



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAMERINO

SCUOLA DI ARCHITETTURA E DESIGN "E. VITTORIA"

CORSO DI LAUREA IN

.....Design per l'Innovazione Digitale.....

## TITOLO DELLA TESI

Migliorare la consapevolezza agli eventi sensibili - Sistema di raccolta e comparazione tra la qualità dell'aria indoor e il comfort dell'utente nell'ambiente d'ufficio

*Laureando/a*

Nome. MONTRONE SARA

Firma. 

*Relatore*

Nome. Prof. Luca Bradini

Firma. 

*Se presente eventuale Correlatore indicarne nominativo/i*

.....  
.....

ANNO ACCADEMICO

2024 / 2025



S A A D

Scuola di Ateneo

**Architettura e Design** "Eduardo Vittoria"

Università di Camerino

# Shoji

## Migliorare la consapevolezza agli eventi sensibili

Sistema di raccolta e comparazione tra la qualità dell'aria  
indoor e il comfort indoor nell'ambiente d'ufficio

Studentessa:  
Sara Montrone

Matricola:  
118864

Relatore:  
Prof. Arch. Luca Bradini





# Indice

## Capitolo 01 - Fondamenti Teorici

|   |                                                                          |    |
|---|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Percezione                                                               | 13 |
|   | 1.1 Fenomenologia della percezione di Merleau-Ponty                      | 13 |
|   | 1.2 Approcci Neuroscientifici                                            | 14 |
|   | 1.3 Teoria Ecologica della percezione di Gibson                          | 15 |
|   | 1.4 Percezione Subliminale e Cognizione Inconscia                        | 17 |
|   | 1.5 Percezione Ambientale e Salute                                       | 18 |
|   | 1.6 Design dell'invisibile: "Immaterial nel design"                      | 19 |
| 2 | Consapevolezza                                                           | 20 |
|   | 2.1 Consapevolezza percettiva e coscienza, distinzioni fondamentali      | 21 |
|   | 2.2 La Global Workspace theory: consapevolezza come Broadcasting Globale | 22 |
|   | 2.3 Consapevolezza e Attenzione: processi correlati ma dissociabili      | 23 |
|   | 2.4 Situation Awareness                                                  | 24 |
| 3 | Evento Sensibile                                                         | 32 |
|   | 3.1 Verso la definizione di Evento Sensibile                             | 32 |
|   | 3.2 Definizione di Evento Sensibile                                      | 34 |
|   | 3.3 Proposta di tipizzazione                                             | 36 |

## Capitolo 02 - Caso Studio

|   |                                                                                          |    |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | La qualità dell'aria negli ambienti di lavoro                                            | 41 |
|   | 2.1 La centralità della qualità dell'Aria Interna                                        | 41 |
|   | 2.2 Caratterizzazione degli inquinanti e fonti di emissione                              | 42 |
|   | 2.3 Sick Building Syndrome                                                               | 43 |
|   | 2.4 Il paradosso dell'edificio come santuario: discrepanza tra qualità reale e percepita | 46 |
|   | 2.5 Analisi dei dati: la caduta del mito della salubrità dell'aria interna               | 47 |
|   | 2.6 Verso un monitoraggio integrato                                                      | 47 |
|   | 2.7 L'impatto economico e cognitivo                                                      | 48 |
|   | 2.8 Qualità dell'aria nei luoghi di lavoro                                               | 52 |

|   |                          |    |
|---|--------------------------|----|
| 2 | Casi Studio              | 62 |
|   | Cloud Atlas              | 65 |
|   | World Skies              | 68 |
|   | Institute du monde Arabe |    |

**Capitolo 03 - Normative**

|     |                          |    |
|-----|--------------------------|----|
| 3.1 | Normative Internazionali | 75 |
| 3.2 | Standard Europei         | 78 |

**Capitolo 04 - Il Progetto**

|      |                                     |     |
|------|-------------------------------------|-----|
| 4.1  | Dataphysicalization                 | 86  |
| 4.2  | Calm Technology                     | 90  |
| 4.3  | Biomimicry                          | 94  |
| 4.4  | Modellazione 3D                     | 99  |
| 4.5  | Embodied Cognition                  | 115 |
| 4.6  | Componenti: Modulo di alimentazione | 118 |
| 4.7  | Componenti: Modulo di comunicazione | 122 |
| 4.8  | Schematico: Modulo di alimentazione | 134 |
| 4.9  | Schematico: Modulo di comunicazione | 136 |
| 4.10 | Algoritmo di interazione            | 137 |
| 4.11 | Programmazione Arduino              | 140 |
| 4.12 | Disegni costruttivi e di insieme    | 144 |
| 4.13 | Render di progetto                  | 154 |
| 4.14 | Scelta dei materiali                | 156 |

**Capitolo 05 - I Dati Soggettivi**

|     |                            |     |
|-----|----------------------------|-----|
| 5.2 | Questionario Trasversale   | 170 |
| 5.3 | Questionario Longitudinale | 174 |
| 5.4 | Mockup                     | 176 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| <b>Bibliografia</b> | 183 |
|---------------------|-----|

|                   |     |
|-------------------|-----|
| <b>Sitografia</b> | 185 |
|-------------------|-----|

# IT

La relazione tra design e percezione umana rappresenta un territorio di ricerca ancora largamente inesplorato. Nonostante l'affermarsi di approcci fenomenologici nel design e nell'architettura contemporanea, grazie a lavori seminali di Merleau-Ponty, Pallasmaa e Holl, persiste una lacuna critica: la mancanza di un approccio sistematico in grado di tradurre fenomeni dinamici, ambientali e invisibili in eventi spaziali e relazionali tangibili.

La capacità sensoriale umana è costitutivamente limitata, capace di recepire solo frammenti della realtà che ci circonda. Tuttavia, l'attuale sviluppo delle tecnologie dei sensori permette di raccogliere costantemente dati oggettivi su fenomeni essenziali per il nostro benessere, primo fra tutti la qualità dell'aria negli spazi chiusi. Questa ricerca esplora come il design possa agire da ponte tra il dato numerico e l'esperienza umana cosciente, colmando il divario tra la limitatezza percettiva e la complessità ambientale.

Partendo dai fondamenti della fenomenologia e della Calm Technology, lo studio propone un passaggio dalla classica visualizzazione dei dati alla Data Physicalization. Attraverso la progettazione di un sistema cinetico ispirato ai principi della biomimica, la ricerca indaga nuove modalità per materializzare i dati ambientali degli spazi di coworking. L'obiettivo è trasformare parametri astratti in variazioni formali e di movimento, generando un'esperienza immersiva che estenda le capacità percettive dell'utente e promuova una nuova consapevolezza dell'ambiente indoor.

# EN

The relationship between design and human perception represents a research territory that remains largely unexplored. Despite the emergence of phenomenological approaches in contemporary design and architecture, driven by seminal works of Merleau-Ponty, Pallasmaa, and Holl, a critical gap persists: the lack of a systematic approach capable of translating dynamic, environmental, and invisible phenomena into tangible spatial and relational events.

Human sensory capacity is inherently limited, able to perceive only fragments of the surrounding reality. However, the current advancement in sensor technologies allows for the continuous collection of objective data regarding phenomena essential to our well-being, most notably indoor air quality. This research explores how design can act as a bridge between numerical data and conscious human experience, bringing the gap between perceptual limitation and environmental complexity.

Drawing on the foundation of phenomenology and Calm Technology, this study proposes a shift from traditional data visualization to Data Physicalization. Through the design of a kinetic system inspired by biomimetic principles, the research investigates new methods to materialize environmental data within coworking spaces. The objective is to transform abstract parameters into formal variations and movement, generating an immersive experience that extends the user's perceptual capabilities and fosters a new awareness of the indoor environment.

# Introduzione

Il concetto di “Evento Sensibile” costituisce il fulcro teorico della prima fase di questa ricerca. Sebbene la letteratura scientifica offra ampi studi sulla percezione e sull’esperienza soggettiva, manca tuttora una definizione consolidata di “Evento Sensibile” applicata all’ambito progettuale. Per colmare questa lacuna, il presente capitolo integra approcci provenienti dalle scienze cognitive, dalla psicologia e dalla fenomenologia. L’obiettivo è costruire una definizione operativa che non sia puramente speculativa, ma capace di guidare lo sviluppo del progetto tecnologico, traducendo i meccanismi cognitivi in concrete strategie di Digital Design.

Per fondare la ricerca su basi solide, è necessario destrutturare l’evento sensibile nei suoi tre processi fondamentali: Percezione, Consapevolezza (Awareness) e Reazione. Comprendere la relazione fenomenologica tra queste fasi è essenziale per il progettista che intende trasformare dati ambientali invisibili – come quelli legati alla qualità dell’aria indoor – in stimoli tangibili per l’utente.

La percezione rappresenta il processo di base attraverso cui il sistema sensoriale umano elabora gli stimoli dell’ambiente circostante. Tuttavia, come dimostrano le neuroscienze, esiste una profonda differenza tra la semplice percezione inconscia e l’effettiva consapevolezza.

Modelli cognitivi come il Global Neuronal Workspace (GNW) suggeriscono che la consapevolezza emerga solo quando le informazioni percettive vengono trasmesse globalmente a livello cerebrale. Per il design, questa distinzione è cruciale: l’obiettivo non è semplicemente fornire un dato (che rischia di rimanere un segnale “subliminale” o ignorato nel rumore di fondo), ma progettare un’interfaccia fisica capace di elevare quel dato allo stato di consapevolezza cosciente.

Infine, la reazione costituisce la risposta comportamentale e cognitiva all’evento percepito. Sebbene l’essere umano possa reagire a stimoli inconsci, è solo attraverso la consapevolezza e il ruolo modulatore dell’attenzione – processi distinti ma interagenti, come evidenziato dal framework CAD (Consciousness and Attention Dissociation) – che si ottengono risposte flessibili, elaborate e volontarie. In questo quadro, l’installazione cinetica proposta dalla tesi si inserisce come uno strumento mediatore: sfruttando la Data Physicalization, essa mira a catturare l’attenzione dell’utente in modo non intrusivo (secondo i principi della Calm Technology), trasformando la percezione passiva dei parametri ambientali in una consapevolezza attiva, capace a sua volta di innescare una reazione virtuosa nello spazio di coworking.







# 01

## Fondamenti Teorici



# 1 Percezione

## 1.1 Fenomenologia della percezione di Merleau-Ponty

Per chiarire il concetto, è utile adottare una prospettiva fenomenologica. In particolare, Maurice Merleau-Ponty, in *Fenomenologia della percezione (1945)*, sostiene che la percezione non si esaurisce nei dati sensoriali né nelle sole elaborazioni concettuali, ma comprende anche dimensioni implicite e pre-riflessive dell'esperienza vissuta. Ne deriva l'idea che esistano livelli di consapevolezza sensibile che operano al di sotto della coscienza, orientando il modo in cui l'individuo si rapporta al mondo e agli eventi che lo attraversano.

In questa cornice, un evento può agire come fenomeno sensibile anche quando non viene colto direttamente dai sensi o riconosciuto dalla riflessione cosciente: può comunque assumere una valenza esperienziale e modificare lo stato soggettivo attraverso processi corporei, emotivi o impliciti. Tale prospettiva giustifica l'importanza di tecnologie capaci di amplificare la consapevolezza di questi eventi, portandoli dalla periferia dell'attenzione alla centralità dell'esperienza cosciente. In questo senso, un "evento sensibile" è un evento che, pur non essendo sempre immediatamente percepibile o nominabile, possiede il potenziale di attivare processi interpretativi e stati cognitivi o emotivi. Può manifestarsi come un'affordance latente, come un segnale che richiede un'attivazione inferenziale o affettiva, oppure come un elemento che opera a livello pre-riflessivo, contribuendo alla costruzione dinamica dell'esperienza soggettiva.

*Merleau-Ponty, M. (2003). Fenomenologia della percezione (A. Bonomi, Trad.). Bompiani. (Opera originale pubblicata nel 1945).*





## 1.2 Approcci teorici e neuroscientifici

La percezione è un processo complesso che va ben oltre la semplice ricezione passiva di stimoli sensoriali. A partire dalla seconda metà dell'Ottocento, e con successivi sviluppi nelle scienze cognitive e nelle neuroscienze del Novecento, è emerso con forza il carattere attivo, interpretativo e dinamico dell'atto percettivo.

Le neuroscienze contemporanee hanno ulteriormente corroborato la visione secondo cui il sistema percettivo umano non si limita a captare dati dall'ambiente, ma costruisce vere e proprie interpretazioni inferenziali integrando le informazioni sensoriali con memorie e aspettative pregresse.

Attraverso la teoria della codifica predittiva (predictive coding), dimostrando che il cervello funziona come un motore inferenziale: le aree corticali superiori generano previsioni continue sul flusso sensoriale in arrivo, modulandone l'elaborazione sulla base del contesto, degli stati emotivi e dei processi attentivi (Clark, 2013; Friston, 2010). La percezione coinvolge così un sistema integrato che opera su molteplici livelli, dai filtri pre-attentivi fino ai processi di consapevolezza riflessiva.

Inoltre, l'atto percettivo si articola lungo uno spettro che va dalla mera rilevazione sensoriale primaria fino alle dimensioni fenomenologiche e cognitive, dove l'interazione corporea e l'esperienza soggettiva assumono un ruolo fondamentale per dare senso al mondo (Noë, 2004).

Questa complessa stratificazione supporta l'idea che eventi ambientali non immediatamente percepibili possano comunque influenzare a vari livelli la coscienza e il comportamento umano, ponendo una solida base neuroscientifica e filosofica per la definizione di evento sensibile.

## 1.3 Teoria Ecologica della Percezione di Gibson

La teoria ecologica della percezione formulata da James J. Gibson (1979) rappresenta un paradigma fondamentale per la comprensione degli eventi sensibili nella loro relazione diretta con l'ambiente. Contrariamente al modello percettivo classico, che concepisce la percezione come una complessa costruzione interpretativa a partire da stimoli ambigui, Gibson sostiene che l'ambiente offra informazioni già strutturate e sufficientemente ordinate per essere colte direttamente, senza necessità di mediazioni cognitive complesse. Il concetto cardine di questa teoria è quello di *affordance*, ovvero le proprietà relazionali che emergono dall'incontro tra le caratteristiche fisiche dell'ambiente e le capacità motorie e sensoriali dell'organismo (Gibson, 1979). Le *affordance* non costituiscono attributi intrinseci degli oggetti in senso assoluto, bensì opportunità d'azione: sono percezioni immediate che guidano il comportamento umano in modo pre-riflessivo. Questa prospettiva evidenzia come i fenomeni ambientali acquisiscano significato relazionale non in base alla loro intensità assoluta, ma in virtù delle conseguenze pratiche che comportano per l'organismo situato in quello specifico contesto ecologico. Il concetto di flusso ottico (*optical flow*), che descrive il mutamento apparente delle superfici nel campo visivo durante il movimento dell'osservatore, fornisce un ulteriore strumento per comprendere come le informazioni ambientali latenti guidino l'azione in modo diretto (Gibson, 1979).

Questo approccio ecologico ha trovato la sua massima applicazione progettuale grazie a Donald Norman, che ne ha traslato i principi nel campo dell'ergonomia e dello user-centered design. Nel suo saggio seminale *La caffettiera del masochista* (Norman, 1988/2014), l'autore rielabora il concetto di *affordance* distinguendo tra le proprietà fisiche reali di un oggetto e le sue *affordance* percepite, ovvero ciò che l'utente crede che l'oggetto permetta di fare. Mentre per Gibson l'*affordance* è una relazione ecologica indipendente dalla consapevolezza

(una sedia offre supporto a prescindere che la si guardi o meno), per Norman il ruolo del designer è proprio quello di rendere queste affordance visivamente esplicite e inequivocabili (Norman, 1988/2014). Un buon design, secondo Norman, utilizza le proprietà fisiche della materia per comunicare la propria funzione in modo naturale, suggerendo le azioni corrette senza il bisogno di istruzioni. Questa trasposizione teorica è cruciale per la progettazione di dispositivi di monitoraggio ambientale: un “evento sensibile”, come la variazione della qualità dell’aria, deve essere tradotto dal designer in un’affordance percepibile, trasformando un dato invisibile in un segnale fisico che inviti intuitivamente l’utente a compiere un’azione correttiva nello spazio.



## 1.4 Percezione Subliminale e Cognizione Inconscia

La ricerca neuroscientifica contemporanea ha rivelato che fenomeni ambientali impercettibili a livello conscio mantengono un’assoluta rilevanza a livello neurale.

È stato dimostrato, infatti, che stimoli subliminali sono in grado di attivare specifiche rappresentazioni nelle aree corticali e di modulare le risposte emotive mediate dall’amigdala, aggirando del tutto la consapevolezza dell’individuo (LeDoux, 1996; Vuilleumier, 2005). All’interno di queste dinamiche di elaborazione inconscia, il fenomeno del priming (innesco) costituisce un meccanismo cruciale: l’esposizione anche breve e inavvertita a determinati stimoli ambientali, come variazioni di luce, odori o micro-suoni, attiva reti associative e frame cognitivi che influenzano i successivi processi di pensiero e di decision-making (Kahneman, 2011).

In questi casi, l’individuo modifica il proprio comportamento senza essere in grado di attribuire consciamente tale cambiamento allo stimolo originario che lo ha innescato.

Questo corpus di ricerche è centrale per il design, poiché dimostra che la latenza percettiva (ovvero il non essere consapevolmente registrato da parte dell’utente) non implica affatto l’assenza di un effetto: gli stimoli ambientali operano simultaneamente su molteplici livelli di elaborazione cognitiva, agendo in parte sotto il controllo cosciente (“Sistema 2”) e in gran parte attraverso automatismi totalmente inconsci (“Sistema 1”) (Kahneman, 2011).

*Kahneman, D. (2011). Thinking, fast and slow. Farrar, Straus and Giroux. (Se usi l’edizione italiana: Pensieri lenti e veloci, Mondadori, 2012).*

*LeDoux, J. E. (1996). The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life. Simon & Schuster.*

*Vuilleumier, P. (2005). How brains beware: neural mechanisms of emotional attention. Trends in Cognitive Sciences, 9(12), 585-594.*



## 1.5 Percezione Ambientale e Salute

La ricerca empirica sulla psicologia ambientale documenta correlazioni significative e statisticamente robuste tra le valutazioni soggettive dell'ambiente e specifici outcome sanitari misurabili, evidenziando una forte mediazione da parte dei processi psicologici e sociali. Diversi studi longitudinali e cross-sectional hanno dimostrato come gli individui con percezioni negative del proprio contesto ambientale – in particolare riguardo alla qualità dell'aria, alla disponibilità di spazi verdi e all'inquinamento acustico – manifestino una prevalenza significativamente superiore di sintomi depressivi e ansiosi, oltre a chiari indicatori fisiologici di stress (Zijlema et al., 2017; Ma et al., 2025).

È fondamentale notare che queste associazioni persistono anche dopo il controllo statistico per variabili demografiche, socioeconomiche e di salute obiettiva, suggerendo che la percezione soggettiva eserciti un effetto indipendente e diretto sul benessere psicofisico (Zijlema et al., 2017). I meccanismi sottostanti a questo fenomeno si basano sui processi di valutazione cognitiva o appraisal (Lazarus & Folkman, 1984): l'ambiente viene costantemente valutato dal soggetto come una minaccia o una risorsa, modulando di conseguenza l'attivazione del sistema nervoso autonomo e le relative strategie comportamentali di adattamento (coping).

Questo corpus di ricerche dimostra empiricamente come fenomeni ambientali, pur non essendo sempre riconosciuti consciamente come rilevanti per la salute, comportino conseguenze misurabili sul corpo umano. La percezione ambientale rappresenta, di fatto, il processo mediante il quale stimoli latenti acquisiscono un reale significato biologico e sanitario attraverso il filtro dell'interpretazione soggettiva.

Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*. Springer Publishing Company.

Ma, L., Zhang, Y., & Li, Q. (2025). *How environmental perception influence depression and anxiety: A cross-sectional study*. *BMC Public Health*, 25, 1-12.

Zijlema, W. L., Triguero-Mas, M., Smith, G., Cirach, M., Martinez, D., Dadvand, P., ... & Nieuwenhuijsen, M. J. (2017). *The relationship between natural outdoor environments and cognitive functioning and its mediators*. *Environmental Research*, 155, 268-275.

## 1.6 Design dell'Invisibile: "Immateriali" nel Design

La pratica di ricerca del discursive design (Tharp & Tharp, 2019) e l'approccio agli immaterials ("materiali invisibili") affrontano in modo diretto il problema metodologico di come rendere percettibili e comunicabili dei fenomeni intrinsecamente invisibili, astratti o tecnicamente complessi. A questo proposito, il progettista e ricercatore Timo Arnall ha teorizzato come il design possa costruire narrazioni, linguaggi e nuovo materiale comunicativo capace di tradurre i fenomeni immateriali e tecnologici in rappresentazioni fisicamente tangibili (Arnall, 2014).

Questo approccio parte dal presupposto che molti fenomeni ambientali e tecnologici critici per la vita contemporanea (come i campi elettromagnetici, i flussi di dati o i livelli di gas nell'aria) rimangano impercettibili ai sensi umani, nonostante le loro conseguenze sulla salute e sul benessere siano profondamente rilevanti. Il design interviene in questa lacuna sensoriale creando "intermediari materiali" che traducono dati astratti in vere e proprie esperienze fisiche (Arnall, 2014). Questo processo non si limita a una semplice visualizzazione passiva, bensì rappresenta una costruzione attiva di significato: attraverso l'intermediario materiale, il designer sceglie quali aspetti del fenomeno enfatizzare, quale narrativa veicolare e quale reazione comportamentale o emozionale suscitare nell'utente (Tharp & Tharp, 2019).

Arnall, T. (2014). *Exploring 'im-materials': Mediating design's invisible materials*. *International Journal of Design*, 8(2), 101-117.

Tharp, B. M., & Tharp, S. M. (2019). *Discursive design: Critical, speculative, and alternative things*. MIT Press.

## 2 Consapevolezza

In termini generali, la consapevolezza (o coscienza) indica la capacità della mente di essere presente in uno stato di veglia nel quale acquisire cognizione della realtà oggettiva e attribuirle senso o significato, raggiungendo una “conosciuta unità” di tutto ciò che viene appreso e giudicato attraverso l’intelletto (Treccani, 2024).

Più specificamente, in ambito filosofico e psicologico, l’Enciclopedia Treccani (2009) la definisce come la “consapevolezza che il soggetto ha di sé stesso, del mondo esterno con cui è in rapporto, della propria identità e del complesso delle proprie attività interiori”.

Questa definizione evidenzia come la consapevolezza non sia una mera ricezione passiva di dati ambientali, ma un processo integrato in cui l’individuo si posiziona attivamente rispetto allo spazio fisico e relazionale che lo circonda, rendendo esplicito il legame tra percezione sensoriale e rielaborazione cognitiva.

### 2.1 Consapevolezza Percettiva e Coscienza: Distinzioni Fondamentali

La letteratura neuroscientifica e filosofica contemporanea distingue tra consapevolezza percettiva (perceptual awareness) e coscienza generale (consciousness) considerandoli costrutti correlati ma non sovrapponibili (Koch et al., 2016).

La consapevolezza percettiva costituisce il processo specifico mediante il quale le informazioni sensoriali elaborate dal cervello acquisiscono una qualità fenomenologica, diventando un’esperienza soggettiva esplicita (Sánchez & Alí, 2022). Al contempo, miriadi di informazioni ambientali vengono processate simultaneamente ma rimangono latenti, confinate in un’elaborazione inconscia inaccessibile alla consapevolezza globale del soggetto.

A sostegno del carattere proattivo del sistema nervoso, la ricerca sui fenomeni di multistabilità percettiva (come le figure bistabili o ambigue) dimostra chiaramente che, pur a fronte di uno stimolo oggettivo costante e invariato, l’esperienza soggettiva fluttua tra diverse interpretazioni (Sánchez & Alí, 2022).

Questo evidenzia come il cervello non si limiti a ricevere passivamente i dati esterni, ma “costruisca” attivamente l’esperienza consapevole attraverso processi inferenziali, reinterpretando di continuo la realtà per risolvere le ambiguità (Sánchez & Alí, 2022).

*Koch, C., Massimini, M., Boly, M., & Tononi, G. (2016). Neural correlates of consciousness: progress and problems. Nature Reviews Neuroscience, 17(5), 307-321.*

*Sánchez, R. C., & Alí, A. F. (2022). Perceptual awareness and its relationship with consciousness. Brain Sciences, 12(10), 1414.*



## 2.2 Global Workspace Theory: La Consapevolezza come Broadcasting Globale

La Global Workspace Theory (GWT) elaborata originariamente da Bernard Baars rappresenta uno dei framework teorici più influenti per comprendere i meccanismi della consapevolezza conscia. Secondo questa teoria, il cervello contiene molteplici processi specializzati (o moduli) che operano in parallelo, la cui immensa maggioranza rimane del tutto inconscia; la consapevolezza emerge unicamente quando specifiche informazioni ottengono l'accesso a uno spazio di lavoro globale (global workspace) (Baars, 1988). Quest'ultimo funge da hub funzionale di trasmissione e integrazione, permettendo la disseminazione e la condivisione dell'informazione attraverso l'intero sistema cognitivo (Baars, 2002).

Le successive implementazioni neuroscientifiche di questo modello hanno chiarito che l'ingresso nello spazio globale avviene attraverso un processo di "amplificazione attentiva" (attentional amplification) che seleziona gli stimoli rilevanti (Dehaene et al., 2001). In questa cornice teorica, la mediazione progettuale che si prefigge di rendere espliciti gli eventi sensibili – come la variazione della qualità dell'aria – opera precisamente come un meccanismo esterno di amplificazione attentiva.

Il design agisce da catalizzatore, portando un'informazione altrimenti latente sulla "ribalta" del palcoscenico consapevole, permettendone così la trasmissione globale e la conseguente integrazione con la memoria a breve termine, i processi decisionali e il controllo volontario dell'azione (Baars, 1988; Dehaene et al., 2001).

*Dehaene, S., Naccache, L., Cohen, L., Bihan, D. L., Mangin, J. F., Poline, J. B., & Rivière, D. (2001). Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. Nature Neuroscience, 4(7), 752-758.*

*Baars, B. J. (1988). A cognitive theory of consciousness. Cambridge University Press.*

## 2.3 Consapevolezza e Attenzione: Processi Correlati ma Dissociabili

La ricerca neuroscientifica contemporanea ha documentato come consapevolezza e attenzione costituiscano processi cognitivi correlati ma dissociabili. L'attenzione può essere definita come la capacità cognitiva di selezionare informazioni rilevanti tra i dati sensoriali disponibili, mentre la consapevolezza corrisponde al contenuto della coscienza. Studi empirici hanno dimostrato che l'attenzione può esistere senza consapevolezza e che la consapevolezza generalmente richiede la trasmissione diffusa dell'informazione attraverso una rete fronto-parietale denominata global neuronal workspace.

L'Attention Schema Theory (AST) proposta postula una relazione specifica: la consapevolezza funziona come modello di controllo che il cervello utilizza per regolare l'attenzione endogena. La mediazione progettuale opera su entrambi i livelli: catturando l'attenzione (attraverso salienza visiva, contrasto, movimento) e simultaneamente facilitando l'accesso alla consapevolezza (attraverso rappresentazioni comprensibili che permettono l'elaborazione nel global workspace).



## 2.4 Situation Awareness

La Situational Awareness (SA), o consapevolezza situazionale, è la capacità di percepire gli elementi del proprio ambiente, comprendere il significato di tali informazioni e proiettare il loro stato futuro, per prendere decisioni informate, specialmente in contesti complessi o rischiosi come l'aviazione, la cybersecurity e il lavoro operativo. È un “quadro mentale” che collega percepire, capire e prevedere per garantire la sicurezza e l'efficacia.

