

In questo caso l'analisi si compone di soli due punti (B4 e B5). Il grafico nella Figura 3.4b ci mostra che senza mascherina si hanno delle variazioni di temperatura maggiori nelle zona al di sotto della narice e poca diffusione del flusso nella parte posteriore della testa.



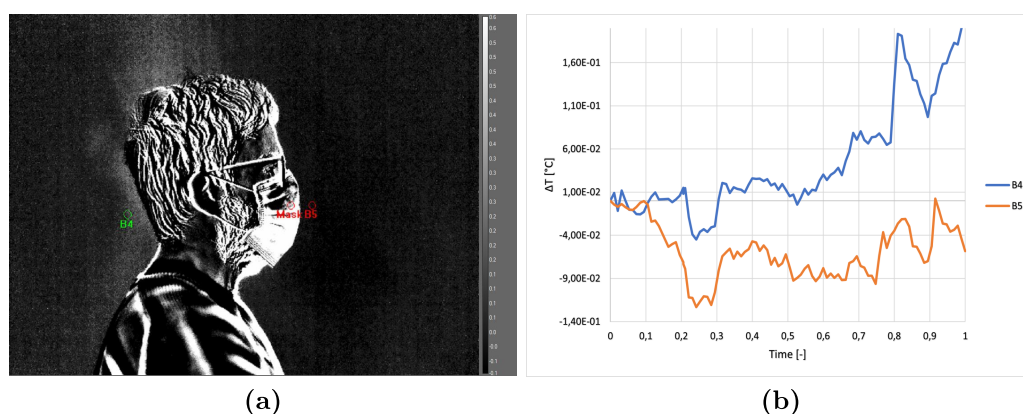
**Figura 3.4:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) nel caso senza mascherina.

### Mascherina chirurgica

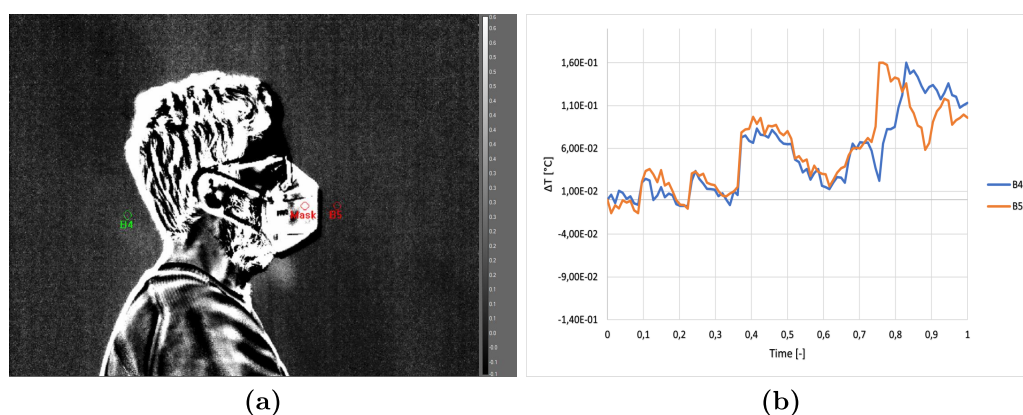
Risultati diversi si ottengono invece nella prova in cui il soggetto sta indossando una mascherina chirurgica. La Figura 3.5 ci fornisce informazioni sulla dinamica della situazione. Come mostrato dalla Fig. 3.5a, il flusso tende a diffondersi nella parte posteriore del volto; questo aspetto può essere valutato anche osservando il grafico (Fig. 3.5b) che mostra quantitativamente come il ROI B4 subisca un incremento di temperatura maggiore rispetto a quello posizionato davanti alla mascherina.

### Mascherina FFP2

Per quanto riguarda il caso in cui il soggetto indossi una mascherina FFP2, il grafico in Figura 3.6b non indica particolari differenze tra i punti B4 e B5. Come mostrato nella Figura 3.6a, si notano invece delle fuoriuscite sotto al mento. La mascherina FFP2 a differenza di quella chirurgica, infatti, tende a produrre delle aperture in quella zona.



**Figura 3.5:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina chirurgica.

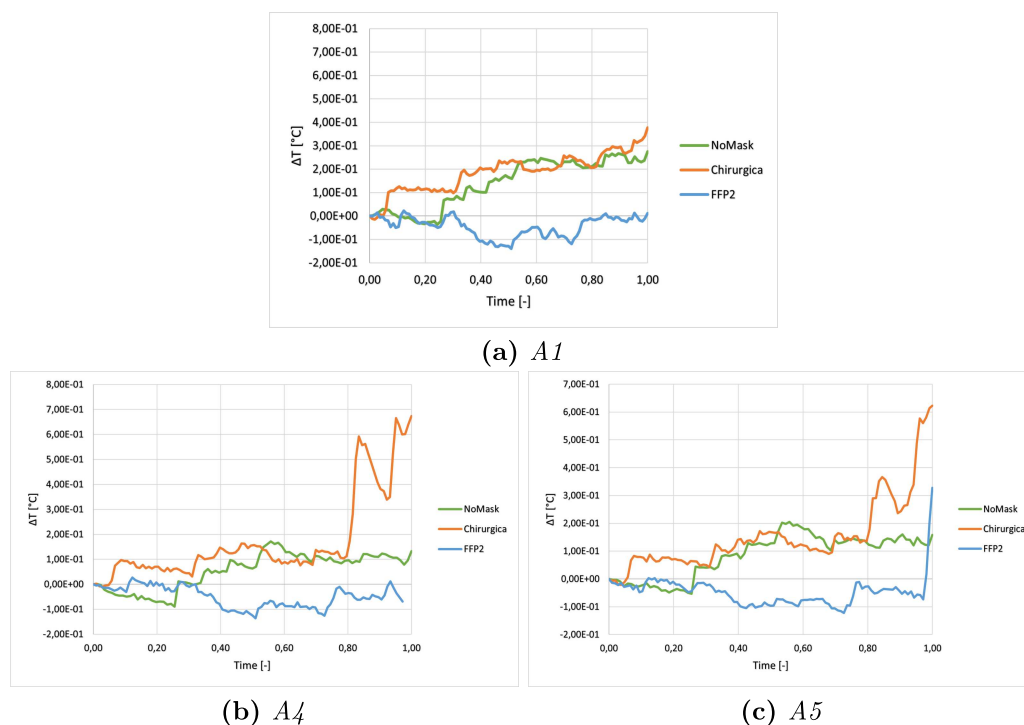


**Figura 3.6:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina FFP2.

### 3.1.3 Confronto tra i risultati

L'aspetto più interessante da considerare è probabilmente quello che si riferisce al confronto tra le diverse acquisizioni. Inizialmente abbiamo effettuato un parallelo tra i seguenti ROI: A1, A4, A5 (Fig. 3.7). In questo modo abbiamo considerato un primo punto appena accanto al viso (A1) e gli altri due che invece individuano il centro dell'area di diffusione delle droplets (A4 e A5). Per il soggetto in questione si può vedere che si hanno delle variazioni di temperatura significative solamente mentre questo indossa una mascherina chirurgica; difatti, la forma della stessa, provoca delle aperture in prossimi-

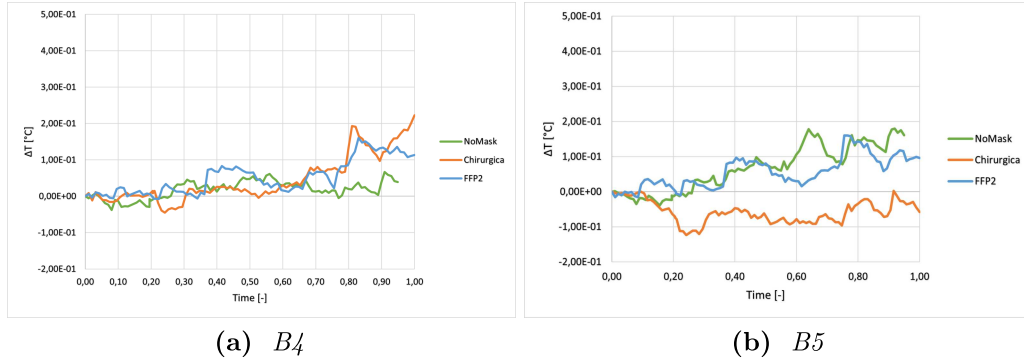
tà delle guance che causano una fuoriuscita importante del flusso. Non sono stati invece riscontrati, come anticipato, aumenti di temperatura significativi negli altri due casi.



**Figura 3.7:** I tre grafici mostrano gli andamenti delle variazioni di temperatura dei punti considerati nei tre casi (senza mascherina, con la mascherina chirurgica e con la mascherina FFP2) per il primo soggetto.

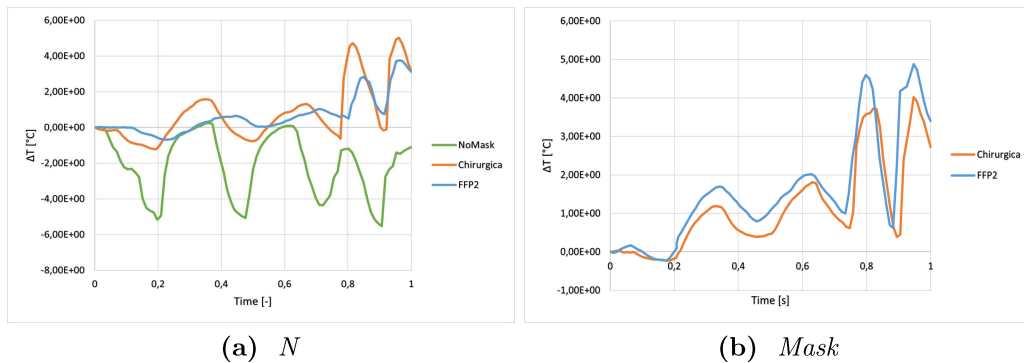
Proseguendo nelle acquisizioni effettuate di profilo, nella Fig. 3.8 vengono presentati i grafici che confrontano gli andamenti delle variazioni di temperatura per i ROI B4 e B5, posti rispettivamente dietro e davanti il volto del soggetto. Secondo quanto riportato dal grafico (Fig. 3.8a), nel caso in cui si indossi una mascherina chirurgica o una mascherina FFP2 si hanno delle fuoriuscite nell'area dietro al viso; niente di particolarmente significativo è stato invece riscontrato per il punto B5 (Fig. 3.8b). E' da sottolineare il fatto per cui se nei filmati termici acquisiti non si riscontrano delle perdite di flusso nella parte anteriore del viso non significa che effettivamente non ce ne siano. Le mascherine, per quanto siano da considerarsi un'efficace barriera contro la diffusione di particelle espirate, non offrono una protezione completamente ermetica. Il motivo per cui non si percepiscono queste perdite, così come accennato per le acquisizioni effettuate senza mascherina, è da riferir-

si alle caratteristiche della termocamera stessa e in particolare al suo range spettrale che non copre la banda di assorbimento dell'anidride carbonica.



**Figura 3.8:** La figura mostra gli andamenti registrati per i punti (a) e (b) nel primo soggetto.

Un altro andamento da tenere in considerazione è quello relativo al ROI che abbiamo posizionato al di sotto della narice (quello che abbiamo denominato "N" nella Fig. 3.3a) e quello che invece è stato utilizzato per le acquisizioni laterali ("Mask" nella Fig. 3.6a).



**Figura 3.9:** La figura mostra gli andamenti registrati per i punti (a) e (b) nel primo soggetto.

Il grafico (Fig. 3.9a) ci fornisce una buona rappresentazione delle fasi eseguite durante le prove; infatti, si riconoscono chiaramente le curve relative ai due respiri e ai due colpi di tosse. I picchi relativi agli aumenti delle variazioni di temperatura si trovano in corrispondenza delle due espirazioni e degli istanti appena successivi ai due colpi di tosse. In aggiunta si registra un riscaldamento maggiore mentre il soggetto è senza mascherina e mentre indossa la mascherina chirurgica. Per quanto riguarda invece l'altro punto



considerato (Fig.3.9b), anche in questo sono ben evidenti le fasi della respirazione e dei due colpi di tosse; i due casi considerati (con mascherina chirurgica e con mascherina FFP2) mostrano degli andamenti molto simili. L'aspetto che più colpisce è il fatto che nel punto N si osserva un incremento di temperatura maggiore durante l'utilizzo della mascherina chirurgica; sul piano laterale invece, è sempre la mascherina FFP2 che subisce un riscaldamento più grande. Quest'ultimo risultato è quello che ci si dovrebbe aspettare anche nel caso delle acquisizioni frontali. Poiché la mascherina FFP2 è per sua costruzione, un dispositivo che offre un grado di protezione maggiore rispetto alla chirurgica, di conseguenza, dovrebbe riuscire a trattenere una maggiore quantità di flusso e quindi subire un riscaldamento maggiore. Per spiegare quanto osservato occorre introdurre il concetto di **fattore di vista**. Infatti, l'entità della potenza termica scambiata per irraggiamento tra due o più corpi dipende dall'orientazione reciproca delle superfici, dalle loro proprietà radiative e dalle loro temperature. Il fattore di vista  $F_{ij}$  tra una superficie  $i$  e una superficie  $j$  è la frazione di energia emessa da  $i$  che incide direttamente su  $j$ . Questa grandezza è puramente geometrica e dipende solo dalla posizione reciproca delle superfici [11]. La mascherina di tipo FFP2 è più rigida e tende ad assumere una forma triangolare che cade in maniera inclinata ai lati del viso; la chirurgica invece, più flessibile, segue le forme del volto. Per quanto appena detto, il ROI N applicato sulla mascherina FFP2 per le acquisizioni frontali, giace su una superficie che è più inclinata rispetto a quella che si ottiene con la mascherina chirurgica. Quanto appena detto, correlato al concetto di fattore di vista, spiega l'incongruenza tra la realtà e i dati acquisiti. Questi risultati, come vedremo, si ripeteranno anche per gli altri due soggetti a seguire.

Relativamente all'analisi delle linee, invece, sono stati estratti i seguenti frame (Fig. 3.10) e ne è stato visualizzato per ognuno il rispettivo profile plot:

- il primo nell'istante immediatamente antecedente il primo colpo di tosse;
- i due successivi a seguito del primo colpo di tosse;
- l'ultimo appena prima il secondo colpo di tosse.

Questa scelta è stata mantenuta anche per i soggetti successivi.

Nel grafico della Fig. 3.11, è riportato il risultato dei dati estrapolati dai profile plot dei frame scelti nel caso in cui il soggetto indossi la mascherina chirurgica. Il pixel 0 corrisponde all'inizio della linea nella parte alta dell'immagine, mentre il numero 400 si riferisce all'ultimo pixel che cade all'inizio

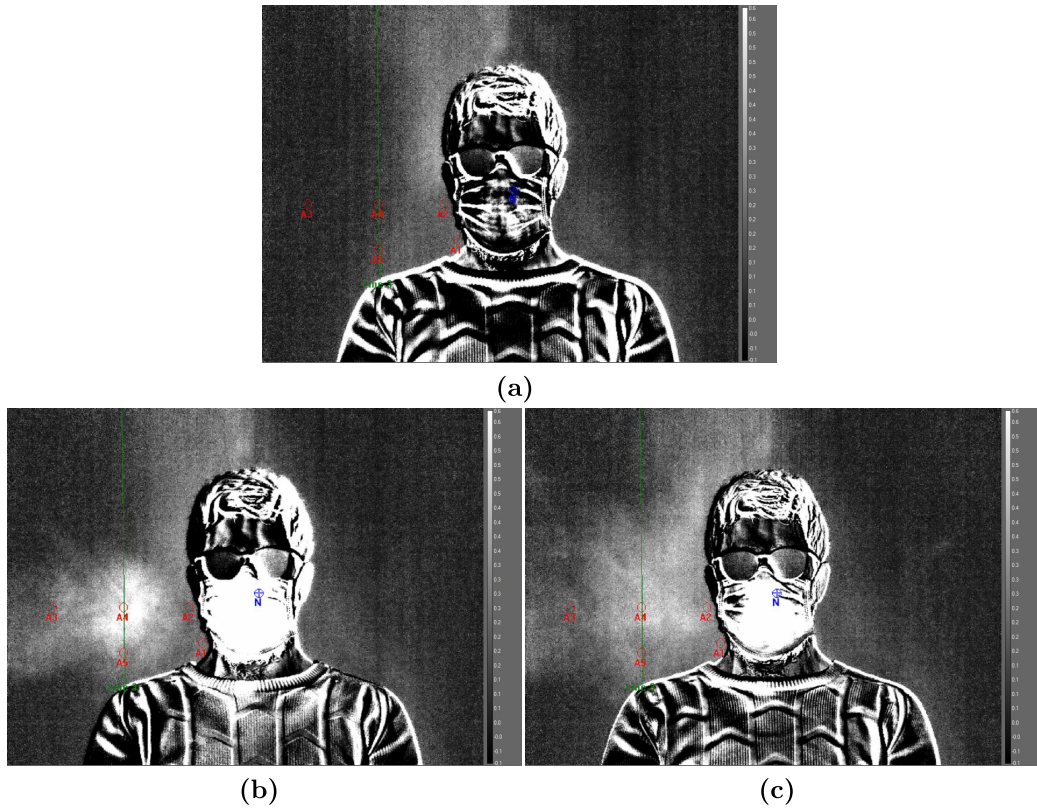


Figura 3.10: Esempio di sequenza dei frame scelti per le analisi.

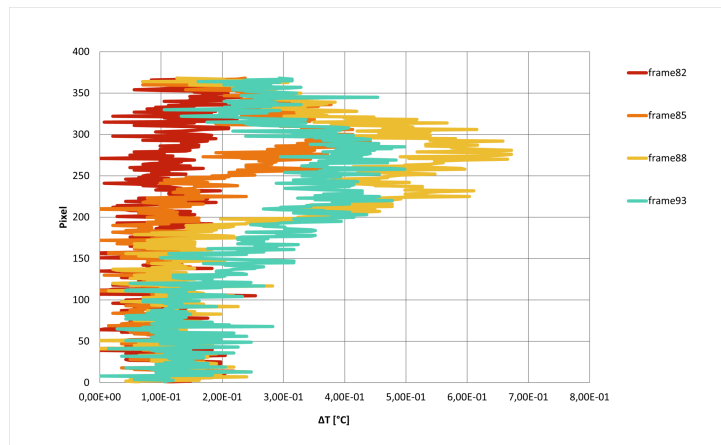
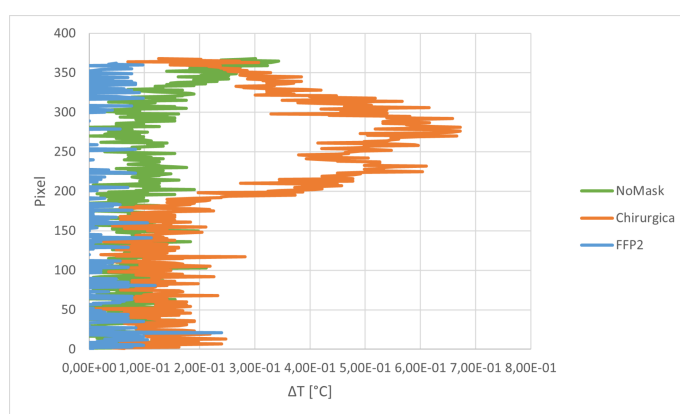


Figura 3.11: Analisi dei frame scelti nel caso in cui il primo soggetto indossa la mascherina chirurgica

della spalla del soggetto. Questo tipo di studio, come già anticipato, ci fornisce una visualizzazione della dinamica di estensione del cloud. Come si può vedere, infatti, i picchi relativi alle maggiori variazioni di temperatura si assistono nell'area prossima all'apertura della mascherina come già evidenziato dalle immagini termiche acquisite (Fig. 3.10b). Inoltre si può notare come il flusso tende a diffondersi in direzione verticale e il punto di massima temperatura dei frame scelti tende a spostarsi verso l'alto.