### Situation Awareness-Oriented Design: Principi per la Mediazione Progettuale

In ambito progettuale, Mica Endsley ha sviluppato una metodologia specifica denominata Situation Awareness-Oriented Design (SA-Oriented Design) finalizzata alla creazione di sistemi informativi e interfacce orientati al potenziamento della consapevolezza situazionale degli utenti (Endsley et al., 2003). Secondo questa metodologia, il design non deve essere puramente incentrato sulla mera esposizione dei dati o sull'ottimizzazione della tecnologia sottostante, bensì deve assumere la consapevolezza situazionale dell'utente come obiettivo primario di progettazione.

Ciò richiede un approccio user-centered che supporti i tre livelli fondamentali della Situation Awareness: la percezione degli elementi nell'ambiente, la comprensione del loro significato rispetto agli scopi attuali e, infine, la proiezione del loro stato futuro (Endsley et al., 2003; Endsley & Jones, 2025).

Applicando il SA-Oriented Design, il progettista non si limita a visualizzare parametri ambientali grezzi (come la percentuale di CO<sub>2</sub>), ma struttura le informazioni in modo da ridurre il carico cognitivo, colmando la distan-

za tra il dato latente e la capacità decisionale dell'individuo. L'obiettivo è favorire un'integrazione immediata dello stimolo ambientale affinché l'utente possa comprendere tempestivamente la situazione ed elaborare schemi d'azione adeguati per gestire l'ambiente circostante.

### La Latenza come Mancanza di Consapevolezza Situazionale

La condizione di “latenza, impercettibile, o mancanza di significato” degli eventi sensibili può essere diagnosticata come mancanza di consapevolezza situazionale adeguata. Le cause possono variare nei tre livelli:

- **Fallimento di Livello 1:** L'elemento non è percepito (attentamente, consciamente) come presente nell'ambiente. Causa: assenza di salienza attentiva, distrazione verso altri elementi, insufficiente qualità del segnale sensoriale.
- **Fallimento di Livello 2:** L'elemento è percepito, ma non è compresa la sua rilevanza. Causa: assenza di conoscenza del nesso causale tra stimolo e conseguenza, mancanza di quadro di riferimento culturale/sociale che attribuisca significato al fenomeno, distanza psicologica dal rischio.
- **Fallimento di Livello 3:** L'elemento è compreso, ma non se ne proietta l'impatto futuro. Causa: horizon temporale breve (presente bias), difficoltà cognitiva nell'estrapolazione, mancanza di modelli mentali per l'anticipazione.

La mediazione progettuale che rende espliciti gli eventi sensibili opera su uno, due, o tutti e tre questi livelli simultaneamente.

Endsley, M. R., Bolte, B., & Jones, D. G. (2003). *Designing for situation awareness: An approach to user-centered design* (1st ed.). Taylor & Francis.



## I Principi di Endsley per il Design

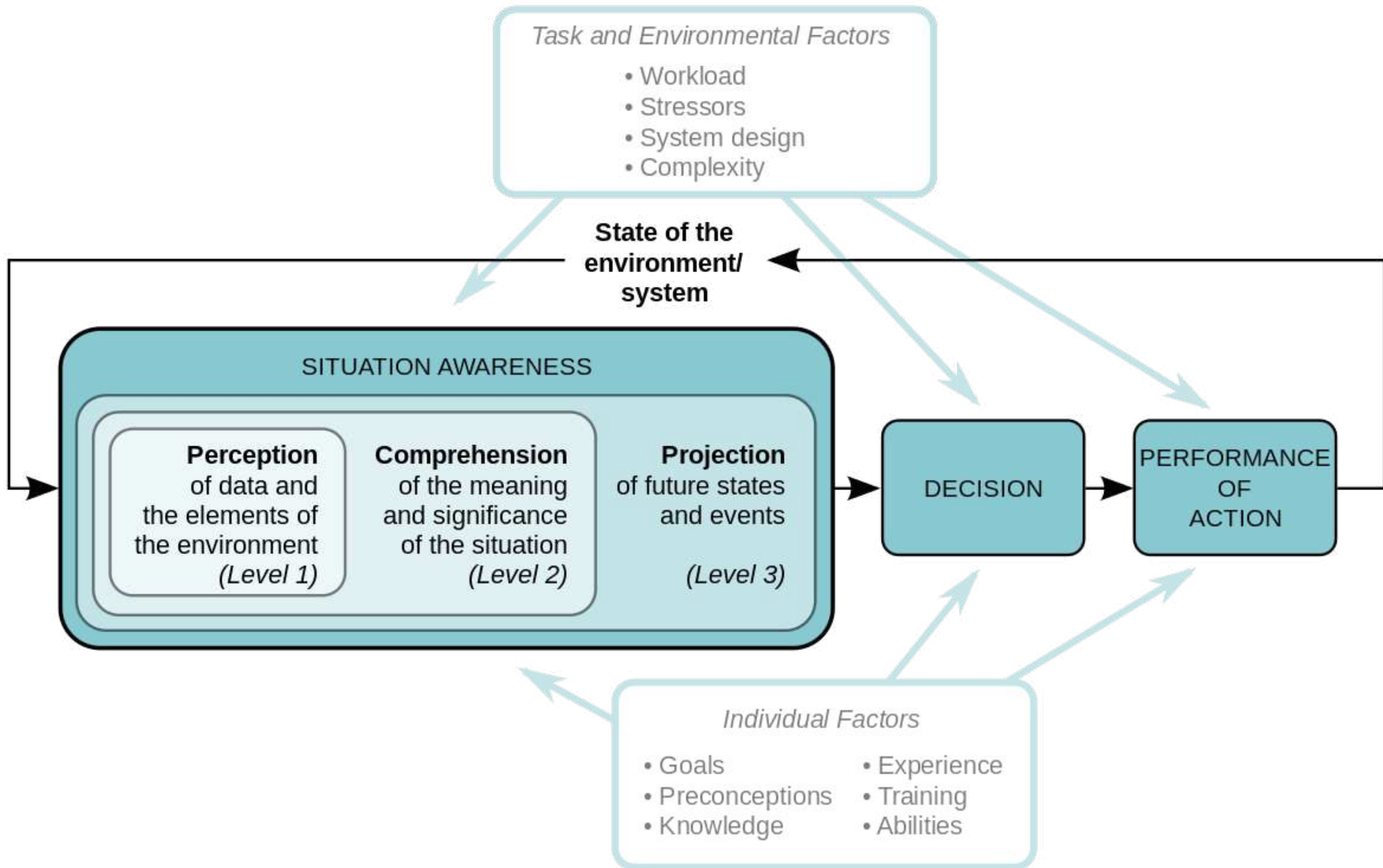
Per guidare la progettazione di queste interfacce, Endsley (2003) articola 50 principi per il SA-Oriented Design. Benché originariamente elaborati nel contesto dell'aviazione e dei sistemi complessi, risultano largamente trasferibili al design di mediazioni per gli eventi sensibili ambientali. Tra i più rilevanti spiccano (Endsley et al., 2003):

- Organizzazione logica orientata al compito: L'informazione deve essere strutturata seguendo il flusso naturale della decisione e dell'azione dell'utente, non la struttura tecnica del sistema sensoriale.
- Consolidamento dell'informazione: È fondamentale integrare dati multipli in rappresentazioni sintetiche ed olistiche per evitare il sovraccarico cognitivo (information overload), piuttosto che presentare dati grezzi (raw data).
- Salienza percettiva per gli elementi critici: Gli elementi cruciali per la sicurezza o la salute devono essere resi visivamente prominenti attraverso contrasti cromatici, posizionamento spaziale o animazioni cinetiche.
- Supporto alla formazione di modelli mentali: Le rappresentazioni fisiche o digitali devono riflettere le strutture causali e spaziali dell'ambiente, facilitando la costruzione di modelli mentali accurati da parte dell'utente.
- Gestione dell'incertezza e della fiducia: Il sistema deve comunicare in modo trasparente e intuitivo il livello di affidabilità dei dati monitorati.

## SA-Oriented Design Process

La seconda fase prevede la progettazione di mediazioni materiali e digitali (visualizzazioni dati, installazioni cinetiche, ambienti informativi) in grado di abilitare i tre livelli di Situation Awareness rispetto agli eventi sensibili identificati (Endsley & Jones, 2025):

- Design per la percezione (Livello 1): L'obiettivo è rendere visibile, udibile o palpabile ciò che è naturalmente invisibile. Le tecniche includono la mappatura spaziale, la data physicalization, la sonorizzazione dei dati e le rappresentazioni immersive in tempo reale.
- Design per la comprensione (Livello 2): Consiste nell'articolare esplicitamente il legame causale tra l'evento sensibile e la sua conseguenza. Questo si ottiene attraverso annotazioni contestuali, codifiche di rischio intuitive (colori, simboli, variazioni di forma) e diagrammi causali.
- Design per la proiezione (Livello 3): Permette agli utenti di anticipare scenari futuri, utilizzando trend storici, simulazioni interattive e scenari "what-if" per supportare il processo decisionale.





## La Situation Awareness come teoria unificante

La teoria della Situation Awareness (SA) formalizzata da Endsley fornisce un quadro teorico coerente e operativamente produttivo per concettualizzare il ruolo del design nel rendere espliciti gli eventi sensibili. In quest'ottica, la SA non rappresenta meramente una teoria di psicologia cognitiva, bensì un framework progettuale completo. In primo luogo, essa permette di diagnosticare il problema alla radice: il permanere di eventi sensibili in uno stato di latenza rappresenta, di fatto, una forma di inadeguata consapevolezza situazionale rispetto a fenomeni ambientali critici per la salute. In secondo luogo, propone una soluzione strutturata, poiché i tre livelli di SA (percezione, comprensione, proiezione) forniscono un'architettura gerarchica per la progettazione di mediazioni fisiche e digitali in grado di elevare progressivamente la consapevolezza dell'utente. Inoltre, il SA-Oriented Design offre chiare metriche di valutazione, includendo approcci validati per misurare empiricamente il grado di successo dell'intervento progettuale. Infine, questo approccio consente di trasferire paradigmi collaudati: la vasta letteratura sulla SA, sviluppata originariamente per domini ad alto rischio come l'aviazione e le operazioni critiche, fornisce linee guida operative, principi ergonomici e casi studio direttamente applicabili al delicato binomio salute-ambiente.

In questo senso, la presente tesi ambisce a contribuire non solo a una rigorosa articolazione teorica del concetto di "evento sensibile", ma anche a una profonda riconcettualizzazione della disciplina progettuale: il design dell'interazione viene qui ridefinito come una pratica attiva orientata all'elevazione della consapevolezza situazionale collettiva, con l'obiettivo primario di rendere tangibili, comprensibili e gestibili quei fenomeni ambientali che altrimenti resterebbero impercettibili e latenti.

## La reazione comportamentale come completamento del ciclo

La reazione comportamentale rappresenta il terzo e ultimo pilastro del framework teorico di questa tesi. Se la fase di percezione risponde alla domanda "Come rendere evidente un evento sensibile latente?" e la fase di consapevolezza a "Come attribuire un significato rilevante all'evento percepito?", la reazione comportamentale risponde all'interrogativo cruciale e finale: "Come trasformare questa nuova consapevolezza in un'azione mirata al miglioramento della salute, del benessere e della relazione con l'ambiente?".

La ricchezza teorica finora esplorata – dal Perception-Action Loop di Gibson alle affordance di Norman, fino ai modelli socio-cognitivi come la Theory of Planned Behavior (TPB; Ajzen, 1991), la Protection Motivation Theory (PMT; Rogers, 1975) e l'Health Belief Model (HBM; Rosenstock, 1974) – fornisce strumenti sofisticati per diagnosticare in quali punti il ciclo percezione-consapevolezza-reazione rischi di interrompersi. Contemporaneamente, queste teorie suggeriscono come la mediazione progettuale possa intervenire per sostenere e completare tale ciclo, ad esempio agendo sull'auto-efficacia percepita (self-efficacy) o sulle strategie di coping. Ne consegue che non esiste mediazione progettuale realmente efficace se questa si limita al solo livello estetico dell'installazione o alla pura e semplice visualizzazione dei dati. Una mediazione di successo deve operare in maniera sinergica su quattro livelli: cognitivo, emotivo, volizionale e pratico. L'intervento di design deve rendere fisicamente percettibile l'evento, intellegibile il suo significato, motivazionale la risposta emotiva che ne scaturisce e, infine, conseguente e sostenibile nel tempo l'azione correttiva dell'utente.

### 3.1 Verso la definizione di evento sensibile

La nozione di evento ricopre un ruolo centrale nell'elaborazione teorica delle scienze umane, sociali e filosofiche, assumendo nel tempo connotazioni differenti a seconda del contesto disciplinare di riferimento.

Il termine evento deriva dal latino *eventus*, esito o risultato, e dal verbo *evenire*, “accadere” o “realizzarsi”. In questa prospettiva originaria appare già la duplice dimensione dell'evento come fatto che si compie e come fenomeno che modifica lo stato delle cose (Marrou, 1954)

In ambito filosofico, la questione dell'evento si evolve oltre la pura registrazione fattuale. Si pensi ad autori come Heidegger, che individua nell'evento un momento di disvelamento dell'essere, un'occasione attraverso cui la verità si manifesta nel flusso storico (Heidegger, 1938; Zarader, 2004). In questa accezione, l'evento si configura come rottura o discontinuità in grado di ridefinire i confini concettuali e le categorie interpretative fondamentali.

Più radicale è la posizione di Derrida, secondo cui l'evento è ciò che eccede la possibilità di previsione o di pianificazione, emergendo come novità assoluta, “impossibile che accada” (Derrida, 1997; Zarader, 2004). L'evento in questa lettura, ha la capacità di essere imprevedibile e di mettere in discussione l'ordine costituito.

La letteratura sociologica attribuisce all'evento una funzione di catalizzatore di cambiamenti e processi di agency. Wittgenstein (1953) considera l'evento come nodo concettuale in cui si intrecciano azione e percezione, aprendo alle possibilità di trasformazione sociale. Studi sulle pratiche organizzative e sulle forme della comunicazione pubblica hanno evidenziato il ruolo degli eventi come strumenti di produzione di valore e di aggregazione di senso collettivo (Belli, 2012)

Alla luce di quanto ricostruito, la declinazione più affine per questa indagine è quella che colloca l'evento come accadimento puntuale e talvolta latente, capace di innestare discontinuità nella percezione, nella struttura del reale e nell'esperienza vissuta. L'evento non si riduce a esito di cause anteriori, ma si configura come manifestazione attiva di novità e trasformazione, che esige l'adozione di strumenti teorici e progettuali in grado di rilevare la presenza e il significato.

(Heidegger, 1938; Derrida, 1997; Zarader, 2004; Wittgenstein, 1953).

In sintesi, l'evento può essere definito come “accadimento che introduce una rottura significativa o una novità interpretativa all'interno di un contesto storico, sociale o fenomenologico, richiedendo una revisione delle categorie di analisi tradizionali”





### 3.2 Definizione di evento sensibile

Nell'epoca dell'Antropocene, l'essere umano è costantemente immerso in fenomeni che determinano la sua sopravvivenza ma che sfuggono alla sua percezione diretta. In questa tesi, definiamo Evento Sensibile una condizione dell'ambiente fisico, digitale o sociale che, pur possedendo una realtà ontologica e conseguenze causali concrete, rimane al di sotto della soglia di coscienza dell'utente.

Questa "latenza" non è un difetto del fenomeno, ma un limite strutturale dell'apparato sensoriale umano o della configurazione spazio-temporale in cui il fenomeno si manifesta. Come argomenta Timothy Morton, fenomeni pervasivi come la contaminazione ambientale sono Iperoggetti (Hyperobjects): occupano una dimensione temporale e spaziale così vasta da risultare "non-locali" rispetto alla percezione umana immediata [31, p. 38]. La CO<sub>2</sub> in una stanza agisce come un "micro-iperoggetto": possiede la caratteristica della viscosità descritta da Morton — ci avvolge e ci penetra senza che possiamo distanziarcene o osservarla oggettivamente [31, pp. 27-32].

*"Hyperobjects are viscous. They adhere to any other object they touch, no matter how hard an object tries to resist."*

— Timothy Morton, *Hyperobjects*, p. 27

Gli eventi sensibili sono fenomeni, condizioni o cambiamenti che avvengono in un ambiente o in un organismo e che hanno conseguenze rilevanti per la salute, il benessere o il comportamento, ma che non sono immediatamente percepibili dai sensi umani.

### Proposta di definizione

*Si definisce evento sensibile un evento che, pur essendo concreto e temporalmente definito, possiede la capacità di essere percepito o di influenzare la sensibilità dell'individuo o del sistema in modi che possono coinvolgere percezione sensoriale diretta o indiretta, risposte emotive e processi cognitivi mediati.*

*Questo concetto dà spazio sia agli eventi immediatamente percepibili sia a quelli latenti o mediati, la cui consapevolezza necessita di tecnologie, mediazioni culturali o cognitive per emergere pienamente.*



### 3.3 Proposta di Tipizzazione

Per progettare dispositivi di mediazione efficaci, è necessario operare una suddivisione tassonomica degli eventi. Non li classificheremo in base alla loro natura scientifica (chimica, fisica, digitale), bensì in base alla loro impercettibilità. Si propone la seguente tripartizione degli Eventi Sensibili:

#### *Classe I: Eventi Extrasensoriali*

Questa tipologia include fenomeni fisici per i quali l'evoluzione non ci ha dotati di recettori specifici. Un esempio emblematico è la radiazione elettromagnetica o la concentrazione di gas inodori come la CO<sub>2</sub> e i VOC (Composti Organici Volatili).

Secondo l'approccio ecologico di James J. Gibson, noi percepiamo le affordances (opportunità di azione) dirette nell'ambiente [42, p. 127]. Tuttavia, un ambiente saturo di CO<sub>2</sub> non offre affordances negative visibili (non "sembra" pericoloso), creando una discrepanza tra pericolo reale e sicurezza percepita.

Il design deve intervenire con una "traduzione sinestetica", creando un sesto senso artificiale. Il dispositivo diventa, nel linguaggio di Don Ihde, una relazione ermeneutica (Hermeneutic Relation): l'utente deve "leggere" il dispositivo per conoscere una proprietà del mondo altrimenti inaccessibile, instaurando una relazione del tipo (Uomo-Tecnologia) Mondo [41, pp. 80-85].

#### *Classe II: Eventi Crono-Latenti*

Sono fenomeni teoricamente percepibili dai sensi, ma il cui gradiente di cambiamento è così lento da sfuggire alla Just Noticeable Difference (JND). È il caso del graduale peggioramento dell'aria in un ufficio chiuso o del lento variare della temperatura cromatica della luce.

Il sistema nervoso umano è ottimizzato per rilevare transienti rapidi, non accumuli lenti. Si verifica un fenomeno di "assuefazione sensoriale" simile a quello descritto da Merleau-Ponty nella Fenomenologia della Percezione: il corpo incorpora l'ambiente abituale nel proprio Body Schema (schéma corporel), relegandolo allo sfondo dell'attenzione cosciente [35, pp. 142-145].

#### *Classe III: Eventi Astratti o "Iper-reali" (Limite Ontologico)*

Riguarda fenomeni privi di corpo fisico, come i flussi di dati, i bias algoritmici o la violazione della privacy digitale.

**Il problema percettivo:** Questi eventi mancano di fisicità. Shoshana Zuboff definisce il potere instrumentariano (instrumentarian power) come una forza che opera attraverso l'architettura computazionale automatizzata per conoscere e plasmare il comportamento umano senza essere rilevata fisicamente [48, p. 8].

Il design deve operare una "materializzazione": trasformare l'astratto in concreto. Un dispositivo che vibra o oppone resistenza fisica quando i dati vengono esfiltrati restituisce "peso" a un'azione digitale altrimenti eterea, rendendo tangibile quella che Zuboff chiama "l'espropriazione dell'esperienza umana" [48, p. 10].



# 02 **Caso Studio**



## 2 La Qualità dell'Aria negli Ambienti di Lavoro

### 2.1 La Centralità della Qualità dell'Aria Interna

La qualità dell'aria interna (IAQ) rappresenta un prerequisito fondamentale per garantire la salute, il benessere e la produttività degli occupanti negli ambienti di lavoro, in particolare negli uffici dove i lavoratori trascorrono una porzione significativa del loro tempo. La IAQ non è determinata da un singolo fattore, ma è il risultato di una complessa interazione tra parametri fisici (temperatura, umidità), chimici (composti organici volatili, particolato) e biologici (batteri, funghi). La gestione inadeguata di questi parametri può portare a un degrado ambientale che minaccia direttamente la salute dei dipendenti, rendendo necessaria l'adozione di protocolli di monitoraggio e intervento efficaci da parte dei datori di lavoro.

In assenza di sistemi di monitoraggio continuo, il degrado della qualità dell'aria si manifesta spesso attraverso quelli che possono essere definiti “eventi sensibili”. Questi eventi, che includono percezioni olfattive sgradevoli e l'insorgenza di sintomatologie fisiche, fungono da primi indicatori di allarme di una contaminazione ambientale latente.

Come evidenziato nello studio di Grini et al. (2025), le indagini sulla qualità dell'aria sono frequentemente innescate da segnalazioni soggettive piuttosto che da rilevazioni strumentali preventive. Nel caso specifico analizzato, è stata la percezione di un “odore chimico caratteristico” e la comparsa di sintomi aspecifici tra i dipendenti (mal di testa, irritazione alla gola, dispnea) a rivelare la presenza di inquinanti pericolosi. Questi sin-



tomi sono spesso associati alla Sick Building Syndrome (SBS), una condizione in cui il malessere è strettamente correlato alla permanenza in un edificio specifico e tende a risolversi con l'allontanamento dallo stesso. Pertanto, l'evento sensibile non è solo un disagio momentaneo, ma un dato qualitativo essenziale che riflette la presenza di una miscela di fattori di rischio (cocktail di inquinanti) che agiscono spesso in modo sinergico.

## 2.2 Caratterizzazione degli Inquinanti e Fonti di Emissione

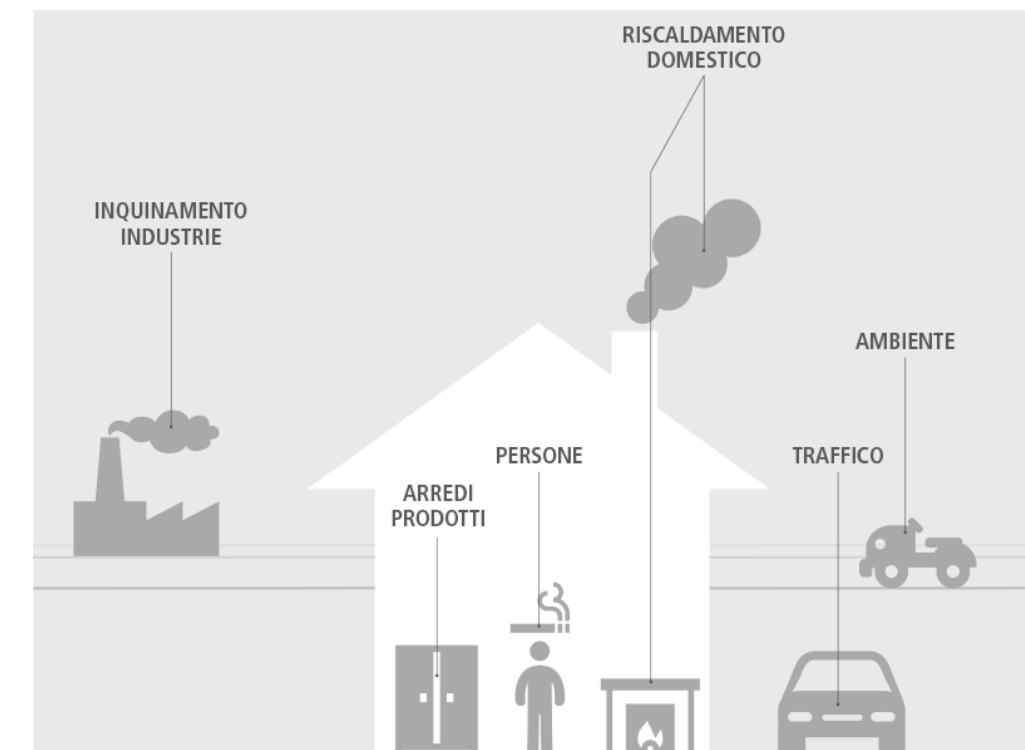
L'analisi della IAQ richiede l'identificazione precisa delle sorgenti inquinanti, che possono essere di natura esterna o interna. Inquinanti Chimici (COV): i Composti Organici Volatili (COV) rappresentano una delle classi di inquinanti più critiche negli uffici, poiché possono essere emessi da materiali da costruzione, arredi, attrezzature elettroniche e prodotti di consumo; lo studio di riferimento ha evidenziato come materiali obsoleti, come l'isolamento bituminoso, possano rilasciare sostanze nocive come il naftalene anche a distanza di decenni, e come azioni di rimedio e nuove pratiche igieniche (es. uso intensivo di disinfettanti e deodoranti post-COVID) possano introdurre nuovi inquinanti, aumentando paradossalmente il carico totale di COV nell'ambiente.

### *Contaminanti Biologici:*

La proliferazione di agenti biologici, come muffe e batteri, è strettamente legata a parametri fisici inadeguati, in particolare l'umidità relativa e la ventilazione; la presenza visibile di muffe o la percezione di aria viziata sono eventi sensibili che denotano una manutenzione carente dei sistemi HVAC (riscaldamento, ventilazione e condizionamento) o problemi strutturali dell'edificio. Particolato (PM): l'infiltrazione di aria esterna e il calpestio degli occupanti contribuiscono ai livelli di particolato sospeso (PM2.5 e PM10), che può penetrare nel sistema respiratorio causando infiammazione e stress ossidativo.

### *Anidride Carbonica (CO2):*

La CO2 è un indicatore chiave dell'adeguatezza della ventilazione e, più in generale, della qualità dell'aria interna negli ambienti di lavoro, perché tende ad accumularsi quando il ricambio d'aria è insufficiente rispetto all'occupazione e alle attività svolte. La sua principale fonte indoor è il metabolismo umano (respirazione), quindi la concentrazione cresce con l'affollamento e con la scarsa ventilazione, risultando particolarmente adatta per "rendere misurabile" un evento sensibile invisibile (gas inodore e incolore). Evidenze sperimentali in contesti di ufficio indicano associazioni tra livelli più elevati di CO2 e peggiori performance cognitive/decision-making, con impatti su attenzione e produttività, rendendo questo parametro centrale per il monitoraggio e per strategie di sensibilizzazione attraverso visualizzazione e physicalization dei dati. Inoltre, documenti di riferimento in ambito HVAC sottolineano che la CO2 non va interpretata come unico indicatore di rischio, ma come proxy della ventilazione (e quindi della potenziale accumulazione di altri inquinanti indoor), motivo per cui viene ampiamente impiegata nelle pratiche di controllo della ventilazione e nelle linee guida tecniche.





### 2.3 Sick Building Syndrome

La *Sick Building Syndrome (SBS)* è una condizione multifattoriale in cui gli occupanti di un edificio riportano un insieme di sintomi aspecifici (per esempio irritazione di occhi/naso/gola, cefalea, affaticamento, difficoltà di concentrazione e “aria pesante”) che tendono a peggiorare durante la permanenza negli ambienti indoor e a ridursi o scomparire dopo l’allontanamento dall’edificio; a differenza delle building-related illnesses (patologie con eziologia identificabile), la SBS non è in genere attribuibile a un singolo agente causale ma emerge dall’interazione tra ventilazione inadeguata e accumulo di contaminanti (COV, particolato, sottoprodotti di pulizia), contaminanti biologici (muffe, batteri, endotossine/allergeni), fattori microclimatici (temperatura, umidità, correnti d’aria) e anche determinanti organizzativi/psicosociali che modulano percezione e stress, rendendo necessaria una valutazione integrata edificio–impianti HVAC–occupazione–comportamenti; in questo quadro, indicatori come la CO<sub>2</sub> vengono spesso usati operativamente come proxy dell’efficacia della ventilazione (non come “inquinante unico”), perché livelli elevati segnalano un insufficiente ricambio d’aria e quindi una maggiore probabilità di co-accumulo di altri inquinanti indoor.