Anche in questo caso appare però interessante andare ad effettuare un confronto tra le tre prove effettuate (Fig. 3.12). Per ogni prova è stato preso come riferimento il frame che forniva valori di variazioni di temperatura maggiori. Il grafico in Fig.3.12 ci dà un'ulteriore conferma del fatto che con la mascherina chirurgica si hanno perdite più consistenti.



**Figura 3.12:** Confronto tra i profile plot nei tre casi (senza mascherina, con mascherina chirurgica, con mascherina FFP2) per il primo soggetto.

## 3.2 Soggetto 2

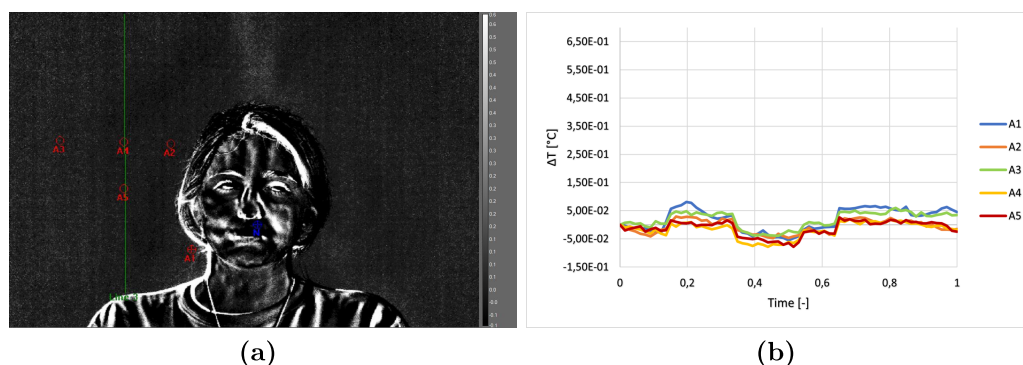
Il secondo doggetto che ha partecipato alla prova è stata una femmina. Le acquisizioni sono avvenute in questo caso alla temperatura di 27°C con un'umidità relativa del 40%.

### 3.2.1 Acquisizioni frontali

#### Senza mascherina

Iniziando ad effettuare delle analisi dei risultati ottenuti per il secondo soggetto, si nota dal grafico della Fig. 3.13b che non sono stati registrati valo-

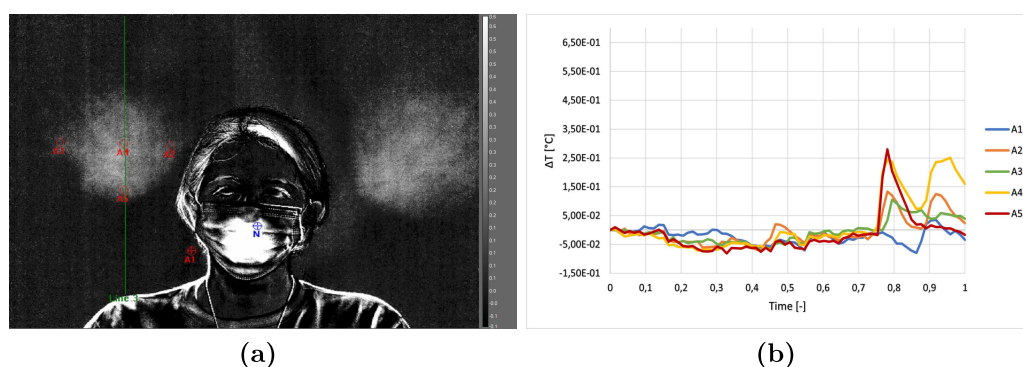
ri particolarmente significativi per quanto riguarda il caso senza mascherina.



**Figura 3.13:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) nel caso senza mascherina.

### Mascherina chirurgica

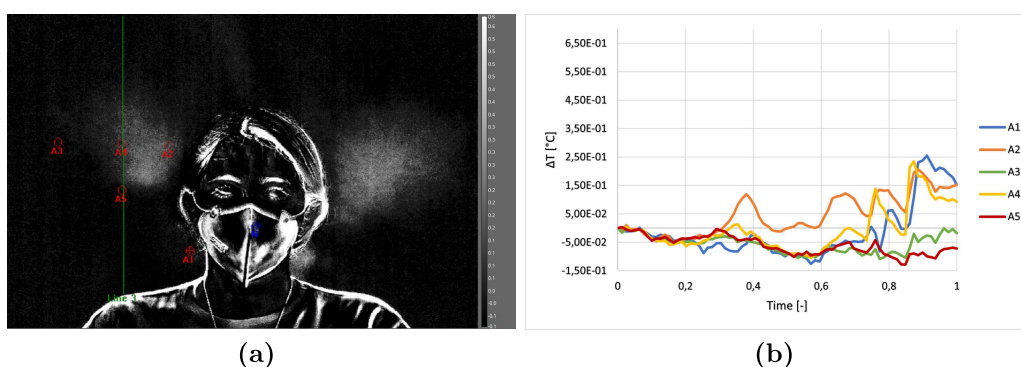
La Fig. 3.14 ci mostra quello che accade nel caso in cui il soggetto indossi una mascherina chirurgica. In questa situazione si registrano degli incrementi di temperatura a seguito del primo colpo di tosse, come si evince dal grafico in Fig. 3.14b. Questo ci mostra come i ROI A4 e A5 subiscano una variazione maggiore, data infatti dalla loro posizione centrale rispetto al cloud di diffusione delle particelle (Fig. 3.14a).



**Figura 3.14:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina chirurgica.

### Mascherina FFP2

Durante la prova in cui il soggetto ha indossato una mascherina di tipo FFP2, la dinamica di diffusione del flusso espirato ha seguito quello che si nota nella Figura 3.15a. Questo tipo di dispositivo sul volto della ragazza lascia delle aperture che permettono al flusso di fuoriuscire nella parte inferiore del mento. Infatti, il grafico 3.15b mostra degli incrementi di temperatura maggiori nella zona A1 prossima al volto.



**Figura 3.15:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina FFP2.

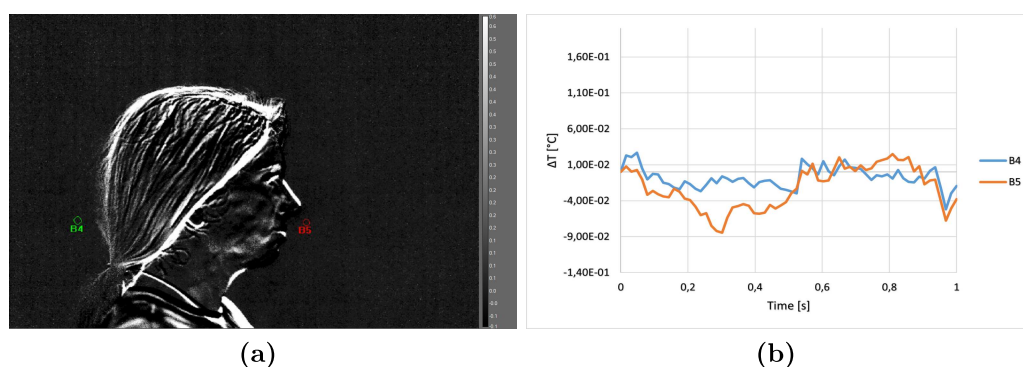
### 3.2.2 Acquisizioni laterali

#### Senza mascherina

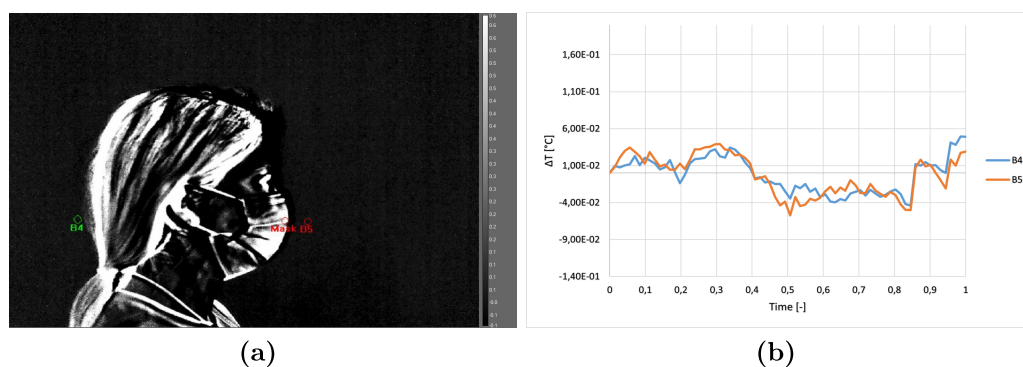
Nessun risultato particolarmente interessante è stato riscontrato in questa prova mentre il soggetto non indossava alcuna mascherina (Fig. 3.16).

#### Mascherina chirurgica

Nel soggetto in questione non sono stati rilevati particolari incrementi di temperatura nei punti di interesse mentre indossa una mascherina chirurgica come mostrato dalla Figura 3.17.



**Figura 3.16:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) nel caso senza mascherina.



**Figura 3.17:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina chirurgica.

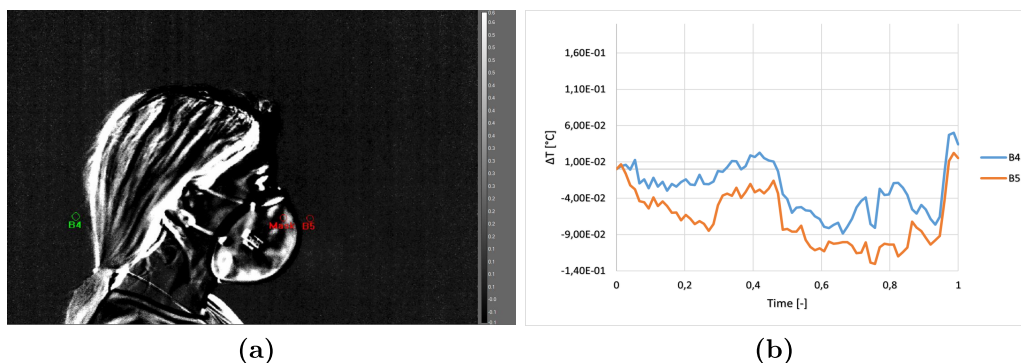
### Mascherina FFP2

Un comportamento analogo è stato osservato anche nel caso in cui il soggetto indossava una mascherina di tipo FFP2.

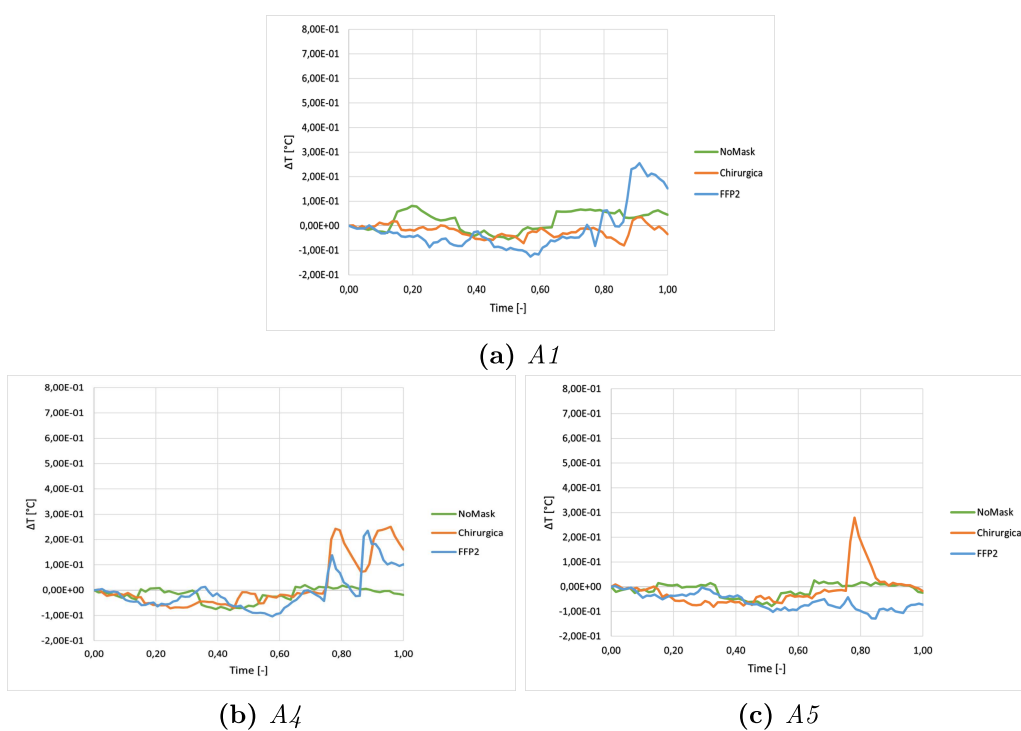
### 3.2.3 Confronti tra i risultati

Analizziamo ora i risultati ottenuti attraverso le diverse acquisizioni.

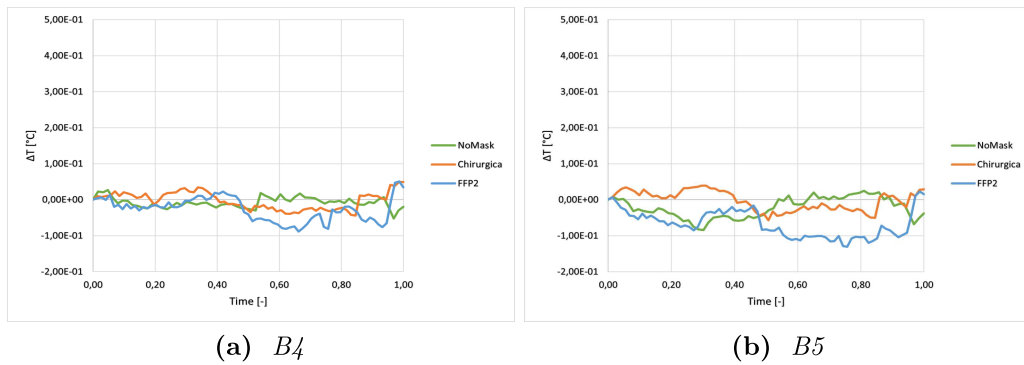
Per quanto riguarda le prove effettuate frontalmente alla termocamera, i grafici della Fig. 3.19 mostrano che in generale si hanno delle fuoriuscite maggiori mentre si indossa una mascherina chirurgica; si registrano anche delle perdite con la mascherina FFP2 nella zona immediatamente prossima al viso (A1). Come già è stato possibile vedere dai grafici in precedenza (Fig.



**Figura 3.18:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina FFP2.

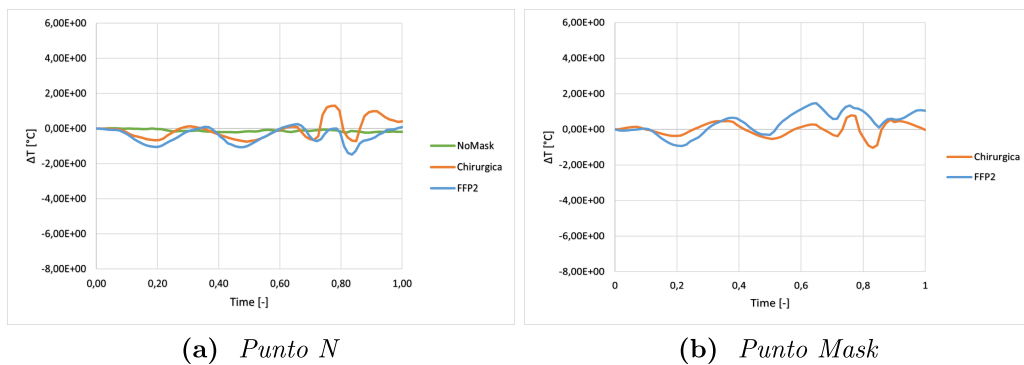


**Figura 3.19:** I tre grafici mostrano gli andamenti delle variazioni di temperatura dei punti considerati nei tre casi (senza mascherina, con la mascherina chirurgica, con la mascherina FFP2) per il secondo soggetto.



**Figura 3.20:** La figura mostra gli andamenti registrati per i punti (a) e (b) nel secondo soggetto.

3.16b, Fig 3.17b, Fig. 3.18b), mettendo a confronto quanto avvenuto in B4 e B5 per i tre diversi casi (Fig. 3.20), non si evidenziano risultati significativi.

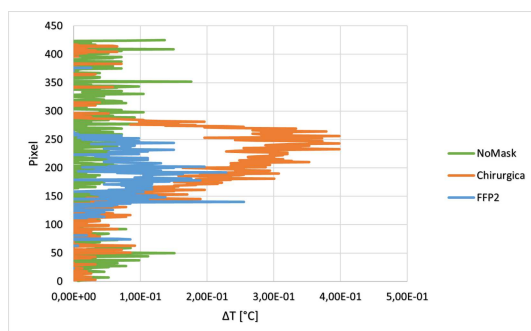


**Figura 3.21:** La figura mostra gli andamenti registrati per i punti (a) e (b) nel secondo soggetto.

I grafici in Fig. 3.21 mostrano invece gli andamenti che si sono registrati nel punto posizionato sopra la mascherina, sia per le prove effettuate di profilo che per quelle avvenute sul piano frontale. Nel primo caso si osserva un riscaldamento maggiore mentre si indossa una mascherina FFP2, mentre per le acquisizioni frontali la mascherina chirurgica subisce un incremento più grande. Questi risultati sono sempre riconducibili al fattore di vista.

L'ultimo grafico relativo al secondo soggetto (Fig. 3.22), mette ben in evidenza che mentre si indossa una mascherina chirurgica si hanno delle perdite maggiori rispetto agli altri due casi; rispetto al primo soggetto però, il flusso tende a mantenersi più vicino al volto del soggetto.





**Figura 3.22:** Confronto tra i profile plot nei tre casi (senza mascherina, con la mascherina chirurgica, con la mascherina FFP2) nel secondo soggetto.

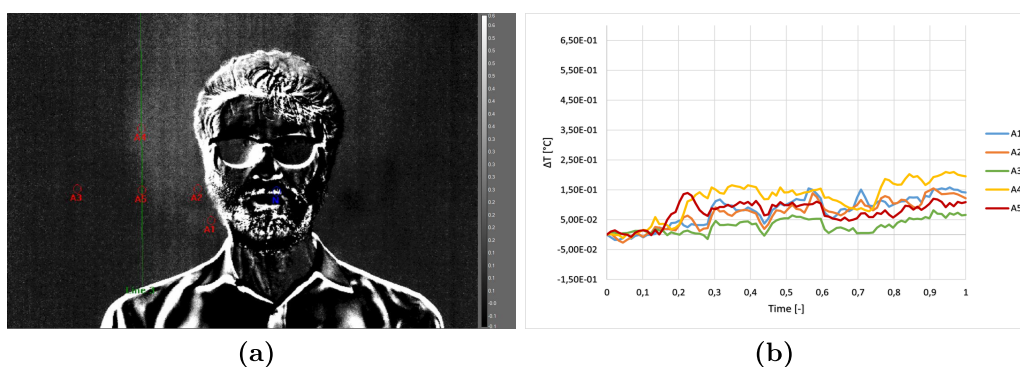
### 3.3 Soggetto 3

L'ultimo soggetto, un maschio, è stato sottoposto alla prova in laboratorio con una temperatura di 27°C e un'umidità relativa del 40%. Poiché durante queste acquisizioni sono state riscontrati eccessivi movimenti durante il colpo di tosse, è stato opportuno operare la sottrazione del frame immediatamente antecedente il primo colpo.