La letteratura individua tra i principali fattori favorenti la ventilazione insufficiente, l’accumulo di inquinanti chimici indoor, la presenza di contaminanti biologici, un microclima sfavorevole e, in alcuni casi, anche determinanti organizzativi e psicosociali che influenzano la percezione del disagio ambientale. In particolare, materiali da costruzione, arredi, prodotti per la pulizia e apparecchiature possono rilasciare composti volatili irritanti, mentre muffe, batteri e altri contaminanti biologici possono contribuire alla comparsa di sintomi respiratori e di discomfort generale. Per tale ragione, la valutazione della SBS richiede un approccio integrato che consideri simultaneamente edificio, impianti HVAC, modalità di occupazione degli spazi e pratiche di gestione e manutenzione.

In questo quadro, la concentrazione di anidride carbonica non viene interpretata come causa univoca della sindrome, ma come indicatore operativo dell’efficacia della ventilazione. Valori elevati di CO<sub>2</sub> suggeriscono infatti un insufficiente ricambio d’aria e, di conseguenza, una maggiore probabilità di co-accumulo di altri inquinanti indoor, chimici o biologici, che possono concorrere al peggioramento del comfort e del benessere degli occupanti. La CO<sub>2</sub> assume dunque il ruolo di proxy ambientale utile a leggere in modo sintetico la qualità della ventilazione e, indirettamente, il potenziale rischio di condizioni favorevoli alla SBS.

World Health Organization (WHO). *Indoor Air Pollutants: Exposure and Health Effects* (EURO Reports and Studies 78). 1983.



#### 2.4 Il Paradosso dell'Edificio come "Santuario": Discrepanza tra Qualità Reale e Percepita

La narrativa storica e culturale moderna ha consolidato l'idea dell'edificio come un "santuario" tecnologico, in grado di proteggere gli occupanti dalle minacce dell'inquinamento atmosferico urbano. Tuttavia, recenti evidenze empiriche mettono in discussione questo paradigma, rivelando una frattura significativa tra la percezione di sicurezza degli occupanti e la realtà misurata dei dati ambientali.

Lo studio di McCormick e Rider (2025), "Inside Out: Perceptions and Realities of Ambient Pollution and Indoor Air Quality", fornisce una disamina critica di questo fenomeno attraverso un'analisi comparativa condotta su quattro edifici per uffici ad alte prestazioni negli Stati Uniti. La ricerca decostruisce due miti fondanti della gestione immobiliare moderna: l'assunto che l'aria interna sia intrinsecamente più salubre di quella esterna e la convinzione che l'inquinamento indoor sia prevalentemente di origine esogena (infiltrazioni di smog).



#### 2.5 Analisi dei Dati: La Caduta del Mito della Salubrità Interna

Contrariamente alla percezione diffusa, condivisa da circa l'80% degli intervistati nello studio, secondo cui l'ambiente di lavoro offre una protezione superiore rispetto all'esterno, i dati di monitoraggio continuo raccontano una realtà più complessa. L'analisi strumentale ha rivelato che l'aria interna è risultata qualitativamente superiore a quella esterna solo per il 59,2% delle ore lavorative totali. In contesti urbani densi come Washington DC e Atlanta, per quasi la metà del tempo, l'aria esterna (ambientale) presentava concentrazioni di inquinanti inferiori rispetto all'aria interna. Questo ribaltamento delle aspettative dimostra che l'involucro edilizio, seppur sigillato ed efficiente, può trasformarsi da barriera protettiva a trappola per gli inquinanti, accumulando sostanze nocive che non vengono adeguatamente diluite o rimosse dai sistemi di ventilazione meccanica.

#### 2.6 Verso un Monitoraggio Integrato

Le risultanze di McCormick e Rider rafforzano la necessità, già delineata nel capitolo normativo, di adottare strategie di monitoraggio strumentale continuo (come prescritto dai protocolli RESET o WELL) che rendano visibile l'invisibile.

La gestione della IAQ non può limitarsi a filtrare l'aria in ingresso, ma deve evolvere verso un controllo attivo delle sorgenti interne (Source Control) e una ventilazione dinamica guidata dai dati reali dei contaminanti chimici (VOC e CO<sub>2</sub>), superando definitivamente l'approccio statico basato sulla sola filtrazione del particolato esterno. Solo colmando il divario tra la "sicurezza percepita" e la "qualità misurata" sarà possibile garantire ambienti di lavoro realmente salubri.



## 2.7 L'Impatto Economico e Cognitivo

### Dal Costo Energetico al Capitale Umano

Nell'analisi della gestione degli edifici per uffici, l'approccio tradizionale si è storicamente concentrato sull'efficienza energetica e sulla riduzione dei costi operativi. Tuttavia, questa prospettiva limitata rischia di trascurare la voce di spesa più significativa per qualsiasi organizzazione: il capitale umano. Secondo il modello "3-30-300" elaborato da J.L.L. e ripreso da Allen e Macomber (2020), i costi aziendali medi per piede quadrato all'anno si ripartiscono in circa \$3 per le utenze, \$30 per l'affitto e \$300 per i salari dei dipendenti. (Allen & Macomber, 2020, pp. 25-35) Questa sproporzione evidenzia un paradosso gestionale: le strategie di risparmio energetico che riducono i tassi di ventilazione per contenere i costi delle utenze (i \$3) possono inavvertitamente degradare la produttività della forza lavoro (i \$300), generando perdite economiche che superano di gran lunga i risparmi ottenuti. Il presente capitolo analizza come la qualità dell'aria interna (IAQ) non sia meramente un parametro di comfort, ma una variabile determinante per le funzioni cognitive superiori e la performance economica aziendale.

### Le Fondamenta dell'Edificio Sano ("Healthy Building")

Per comprendere come l'ambiente fisico influenzi la fisiologia umana, è necessario fare riferimento al quadro teorico delle "9 Fondamenta di un Edificio Sano". Questa tassonomia identifica i determinanti ambientali critici per la salute occupazionale: ventilazione, qualità dell'aria, salute termica, umidità, polvere e parassiti, sicurezza, qualità dell'acqua, rumore e illuminazione.

Tra questi, la ventilazione e la qualità dell'aria assumono un ruolo preminente. La riduzione dei Composti Organici Volatili (COV) e l'incremento dell'apporto di aria esterna non servono solo a prevenire patologie respiratorie, ma agiscono direttamente su l'ossigenazione cerebrale e sulla riduzione del carico infiammatorio sistemico, creando le pre condizioni fisiologiche per prestazioni mentali ottimali. Allen & Macomber, 2020, pp. 45-68



### Evidenze Empiriche: Lo Studio COGfx e il Potenziamiento Cognitivo

Il nesso causale tra qualità dell'aria e produttività è stato quantificato in modo rigoroso dallo studio COGfx (Cognitive Function), condotto dalla Harvard T.H. Chan School of Public Health. La ricerca ha valutato le prestazioni cognitive di lavoratori della conoscenza esposti a diverse condizioni ambientali simulate, mantenendo invariati altri fattori di stress. I risultati hanno dimostrato una correlazione positiva non lineare tra la qualità dell'aria e le capacità decisionali:

- In ambienti "Green" (basse concentrazioni di COV), i punteggi cognitivi sono aumentati del 61% rispetto agli uffici standard.
- In ambienti "Green+" (bassi COV e tassi di ventilazione raddoppiati), l'aumento ha raggiunto il 101%.

L'impatto più significativo è stato osservato nelle funzioni cognitive superiori, quelle essenziali per la leadership e il lavoro intellettuale complesso:

- Strategia: +288% (capacità di pianificare azioni future).
- Utilizzo delle Informazioni: +299% (capacità di raccogliere e sintetizzare dati).
- Risposta alle Crisi: +131% (capacità di gestire emergenze impreviste).

Questi dati indicano che un ambiente insalubre non si limita a causare disagio fisico, ma induce un vero e proprio "deficit cognitivo ambientale", rallentando i processi mentali e riducendo l'efficacia decisionale. (Allen & Macomber, 2020, pp. 75-90)

### Analisi Costi-Benefici e Ritorno sull'Investimento (ROI)

Tradurre questi guadagni cognitivi in metriche finanziarie è fondamentale per giustificare gli investimenti in tecnologie di monitoraggio e ventilazione (come i sensori ISO 16000-29 e i purificatori discussi nei capitoli precedenti).

Allen e Macomber propongono un calcolo del ROI basato sull'incremento di produttività. Si stima che il costo per raddoppiare i tassi di ventilazione in un edificio standard sia nell'ordine di \$40 per persona all'anno.

A fronte di questo investimento marginale, il miglioramento delle funzioni cognitive e la riduzione dell'assenteismo possono generare un valore aggiunto di produttività stimato fino a \$6.500 per persona all'anno.

Il rapporto costi-benefici è dunque fortemente asimmetrico a favore dell'intervento: l'implementazione di sensori per il controllo dinamico della IAQ e l'ottimizzazione degli impianti HVAC rappresentano investimenti ad alto rendimento, trasformando l'edificio da centro di costo a leva strategica per la competitività aziendale. Allen & Macomber, 2020, pp. 105-115



2.8 Qualità dell'aria nei luoghi di lavoro

Cosa prevede il Testo Unico della sicurezza

Il *D.Lgs. 81/2008* prescrive il rispetto di specifici requisiti negli ambienti chiusi in relazione al microclima e alla qualità dell'aria. Con riferimento al controllo della qualità dell'aria degli ambienti non industriali, l'Allegato IV "*Requisiti dei luoghi di lavoro*" fornisce al punto 1.9.1.1 la seguente prescrizione per la qualità dell'aria: nei luoghi di lavoro chiusi, è necessario far sì che tenendo conto dei metodi di lavoro e degli sforzi fisici ai quali sono sottoposti i lavoratori, essi dispongano di aria salubre in quantità sufficiente ottenuta preferenzialmente con aperture naturali e quando ciò non sia possibile, con impianti di aerazione.

A seguire è previsto che:

- Se viene utilizzato un impianto di aerazione, esso deve essere sempre mantenuto funzionante. Ogni eventuale guasto deve essere segnalato da un sistema di controllo, quando ciò è necessario per salvaguardare la salute dei lavoratori.
- Se sono utilizzati impianti di condizionamento dell'aria o di ventilazione meccanica, essi devono funzionare in modo che i lavoratori non siano esposti a correnti d'aria fastidiosa. Gli stessi impianti devono essere periodicamente sottoposti a controlli, manutenzione, pulizia e sanificazione per la tutela della salute dei lavoratori.
- Qualsiasi sedimento o sporcizia che potrebbe comportare un pericolo immediato per la salute dei lavoratori dovuto all'inquinamento dell'aria respirata deve essere eliminato rapidamente.

Il *D.Lgs. 81/2008* risulta carente di elementi quantitativi; ciò implica che qualsiasi valutazione in merito va realizzata facendo riferimento alla normativa tecnica. Non risultano pertinenti né il Titolo IX "Sostanze pericolose", visto che tratta le esposizioni occupazionali ed è quindi applicabile agli ambienti industriali, né i "valori limite di esposizione professionale" definiti nell'allegato XXXVIII, né il Titolo X riferito agli inquinanti microbiologici.

La qualità dell'aria interna è considerata accettabile quando in essa non sono presenti inquinanti in concentrazioni dannose, secondo quanto stabilito dalle autorità competenti, e quando una larga maggioranza delle persone esposte (80% o più) non esprime insoddisfazione verso di essa (ANSI/ASHRAE 62.1).

I due elementi cardine di questa definizione sono: l'eventuale presenza di sostanze inquinanti in concentrazioni sufficientemente elevate da risultare dannose; il giudizio espresso dagli individui riguardo all'agente di discomfort (la qualità dell'aria).

Esistono quattro tipologie di sostanze inquinanti in ambienti indoor:

| Parametro / Inquinante            | Valore Soglia / Valore Guida     | Effetti per esposizioni oltre la soglia                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Anidride Carbonica (CO2)          | < 1000 ppm (Classe IEQ II)       | Scarsa ventilazione, sonnolenza, calo della produttività |
|                                   | > 1200 ppm                       | Necessità di interventi correttivi e ricambio d'aria     |
| Particolato Fine (PM10)           | 50 µg/m³ (soglia giornaliera)    | Irritazione delle vie respiratorie                       |
| Particolato Fine (PM2.5)          | 25 µg/m³ (soglia giornaliera)    | Penetrazione profonda nei polmoni, effetti sistemici     |
| Composti Organici Volatili (TVOC) | 500 µg/m³ - 1000 µg/m³ (1 mg/m³) | Cefalee, irritazione mucosa, "Sick Building Syndrome"    |
| Monossido di Carbonio (CO)        | 35 ppm                           | Tossicità sistemica, affaticamento                       |
| Formaldeide                       | 0.1 ppm                          | Irritante chimico, potenziale cancerogeno                |

- le sostanze generate dagli occupanti;
- le sostanze generate dai materiali edilizi e di arredo;
- le sostanze generate dalle lavorazioni eseguite;
- le sostanze presenti nell'aria esterna (particolato e gas/vapori), immesse all'interno della ventilazione naturale o meccanica.

Quando le concentrazioni di una o più di tali sostanze sono tali da risultare dannose/pericolose, il datore di lavoro è tenuto alla valutazione del rischio per la salute per esposizioni a sostanze pericolose (D.lgs. 81/2008 – Titolo IX). In questo caso si ha a che fare con un possibile rischio per la salute e non con un possibile discomfort. Nel caso contrario, in cui nessuna delle sostanze sopra elencate è presente in concentrazioni tali da risultare dannosa/pericolosa, la valutazione da effettuare è relativa all'entità dell'eventuale disturbo arrecato dalla qualità dell'aria indoor – IAQ (D.lgs. 81/2008 – Allegato IV).

Questo elemento potenzialmente concorre, assieme ad altri elementi quali l'ambiente termico, acustico e luminoso, ad impedire che gli individui presenti avvertano quella generale sensazione di soddisfazione per l'ambiente, comunemente definita "benessere" o "comfort". La qualità dell'aria va opportunamente valutata ed inserita all'interno del Documento di Valutazione dei Rischi per la salute e sicurezza (DVR), previsto dall'art. 28 del d.lgs. 81/2008.

Secondo lo standard **ANSI/ASHRAE 62-1** l'accettabilità della qualità dell'aria risulta legata ad un giudizio positivo espresso da una forte maggioranza dei soggetti. Come per l'ambiente termico, così anche per l'IAQ sono stati cercati descrittori di natura chimico/fisica collegati al giudizio soggettivo, che consentano una valutazione oggettiva dell'ambiente.

Ai fini della valutazione sono percorribili due percorsi:

- il metodo diretto-prestazionale, prevede che l'accettabilità risulti associata al mantenimento al di sotto di opportune soglie limite le concentrazioni delle sostanze inquinanti;
- il metodo indiretto-prescrittivo, prevede che l'accettabilità risulti associata al mantenimento di flussi in ingresso di aria pulita, di entità pari o superiore ad opportuni valori limite.

Ragionare in termini di concentrazione di inquinanti è assai meno complicato.

Rispetto all'uso della portata d'aria, la concentrazione di inquinanti stabilisce limiti "assoluti" determinati semplicemente dalle caratteristiche di accettabilità legate a loro volta alle loro proprietà e alla sensibilità umana a tali sostanze. Tali limiti, pertanto, non dipendono né dalla densità dei soggetti presenti, né dalla loro attività metabolica, né dalla tipologia né dalla densità degli arredi

La normativa tecnica sulla qualità dell'aria non contiene indicazioni relative agli aspetti pratici delle misurazioni che intervengono nella valutazione del comfort.

Le sostanze la cui concentrazione va misurata sono:

- inquinanti di origine antropica: CO<sub>2</sub> (indoor e outdoor);
- inquinanti emessi da materiali edilizi e arredi: HCHO (formaldeide) e TVOC (composti organici volatili totali);
- inquinanti emessi da sorgenti esterne di tipo gassoso; NO<sub>2</sub> ; SO<sub>2</sub> ; CO ; O<sub>3</sub>
- inquinanti emessi da sorgenti esterne di tipo particolato: PM<sub>2.5</sub>; PM<sub>10</sub>

L'INAIL raccomanda di eseguire le misure mirate alla valutazione della qualità dell'aria in una situazione di "massimo discomfort ricorrente", ovvero nelle condizioni peggiori fra quelle che si ripetono regolarmente.

Per quanto riguarda le sostanze di origine antropica, gli elementi di cui tener conto sono la densità di soggetti nell'ambiente ed il possibile progressivo accumulo durante la giornata. Per quanto riguarda le sostanze emesse dai materiali, l'unico elemento di cui va tenuto conto è che il ritmo di rilascio nell'ambiente cresce all'aumentare della temperatura. Infine, per gli inquinanti di origine esterna, l'elemento prevalente è probabilmente dato dalle condizioni di traffico urbano.



## Certificazione WELL

WELL è una certificazione, o meglio un protocollo, approvato da qualche anno nel mondo dell'edilizia. Esso è gestito dall'International WELL Building Institute e pone al centro le condizioni di salute e benessere mentale di chi occupa un dato spazio costruito. Viene rilasciato dall'America Green Business Certification Inc. (GBCI), la quale si occupa anche della certificazione LEED, e da altri autorevoli enti. In Italia è promossa dalla collaborazione tra l'IWBI e Apta Vitae, società no-profit appositamente creata allo scopo.

Alla base della certificazione WELL, vi sono precetti nati per meglio gestire e vivere il tempo trascorso negli ambienti chiusi, cioè il 90% di una giornata. Possono essere applicati a tutti i settori dell'edilizia e a tutte le destinazioni d'uso degli edifici, ma trovano la loro massima espressione negli ambienti lavorativi come uffici o industrie, nei quali il raggiungimento di una condizione di serenità può avere risvolti positivi anche sulla produttività dell'intera azienda.

I 7 punti focali del benessere WELL

Il protocollo WELL adotta un approccio olistico dove al centro si pone il benessere dell'uomo e si considerano anche fattori importanti come la sostenibilità ambientale, la tutela del paesaggio e l'utilizzo di risorse rinnovabili per la produzione di energia. Frutto di anni di ricerche a cui hanno preso parte medici, nutrizionisti, ingegneri, architetti, il protocollo WELL mira a valutare e certificare quelli che sono considerati i 7 aspetti fondamentali:

- **Benessere psicofisico**, per il quale si intende uno stato generale di salute che tocca mente e corpo e che consente di sentirsi bene e di conseguenza svolgere bene il proprio lavoro. Viene valutato il livello spirituale e anche quello dell'organismo, quindi in che misura gli individui vivono all'interno di un ambiente. Tale sensazione di benessere può essere

ottenuta attraverso l'adozione di diverse soluzioni che mirano ad un obiettivo comune, cioè la soddisfazione e il benessere delle persone.

- **Il comfort**, per il quale si certifica quanto uno spazio indoor sia progettato per il comfort considerando fattori come la temperatura, la pulizia degli ambienti, quanto questi sono rumorosi, quanto gli arredi sono studiati in modo da essere comodi e funzionali o anche per trasmettere tranquillità ed indurre i lavoratori ad essere stimolati nel lavoro.
- **Il movimento**, inteso come modalità per combattere la sedentarietà, trasformando la classica concezione, ormai radicata nell'immaginario collettivo, dell'impiegato che trascorre la sua giornata davanti alla scrivania. In questo aspetto si tratta quindi di scelte progettuali fatte a monte, ridefinendo i tradizionali criteri alla base del costruire e implementandoli con nuove ulteriori riflessioni.
- **La luce**, per la quale non solo è necessario badare ad un adeguato numero di aperture ed al loro posizionamento, ma ancor prima, è necessario compiere appositi studi sull'orientamento dell'edificio. Bisogna valutare quindi quanto lo spazio costruito riceve la luce e il calore fondamentali alla salute e alla serenità.
- **L'alimentazione**, dove viene promossa una alimentazione sana e ricca di nutrienti che può essere incentivata tramite un'accurata selezione delle materie prime che finiscono nelle cucine delle mense aziendali.
- **L'acqua**, i lavoratori devono avere acqua pulita, pura e controllata a portata di mano. Idratarsi in modo costante con acqua di qualità non può che giovare a tutte le diverse funzioni dell'organismo.
- **L'aria**, dove il corretto ricambio di questa, sia attraverso la ventilazione naturale sia servendosi di impianti di ventilazione meccanica controllata, garantisce che si respiri sempre aria pulita, priva di inquinanti tossici, e che il livello di umidità sia sempre ottimale. L'utilizzo di appositi filtri e l'apertura sistematica delle finestre consentono inoltre di ridurre la presenza di VOC (Volatile Organic Compounds - Composti Organici Volatili)

I benefici della certificazione WELL per le aziende

Ottenere la certificazione WELL rappresenta un vantaggio competitivo concreto e misurabile per le imprese:

- Miglioramento del benessere e della produttività**  
La qualità dell’ambiente di lavoro influisce direttamente sulla salute e sulla concentrazione. Una corretta ventilazione, livelli controllati di CO2, una temperatura equilibrata e un’illuminazione adeguata favoriscono la lucidità mentale, riducono affaticamento e stress e contribuiscono a diminuire assenze per malesseri e malattie.
- Riduzione dei costi energetici e operativi**  
Il monitoraggio continuo dei parametri ambientali consente di ottimizzare gli impianti HVAC e di illuminazione, adattando il funzionamento in base alla reale occupazione e alle condizioni climatiche interne. Questo approccio consente di ridurre i consumi combattendo i costi operativi e contribuendo alla riduzione dell’impronta di carbonio.
- Rafforzamento della strategia ESG**  
La certificazione WELL contribuisce agli obiettivi ambientali e sociali delle politiche ESG, migliorando la reputazione aziendale e la capacità di attrarre investitori responsabili  
Sul piano ambientale, promuove la riduzione delle emissioni e il consumo responsabile delle risorse. Sul piano sociale, dimostra l’impegno dell’azienda verso il benessere e la sicurezza delle persone, elementi sempre più richiesti da investitori e stakeholder.  
Integrare la certificazione WELL nelle proprie strategie aziendali significa dunque rendere misurabili e credibili le azioni di sostenibilità.

- Attrattività e retention del personale**  
Lavorare in un ambiente sano e confortevole aumenta la soddisfazione dei lavoratori e rafforza il senso di appartenenza. Gli ambienti certificati WELL comunicano attenzione verso le persone e un approccio al lavoro basato su fiducia e cura.
- Valorizzazione immobiliare**  
Gli edifici progettati o riqualificati secondo i criteri WELL acquisiscono maggiore valore sul mercato immobiliare e risultano più appetibili per investitori, conduttori e tenant istituzionali.  
Il riconoscimento internazionale della certificazione rappresenta una garanzia di qualità, trasparenza e sostenibilità difficilmente replicabile con altri standard.

| Inquinante                        | Precondizione (Limite Base)                         | Ottimizzazione (High-Performance) | Note                                                                  |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| PM2.5                             | < 15 µg/m³                                          | < 12 µg/m³ o persino < 10 µg/m³   | Il PM2.5 è l'inquinante fisico più monitorato dal protocollo          |
| PM10                              | < 50 µg/m³                                          | < 30 µg/m³                        | -                                                                     |
| W                                 | < 1000 ppm (altrimenti < 900 ppm in fase di design) | < 800 ppm o persino < 600 ppm     | Valore essenziale per calcolare l'efficienza della ventilazione (A03) |
| Composti Organici Volatili (TVOC) | 500 µg/m³                                           | < 200 µg/m³                       | Soglia per il comfort olfattivo e la prevenzione da esalazioni        |
| Formaldeide                       | < 27 ppb (o 50 µg/m³)                               | < 13.5 ppb                        | Strettamente legato all'emissione dei materiali di arredo             |
| Monossido di Carbonio (CO)        | 9 ppm                                               | -                                 | E non deve superare di 2 ppm il livello esterno                       |



Secondo le statistiche, trascorriamo il 90% del nostro tempo all'interno di ambienti chiusi. Molti di noi sono consapevoli dell'inquinamento atmosferico esterno ma poco dell'inquinamento indoor. Quest'ultimo può essere altrettanto pericoloso.

All'interno degli edifici possiamo trovare una varietà di contaminanti, dalle sostanze chimiche volatili, precedentemente citate, rilasciate da materiali di costruzione, mobili e prodotti per la pulizia, alle polveri sottili come PM2.5 e PM10, fino agli agenti biologici come muffe e batteri che proliferano in ambienti poco ventilati. La qualità dell'aria interna non dipende solo da ciò che entra dall'esterno, ma anche da:

- Sistemi di ventilazione inadeguati o maltenuti
- Materiali edili che rilasciano sostanze nocive
- Presenza di umidità che favorisce la crescita di muffe
- Affollamenti degli spazi senza adeguato ricambio d'aria
- Attività umane che generano inquinanti

Gli effetti sulla nostra salute e benessere possono essere:

- Immediati
- Mal di testa e affaticamento
- Irritazione agli occhi, naso e gola
- Difficoltà di concentrazione
- Sonnolenza
- A lungo termine
- Disturbi respiratori
- Allergie e asma
- Riduzione delle performance cognitive
- Stress e malessere generale

Il cambiamento è il raggiungimento di una nuova consapevolezza, trovano le loro origini dal periodo della pandemia, dalla quale si evince un'accelerazione sul concetto che stava già emergendo cioè che gli edifici non sono contenitori neutri, ma spazi attivi che influenzano profondamente la nostra vita. Si tratta quindi di creare spazi che promuovono attivamente la salute e il benessere di chi li vive.



*Esempio di progettazione indoor orientata al benessere: la presenza di luce naturale, materiali sostenibili e un'adeguata ventilazione trasformano l'edificio da contenitore passivo a spazio attivo per la promozione della salute psicofisica degli occupanti.*

# Casi Studio

## 1

### Cloud Atlas

*di Zilun Nie, Yao Meng, Chun Song,  
Fengqi Li, Xiaolei Hu*

#### Introduzione al Caso Studio

L'installazione "Cloud Atlas" rappresenta un caso studio paradigmatico nell'ambito dell'architettura interattiva e del design orientato alla consapevolezza ecologica. Commissionata dall'UCCA Center for Contemporary Art di Pechino, l'opera si configura come una stazione meteorologica sperimentale situata a Beidaihe, concepita per esplorare l'architettura quale medium tra l'atmosfera e la percezione umana. Il progetto traduce in modo tangibile problematiche socio-ambientali complesse, trasformando i dati invisibili sulla qualità dell'aria in un'esperienza immersiva per l'osservatore.