#### 3.3.1 Acquisizioni frontali

##### Senza mascherina

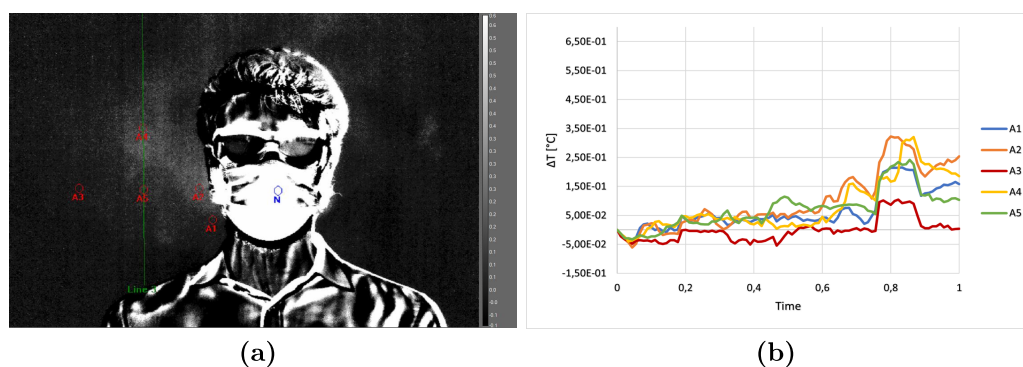
Come già mostrato per gli altri due soggetti, non si riscontrano particolari incrementi nel caso senza mascherina.



**Figura 3.23:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) nel caso senza mascherina.

### Mascherina chirurgica

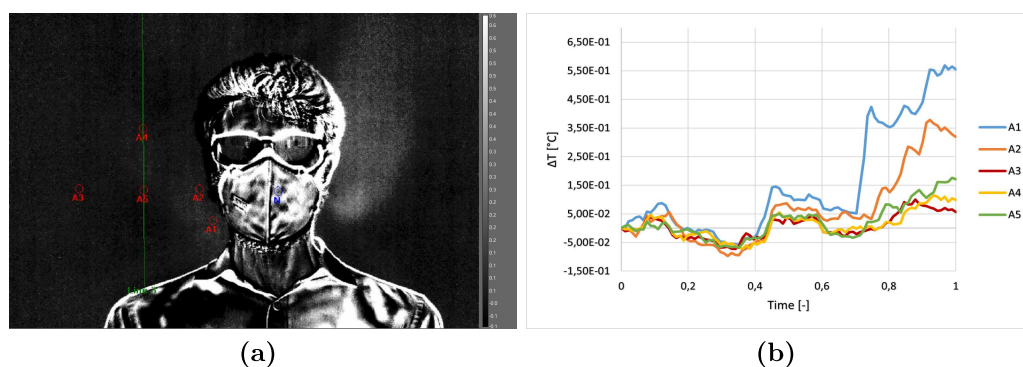
Mentre il soggetto indossa una mascherina chirurgica, si osservano delle fuoriuscite che si propagano verso l'alto (Fig. 3.24), andando ad investire i ROI A2 e A4 che quindi registrano gli incrementi di temperatura maggiori.



**Figura 3.24:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina chirurgica.

### Mascherina FFP2

Con l'utilizzo di una mascherina FFP2, invece, si nota che il flusso tende ad uscire dalla parte inferiore del dispositivo (Fig. 3.25a); di conseguenza, come mostrato dal grafico (Fig. 3.25b) A1 è il ROI che subisce un incremento di temperatura maggiore; a seguire troviamo A2, poichè il flusso tende a distribuirsi in direzione verticale.

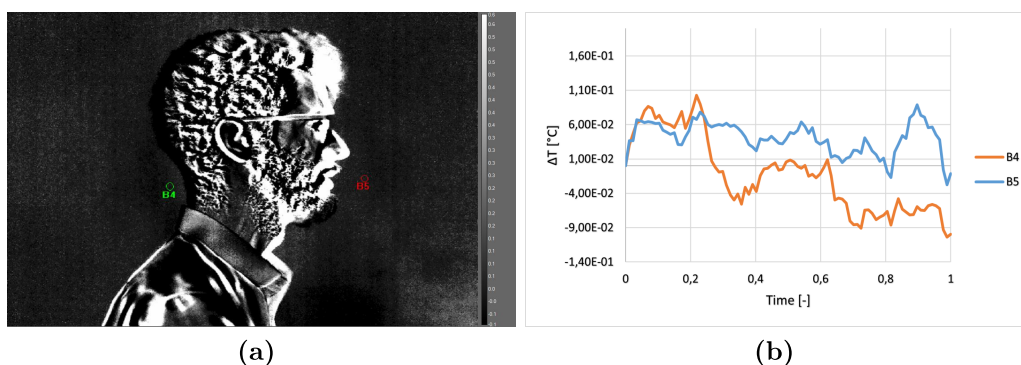


**Figura 3.25:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina FFP2.

### 3.3.2 Acquisizioni laterali

#### Senza mascherina

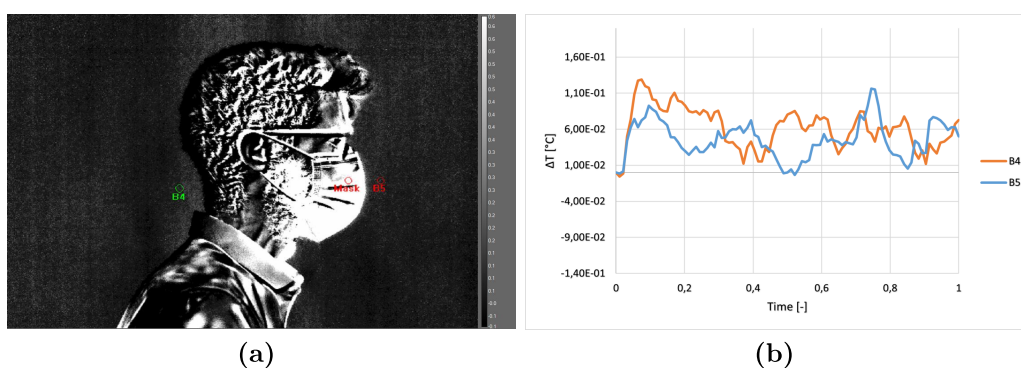
Anche nell'ultima acquisizione avvenuta senza indossare alcuna mascherina, non sono stati rilevati risultati significativi.



**Figura 3.26:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) nel caso senza mascherina.

#### Mascherina Chirurgica

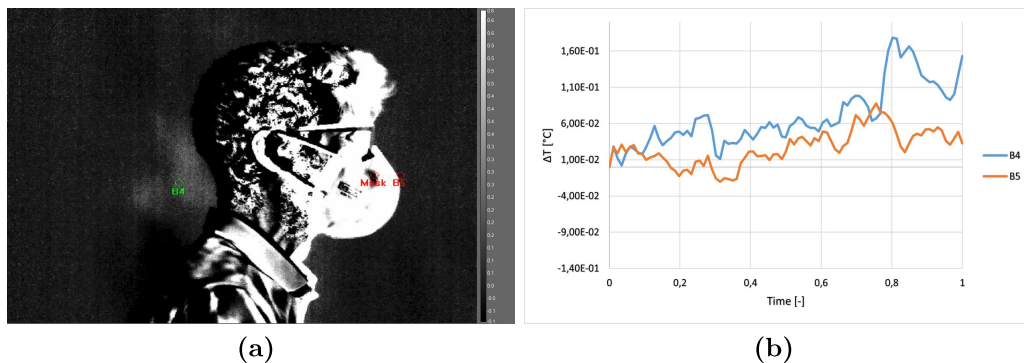
Nella prova di profilo mentre si indossa la mascherina chirurgica, si sono invece osservate delle leggere fuoriuscite che si sono diffuse nella parte dietro al collo (Fig. 3.27b).



**Figura 3.27:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina chirurgica.

## Mascherina FFP2

L'ultima prova effettuata è stata quella in cui il soggetto di profilo stava indossando una mascherina FFP2. Come suggerisce l'immagine (Fig. 3.28a), il flusso tende a distribuirsi nella parte posteriore della testa in prossimità del collo; questo risultato è infatti confermato dal grafico (Fig. 3.28b), che evidenzia l'aumento della variazione di temperatura intorno a B4.

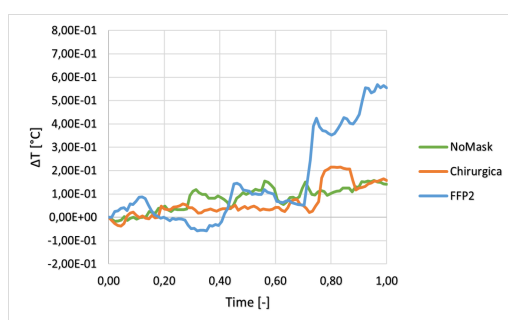


**Figura 3.28:** Nella figura sono riportati il frame successivo al primo colpo di tosse (a) e il grafico che riporta l'andamento delle variazioni di temperatura dei ROI considerati (b) con la mascherina FFP2

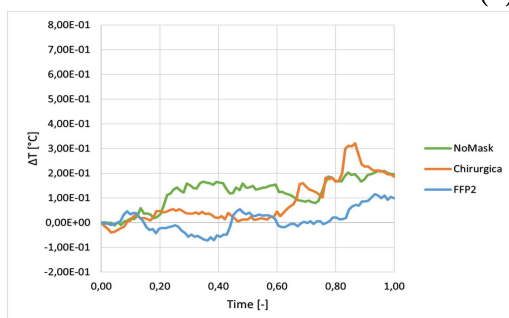
### 3.3.3 Confronto tra i risultati

Iniziamo il confronto tra i risultati ottenuti nelle tre diverse applicazioni, andando a considerare A1, A4 e A5 come punti d'interesse. L'andamento mostrato dai grafici (Fig. 3.29), ci suggerisce che il flusso espirato durante l'utilizzo di una mascherina FFP2 si diffonde soprattutto nelle zone appena prossime al volto; quando invece si indossa una mascherina chirurgica il flusso raggiunge distanze maggiori anche se non in maniera significativa.

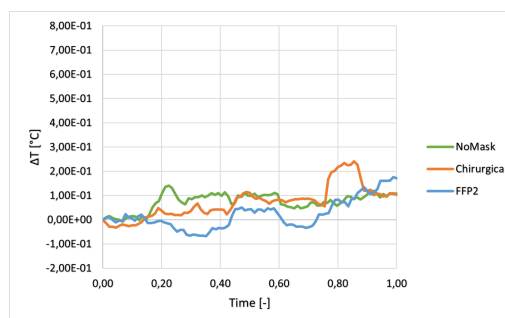
Spostandoci invece sul piano laterale, come già era stato visto nelle analisi precedenti (Fig. 3.27b, Fig. 3.28b), nella zona immediatamente di fronte alla mascherina non è stato possibile registrare incrementi significativi; alcune fuoriuscite si rilevano durante l'utilizzo della mascherina FFP2 che poi si propagano nella zona posteriore alla testa.



(a) A1

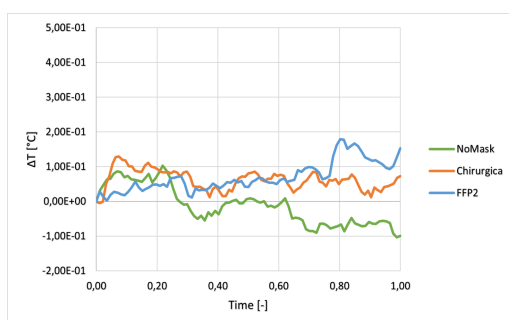


(b) A4

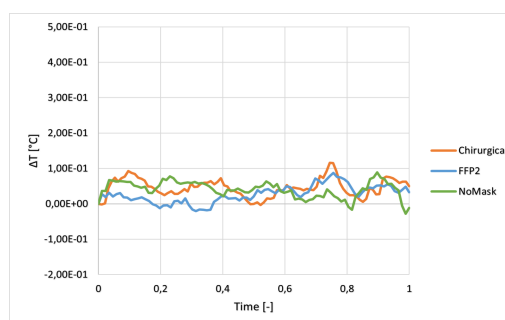


(c) A5

**Figura 3.29:** I tre grafici mostrano gli andamenti delle variazioni di temperatura dei punti considerati nei tre casi (senza mascherina, con la mascherina chirurgica, con la mascherina FFP2) per il terzo soggetto.



(a) B4

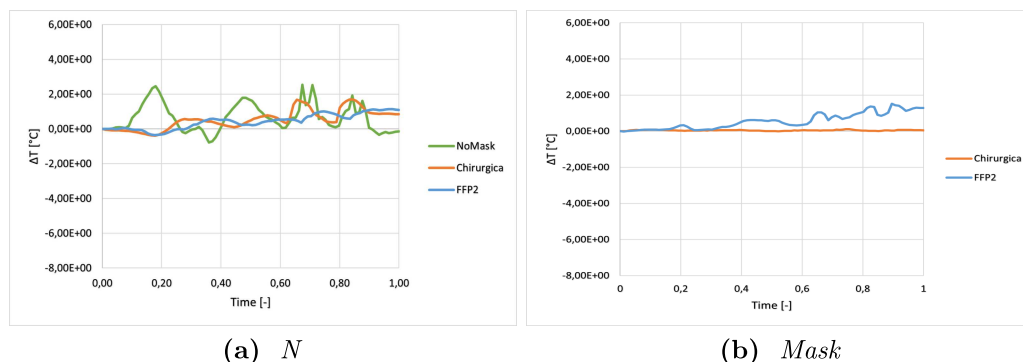


(b) B5

**Figura 3.30:** La figura mostra gli andamenti registrati per i punti (a) e (b) nel terzo soggetto.

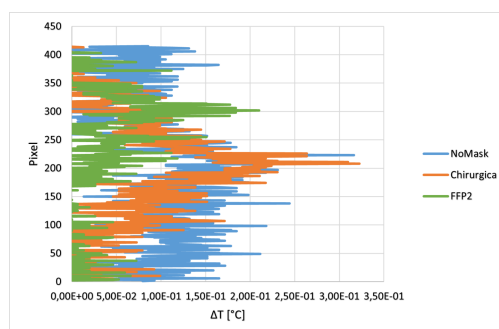
Per quanto riguarda invece le zone d'interesse che sono state scelte sulla mascherina, la Fig. 3.31 ne mostra gli andamenti. Nelle acquisizioni frontali (Fig. 3.31a) quindi, vediamo che i tre casi registrano degli andamenti molto

simili tra di loro; sul piano laterale invece (Fig. 3.31b), la mascherina di tipo FFP2 subisce un aumento di temperatura maggiore rispetto alla chirurgica.



**Figura 3.31:** La figura mostra gli andamenti registrati per i punti (a) e (b) per il terzo soggetto.

Concludendo infine con l'analisi del profile plot, il grafico (Fig. 3.32), mostra l'estensione del flusso espirato mentre si indossa una mascherina chirurgica o una mascherina FFP2.

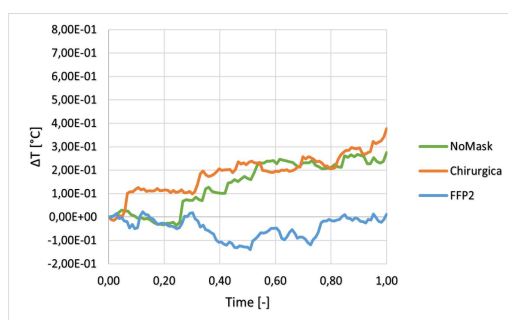
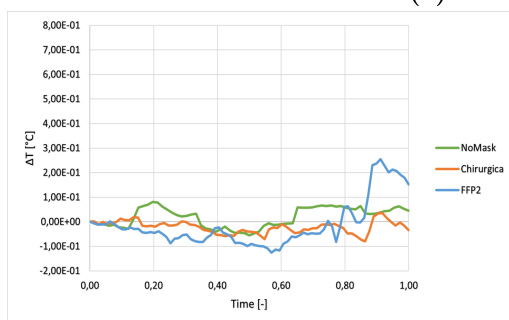
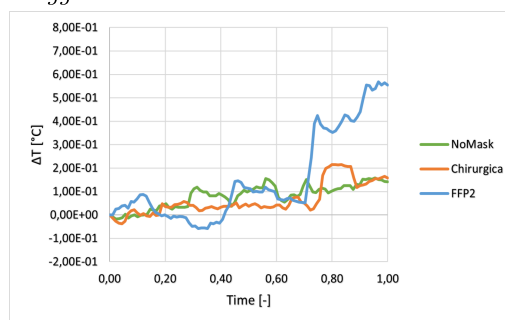


**Figura 3.32:** Confronto tra i profile plot nei tre casi (senza mascherina, con la mascherina chirurgica, con la mascherina FFP2) per il terzo soggetto.

### 3.4 Confronto dei risultati tra i diversi soggetti

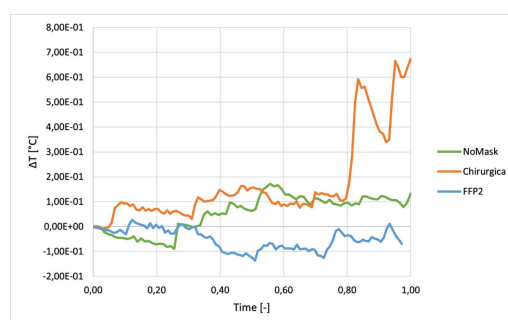
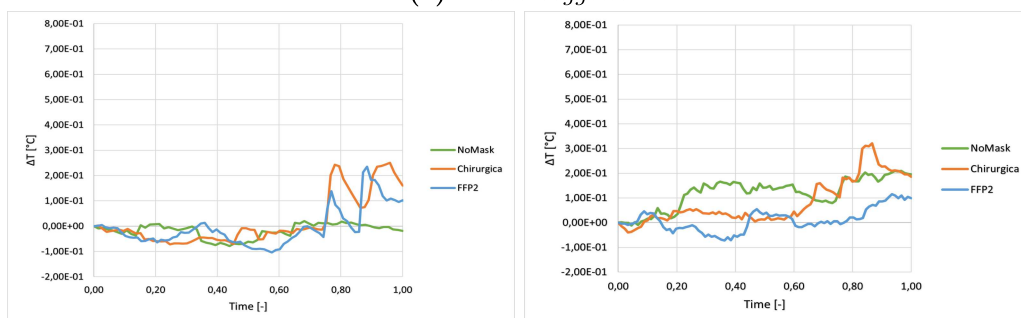
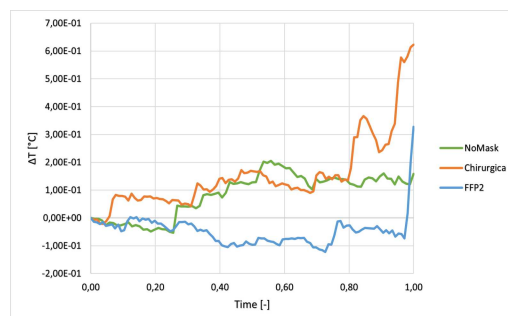
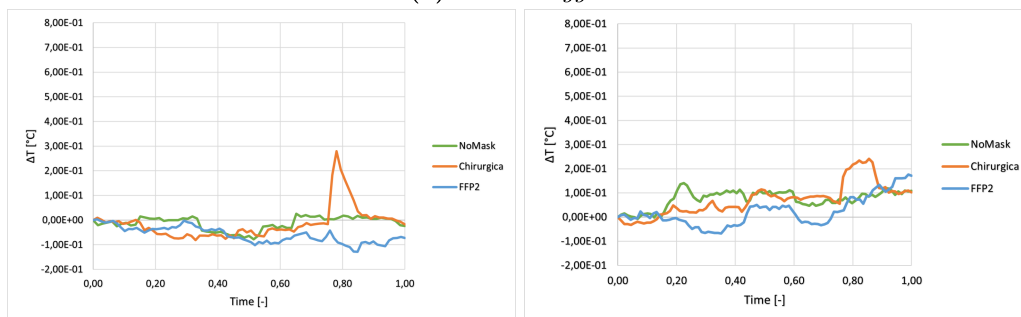
In questa ultima parte del capitolo mettiamo a confronto i risultati che sono stati ottenuti considerando gli stessi ROI ma su soggetti diversi. Iniziando da A1 (Fig. 3.33), ricordiamo che questo è il ROI posizionato immediatamente vicino al volto del soggetto al di sotto dell'orecchio. Confrontando gli andamenti tra i diversi soggetti vediamo che quello che si discosta di più dagli altri è il primo soggetto. Se infatti negli altri due soggetti si osserva un