#### Concept e Dinamiche Interattive

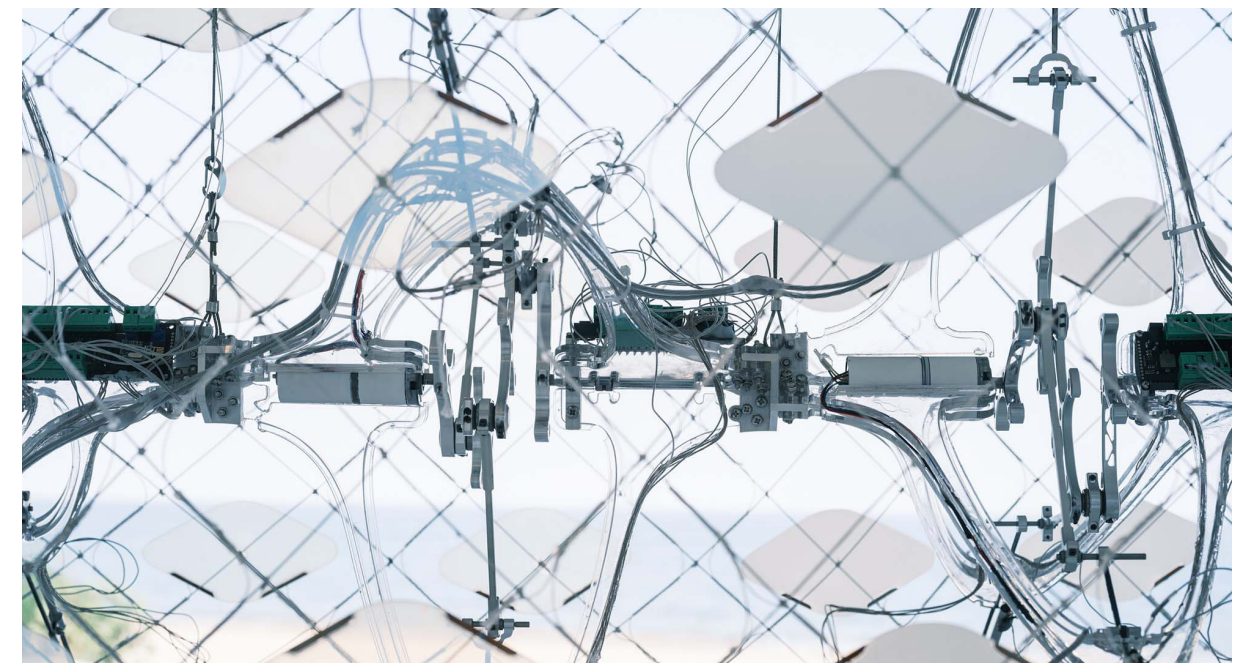
Il nucleo concettuale del dispositivo risiede nella sua capacità di mutare forma, livello di trasparenza e suono in tempo reale, rispondendo alle variazioni dell'Indice di Qualità dell'Aria (AQI). Questa dinamica genera un microcosmo atmosferico in cui l'interazione del pubblico altera il comportamento della struttura, evocando il cosiddetto "effetto farfalla" per evidenziare l'impatto antropico sull'ecosistema naturale. La programmazione dell'opera unisce quindi l'elaborazione dei dati ambientali raccolti al minuto con le risposte spaziali agli stimoli dei visitatori, offrendo una stratificata esperienza estetica e informativa.

#### Materiali e Innovazione Tecnologica

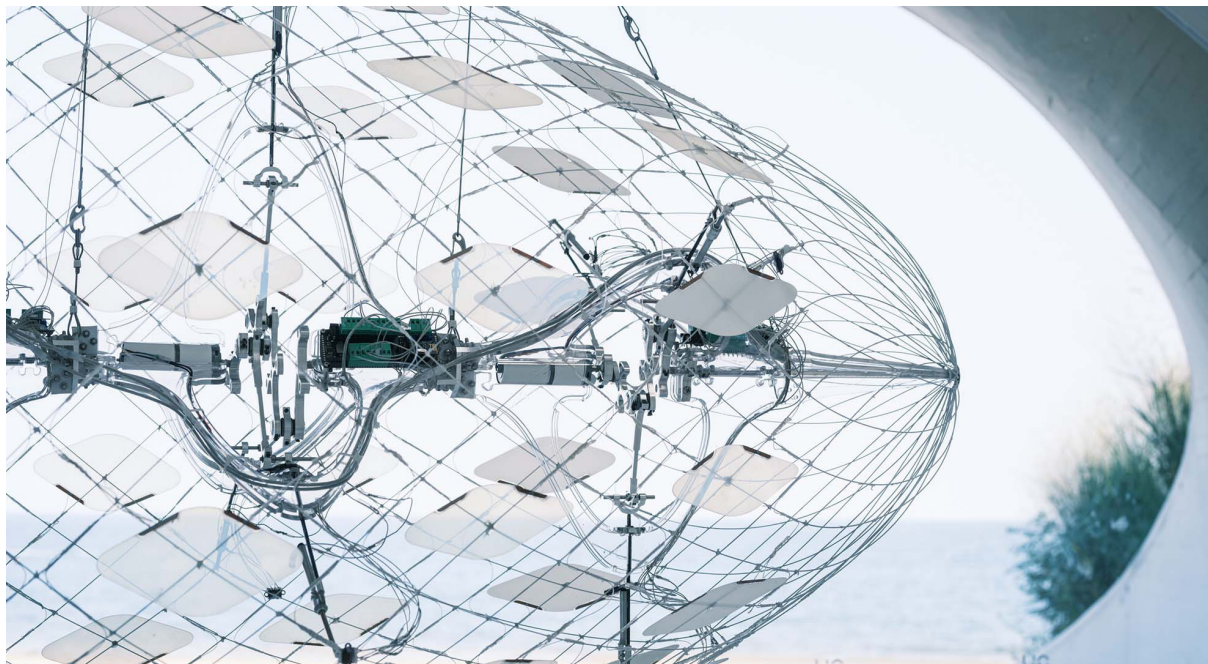
Dal punto di vista ingegneristico, l'opera è suddivisa in un'infrastruttura interna in acrilico e alluminio e in un involucro esterno leggero realizzato in maglia di fibra di carbonio. Sulla superficie esterna sono installate pellicole a trasparenza variabile (STF) tagliate al laser, le quali assumono un aspetto opaco e nebbioso in presenza di aria inquinata per poi tornare trasparenti quando il cielo è terso. Sette unità meccaniche deformano costantemente l'involucro modificando il ritmo di "respirazione" della nuvola, mentre un sistema acustico integrato con moduli wireless arricchisce la percezione sensoriale.

#### Prospettive e Applicazioni Urbane

Oltre alla sua funzione di prototipo artistico, l'installazione illustra un vasto potenziale per la creazione di reti cittadine destinate al monitoraggio ambientale diffuso. Moduli simili, dotati di pelli mobili e mutevoli, potrebbero fungere da indicatori visivi per allontanare i pedoni dalle aree altamente inquinate, delimitando fisicamente i confini delle zone urbane sicure. Questo approccio progettuale fornisce un framework metodologico per lo sviluppo di architetture responsive e sistemi senzienti capaci di far dialogare in modo efficiente i dati climatici con lo spazio abitato.







## 2 World Skies

*Breakfast*

### Introduzione al Caso Studio

L'opera "World Skies", concepita dallo studio newyorkese BREAKFAST, si configura come un'installazione d'arte cinetica interattiva che esplora il confine tra visualizzazione dei dati web e design sensoriale. Lo studio, fondato nel 2009 e guidato da artisti quali Andrew Zolty e Mattias Gunneras, indaga il nesso tra arte, design e tecnologia attraverso dispositivi meccanici in grado di narrare i mutamenti del nostro pianeta. Questo progetto specifico utilizza le informazioni meteorologiche per tradurre l'invisibile mutevolezza del clima globale in un'esperienza tangibile e tridimensionale.

### Concept e Dinamiche Interattive

Il fulcro concettuale del dispositivo risiede nella sua capacità di mostrare le condizioni atmosferiche in tempo reale — tra cui copertura nuvolosa, vento e precipitazioni — di qualsiasi città del mondo selezionata dall'utente. Quando un osservatore si avvicina all'opera, un sensore di profondità rileva la sua presenza e sostituisce la mappa meteorologica con un "riflesso" cinetico della persona stessa. Il livello di contrasto di questa sagoma varia dinamicamente in base alla reale copertura nuvolosa della città scelta in quel preciso istante, simulando l'effetto visivo che la luce solare o il cielo coperto avrebbero sull'aspetto dell'individuo se si trovasse fisicamente in quel luogo.

### Materiali e Innovazione Tecnologica

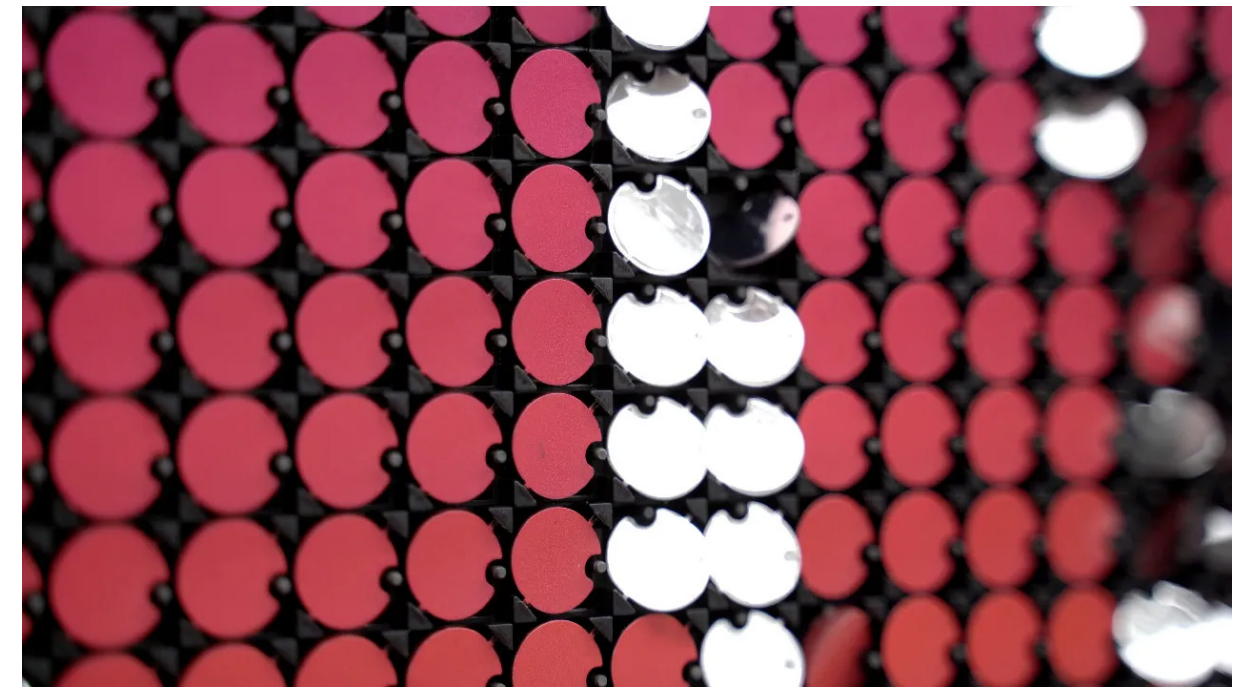
Dal punto di vista tecnico e ingegneristico, "World Skies" recupera la tecnologia dei "Flip-Discs" (o Flip Dots), un medium meccanico ed elettromagnetico a dischi mobili sviluppato originariamente negli anni Sessanta per i tabelloni e la segnaletica aeroportuale. Il



team multidisciplinare di BREAKFAST ha reingegnerizzato sia l'hardware che il software di questa tecnologia obsoleta, incrementando drasticamente la velocità di rotazione dei dischi per supportare animazioni fluide e interazioni istantanee. L'infrastruttura fisica dell'opera, che si presenta come un pannello dal peso di 25 chilogrammi, integra al suo interno sensori, un computer dedicato e un modulo Wi-Fi necessario per il costante approvvigionamento dei dati.

### Prospettive e Significato dell'Opera

L'installazione supera la mera funzione estetica per proporsi come uno strumento narrativo in grado di connettere empaticamente l'osservatore a luoghi geograficamente distanti. Attraverso la gestione innovativa dei flussi di dati ambientali, il progetto spinge i confini tecnologici per stimolare riflessioni sulla connettività globale e sul nostro rapporto con l'ambiente circostante. L'ibridazione tra la fisicità quasi analogica dei dischi rotanti e l'immaterialità delle informazioni digitali offre un modello progettuale esemplare per lo sviluppo di interfacce cinetiche ed emozionali.





## 3

**Institute du monde arabe***Jean Nouvel***Introduzione al Caso Studio**

L'Institut du Monde Arabe, inaugurato a Parigi nel 1987, rappresenta un capolavoro dell'architettura contemporanea progettato da Jean Nouvel in collaborazione con Architecture Studio. Nato su impulso governativo per consolidare le relazioni diplomatiche e culturali tra la Francia e i Paesi arabi, l'edificio si pone come un polo d'eccellenza che ospita spazi espositivi, una biblioteca e un centro studi. Il complesso architettonico si sviluppa lungo la Senna, instaurando un dialogo visivo e simbolico tra il tessuto urbano storico parigino e le radici della cultura araba.

**Concept e Dinamiche Interattive**

Il fulcro concettuale dell'opera risiede nella gestione dinamica della luce naturale attraverso una rilettura in chiave moderna degli elementi architettonici vernacolari. Sulla facciata sud, Nouvel reinterpreta i tradizionali moucharabieh lignei introducendo 240 diaframmi metallici intelligenti, concepiti per funzionare in modo analogo all'otturatore di una macchina fotografica. Questi dispositivi fotosensibili si dilatano e si contraggono meccanicamente in risposta all'intensità dell'irraggiamento solare, filtrando la luce e proiettando suggestivi arabeschi geometrici all'interno degli ambienti espositivi.

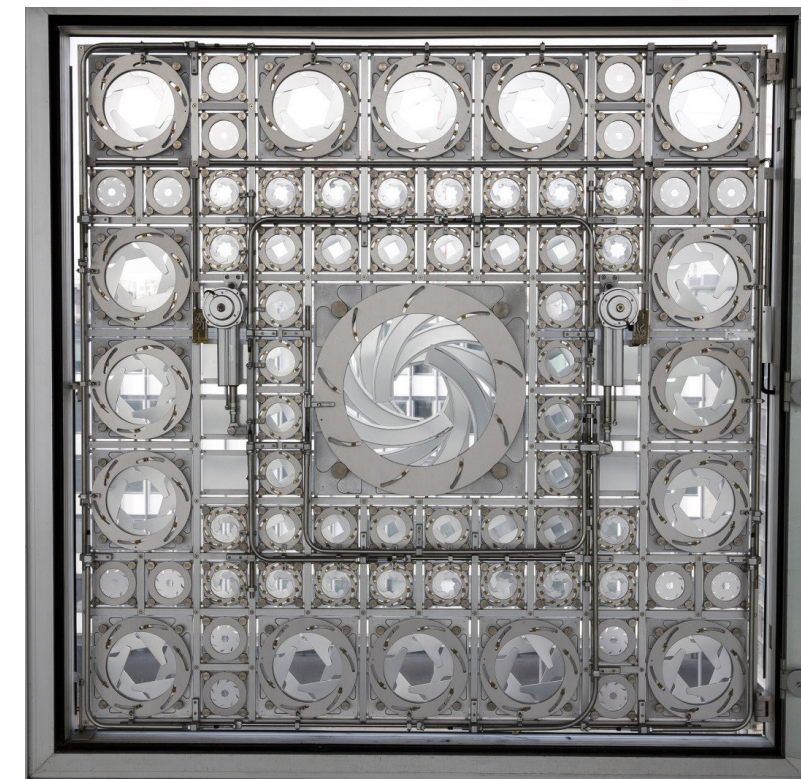
**Materiali e Innovazione Tecnologica**

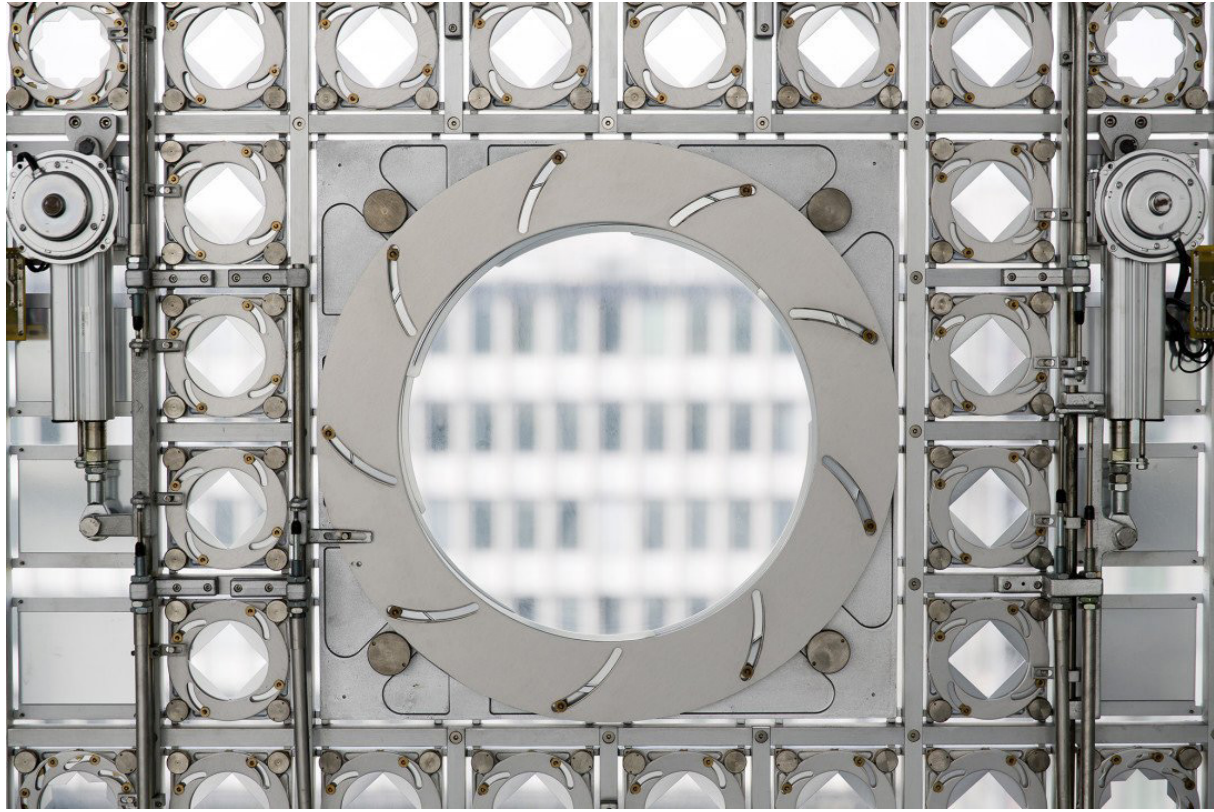
La realizzazione dell'edificio si fonda su un rigoroso impiego di materiali industriali quali il vetro, l'alluminio e l'acciaio, i quali conferiscono alla struttura un'estetica tecnologica ed essenziale. I moduli quadrati e poligonali che compongono la facciata mobile sono il risultato di una complessa ingegnerizzazione meccanica, volta

a coniugare il rigore geometrico con le necessità climatiche degli spazi interni. Questa sofisticata pelle architettonica ha segnato un punto di svolta per la progettazione bioclimatica, dimostrando come la tecnologia avanzata possa tradurre antiche consuetudini costruttive in soluzioni efficienti.

**Prospettive e Significato dell'Opera**

L'Institut du Monde Arabe trascende la sua primaria funzione espositiva per affermarsi come un dispositivo di vera e propria mediazione culturale. Attraverso un'architettura che calibra costantemente le trasparenze, l'opera è riuscita a sintetizzare l'identità visiva del mondo arabo con il razionalismo costruttivo occidentale. Il progetto ha fornito un modello progettuale imprescindibile per le future esplorazioni sulle facciate cinetiche e sull'architettura responsiva.







# 03 Normative



## 3.1 Normative Internazionali

### ISO 16000 Series – Lo Standard Internazionale di Riferimento

La ISO (Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione) è una federazione mondiale di organismi nazionali di normalizzazione (organismi membri dell'ISO). Il lavoro di preparazione dei Norme Internazionali è normalmente svolto attraverso i comitati tecnici dell'ISO. Ogni organismo membro interessato a un argomento per il quale è stato istituito un comitato tecnico ha il diritto di essere rappresentato in tale comitato. Organizzazioni internazionali, governative e non governative, in collegamento con l'ISO, partecipano inoltre ai lavori. L'ISO collabora strettamente con la Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC) su tutte le questioni di normalizzazione elettrotecnica.

La serie ISO 16000 rappresenta lo standard internazionale di riferimento per la qualità dell'aria indoor. La norma ISO 16000-41:2023 specifica una procedura di valutazione della qualità dell'aria interna applicabile a tutti i locali interni in edifici residenziali e non residenziali con ventilazione naturale o meccanica. Questo standard classifica la qualità dell'aria in tre categorie: Classe A (qualità elevata con basse concentrazioni di sostanze), Classe B (qualità media con concentrazioni medie) e Classe C (qualità bassa con concentrazioni sopra la media). Lo standard considera parametri chimici, biologici e fisici, comprendendo gas, composti organici volatili, particolato, fibre, funghi, batteri, virus, polline e altre particelle. Particolare attenzione viene dedicata ai criteri principali quali biossido di carbonio, muffa/infestazione microbica, odore e particolato fine (PM1, PM2.5, PM10, UFP).



Lo standard ISO 16000-41:2023 costituisce un quadro metodologico normativo per la valutazione e la classificazione della qualità dell'aria negli ambienti indoor, applicabile a edifici residenziali e non-residenziali dotati di ventilazione naturale o meccanica. Il documento stabilisce una procedura sistematica che suddivide il processo valutativo in fasi distinte, articolate in indagine preliminare, pianificazione dell'indagine, investigazione e documentazione, al fine di ottenere una valutazione complessiva e differenziata della qualità dell'aria indoor. La classificazione della qualità dell'aria si basa su tre classi qualitative (A: elevata; B: media; C: bassa) definite mediante parametri principali e secondari, rispettivamente obbligatori e condizionali, che includono sia costituenti chimici e biologici—quali composti organici volatili, formaldeide, radon, biomi microbici—sia parametri fisici quali temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria. L'approccio metodologico proposto riconosce che le concentrazioni di inquinanti indoor presentano fluttuazioni spaziali, temporali e d'uso significative, per cui la valutazione di singoli parametri isolati risulta insufficiente a caratterizzare adeguatamente la qualità complessiva dell'aria, rendendo indispensabile un'analisi integrata di tutte le fonti di inquinamento e sostanze contaminanti.

### **Linee Guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO)**

Nel 2021, l'OMS ha aggiornato le sue "Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants", fornendo raccomandazioni basate su revisioni scientifiche comprensive riguardanti inquinanti comuni negli ambienti interni. Le linee guida WHO definiscono limiti specifici per molteplici sostanze:

- Monossido di carbonio (CO): 100 mg/m<sup>3</sup> per 15 minuti; 35 mg/m<sup>3</sup> per 1 ora; 10 mg/m<sup>3</sup> per 8 ore; 7 mg/m<sup>3</sup> per 24 ore
- Biossido di azoto (NO<sub>2</sub>): 200 µg/m<sup>3</sup> per 1 ora; 40 µg/m<sup>3</sup> media annuale
- Benzene, formaldeide, radon e altri inquinanti: Specifici per ciascun composto

Queste linee guida forniscono una base scientifica per standard legalmente vincolanti e rappresentano il riferimento principale adottato da numerosi Paesi.



## 3.2 Standard Europei

### EN 13779:2007 – Standard Europeo per Edifici Non Residenziali

La norma EN 13779:2007 “Ventilazione degli edifici non residenziali - Esigenze di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione” fornisce orientamenti sulla progettazione della ventilazione per ottenere un ambiente interno confortevole e sano. Lo standard introduce una classificazione della qualità dell’aria percepita mediante le categorie IDA (Indoor Air):

- IDA 1: Alta qualità dell’aria ( $\leq 1.0$  decipol)
- IDA 2: Buona qualità (1.0-1.4 decipol)
- IDA 3: Qualità moderata (1.4-3 decipol)
- IDA 4: Bassa qualità ( $> 3$  decipol)

Parallelamente, la norma classifica la qualità dell’aria esterna di approvvigionamento in quattro categorie ODA (Outdoor Air Conditioners) da A a D.

### EN 16798-1:2019 – Standard Europeo Recente

Questa norma “Prestazione energetica degli edifici – Ventilazione per gli edifici – Parte 1” rappresenta uno dei principali riferimenti per la gestione del microclima indoor in Europa. Introduce il concetto di Indoor Environmental Quality (IEQ) e definisce quattro classi di qualità:

- Classe IEQ I: Elevata qualità
- Classe IEQ II: Buona/Media qualità
- Classe IEQ III: Qualità moderata
- Classe IEQ IV: Bassa qualità

La norma propone tre metodi alternativi per determinare i tassi di ventilazione necessari: metodo basato sulla qualità percepita dell’aria, metodo basato sui valori limite per contaminanti specifici, e metodo basato su livelli di inquinanti indoor.

### EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) 2024

La nuova EPBD include nuovi requisiti per la qualità ambientale interna (IEQ), richiedendo che gli Stati membri stabiliscono requisiti specifici per:

- Ventilazione con capacità minima di 7 L/s per persona più 0.7 L/s per m<sup>2</sup> di superficie in edifici non residenziali
- Monitoraggio continuo di CO<sub>2</sub>, temperatura operativa e umidità relativa
- Concentrazioni di CO<sub>2</sub> di 900-1200 ppm, dipendenti dalla densità di occupanti

### Norme Nazionali Italiane

#### *D.M. 10 maggio 2001 – Atto di Indirizzo sui Criteri Tecnico-Scientifici*

Decreto ministeriale che fornisce criteri tecnico-scientifici per la qualità dell’aria negli edifici, rappresentando il primo strumento nazionale di indirizzo su questa materia.

#### *D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412 – Regolamento per gli Impianti Termici*

Il Decreto del Presidente della Repubblica n. 412/1993 stabilisce norme per la progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici degli edifici. Il decreto include specifici requisiti per:

- Controllo della purezza dell’aria negli ambienti climatizzati
- Portata minima di rinnovo dell’aria
- Recupero del calore disperso per aria di ricambio quando la portata totale e le ore annue di funzionamento superano determinati valori limite

#### *D.M. 11 marzo 2008 – Valori Limite di Efficienza Energetica*

Attuazione dell’articolo 1, comma 24, della legge 244/2007, che definisce i valori limite di fabbisogno di energia primaria annua e di trasmittanza termica dei componenti edili.



## Qualità dell'aria negli ambienti di ufficio

### Introduzione

La qualità dell'aria indoor negli ambienti d'ufficio rappresenta un elemento critico per la salute, il benessere e la produttività dei lavoratori. Ad oggi vi è una ricca documentazione scientifica e normativa che raccoglie e definisce quali controlli debbano essere effettuati, con quali parametri e secondo quali protocolli.

### Documentazione italiana ufficiale

Documentazione INAIL 2023: “La valutazione della qualità dell'Aria nei Luoghi di Lavoro”

Il documento più recente ed autorevole a livello nazionale è il Quaderno INAIL pubblicato a fine 2023, intitolato “La valutazione della qualità dell'aria nei luoghi di lavoro: benessere, performance”. Tale documento rappresenta una revisione fondamentale dell'approccio italiano alla qualità dell'aria indoor introducendo il concetto innovativo di “aria salubre in quantità sufficiente”, condizione vincolante e imprescindibile.

Il quaderno stabilisce che la qualità dell'aria accettabile deve soddisfare due condizioni simultanee:

Condizione quantitativa: concentrazioni di inquinanti inferiori ai limiti riconosciuti come dannosi

Condizione qualitativa: almeno l'80% degli occupanti non manifesta insoddisfazione verso la qualità dell'aria.

Contestualmente il quaderno suddivide le sostanze nocive in quattro macro-categorie:

- Sostanze rilasciate dagli occupanti
- Sostanze rilasciate dai materiali edili ed arredi
- Sostanze derivanti dalla lavorazione in essere
- Sostanze presenti nell'aria esterna, immessa all'interno da ventilazione naturale o meccanica malfunzionante

## Il concetto della qualità e quantità di aria salubre

Il concetto è proprio quello di aria salubre in quantità sufficiente, ponendo la quantità di aria salubre come condizione vincolante di accettabilità nella valutazione della qualità dell'aria in ambienti lavorativi. Di fatto, viene definita e rimarcata con forza la necessità che gli stati di quantità di aria sufficiente e di aria salubre siano imprescindibili e debbano verificarsi contestualmente. In assenza di uno dei due elementi, anche solo in termini di mancata verifica, non ci si può esprimere sullo stato di salubrità di questi locali confinanti.

Il documento riprende il concetto di classificazione degli ambienti. Si tratta di classificazioni di rischio che originano dall'individuazione della fragilità delle persone presenti, per arrivare all'assunzione di un rischio temporaneo, al quale vengono aggiunti una serie di fattori incrociati che vanno a contemplare l'aspetto soggettivo delle persone, la tipologia di attività svolta e le caratteristiche dell'edificio.