incremento della temperatura nella zona in questione soprattutto mentre si indossa una mascherina FFP2, questo non si è verificato nel primo soggetto. La risposta è collegata alla conformazione del viso dei tre soggetti alla quale è associata una differenza di adesione della mascherina al volto. Nel primo caso infatti la mascherina FFP2 risulta aderire quasi perfettamente ai lineamenti del soggetto, mentre negli altri due si formano delle aperture laterali e sotto al mento che lasciano fuoriuscire parte del flusso.

(a) *Primo soggetto*(b) *Secondo soggetto*(c) *Terzo soggetto***Figura 3.33:** Confronto del ROI A1 tra i diversi soggetti.

Proseguiamo poi con l'analisi che interessa A4 (Fig. 3.34). In questa circostanza i grafici mostrano degli andamenti che, seppur differendo nei valori, si mantengono simili nei tre soggetti. In questa zona si registrano degli incrementi di temperatura maggiori quando i soggetti indossano una mascherina chirurgica; perdite più grandi si verificano nel caso del primo soggetto.

Una situazione analoga è quella che si verifica nel caso di A5 (Fig. 3.35), poichè questo è posizionato sulla stessa linea del ROI visto in precedenza. Anche in questa situazione quindi, le variazioni più significative si riscontrano nel caso della mascherina chirurgica e in particolare nel primo soggetto.

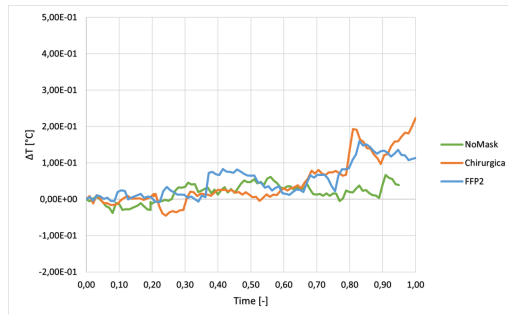
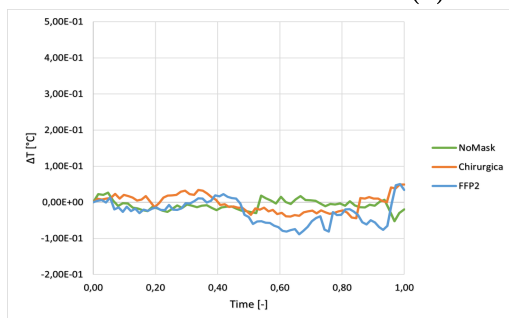
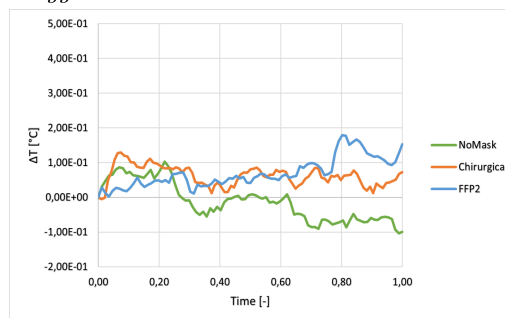
(a) *Primo soggetto*(b) *Secondo soggetto*(c) *Terzo soggetto***Figura 3.34:** Confronto del ROI A4 tra i diversi soggetti.(a) *Primo soggetto*(b) *Secondo soggetto*(c) *Terzo soggetto***Figura 3.35:** Confronto del ROI A5 tra i diversi soggetti.



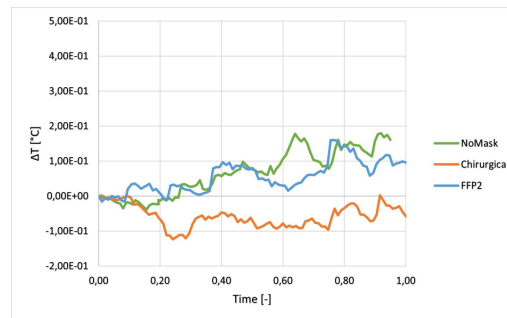
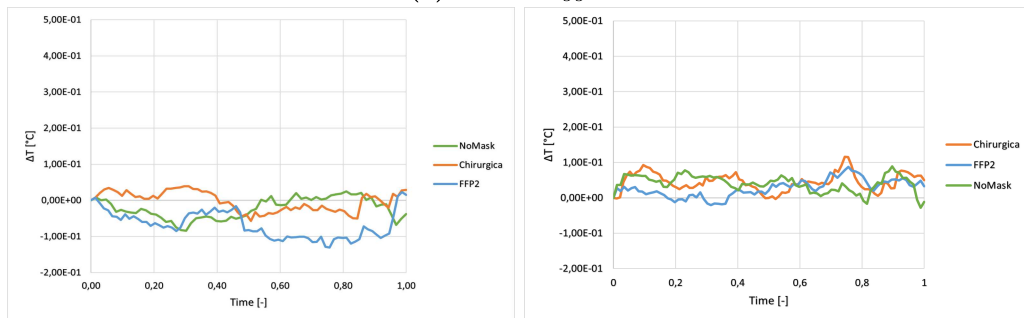
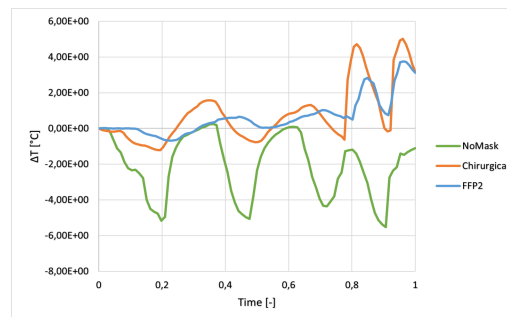
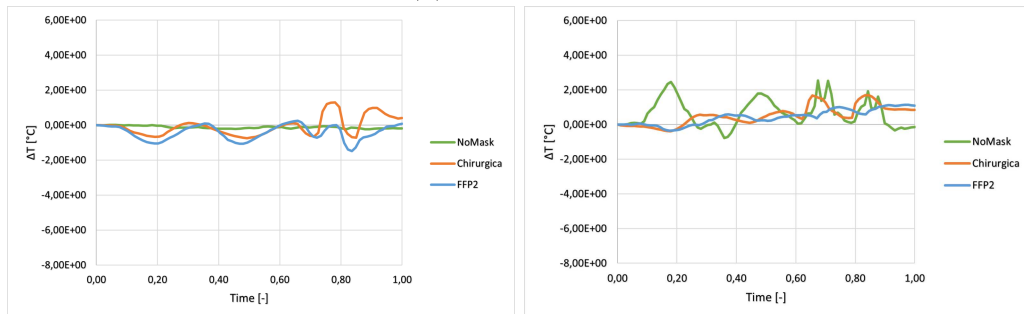
Passiamo invece ora all'analisi dei ROI scelti per le acquisizioni effettuate sul piano laterale. Il ROI B4 è quello che è stato posizionato nella parte posteriore della testa. Confrontando i grafici del punto tra i diversi soggetti (Fig. 3.36), si nota che nel secondo soggetto non si registrano dati significativi. Negli altri due soggetti, invece i grafici mostrano che il flusso tende a distribuirsi verso la parte posteriore del viso mentre si indossa una mascherina. Per il primo soggetto si registrano degli incrementi maggiori durante l'utilizzo della mascherina chirurgica, mentre nel secondo soggetto durante l'uso della mascherina FFP2. Questo risultato si riconduce a quanto detto in precedenza riguardo alla differenza di forma del viso tra i due soggetti in questione.

Proseguiamo con il punto B5, posizionato di fronte alla mascherina sempre durante le acquisizioni laterali. Come già si era notato durante l'analisi dei risultati dei singoli soggetti, non si sono riscontrate perdite significative verso la parte anteriore della mascherina (Fig. 3.37).

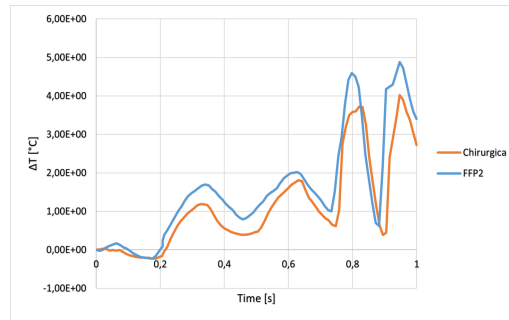
Interessante è infine l'analisi dei ROI che sono stati posizionati al di sopra della mascherina sia durante le prove avvenute sul piano frontale che quelle effettuate di profilo.