Un aspetto interessante e orientativo riguarda le indicazioni presenti sulle soglie di accettabilità dei vari inquinanti presi in considerazione. Si tratta di un elenco di sostanze riepilogativo molto ampio, anche se non completo, che origina dalla summa di decreti legislativi, normative e protocolli differenti. Grande attenzione viene riservata alla fase della misurazione, in quanto è necessario considerare con cura le variabili di condizioni, posizione e numero dei sensori e durata del monitoraggio. Non tener conto in modo completo e corretto di questi aspetti potrebbe portare ad una valutazione non veritiera della situazione di rischio.

In conclusione, vengono riportate alcune indicazioni per il miglioramento della qualità dell'aria, richiamando doveri del datore di lavoro, anche questi presenti nel d.lgs. 81/2008, individuando come principi base per una efficace prevenzione le seguenti tre azioni:

- intervento sulle sorgenti, riducendo le emissioni
- diluizione dell'aria
- verifica dell'eventuale miglioramento dell'efficacia della ventilazione

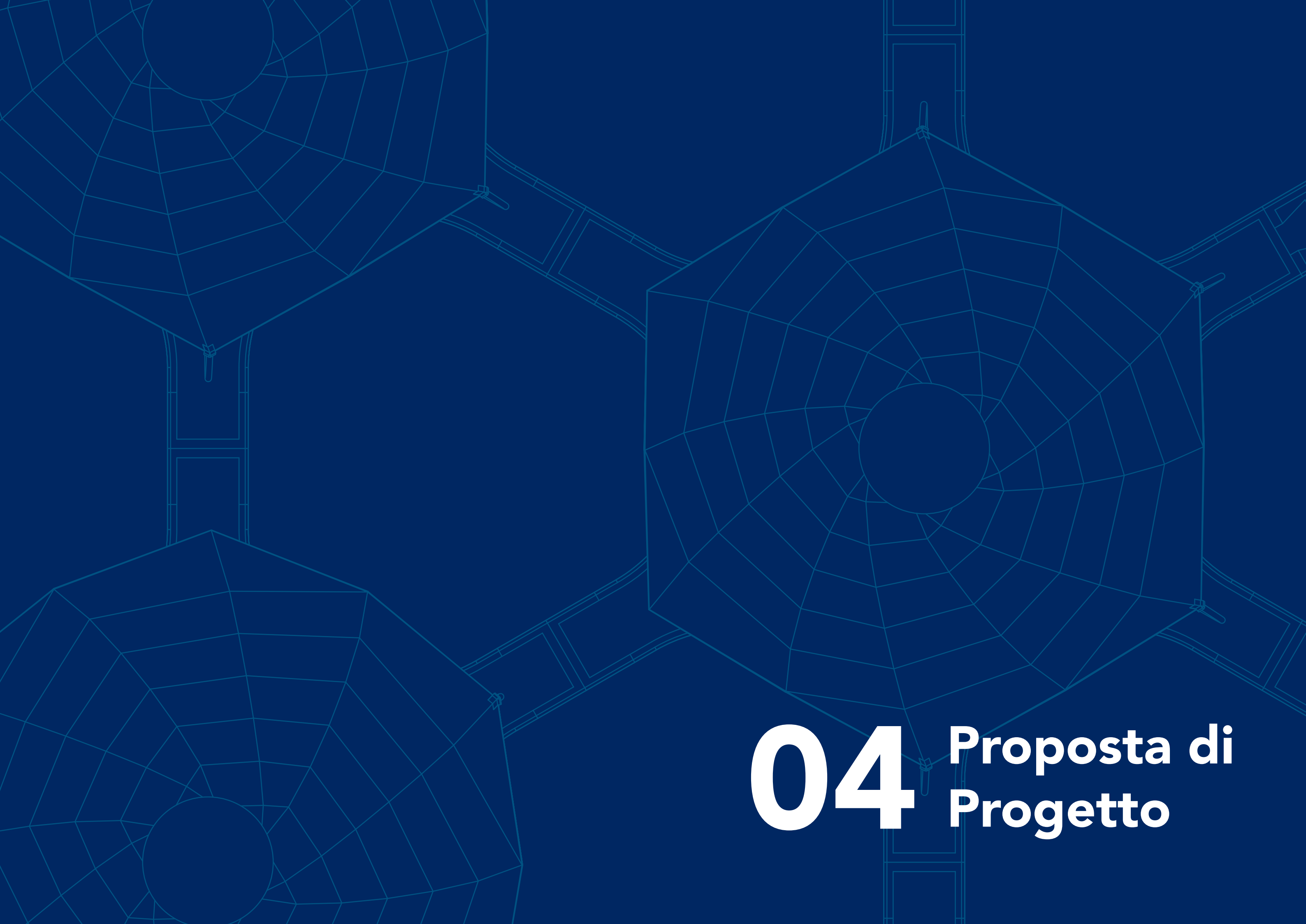


### **Aumentare il benessere e la produttività degli occupanti**

Poichè si trascorre la maggior parte del nostro tempo in ambienti chiusi, l'aria interna ha generalmente un impatto maggiore sulla nostra salute e sulle nostre prestazioni cognitive rispetto all'aria esterna:

- **Funzione cognitiva:** alti livelli di CO2 compromettono il pensiero strategico. Uno studio recente ha rilevato che i dipendenti che lavorano in ambienti con 1400 ppm di CO2 ottengono punteggi inferiori del 50% nei test cognitivi rispetto a quelli che lavorano in ambienti con 550 ppm.
- **Creatività:** è stato dimostrato che la riduzione dei livelli di TVOC aumenta il potenziale creativo: uno studio ha collegato una riduzione dell'71,9% dei livelli di TVOC a un aumento dell'11,5% della creatività.
- **Assenteismo:** la scarsa qualità dell'aria interna è un fattore che contribuisce in modo significativo alla sindrome dell'edificio malato. Gli edifici con bassi tassi di ventilazione registrano un aumento significativo delle assenze per malattia.
- **Fidelizzazione:** i miglioramenti nella qualità dell'aria aumentano la soddisfazione dei dipendenti in merito alle condizioni ambientali di 1,626 punti su una scala di 7 punti, incrementando la soddisfazione lavorativa complessiva.





# 04 Proposta di Progetto

# 4.1 Dataphysicalization

La **data physicalization** è un approccio alla rappresentazione dei dati in cui l'informazione non viene mostrata principalmente su uno schermo, ma viene "incorporata" in un artefatto fisico: forma, materia, movimento e trasformazioni dell'oggetto diventano il mezzo attraverso cui il dato si rende percepibile. In questo paradigma, la lettura dei dati avviene anche tramite percezione tattile, spaziale e cinestetica (osservare una variazione di curvatura, una tensione, un'apertura/chiusura, una variazione di volume o di orientamento), spostando l'attenzione dal "guardare un grafico" al "fare esperienza" del dato nello spazio.

Una physicalization funziona quando il pubblico costruisce rapidamente un modello mentale: "se succede X, allora significa Y". Per questo è utile distinguere tra:

- **Leggibilità immediata (gist):** percezione rapida dello stato (aperto = ok; chiuso = aria critica).
- **Interpretazione fine:** comprendere differenze più sottili (chiusura al 30% vs 60%), possibile solo se la scala e i livelli sono progettati per essere distinguibili.
- **Apprendimento nel tempo:** con l'esposizione ripetuta, l'utente associa la dinamica dell'oggetto alle condizioni reali (affollamento, finestre chiuse, riunioni).

## Differenza rispetto alla visualizzazione tradizionale

A differenza della data visualization classica, che privilegia la codifica su canali visivi bidimensionali (posizione su assi, lunghezza, area, colore), la data physicalization introduce vincoli e opportunità legati al mondo fisico: gravità, attrito, elasticità, inerzia, tolleranze, usura, condizioni ambientali e percezione multisensoriale. Questo comporta un cambio di priorità progettuale: non si cerca solo l'accuratezza metrica, ma anche leggibilità situata, continuità percettiva, qualità del gesto e significatività del feedback nel contesto d'uso. In altre parole, la physicalization non è soltanto "una visualizzazione resa oggetto", ma un sistema che mette in relazione dati, corpo, ambiente e temporalità.





## Perché physicalization per dati ambientali

Nel caso del monitoraggio della qualità dell'aria in ambienti di lavoro condivisi, l'obiettivo non è necessariamente fornire un valore numerico istantaneo, bensì sostenere una consapevolezza continua e non invasiva (peripheral awareness): l'utente può notare un cambiamento senza interrompere l'attività principale. Una physicalization cinetica—ad esempio un origami che si chiude gradualmente verso il centro—può comunicare l'andamento del dato come fenomeno atmosferico, rendendo intuitiva la relazione tra “accumulo” (aria viziata) e “chiusura” (riduzione di apertura/respirabilità simbolica). La dimensione lenta e continua del movimento è cruciale: evita l'effetto allarme e consente un'interpretazione più “ambientale” che “notifica”



Nathalie Miebach Weaves Data and Anecdotes into Expansive Sculptures to Raise Awareness of the Climate Crisis

## Dal dato alla forma: mappatura e variabili progettuali

Progettare una data physicalization significa costruire una mappatura esplicita tra variabili del dataset e variabili fisiche dell'artefatto.

Nella casistica della CO2 alcune scelte tipiche sono:

- **Variabile di input (dato):** valore assoluto (ppm), velocità di crescita (derivata), permanenza sopra soglia (tempo), o combinazioni (es. indice di “aria stagnante”).
- **Variabile fisica (output):** grado di chiusura dell'origami (angolo, raggio del foro centrale, numero di “petali” ingaggiati), velocità del movimento, micro-oscillazioni (tremore quasi impercettibile), oppure tensione dei tendini/cavi.
- **Funzione di mappatura:** lineare (semplice e leggibile), logaritmica (più sensibile ai valori bassi), a soglie (chiusura più marcata oltre un limite), o con isteresi (evita continui “apri/chiudi” attorno a un valore instabile).

In una physicalization, inoltre, diventano progettualmente rilevanti aspetti spesso secondari nella visualizzazione 2D: la scala (quanto deve muoversi per essere percepibile), la risoluzione (quanti “stati” distinguibili), la latenza (ritardo accettabile tra variazione e risposta), e la persistenza (quanto a lungo l'oggetto “mantiene memoria” del trend).

## 4.2 Calm Technology

La *calm technology* è un approccio progettuale che mira a rendere l'informazione disponibile e comprensibile senza chiedere attenzione continua, riducendo interruzioni, carico cognitivo e "rumore" informativo. Invece di competere con l'utente, un sistema calm si colloca sullo sfondo dell'esperienza: è percepibile quando serve, ma resta discreto quando non è rilevante.

Nel contesto di un'installazione che rende percepibile la CO2 indoor attraverso un origami cinetico, la calm technology offre una cornice chiara: l'obiettivo non è "mostrare un numero", ma sostenere una consapevolezza ambientale progressiva tramite un segnale fisico lento, leggibile e non intrusivo.

### Attenzione periferica e "presenza" dell'informazione

Un principio centrale della calm technology è lavorare con l'attenzione periferica: l'utente coglie cambiamenti di stato senza dover "guardare" intenzionalmente un'interfaccia. Questo è particolarmente adatto ai dati ambientali (aria, luce, rumore) perché sono fenomeni continui, spesso invisibili, e la loro comprensione passa meglio da segnali gradualmente che da allarmi puntuali.

Nel tuo caso, un movimento che si sviluppa nel tempo (chiusura/apertura progressiva dell'origami verso il centro) può diventare una sorta di "meteo interno" percepibile con la coda dell'occhio, coerente con un ambiente di coworking in cui le persone alternano fasi di focus e interazione.

### Dal dato al comportamento: mappature "calme"

Progettare in chiave calm significa scegliere mappature che privilegiano continuità, stabilità e interpretabilità. In pratica, la relazione tra CO2 e movimento dovrebbe evitare salti improvvisi e oscillazioni nervose, altrimenti il sistema perde la qualità "ambientale" e torna a comportarsi come una "notifica".

Scelte utili (a livello concettuale) sono:

- Filtrare o mediare il segnale, così che l'oggetto risponda a trend e non al rumore istantaneo.
- Usare una mappatura con isteresi (bande diverse per "chiudere" e "riaprire"), per evitare micro-aperture/chiusure attorno a una soglia.
- Dare priorità alla variazione lenta (velocità controllata) rispetto alla precisione numerica millimetrica: nella calm technology spesso conta più il "senso" dello stato che il valore esatto.





### Linguaggio formale: perché un origami cinetico funziona

Nella calm technology, il linguaggio dell'artefatto (forma, materiale, dinamica) è parte del messaggio. Un origami che si avvolge verso il centro comunica intuitivamente idee come "contrazione", "riduzione", "accumulo" o "chiusura", e quindi può diventare una metafora efficace per la qualità dell'aria percepita come "più o meno respirabile". Inoltre, un origami cinetico si presta a un comportamento compliant (la piega come giunto), in cui il movimento non dipende solo da attuatori, ma anche dalla fisica del materiale. La letteratura su pieghe "origami-like" in materiali a lamina discute proprio come le linee di piega possano funzionare da meccanismi compliant e guidare la trasformazione della geometria. Anche in ambito di involucri/artefatti responsivi, sono stati esplorati approcci basati su origami per ottenere trasformazioni controllate e leggibili nel tempo.



### Progettare la discrezione: intensità, soglie e "non-invasività"

Un dispositivo calm non è "debole": è *intenzionalmente misurato*.

Questo comporta definire con cura ampiezza, velocità e frequenza del movimento, perché questi parametri determinano l'impatto percettivo. Un segnale troppo evidente (movimento rapido, scatti, rumore meccanico) viene interpretato come allarme; un segnale troppo sottile rischia di diventare invisibile e quindi inutile.

Due strategie efficaci:

- Progressività: piccoli cambiamenti per variazioni moderate del dato; un cambio più marcato solo in condizioni persistenti.
- Ridondanza morbida: se usi anche luce o ombra, deve essere coerente con la cinetica e non aggiungere "animazioni" competitive.

In un coworking, la discrezione è anche sociale: un artefatto troppo "allarmante" può generare ansia o giudizio. Un comportamento calm, invece, facilita azioni collettive semplici (aprire una finestra) senza colpevolizzazione.

## 4.3 Biomimicry

La biomimesi, il cui termine deriva dal greco *bios* (vita) e *mimesis* (imitazione), è una disciplina tecno-scientifica che studia e imita i processi biologici, le strutture e gli ecosistemi presenti in natura per migliorare le attività e le tecnologie umane.

Questa scienza si basa sul principio fondamentale che la natura, attraverso 3,8 miliardi di anni di evoluzione e continuo adattamento, abbia già sviluppato e perfezionato soluzioni altamente efficienti per affrontare sfide ingegneristiche e ambientali complesse.

Di conseguenza, la biomimetica si configura come un processo creativo e interdisciplinare in cui biologia, ingegneria e design collaborano per risolvere i problemi dell'umanità attraverso l'astrazione e il trasferimento di conoscenze ricavate dai modelli biologici.



### I Principi Fondamentali

Il concetto di biomimetica ha acquisito un'ampia risonanza globale grazie al lavoro della scienziata e divulgatrice Janine Benyus, in particolare attraverso il suo saggio del 1997 intitolato *"Biomimicry: Innovation Inspired by Nature"*.

Secondo la Benyus, l'approccio biomimetico richiede un profondo cambiamento di prospettiva, strutturato su tre ruoli chiave attribuiti al mondo naturale:

- **Natura come modello:** L'impiego delle forme, dei processi e delle strategie biologiche come fonte di ispirazione diretta per la progettazione di soluzioni tecniche o architettoniche.
- **Natura come misura:** L'utilizzo degli standard ecologici per valutare la reale sostenibilità e la correttezza delle innovazioni prodotte dall'uomo, stabilendo se esse siano in linea con gli equilibri del pianeta.
- **Natura come mentore:** L'abbandono di una visione puramente estrattiva, in cui l'ambiente è considerato unicamente un bacino di risorse da sfruttare, in favore di un approccio in cui la natura diviene una guida saggia da cui apprendere e con cui cooperare.



## Architettura e Robotica Bioispirata

L'architettura biomimetica adotta l'efficienza morfologica degli organismi per edificare strutture a basso impatto ambientale e con consumi energetici minimizzati. Esistono ad esempio edifici strutturati sulla base degli alveari delle api, un assetto geometrico che massimizza la stabilità statica impiegando una quantità ridotta di materiali da costruzione. Altri progetti urbani all'avanguardia prevedono l'impiego di facciate intelligenti capaci di emulare la pelle dei cactus; queste superfici sono in grado di trattenere l'umidità atmosferica notturna per raffrescare passivamente gli ambienti interni durante il giorno, abbattendo drasticamente i consumi di condizionamento.

Anche la robotica trae una costante spinta innovativa dall'osservazione del regno animale. Tra i risultati più notevoli vi è lo sviluppo di robot flessibili che imitano la morfologia e le dinamiche di nuoto dei polpi. Queste macchine bioispirate sono state progettate per muoversi con agilità e delicatezza in ambienti ostili e complessi, trovando impiego sia per l'esplorazione non invasiva delle barriere coralline, sia in ambito medico come endoscopi. Tecnologie analoghe, come i sistemi di "cloud-milking" che imitano la struttura degli aghi di pino per condensare e raccogliere acqua potabile dalla nebbia, dimostrano appieno il potenziale della biomimetica nell'offrire risposte concrete e sostenibili alle sfide climatiche contemporanee.

## Biomimicry nel progetto

La biomimicry rappresenta il fondamento teorico e metodologico entro cui può essere interpretato il presente progetto, poiché consente di leggere il dispositivo non come una mera sperimentazione formale, ma come una trasposizione progettuale di principi biologici di adattamento e interazione con l'ambiente.

In tale prospettiva, l'origami che si apre e si chiude in relazione ai livelli di CO<sub>2</sub> si configura come un sistema bioispirato capace di tradurre in forma cinetica e percepibile un fenomeno altrimenti invisibile. Il riferimento alla natura non riguarda esclusivamente l'aspetto morfologico della piega, bensì il comportamento dinamico di organismi vegetali e strutture naturali che modificano la propria configurazione in risposta a specifiche condizioni ambientali, come avviene, ad esempio, nelle squame delle pigne.

La logica dell'apertura e della chiusura viene quindi assunta come principio biomimetico di regolazione e risposta, e reinterpretata attraverso una struttura origami interattiva in cui sensori elettronici e piccoli attuatori motorizzati rilevano il dato ambientale e lo restituiscono sotto forma di variazione geometrica.

Ne deriva un artefatto che non assolve soltanto a una funzione informativa, ma costruisce una relazione sensibile tra utente e ambiente, rendendo leggibile la qualità dell'aria mediante un linguaggio visivo e meccanico ispirato ai processi adattivi del mondo naturale. In questo senso, il progetto dimostra come la biomimicry possa essere applicata non solo all'ottimizzazione tecnica o materica, ma anche alla progettazione di dispositivi comunicativi capaci di accrescere la consapevolezza ecologica attraverso l'interazione e il movimento

## 4.4 Modellazione 3D

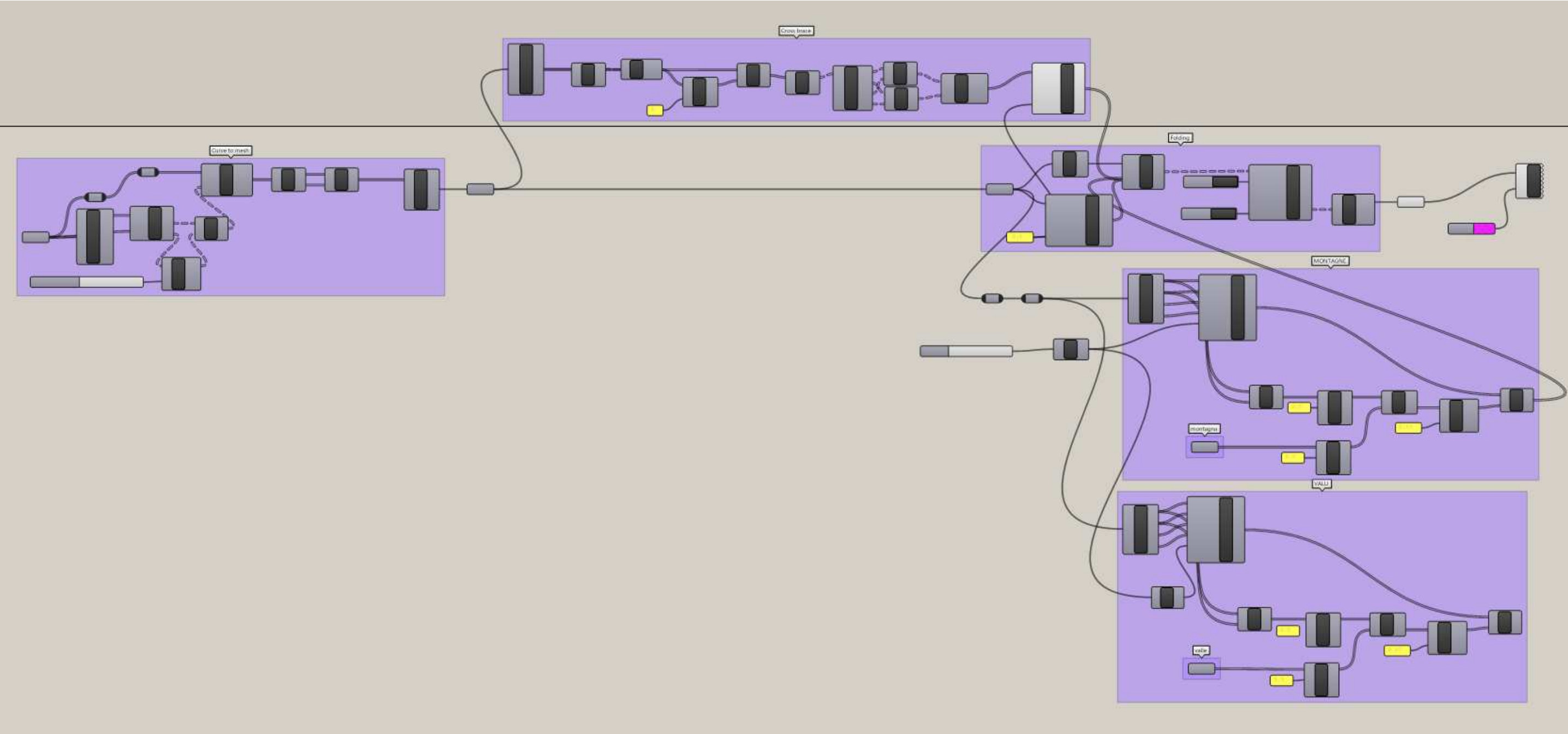
### Grasshopper 3D

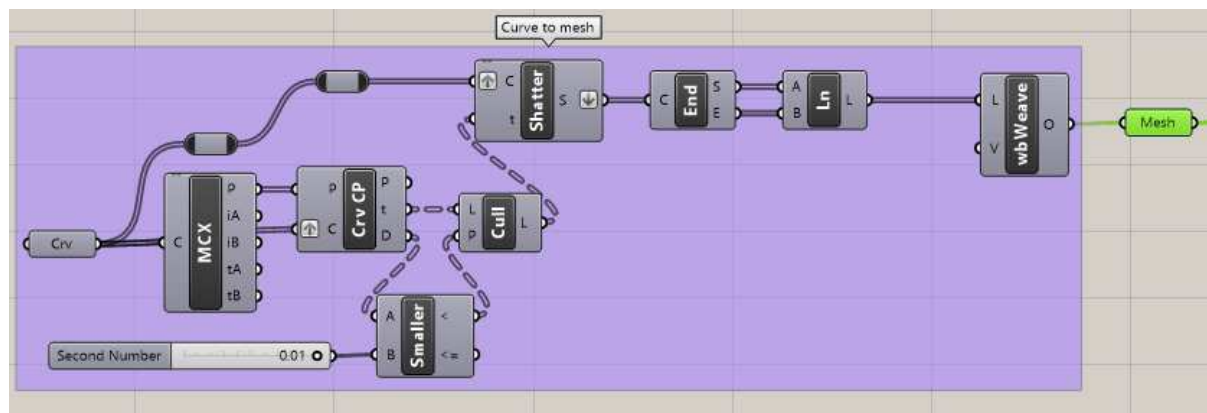
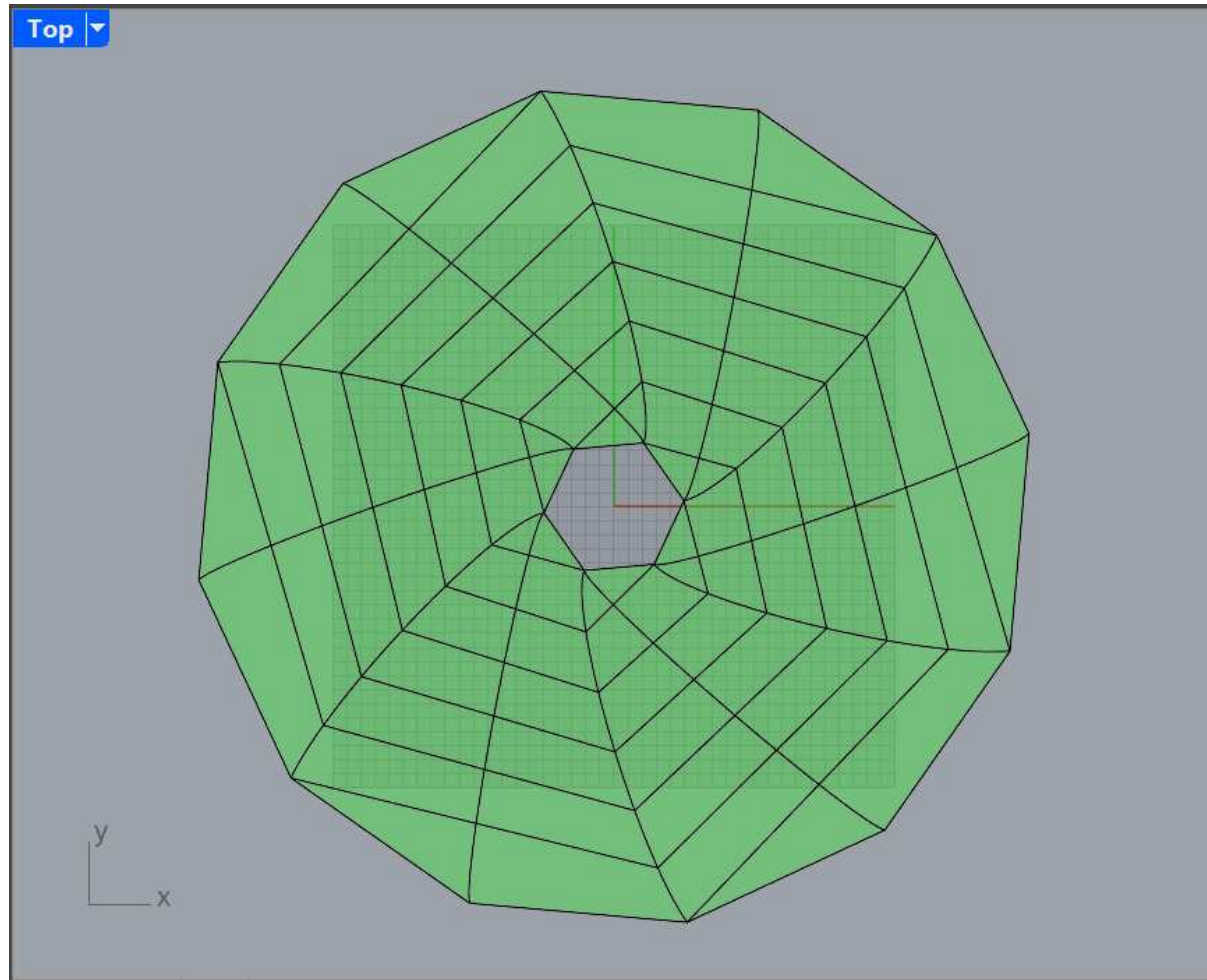
Per la concezione e l'ottimizzazione geometrica del meccanismo cinetico si è scelto di adottare Grasshopper, un avanzato ambiente di programmazione visiva perfettamente integrato all'interno del software di modellazione CAD Rhinoceros. A differenza degli approcci di modellazione tridimensionale tradizionali, di natura statica e manuale, Grasshopper sfrutta i principi della modellazione algoritmica e parametrica.