(a) *Primo soggetto*(b) *Secondo soggetto*(c) *Terzo soggetto*

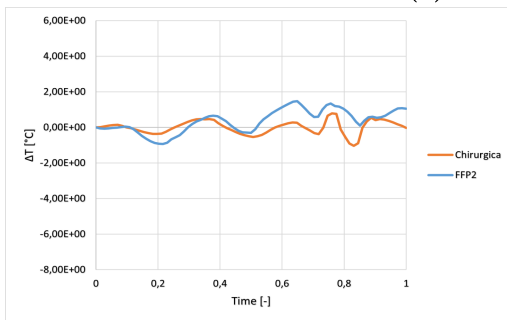
**Figura 3.36:** Confronto del ROI B4 tra i diversi soggetti.

(a) *Primo soggetto*(b) *Secondo soggetto*(c) *Terzo soggetto***Figura 3.37:** Confronto del ROI B5 tra i diversi soggetti.(a) *Primo soggetto*(b) *Secondo soggetto*(c) *Terzo soggetto***Figura 3.38:** Confronto del ROI N tra i diversi soggetti.

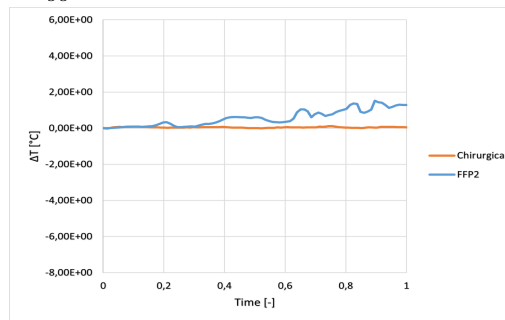
I grafici mostrati nelle Fig. 3.38 e 3.39 ci forniscono una riproduzione fedele delle fasi attraversate durante ogni prova (due respiri profondi seguiti da due colpi di tosse). Mettendo a confronto i risultati ottenuti per i tre soggetti, è ancora più evidente l'incongruenza che si registra tra le acquisizioni sul piano frontale e quelle sul piano laterale dovuta al fattore di vista.



(a) *Primo soggetto*



(b) *Secondo soggetto*



(c) *Terzo soggetto*

**Figura 3.39:** Confronto del ROI Mask tra i diversi soggetti.

# Capitolo 4

## Conclusioni

Nel presente studio è stata effettuata un'indagine termografica con l'obiettivo di visualizzare la diffusione del flusso espirato attraverso alcuni dei dispositivi di protezione individuale più in uso. Nello specifico sono state analizzate la mascherina chirurgica e la mascherina FFP2; questi dispositivi fungono da barriere contro la fuoriuscita di droplets, ma possono comunque lasciare delle aperture che causano perdite importanti di flusso soprattutto verso la parte posteriore della testa. Le prove sono state effettuate su tre soggetti diversi che sono stati sottoposti a delle acquisizioni sia sul piano frontale che su quello laterale.

Di seguito vengono illustrati i principali risultati che sono emersi a seguito delle numerose prove effettuate.

Per quanto riguarda le prove che sono state effettuate senza l'utilizzo di alcun dispositivo di protezione, il motivo per cui non è stato possibile catturare visivamente il flusso è da riferirsi alle caratteristiche della termocamera stessa. Come già anticipato, la banda di assorbimento del biossido di carbonio (principale componente del flusso d'aria espirato) ha una banda di assorbimento di circa  $4,3\mu m$ , mentre la termocamera utilizzata in questo studio opera in un range spettrale di  $[7,5 \div 14,0] \mu m$ . Questo discorso vale anche nei casi in cui non è stato possibile osservare delle fuoriuscite nella parte anteriore al viso. Sebbene entrambi i tipi di dispositivi di protezione individuale analizzati in questo studio si comportano come barriere contro la fuoriuscita di particelle, questi non offrono una protezione assoluta; quindi, delle perdite di flusso si dovrebbero osservare anche davanti alla mascherina.

Durante l'utilizzo di un dispositivo di protezione, invece, le immagini termiche hanno evidenziato la presenza di flussi in uscita nella parte posteriore al volto; questo risultato è stato possibile grazie all'utilizzo di un telo nero posizionato dietro al soggetto come sfondo termico uniforme. I flussi che quindi venivano visualizzati nelle immagini termiche acquisite si riferivano al

riscaldamento dello schermo prodotto dal continuo flusso d'aria espirato dal soggetto.

La quantità di flusso che fuoriesce dalle mascherine dipende sia dal tipo di mascherina stessa che dalla conformazione del viso della persona che la indossa. Infatti, la mascherina chirurgica lascia soprattutto delle aperture laterali, mentre con la FFP2 si hanno delle aperture nella parte sotto al mento, che possono essere più o meno ampie a seconda del soggetto. Infatti, nel primo soggetto non si registrano perdite consistenti indossando una mascherina FFP2, come invece si osserva per gli altri due soggetti. In generale, però, rimane valido il fatto per cui la mascherina FFP2 offre un grado di protezione maggiore rispetto a quella chirurgica. Di conseguenza, grazie all'analisi dei ROI posti sulla mascherina ("N" per le acquisizioni frontali e "Mask" per quelle laterali), si osserva come la mascherina FFP2 subisca un riscaldamento maggiore rispetto alla chirurgica, in quanto riesce a trattenere un volume d'aria maggiore. L'analisi dei dati relativi alle acquisizioni frontali, hanno però evidenziato degli andamenti che dimostrano un riscaldamento maggiore nella mascherina chirurgica rispetto alla FFP2. Questa incongruenza, come già ampiamente discusso, è da riferirsi al concetto di fattore di vista in quanto la superficie sulla quale è stato posizionato il ROI nelle acquisizioni con la mascherina FFP2, risulta essere più inclinata rispetto a quella relativa alla mascherina chirurgica. L'analisi dei dati relativi alla linea posizionata a partire dalla parte alta dell'immagine fino all'inizio della spalla del soggetto ci ha fornito invece informazioni riguardo alla direzione di propagazione del flusso; questo tende sempre a distribuirsi in direzione verticale verso l'alto, mantenendosi più o meno vicino al volto a seconda del soggetto.

# Bibliografia

- [1] Lidia Morawska. “Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection?” In: *Indoor Air 2005: Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. Tsinghua University Press. 2005, pp. 9–23.
- [2] Jianjian Wei e Yuguo Li. “Airborne spread of infectious agents in the indoor environment”. In: *American journal of infection control* 44.9 (2016), S102–S108.
- [3] ZY Han, WG Weng e QY Huang. “Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze”. In: *Journal of the Royal Society Interface* 10.88 (2013), p. 20130560.
- [4] Sacha Stelzer-Braid et al. “Exhalation of respiratory viruses by breathing, coughing, and talking”. In: *Journal of medical virology* 81.9 (2009), pp. 1674–1679.
- [5] Yacob T Tesfaldet e Nji T Ndeh. “Public face masks wearing during the COVID-19 pandemic: A comprehensive analysis is needed for potential implications”. In: *Journal of Hazardous Materials Advances* 7 (2022), p. 100125.
- [6] Wenjia Du et al. “Microstructure analysis and image-based modelling of face masks for COVID-19 virus protection”. In: *Communications Materials* 2.1 (2021), pp. 1–10.
- [7] M Gnes. “Conversione in legge del “Cura Italia”: novità per le PA, la scuola e l’università”. In: (2020).
- [8] Gaetano Natullo. “Covid-19 e sicurezza sul lavoro: nuovi rischi, vecchie regole”. In: *WP CSDLE" Massimo D'Antona"-*. IT 413 (2020).
- [9] Mauro Felli. *Lezioni di fisica tecnica (civile e ambientale)*. Vol. 2. Morlacchi Editore, 2004.
- [10] Lamberto Tronchin. *Elementi di fisica tecnica e controllo ambientale*. Società Editrice Esculapio, 2007.

- [11] F. Peron A. Carbonari M. Vio P. Romagnoni. “13. LO SCAMBIO TERMICO PER IRRAGGIAMENTO”. In: *IUAV* (2006).
- [12] Gilbert Gaussorgues e Seweryn Chomet. *Infrared thermography*. Vol. 5. Springer Science & Business Media, 1993.
- [13] Sherwood B Idso. “Atmospheric attenuation of solar radiation”. In: *Journal of Atmospheric Sciences* 26.5 (1969), pp. 1088–1095.
- [14] U Dillner, E Kessler e H-G Meyer. “Figures of merit of thermoelectric and bolometric thermal radiation sensors”. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* 2.1 (2013), pp. 85–94.
- [15] Davide Lanzoni. *Termografia*. Vol. 45. Maggioli Editore, 2014.
- [16] E Koroteeva e A Shagiyanova. “Infrared-based visualization of exhalation flows while wearing protective face masks”. In: *Physics of Fluids* 34.1 (2022), p. 011705.
- [17] Siddhartha Verma, Manhar Dhanak e John Frankenfield. “Visualizing the effectiveness of face masks in obstructing respiratory jets”. In: *Physics of Fluids* 32.6 (2020), p. 061708.
- [18] Daniela Cardone e Arcangelo Merla. “New frontiers for applications of thermal infrared imaging devices: Computational psychophysiology in the neurosciences”. In: *Sensors* 17.5 (2017), p. 1042.
- [19] Giovanna Concu e Nicoletta Trulli. “EFFICACIA DELLA TERMOGRAFIA A INFRAROSSI NELLA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA DI STRUTTURE ESISTENTI”. In: *CIAS Italia* (2016).
- [20] Xiaojian Xie et al. “Exhaled droplets due to talking and coughing”. In: *Journal of the Royal Society Interface* 6.suppl\_6 (2009), S703–S714.