L'interfaccia si basa su un sistema di diagrammi a nodi (Visual Programming Language) in cui i componenti logici e matematici vengono collegati tra loro per generare forme complesse senza richiedere la stesura di codice testuale. Questa architettura parametrica trasforma il modello 3D in un sistema dinamico e relazionale: modificando un singolo dato in ingresso (come lo spessore del materiale, il raggio di curvatura o il numero dei segmenti della living hinge), l'intera geometria dell'origami e del meccanismo di attuazione si aggiorna automaticamente in tempo reale.

Tale flessibilità procedurale si è rivelata fondamentale nella fase di design iterativo dell'installazione biometrica, permettendo di simulare digitalmente diverse configurazioni spaziali, di controllare con precisione i percorsi di scorrimento dei cavi di trazione e di esportare le geometrie ottimizzate direttamente per la fabbricazione digitale.



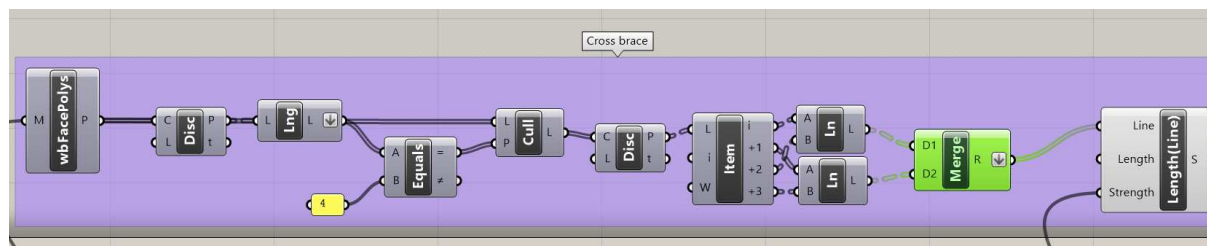
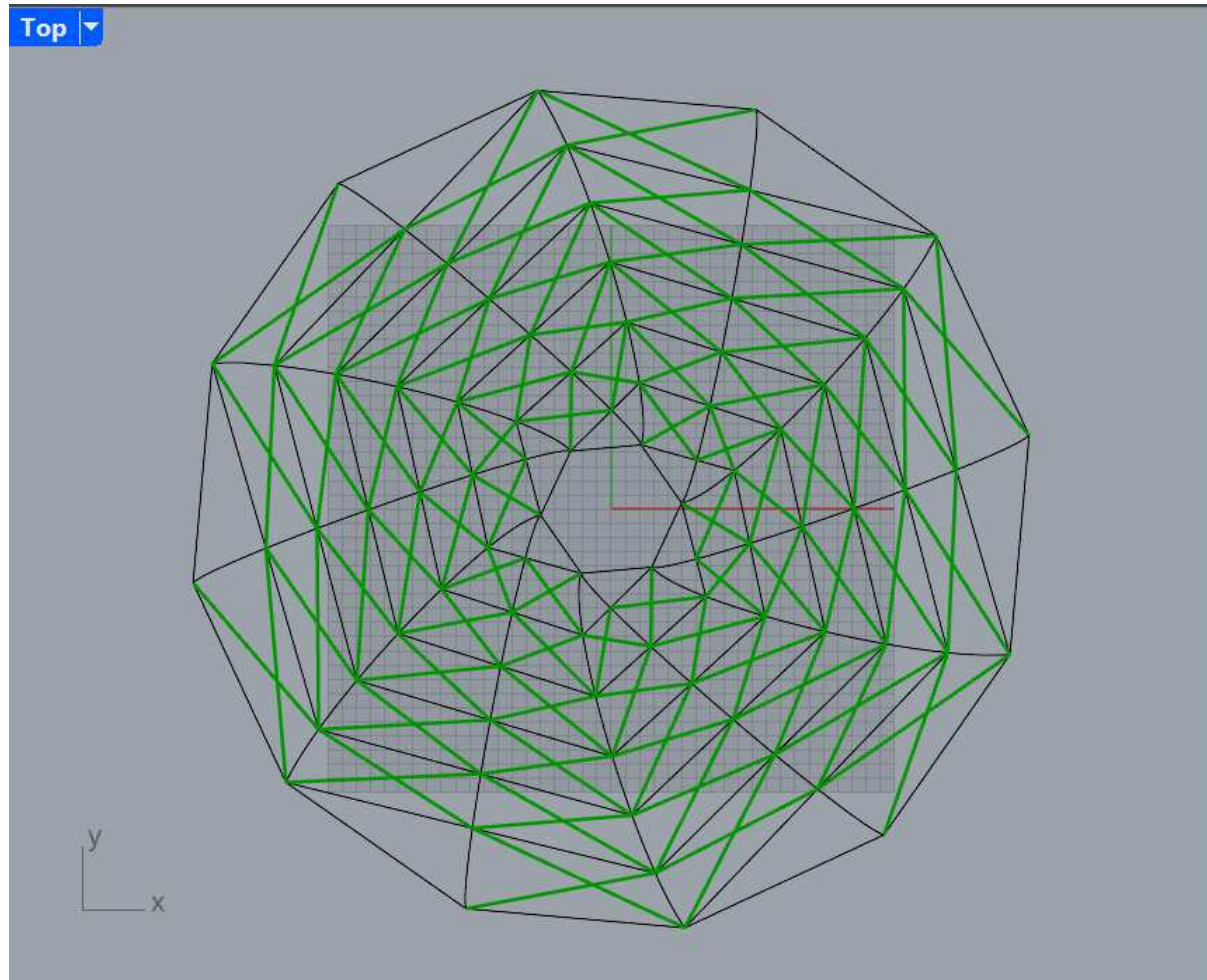




### Prima fase di modellazione dell'origami

Il processo logico illustrato in questa fase dello script ha l'obiettivo di trasformare un tracciato bidimensionale di linee di base in una mesh topologica strutturata, passaggio fondamentale per definire le singole facce rigide del pattern origami. Partendo da un set di curve generatrici iniziali in input (componente Crv), la prima operazione consiste nell'individuare la totalità dei nodi strutturali del reticolo attraverso il calcolo delle intersezioni multiple (MCX - Multiple Curve Intersect). Per garantire una topologia pulita ed evitare la genesi di micro-facce o errori di modellazione, i parametri di intersezione vengono verificati tramite il nodo Crv CP (Curve Closest Point); la distanza calcolata viene quindi sottoposta a una condizione booleana con tolleranza minima (inferiore a 0.01 tramite i componenti Smaller e Cull Pattern), che agisce da filtro logico per scartare i punti di intersezione ridondanti o troppo ravvicinati. Ottenuti i parametri esatti e ripuliti, il nodo Shatter interviene per frammentare le linee continue originarie in segmenti indipendenti, separandole in corrispondenza di ogni intersezione valida. Poiché il comportamento meccanico di una struttura origami cinetica richiede pattern di piegatura composti da linee perfettamente rette, i segmenti frammentati vengono decostruiti per estrapolarne i vertici di inizio e fine (End Points), per poi essere ricostruiti come vettori rigidamente lineari attraverso il componente Line (Ln). Questa rete di segmenti lineari, ora geometricamente esatta, viene infine data in input agli algoritmi del plugin Weaverbird: il nodo wbWeave ("Weaverbird's Mesh From Lines") interpreta il network vettoriale tessendolo in una mesh singola e continua (il risultato poligonale visibile in ambiente Rhinoceros), mentre wbFacePolys ne estrae i perimetri poligonali planari. Questa sequenza di scomposizione e ricostruzione garantisce la transizione da un semplice wireframe grafico a una superficie discretizzata in poligoni chiusi, ottimizzata e pronta per le successive fasi di simulazione cinematica e fabbricazione fisica.





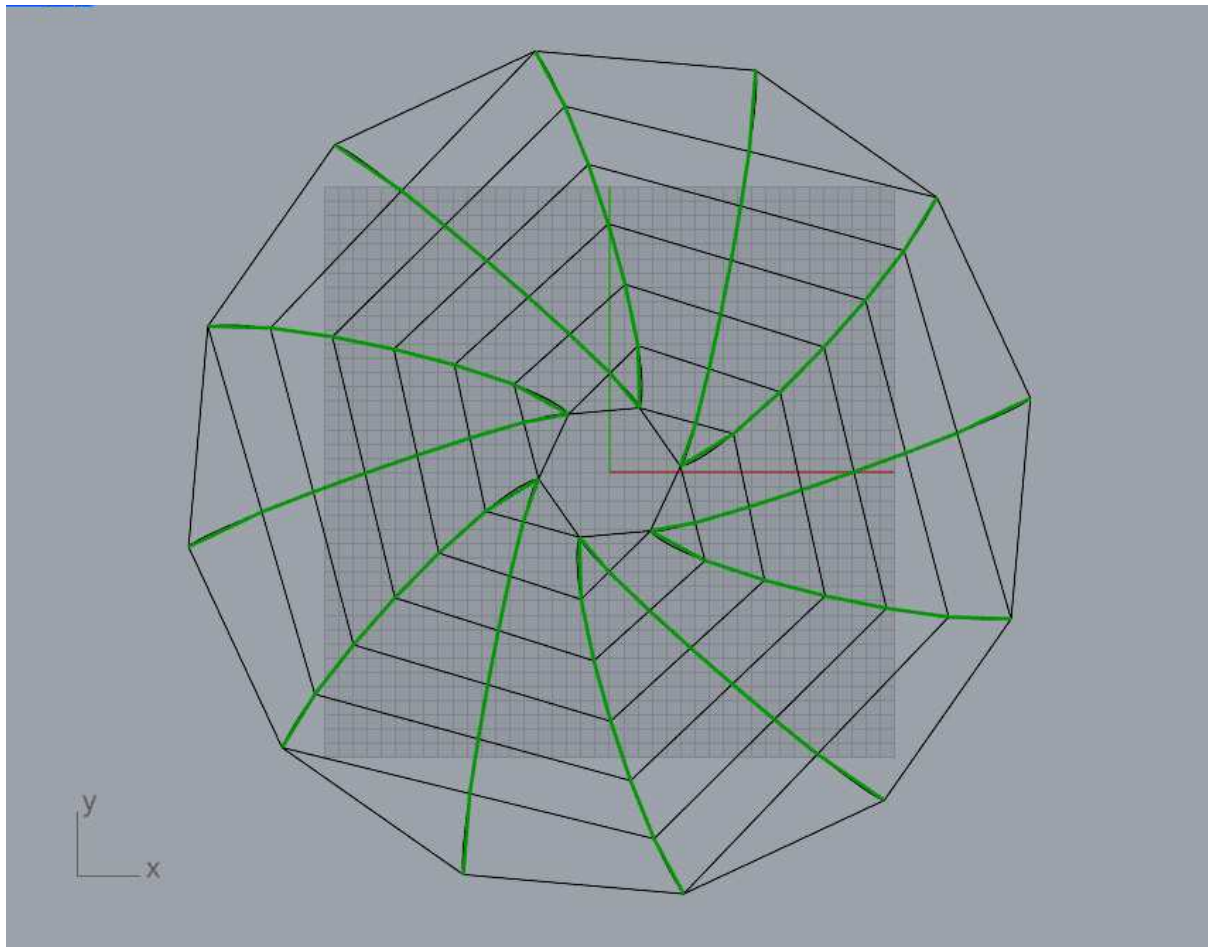
## Seconda fase di modellazione dell'origami

Una volta stabilita la topologia di base della mesh origami, il processo logico affronta l'esigenza di conferire rigidezza strutturale alle facce poligonali, preparandole alla simulazione fisica. Poiché il comportamento cinematico di un origami richiede che le superfici interposte tra le pieghe si mantengano indeformabili, lo script interviene per triangolare specifici poligoni. Il flusso di dati riparte dall'output del nodo `wbFacePolys` (Weaverbird Face Polyline), che fornisce i confini perimetrali di ogni singola faccia.

Tali perimetri vengono analizzati attraverso il componente `Disc` (Discontinuity) per estrarne i vertici, mentre il nodo `Lng` (List Length) ne calcola il numero di lati. Questo conteggio è fondamentale per isolare esclusivamente le facce quadrilatera, poiché i triangoli possiedono già un'intrinseca indeformabilità planare. Mediante una condizione di uguaglianza (`Equals`) impostata sul valore "4", combinata al nodo `Cull Pattern`, l'algoritmo filtra e seleziona unicamente i vertici appartenenti ai poligoni a quattro lati.

A questo punto, una seconda iterazione di discontinuità (`Disc`) associata al componente `Item` (List Item) consente di isolare in modo mirato i vertici opposti lungo le diagonali (gestiti tramite l'indicizzazione +1, +2, +3). Tali vertici vengono connessi a coppie attraverso due nodi `Line` (`Ln`), generando fisicamente le diagonali incrociate o "controventi" (cross braces).

Queste linee vengono infine unificate in una singola lista tramite il nodo `Merge` e convogliate nel componente `Length(Line)` del motore di simulazione fisica (Kangaroo), affinché ad esse venga assegnata una forza elastica o di vincolo per preservare la complanarità e la rigidità della faccia durante la deformazione tridimensionale della membrana.



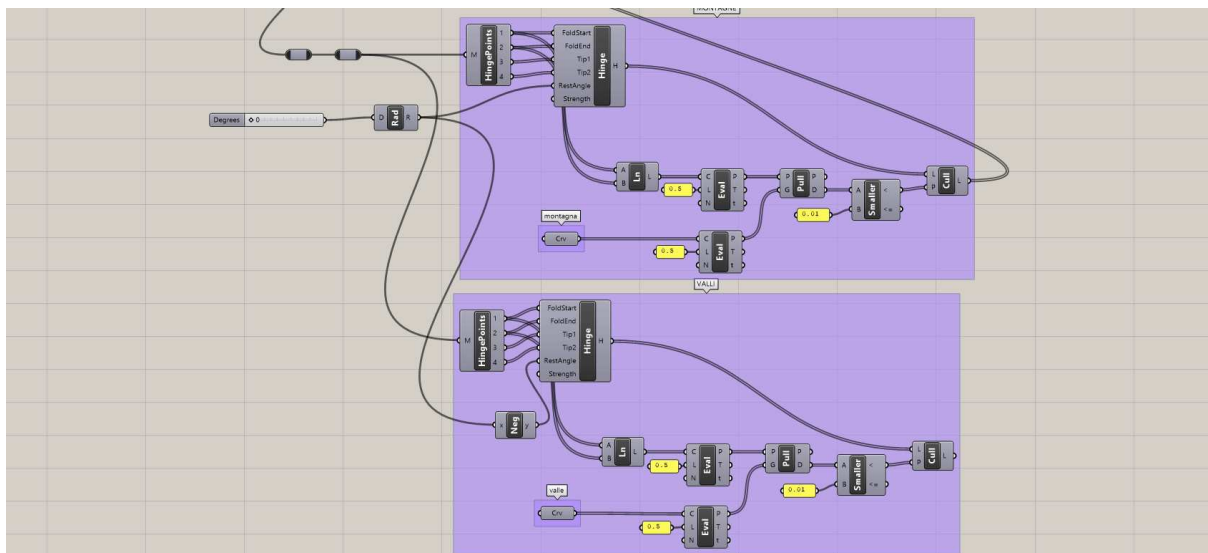
### Terza fase: definizione di "montagne" e "valli"

Per simulare il corretto comportamento cinematico della struttura origami, il modello computazionale deve discriminare con precisione la direzione di piegatura dei singoli bordi, classificandoli in pieghe a “monte” (mountain folds) e a “valle” (valley folds). Questa fase dello script si serve dei nodi specifici del motore Kangaroo per assegnare le proprietà di cerniera elastica ai segmenti della mesh.

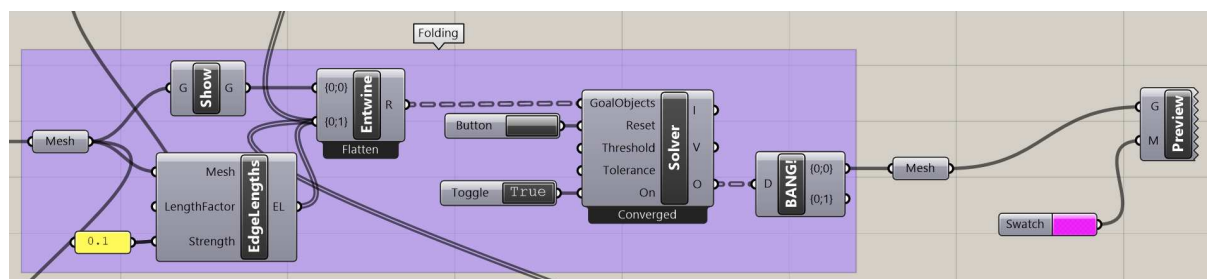
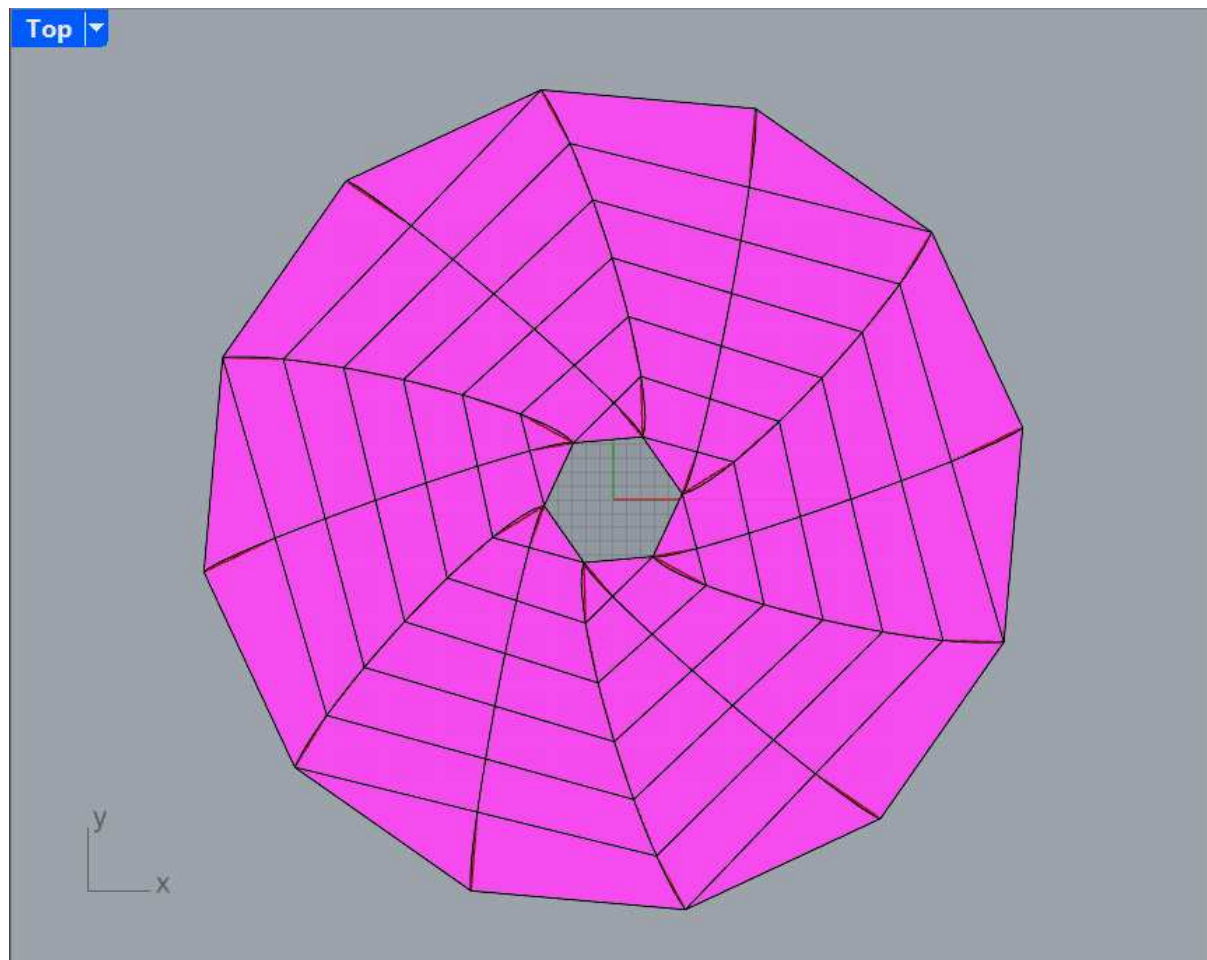
Il componente HingePoints identifica la topologia delle facce adiacenti per estrarre gli assi di rotazione e i relativi vertici, fornendoli in input al nodo Hinge. Per distinguere quali linee debbano piegarsi verso l’alto o verso il basso, l’algoritmo effettua una comparazione geometrica: rigenera le linee degli spigoli ( $L_n$ ) e ne estrae il punto medio tramite il parametro  $t=0.5$  (Eval), eseguendo la medesima operazione su delle curve di riferimento tracciate a monte (nodo Crv nel gruppo “MONTAGNE”) e a valle (nodo Crv nel gruppo “VALLI”).

Attraverso il nodo Pull Point, lo script calcola la distanza tra i punti medi degli spigoli della mesh e le curve guida; se questa distanza risulta inferiore a una tolleranza minima (0.01), il nodo Smaller attiva un filtro booleano (Cull Pattern) che isola e seleziona unicamente le cerniere corrispondenti a quel determinato tracciato.

A queste cerniere isolate viene infine associato un angolo di riposo desiderato (controllato da un cursore e convertito in radianti dal nodo Rad): per le pieghe a monte il valore angolare viene fornito direttamente, mentre per quelle a valle viene invertito matematicamente tramite il componente Negative (Neg). Questa differenziazione vettoriale delle forze di cerniera garantisce che, durante la fase di rilassamento in Kangaroo, la membrana planare collassi assumendo l’esatta conformazione tridimensionale programmata.







### Fase finale: movimento dell'origami

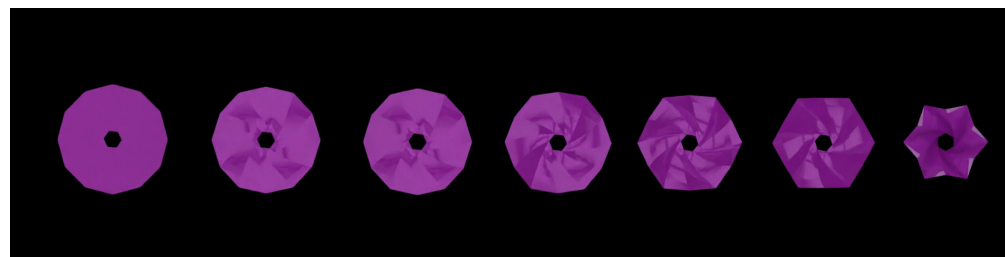
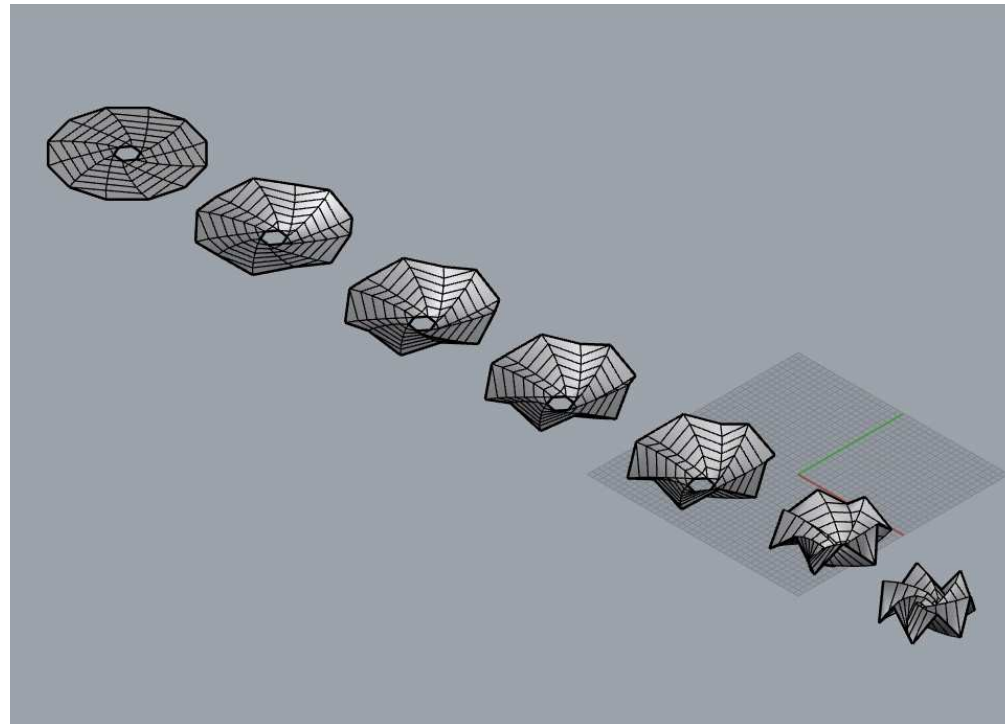
L'ultima fase del processo computazionale si concentra sulla sintesi e risoluzione di tutti i vincoli vettoriali per generare la simulazione fisica della deformazione dell'origami. Il nodo centrale di questo blocco è il Solver di Kangaroo2, che agisce come motore di calcolo per il rilassamento dinamico della struttura.

Affinché il solutore possa processare simultaneamente tutte le regole fisiche stabilite in precedenza, i dati convergono nel componente Entwine (con l'opzione Flatten attiva), che unifica in un'unica struttura ad albero i diversi obiettivi fisici (GoalObjects): il mantenimento della forma originale tramite il nodo Show, la preservazione della lunghezza dei bordi esterni garantita da EdgeLengths (impostato con una Strength di 0.1 per conferire una leggera elasticità), i controventi per la rigidità planare, e le forze angolari delle cerniere a monte e a valle precedentemente definite. Il calcolo iterativo del Solver è controllato da un Button per il reset della simulazione e da un Toggle booleano per l'attivazione continua.

Una volta che il sistema raggiunge l'equilibrio vettoriale (stato "Converged"), l'output grezzo della simulazione viene processato dal componente BANG! (Explode Tree), che ha il compito di separare la geometria risultante dagli altri dati di calcolo.

La geometria processata viene riconvertita in formato Mesh e infine inviata al nodo Custom Preview (o Preview), al quale è associato uno Colour Swatch (nel caso specifico, un magenta acceso) per restituire nell'ambiente viewport di Rhinoceros la rappresentazione tridimensionale e ombreggiata della membrana cinetica, permettendo così di valutare visivamente l'esito morfologico dell'algoritmo di piegatura parametrica.

### Fasi di piegatura su grasshopper e Rhino 8



### Principi di attuazione e vincolo del modello

La configurazione adottata nel presente progetto appartiene alla famiglia degli origami flasher, strutture a simmetria rotazionale capaci di passare da una condizione estesa a una configurazione compatta mediante un moto combinato di torsione e contrazione radiale. Tale principio è stato studiato anche in ambito aerospaziale per sistemi dispiegabili ad alta compattazione, inclusi pannelli e array solari ispirati agli origami. Nel caso in esame, il pattern non viene utilizzato per un dispiegamento passivo, ma come componente dinamico di un prodotto, in cui la chiusura della superficie deve essere attivata da un motore alloggiato in un tubo centrale.

Il principio di funzionamento del sistema si basa sulla necessità di generare una rotazione relativa tra la parte interna dell'origami e il suo bordo esterno. Se il motore imponesse una semplice rotazione al centro senza alcun vincolo periferico, l'intera membrana tenderebbe a ruotare come un corpo quasi rigido, senza produrre la chiusura verso il centro. Per questa ragione, il foro interno dell'origami deve essere collegato rigidamente al mozzo motorizzato, mentre il perimetro esterno deve essere guidato tramite un anello fisso o elementi di scorrimento che ne limitino la rotazione e consentano la contrazione radiale. In tal modo, la coppia impressa dal motore viene trasformata in una progressiva chiusura del pattern.

Dal punto di vista materico, l'impiego di un laminato Poliestere+TPU consente di distinguere tra zone a comportamento prevalentemente rigido e zone a comportamento deformabile. Le faccette in Poliestere contribuiscono alla stabilità geometrica complessiva, mentre il TPU, disposto lungo le linee di piega, agisce come cerniera flessibile e permette la ripetizione ciclica del movimento. Questa impostazione rientra nella logica dei compliant mechanisms, nei quali il moto deriva dalla deformazione controllata del materiale e non dall'assemblaggio di cerniere meccaniche tradizionali.



Zirbel et al., *Deployment Methods for an Origami-Inspired Rigid-Foldable Array*, NASA/ESMATS.

Uno degli aspetti più critici riguarda tuttavia la presenza di uno spessore reale del laminato. I modelli origami teorici assumono infatti materiali a spessore nullo, mentre nel prototipo reale i pannelli occupano volume e, durante la chiusura, si sovrappongono progressivamente attorno al centro. Questo fenomeno, noto come *thickness accommodation*, comporta che la geometria ideale debba essere corretta affinché gli strati possano accumularsi senza interferenze meccaniche. In forma semplificata, l'aumento del raggio di raccolta può essere espresso con la relazione.

$$r(\phi) = r_0 + \frac{t_{eq}}{2\pi} \phi$$

Origami With Rotational Symmetry: A Review on Their Mechanics.

Tale espressione evidenzia che, all'aumentare della rotazione, cresce anche l'ingombro del materiale nella zona centrale; di conseguenza, il diametro del tubo e la geometria del pattern devono essere progettati in modo coordinato.

Engineering Origami: A Comprehensive Review of Recent Applications

Dal punto di vista meccanico, la chiusura dell'origami dipende dalla capacità del motore di vincere la resistenza elastica opposta dalle linee di piega e gli attriti presenti nel sistema. In una schematizzazione semplificata, il momento resistente complessivo può essere espresso come

$$M_r = \sum_{i=1}^n k_i \Delta\theta_i$$

Single Degree-of-Freedom Rigidly Foldable Cut Origami Flashers.

La coppia motrice disponibile deve quindi soddisfare la condizione

$$M_m > M_r + M_f$$

dove  $M_m$  è la coppia del motore e  $M_f$  il contributo dovuto agli attriti nelle guide e nei contatti tra i diversi strati del laminato. Questa relazione chiarisce che la riuscita del sistema non dipende soltanto dalla forma dell'origami, ma anche dall'equilibrio tra proprietà elastiche del materiale, geometria dei vincoli e prestazioni dell'attuatore.

In sintesi, la progettazione del sistema richiede l'integrazione di tre livelli tra loro interdipendenti: il livello geometrico, che definisce il comportamento del flasher; il livello materico, che regola la deformabilità delle cerniere; e il livello meccanico, che garantisce la trasformazione della rotazione del motore in una chiusura ripetibile e controllata verso il centro. La corretta interazione tra questi fattori costituisce la condizione essenziale affinché il prototipo possa funzionare in modo affidabile sia in apertura sia in chiusura.

# 4.5 Embodied Cognition

## L'interfaccia Tangibile Bio-ispirata: Comunicare la Qualità dell'Aria attraverso la Forma

Nell'ambito della *Human-Building Interaction* (HBI), la comunicazione dei dati ambientali è stata tradizionalmente affidata a schermi digitali o dashboard numeriche. Tuttavia, la letteratura scientifica evidenzia come tali interfacce esplicite richiedano un'attenzione focale, contribuendo ad aumentare il carico cognitivo dell'utente e generando potenziale distrazione nel contesto lavorativo (Weiser & Brown, 1996; Margariti, 2024).

Per ovviare a questo limite, il presente progetto adotta il paradigma degli *Ambient Displays* e, più specificamente, delle interfacce a mutazione di forma (Shape-Changing Interfaces). L'idea alla base è quella di utilizzare un artefatto fisico – un origami robotico – che comunica la concentrazione di anidride carbonica CO2 non attraverso numeri o allarmi sonori, ma modificando silenziosamente la propria geometria spaziale (Rasmussen et al., 2012; Kim et al., 2023).

Questo approccio si fonda sui principi della **Calm Technology**, secondo cui le informazioni ambientali devono risiedere nella "periferia" dell'attenzione dell'utente, spostandosi al centro solo in caso di reale necessità (Weiser & Brown, 1996).

Il design dell'interazione dell'origami sfrutta il principio dell'*Embodied Cognition* (cognizione incarnata), secondo il quale l'essere umano comprende concetti astratti più facilmente se questi sono mappati su metafore fisiche e biologiche. Nel caso specifico, la variazione di CO2 è stata associata all'atto della respirazione e alla prossemica difensiva (Jafarinai et al., 2004). L'apertura (espansione) dell'origami simboleggia l'espansione della cassa toracica, richiamando un senso di respiro profondo, rilassamento e salubrità dell'aria. Al contrario, la chiusura (contrazione o accartocciamento) richiama una postura difensiva, il soffocamento o la mancanza di ossigeno. Questo mapping diretto permette agli occupanti di decodificare lo stato dell'ambiente in modo puramente intuitivo, superando la necessità di interpretare il dato numerico in parti per milione (ppm).

Gumus, A., et al. (2024). Modular multi-degree-of-freedom soft origami robots with reprogrammable electrothermal actuation. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. (Riferimento per la fattibilità tecnica dei movimenti fluidi negli origami robotici).



Weiser, M., & Brown, J. S. (1996). *The Coming Age of Calm Technology*. Xerox PARC. (Teoria fondamentale sul design di tecnologie non intrusive).



## Gli stati dell'origami

Il comportamento dinamico dell'origami è regolato da un microcontrollore interno (collegato al sensore CO<sub>2</sub>, programmato per attuare tre stati morfologici distinti, calibrati sulle soglie standard di qualità dell'aria (ASHRAE, REHVA):

- **Stato 1: Espansione / Comfort (Concentrazione CO<sub>2</sub> < 800 ppm)**

Quando la qualità dell'aria è ottimale, l'origami si trova nel suo stato di massima apertura. Le geometrie sono distese e regolari. Questo stato trasmette "quiete" visiva e si integra nell'ambiente come un elemento di design passivo. Studi sulle interfacce tangibili confermano che le forme aperte e simmetriche inducono un senso di sicurezza psicologica nell'osservatore (Ishii & Ullmer, 1997).

- **Stato 2: Transizione / Allerta Periferica (Concentrazione CO<sub>2</sub> tra 800 e 1200 ppm)**

Al superamento della prima soglia di attenzione, l'origami inizia un lento processo di contrazione. I lembi si sollevano parzialmente e il volume dell'oggetto si riduce. Il movimento è programmato per essere estremamente lento e fluido (sfruttando le dinamiche della soft robotics), fungendo da nudging (spinta gentile) visivo. L'obiettivo non è allarmare, ma insinuare nella percezione periferica dell'utente l'idea che l'aria si stia lentamente viziando (Jafarinnaimi et al., 2004; Kim et al., 2023).

- **Stato 3: Contrazione / Criticità (Concentrazione CO<sub>2</sub> > 1200 ppm)**

Quando l'aria raggiunge livelli in grado di generare affaticamento cognitivo, l'origami raggiunge la sua forma di massima chiusura. A livello visivo, l'oggetto appare "contratto" o "accartocciato". In alcune varianti di Shape-Changing Displays, per enfatizzare lo stato di urgenza senza ricorrere al suono, l'artefatto può essere programmato per eseguire micro-movimenti rapidi, simili a un respiro affannoso (panting). Questo stato richiama l'attenzione focale dell'occupante in modo esplicito, invitandolo ad un'azione fisica risolutiva (es. aprire una finestra) (Gumus et al., 2024).

L'utilizzo di artefatti a mutazione di forma per la promozione di comportamenti proattivi è ampiamente documentato. Uno studio seminale di riferimento è il progetto Breakaway (Jafarinnaimi et al., 2004), in cui una piccola scultura sulla scrivania modificava la propria postura (da eretta a incurvata) per segnalare all'utente che era rimasto seduto troppo a lungo. Similmente, il nostro origami si "ammala" (si chiude) quando l'ambiente è insalubre.

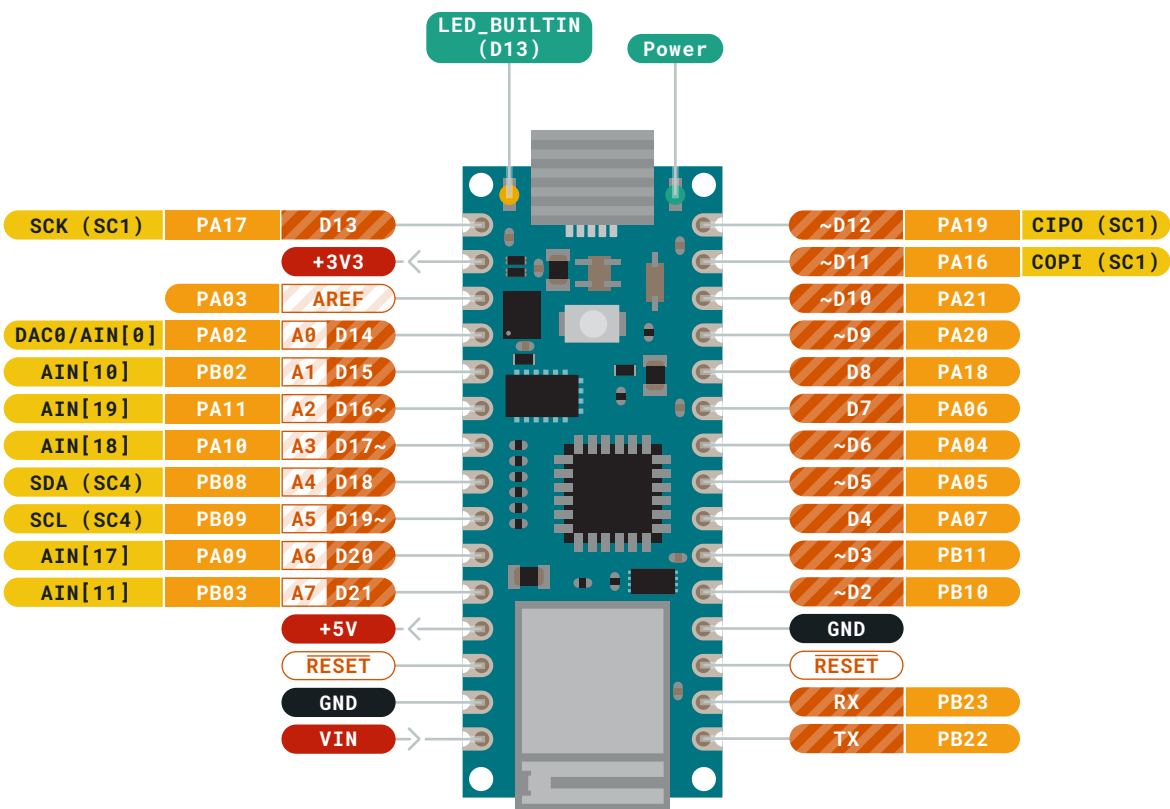
Ricerche recenti condotte specificamente sui Shape-Changing Air Quality Displays hanno dimostrato che gli occupanti di un edificio rispondono in modo più tempestivo e provano meno ansia quando il degrado dell'aria è comunicato da un'interfaccia fisica morfologica rispetto a un indicatore a semaforo (LED rosso/verde) o a un avviso acustico (Kim et al., 2023). L'origami, dunque, non è un mero sensore travestito da oggetto di design, ma un vero e proprio "attore" sociale non verbale che facilita la mediazione tra l'ambiente costruito e l'essere umano (Ishii et al., 2012).

Kim, S., et al. (2023). Building Occupants' Experiences of a Shape-Changing Air Quality Display. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. (Studio specifico sulla percezione psicologica dei display a mutazione di forma per la qualità dell'aria).

# Componenti: Modulo di Alimentazione

## Arduino Nano 33 IoT

L'Arduino Nano 33 IoT è una scheda di sviluppo estremamente compatta, progettata specificamente per applicazioni di Internet of Things (IoT), dispositivi indossabili e reti di sensori. Nonostante le dimensioni ridotte (fattore di forma Nano), integra connettività Wi-Fi e Bluetooth, un sensore di movimento a 6 assi e un chip crittografico per garantire la sicurezza dei dati trasmessi.



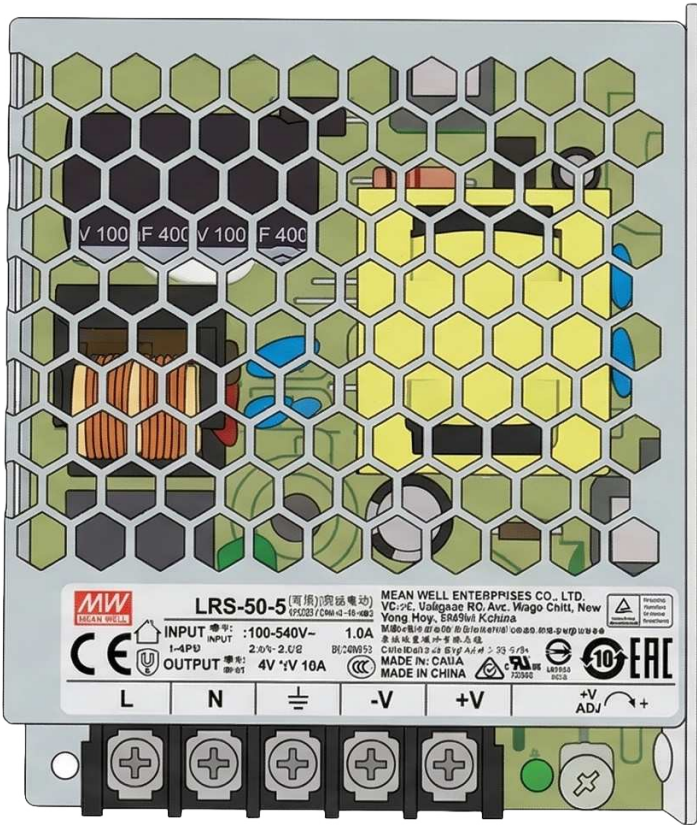
## Scheda tecnica

| Parametro                   | Specifiche                                               |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------|
| Microcontrollore            | Microchip SAMD21 Cortex-M0+ a 32 bit                     |
| Modulo Radio (Connettività) | u-blox NINA-W102 (Wi-Fi 802.11b/g/n, Bluetooth/BLE v4.2) |
| Elemento di Sicurezza       | Chip crittografico Microchip ATEC-C608A                  |
| Sensore Integrato           | IMU a 6 assi (LSM6DS3)                                   |
| Frequenza di Clock          | 48 MHz                                                   |
| Memoria Flash               | 256 KB                                                   |
| Memoria SRAM                | 32 KB                                                    |
| Tensione Operativa (Logica) | 3.3 V                                                    |
| Tensione di Ingresso (Vin)  | Da 4.5 V a 21 V massimo                                  |
| Corrente DC per Pin I/O     | 7 mA                                                     |
| Pin di I/O Digitali         | 14 (di cui 11 configurabili come PWM)                    |
| Pin di Input Analogico      | 8 (ADC con risoluzione fino a 12 bit)                    |
| Pin di Output Analogico     | 1 (DAC a 10 bit)                                         |
| Interfacce di Comunicazione | 1x UART, 1x SPI, 1x I2C                                  |
| Dimensioni                  | 45 mm x 18 mm                                            |
| Peso                        | 5 g                                                      |



Mean Well LRS-50-5

Il Mean Well LRS-50-5 è un alimentatore switching AC/DC a telaio metallico, progettato per la conversione della tensione di rete in bassa tensione continua stabilizzata. Il dispositivo accetta in ingresso una tensione compresa tra 100 e 240 V AC e fornisce in uscita 5 V DC, con una corrente massima di 10 A e una potenza nominale di 50 W. La struttura compatta in involucro metallico traforato favorisce la dissipazione termica passiva e rende il componente idoneo a integrazioni elettroniche che richiedono continuità di alimentazione, affidabilità operativa e stabilità elettrica.

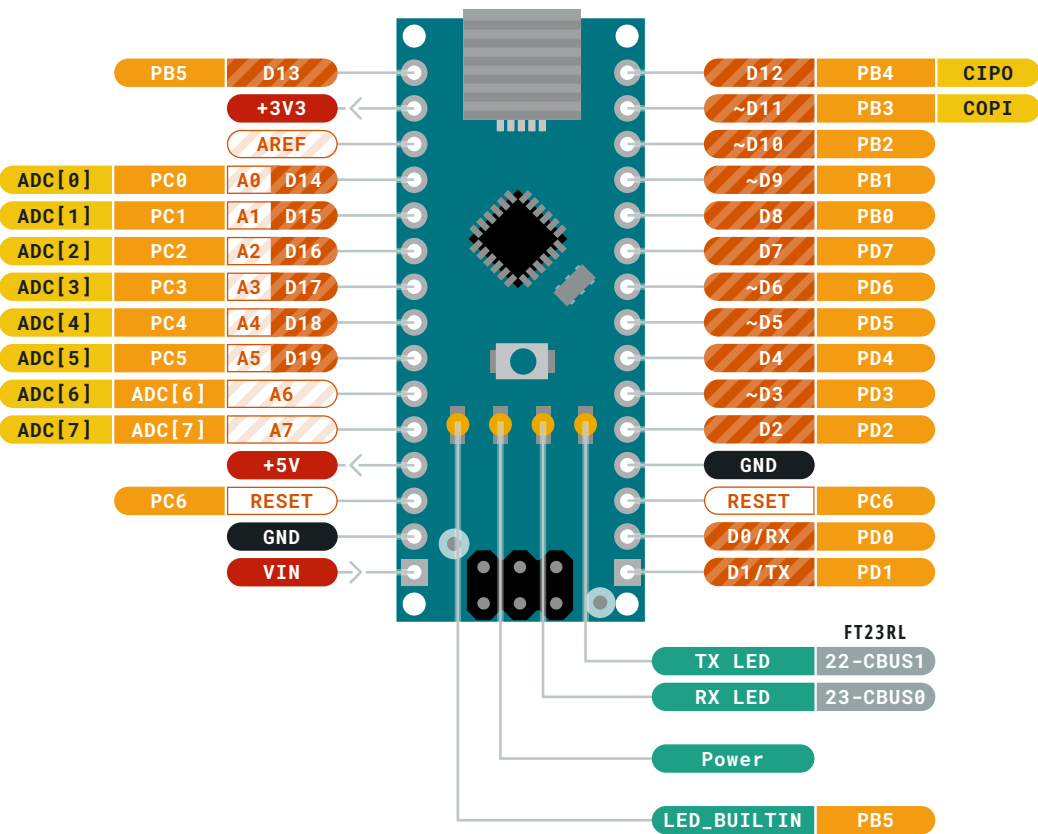


| Parametro                    | Specifiche                                                                                     |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Produttore                   | Mean Well (MW)                                                                                 |
| Modello                      | LRS-50-5                                                                                       |
| Tipologia                    | Alimentatore Switching (AC/DC) Enclosed (a telaio metallico)                                   |
| Tensione di Ingresso (Input) | 100-240V AC (range universale)                                                                 |
| Frequenza di Rete            | 50/60 Hz                                                                                       |
| Corrente di Ingresso         | 1.0A                                                                                           |
| Tensione di Uscita (Output)  | 5V DC (Corrente Continua)                                                                      |
| Regolazione Tensione (V ADJ) | Presente tramite trimmer (potenziometro) per piccole correzioni della tensione di uscita       |
| Corrente Massima di Uscita   | 10A (Ampere)                                                                                   |
| Potenza Nominale             | 50 Watt                                                                                        |
| Connessioni                  | Morsettiera a vite (Fase, Neutro, Terra, -V, +V)                                               |
| Struttura Esterna            | Case in alluminio con fori a nido d'ape per la dissipazione passiva del calore (senza ventola) |

# Componenti: Modulo di Comunicazione

## Arduino Nano

L'Arduino Nano (v3.0) è una scheda di prototipazione elettronica ultra-compatta basata sul microcontrollore Atmel ATmega328P a 8-bit. Progettata per applicazioni con vincoli di spazio, condensa le piene funzionalità della famiglia Arduino in un formato ridotto (45 x 18 mm). Operando con una tensione logica di 5 V e garantendo un'erogazione di corrente fino a 40 mA per singolo pin, la scheda risulta particolarmente affidabile e versatile per il controllo diretto di sensori, attuatori e logiche embedded che non richiedono connettività wireless nativa.

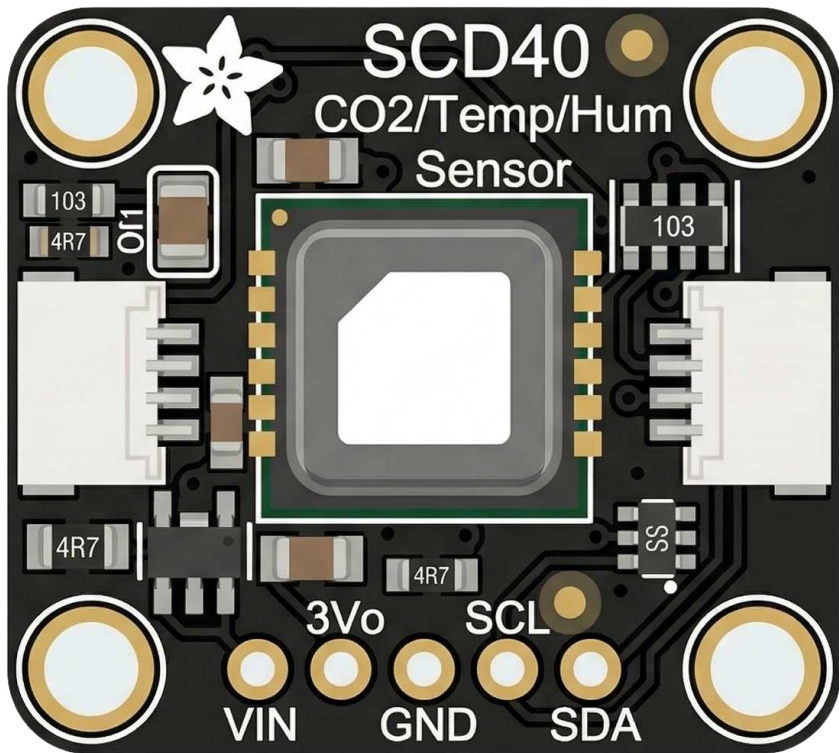


| Parametro                   | Specifiche                                       |
|-----------------------------|--------------------------------------------------|
| Microcontrollore            | Atmel ATmega328P (Architettura AVR a 8-bit)      |
| Frequenza di Clock          | 16 MHz                                           |
| Memoria Flash               | 32 KB (di cui 2 KB riservati al bootloa-<br>der) |
| Memoria SRAM                | 2 KB                                             |
| Memoria EEPROM              | 1 KB                                             |
| Tensione Operativa (Logica) | 5 V                                              |
| Tensione di Ingresso (Vin)  | 7 - 12 V (Consigliata)                           |
| Limiti di Tensione (Vin)    | 6 - 20 V                                         |
| Corrente DC per Pin I/O     | 40 mA                                            |
| Corrente DC sul Pin 3.3V    | 50 mA                                            |
| Pin di I/O Digitali         | 14 (di cui 6 utilizzabili per output PWM)        |
| Pin di Input Analogico      | 8 (con risoluzione ADC a 10 bit)                 |
| Interfacce di Comunicazione | 1x UART, 1x SPI, 1x I2C (IIC)                    |
| Connettore USB              | Mini-B USB                                       |
| Dimensioni                  | 45 x 18 mm (1.70" x 0.73")                       |
| Peso                        | 7 g                                              |



Adafruit SCD-40

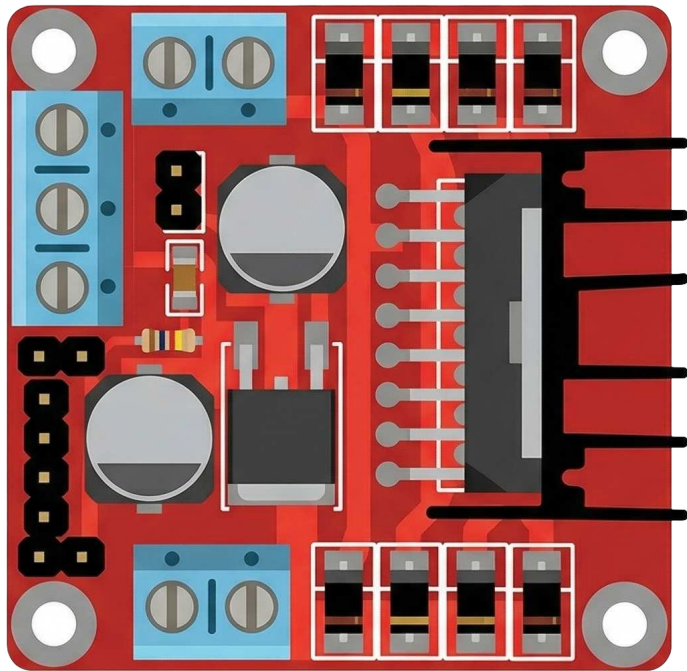
Il modulo Adafruit SCD-40 è una scheda sensoriale compatta ad alta precisione, basata sul sensore foto-acustico Sensirion SCD40, progettata per il monitoraggio della qualità dell'aria indoor. Il dispositivo rileva simultaneamente la concentrazione reale di CO2 (da 400 a 2000 ppm), la temperatura e l'umidità relativa dell'ambiente. Grazie all'integrazione di un regolatore di tensione e traslatori di livello, la scheda è compatibile con sistemi logici sia a 3.3 V che a 5 V. L'adozione del bus di comunicazione I2C e dei connettori standardizzati STEMMA QT / Qwiic ne facilita l'implementazione in reti di sensori e architetture IoT per la diagnostica ambientale.



| Parametro                          | Specifiche                                                                            |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Sensore Principale                 | Sensirion SCD40                                                                       |
| Tecnologia di rilevamento CO2      | Sensore fotoacustico (NDIR)                                                           |
| Intervallo di misurazione CO2      | 400 ppm – 2.000 ppm                                                                   |
| Accuratezza misurazione CO2        | ±(50 ppm + 5% del valore letto)                                                       |
| Sensori ausiliari integrati        | Temperatura e Umidità Relativa                                                        |
| Tensione di alimentazione (VIN)    | 3.3 V – 5 V DC (regolatore di tensione integrato sulla scheda)                        |
| Corrente assorbita (operativa)     | 17 mA (con campionamento ogni 5 secondi)                                              |
| Corrente assorbita (basso consumo) | 0.5 mA (con campionamento ogni 5 minuti)                                              |
| Interfaccia di comunicazione       | Bus I2C digitale                                                                      |
| Indirizzo I2C predefinito          | 0x62                                                                                  |
| Conessioni                         | Pin per breadboard standard (Passo 2.54mm) + 2x Connettori JST SH (STEMMA QT / Qwiic) |
| Dimensioni della scheda            | 25.5 mm x 22.8 mm x 7.7 mm                                                            |
| Peso                               | 2.8 g                                                                                 |

modulo driver motore L298N

Il modulo driver motore L298N è una scheda di potenza basata sull'omonimo circuito integrato a doppio ponte H prodotto da STMicroelectronics. Progettato per interfacciarsi con logiche di controllo a bassa tensione (come quelle dei microcontrollori Arduino), il modulo assolve alla funzione di amplificatore di corrente, permettendo di pilotare simultaneamente la velocità e la direzione di due motori in corrente continua (DC) oppure di un singolo motore passo-passo (stepper motor) bipolare. Grazie a un ampio range di tensione operativa e a una capacità di erogazione fino a 2A per canale, uniti al dissipatore di calore in alluminio integrato, il driver costituisce la soluzione ideale per convertire i deboli segnali logici digitali nei movimenti meccanici e nei cinematismi strutturali dei moduli origami.

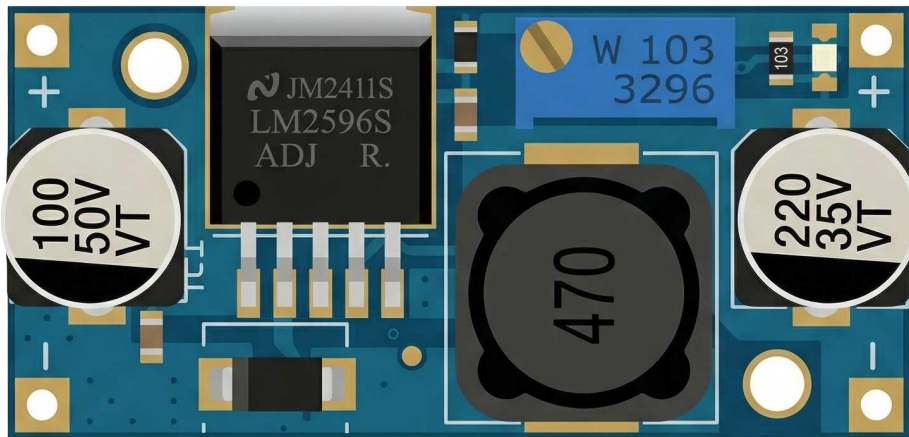


| Parametro                        | Specifiche                                                                                                      |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Circuito Integrato (Chip)        | L298N (Dual H-Bridge)                                                                                           |
| Architettura di controllo        | Doppio Ponte H (Dual H-Bridge)                                                                                  |
| Tensione Logica (Vss)            | 5 V                                                                                                             |
| Tensione Operativa Motori (Vs)   | 5 V – 35 V (Supporta alimentazioni esterne elevate)                                                             |
| Corrente Operativa di Picco      | 2 A per singolo canale (ponte) o 4 A massimi complessivi                                                        |
| Corrente Logica Assorbita        | 0 mA – 36 mA                                                                                                    |
| Potenza Massima Dissipabile      | 25 W                                                                                                            |
| Tipologia Motori Supportati      | 2 Motori DC indipendenti oppure 1 Motore Passo-passo bipolare                                                   |
| Controllo Velocità               | Supportato tramite segnali PWM (Pulse Width Modulation) sui pin di Enable                                       |
| Regolatore di tensione integrato | Regolatore lineare a 5V a bordo (abilitabile/disabilitabile tramite jumper) per alimentare la logica del modulo |
| Dissipazione Termica             | Dissipatore alettato in alluminio montato sul chip L298N                                                        |
| Dimensioni                       | 43 mm x 43 mm x 28 mm                                                                                           |



modulo regolatore LM2596S

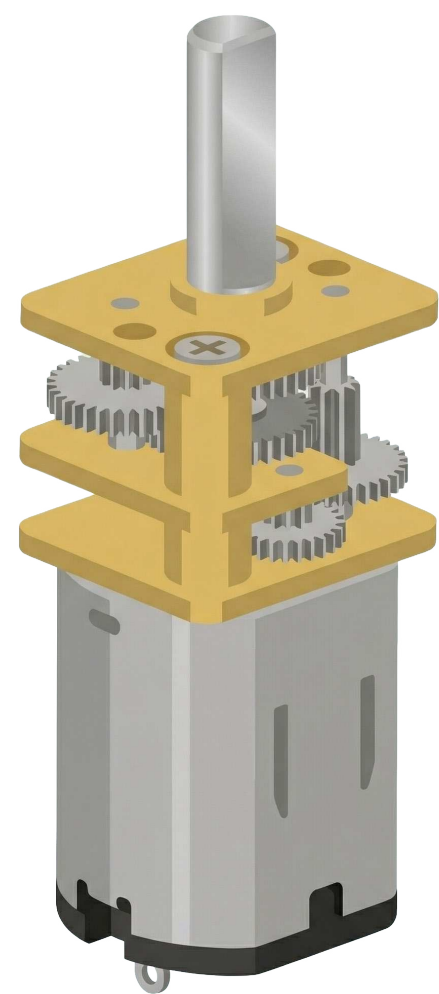
Il modulo regolatore LM2596S è un convertitore DC-DC di tipo step-down (buck converter) ad alta efficienza. La sua funzione è quella di abbassare una tensione continua in ingresso (fino a 40V) a un valore inferiore stabilizzato in uscita (da 1.25V a 35V), regolabile con estrema precisione tramite un trimmer multi-giro. Capace di erogare una corrente nominale di 2A (fino a 3A con dissipatore), il modulo vanta un'efficienza superiore al 90%, limitando drasticamente la dispersione termica. Nel contesto del progetto, questo componente è indispensabile per derivare le tensioni operative minori (es. 3.3V o 5V per l'elettronica logica) a partire dalla linea di potenza principale utilizzata dai motori o dall'alimentatore centrale.



| Parametro                   | Specifiche                                                                                                      |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Circuito Integrato          | LM2596S (Regolatore di commutazione Step-Down)                                                                  |
| Circuito Integrato          | LM2596S (Regolatore di commutazione Step-Down)                                                                  |
| Tensione di Uscita (Vout)   | 1.25 V – 35 V DC (Regolabile tramite trimmer potenziometro)                                                     |
| Vincolo Ingresso/Uscita     | La tensione di ingresso deve essere superiore di almeno 1.5 V – 2 V rispetto alla tensione di uscita desiderata |
| Corrente di Uscita Nominale | 2 A (Ampere)                                                                                                    |
| Corrente di Uscita Massima  | 3 A (Esclusivamente con dissipatore di calore aggiuntivo)                                                       |
| Efficienza di conversione   | Fino al 92% (in base al rapporto Vin/ Vout e al carico)                                                         |
| Frequenza di commutazione   | 150 kHz                                                                                                         |
| Protezioni integrate        | Limitazione di corrente (Short circuit protection) e blocco termico per sovra-temperatura                       |
| Temperature di esercizio    | Da -40°C a +85°C                                                                                                |
| Dimensioni della scheda     | ~ 43 mm x 20 mm x 14 mm                                                                                         |

Motoriduttore DC

Il micro motoriduttore DC in formato N20 è un attuatore elettromeccanico ultracompatto progettato per erogare coppie di torsione elevate in spazi millimetrici. Il componente integra un motore in corrente continua a spazzole e una scatola di riduzione (gearbox) ad ingranaggi metallici, essenziale per abbattere la velocità di rotazione a favore della forza motrice. Dotato di un albero di uscita con sezione a "D" per garantire una presa anti-slittamento, questo motore risulta la soluzione ingegneristica ideale per animare in modo lento, fluido e preciso i cinematismi strutturali dei moduli origami.

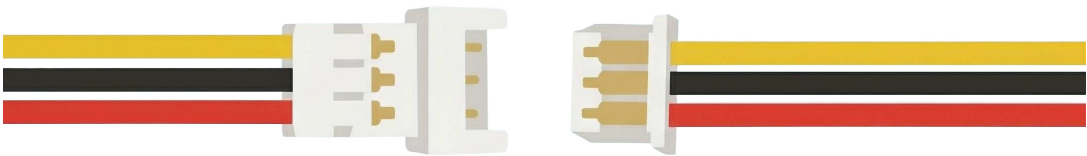


| Parametro                                 | Specifiche                                                             |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Tensione Nominale Operativa               | Solitamente disponibile in varianti da 3 V, 6 V o 12 V DC              |
| Scatola Ingranaggi (Gearbox)              | A vista, interamente in ottone e acciaio (Metal Gear)                  |
| Rapporto di Riduzione                     | Variabile in base al modello (tipicamente da 30:1 fino a 1000:1)       |
| Velocità a vuoto (No-load RPM)            | Variabile (tipicamente tra i 15 RPM e i 600 RPM a seconda del gearbox) |
| Coppia di Stallo (Stall Torque)           | Fino a 3 kg·cm (dipendente dalla variante di riduzione)                |
| Corrente a vuoto                          | ~30 mA - 50 mA                                                         |
| Corrente di stallo                        | ~0.7 A                                                                 |
| Profilo dell'Albero (Shaft)               | Asse a "D" (per impedire la rotazione a vuoto delle pulegge)           |
| Diametro dell'Albero                      | 3 mm (o 4 mm nelle varianti M4)                                        |
| Dimensioni corpo motore (incluso gearbox) | ~ 24 mm (lunghezza) x 12 mm (larghezza) x 10 mm (altezza)              |
| Peso                                      | ~ 10 g - 19 g                                                          |



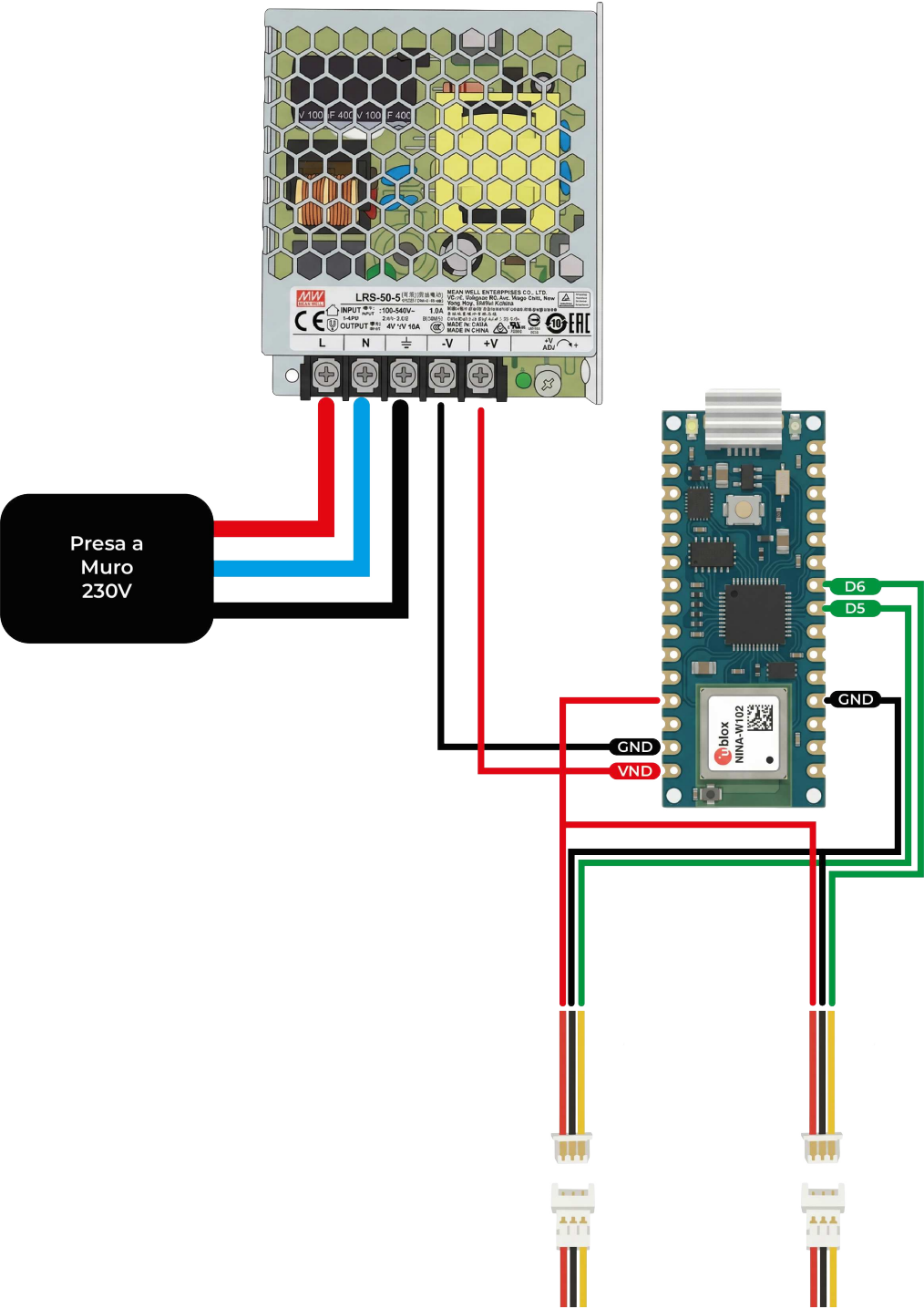
JST SM a 3 poli

Il connettore JST SM a 3 poli è una soluzione di cablaggio wire-to-wire ampiamente impiegata nel design di sistemi elettronici modulari e nell'illuminazione a stato solido. Progettato per facilitare il rapido aggancio e sgancio dei componenti senza l'uso di saldature permanenti, il connettore è dotato di un meccanismo di bloccaggio a scatto (locking latch) che previene disconnessioni accidentali causate da vibrazioni o sollecitazioni meccaniche. Grazie al suo profilo compatto e al passo di 2.50 mm (spesso arrotondato a 2.54 mm per compatibilità con le breadboard), risulta il terminale d'elezione per il collegamento seriale di strisce LED indirizzabili (come le serie WS2812B o SK6812) e di sensori a bassa tensione all'interno di scocche dalle dimensioni contenute, come quelle dei moduli origami.



| Parametro                   | Specifiche                                                         |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Famiglia Connettore         | JST Serie SM (Wire-to-Wire)                                        |
| Numero di Poli (Pin)        | 3                                                                  |
| Passo (Pin Pitch)           | 2.50 mm (Standard JST) / Compatibile con 2.54 mm                   |
| Tipologia di Accoppiamento  | Maschio (Plug) e Femmina (Receptacle)                              |
| Meccanismo di Ritenuta      | Clip di bloccaggio a scatto (Friction Lock ad alta forza)          |
| Corrente Nominale Massima   | Fino a 3 A per singolo pin                                         |
| Tensione Nominale Massima   | 250 V (Generalmente impiegato per basse tensioni: 5V, 12V, 24V)    |
| Sezione dei Cavi Supportata | Da 28 AWG a 22 AWG (spesso pre-cablato con cavi da 22 AWG)         |
| Principali Applicazioni     | Strisce LED Addressable (WS2812B, WS2811), sensori, piccoli motori |

# Schematico: Modulo di Alimentazione



## Schematico Modulo di Alimentazione

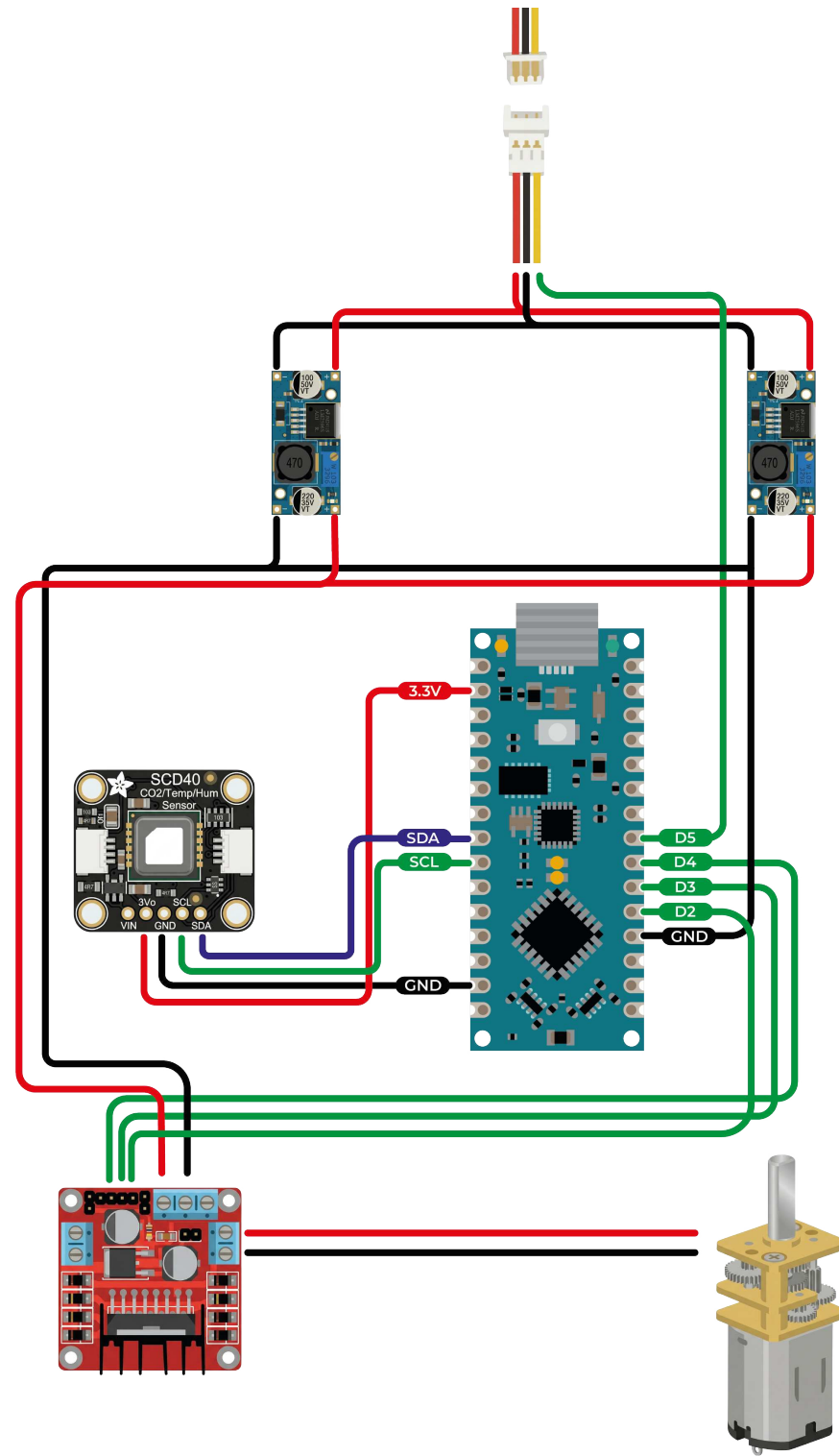
Questo schematico rappresenta il "cervello" dell'intera installazione e il suo punto di interfacciamento con la rete elettrica dell'edificio. La conversione dell'energia è affidata a un alimentatore switching Mean Well LRS-100-5, che trasforma la corrente alternata in ingresso (230V AC) in una corrente continua e stabilizzata a 5V. Per ottimizzare il cablaggio e gestire correnti elevate senza sovraccaricare un singolo punto di contatto, la progettazione sfrutta i doppi terminali di uscita nativi dell'alimentatore.

Il primo set di terminali è dedicato all'alimentazione della scheda master, l'Arduino Nano 33 IoT. In questo caso, i 5V vengono indirizzati al pin VIN: questa scelta è obbligata poiché il microcontrollore interno della scheda opera esclusivamente con livelli logici a 3.3V. Il pin VIN è collegato a un regolatore step-down integrato sulla scheda stessa, che abbassa internamente e in modo sicuro la tensione da 5V ai 3.3V richiesti.

Il secondo set di terminali dell'alimentatore viene sdoppiato tramite un morsetto Mammuto per erogare energia a due distinti rami JST (destro e sinistro), ai quali si affiancano i segnali dati generati dai pin digitali del Nano 33 IoT per sincronizzare il movimento dell'intera parete.



# Schematico: Modulo di Comunicazione

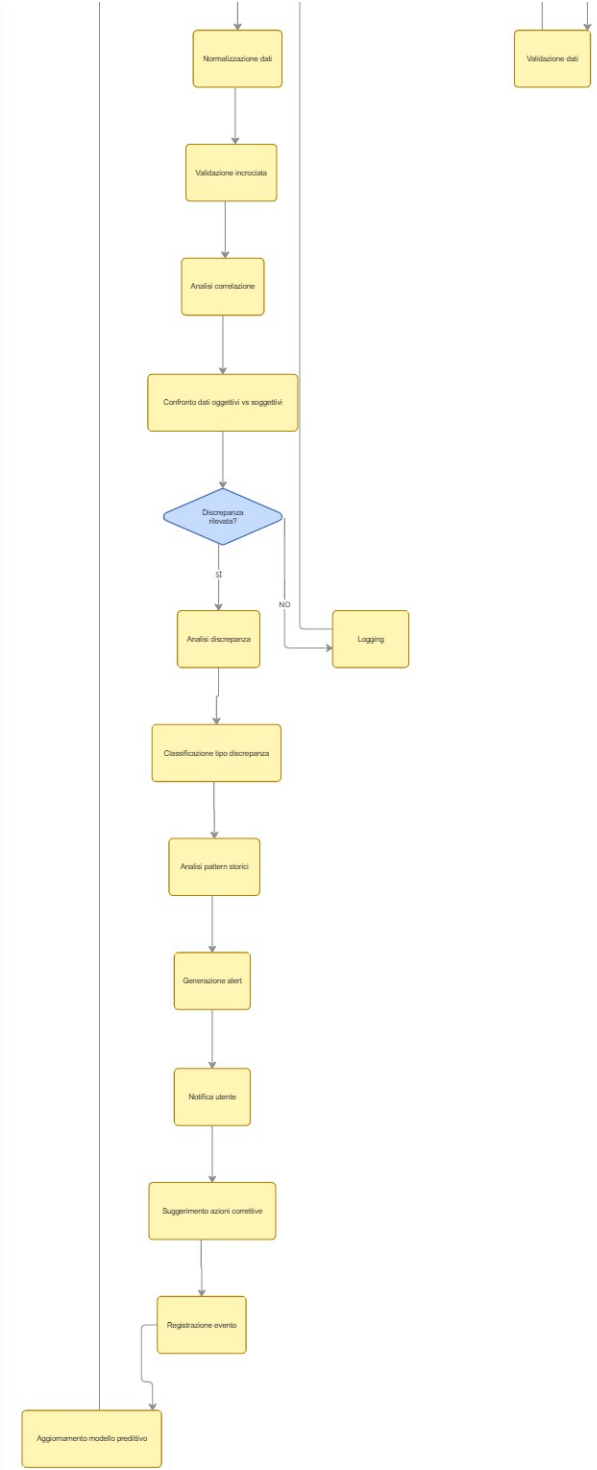
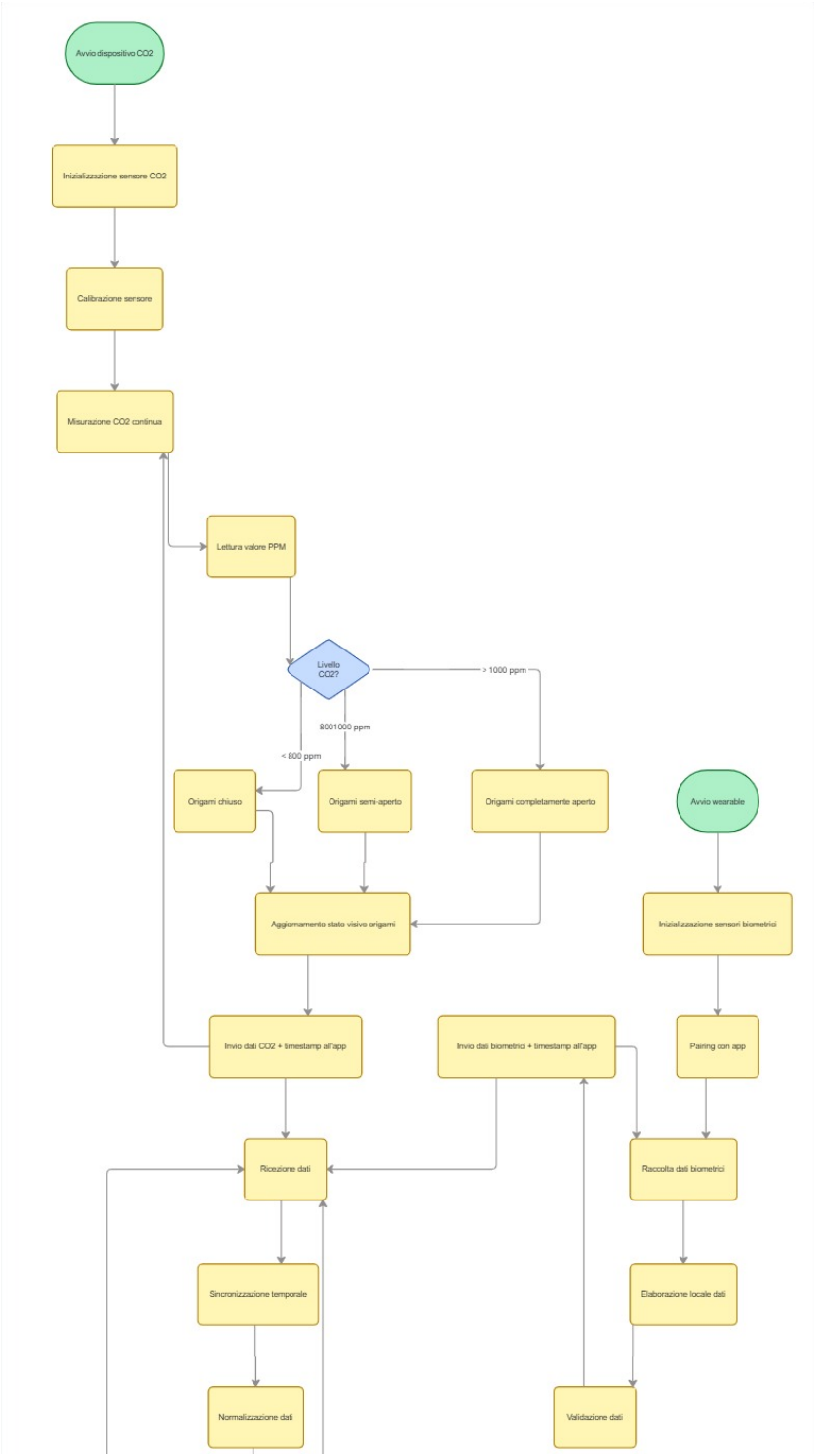


## Schematico modulo di comunicazione

Questo secondo schematico illustra l'architettura elettrica all'interno della singola struttura origami, incaricata di rilevare i dati ambientali e tradurli in movimento fisico. Per superare il problema della caduta di tensione (voltage drop) tipico dei sistemi modulari estesi nello spazio, il modulo riceve dal connettore JST un'alta tensione di trasporto (fino a 24V), che viene processata localmente da due convertitori DC-DC di tipo Buck. Il primo convertitore abbassa la tensione a 5V per la microelettronica, mentre il secondo fornisce 3V isolati esclusivamente per il motore.

A differenza del modulo master, l'intelligenza locale è affidata a un Arduino Nano Every, che opera nativamente a 5V. L'uscita a 5V del primo Buck Converter viene quindi immessa direttamente nel pin 5V (bypassando il VIN per evitare inefficienze) e viene utilizzata anche per alimentare il sensore di qualità dell'aria SCD40, uniformando così la tensione logica del bus di comunicazione I2C. Infine, l'azionamento meccanico è delegato al driver L298N, un circuito a doppio ponte H che riceve l'energia dal convertitore a 3V e, interpretando i segnali PWM e digitali in arrivo dall'Arduino, inverte la polarità ai morsetti d'uscita per controllare la direzione e la velocità di espansione o contrazione dell'origami.

# Algoritmo di interazione





# Programmazione Della rotazione basata sul livello di CO2

```
#include <Servo.h>
/*
 * Firmware per Arduino Nano 33 IoT
 * Controllo cinetico proporzionale basato su rilevazione CO2
 * (SCD40).
 */

#include <Servo.h>
#include <Wire.h>
#include "SparkFun_SCD4x_Arduino_Library.h"

Servo myServo;
SCD4x mySensor;

// Costanti di configurazione
const int servoPin = 3;
const int moveDelay = 15;      // Ritardo per movimento fluido
                                   (ms/grado)
const int readInterval = 5000; // Intervallo di lettura sensore
                                   (ms)

// Variabili di stato
int currentAngle = 0;
int targetAngle = 0;
unsigned long lastMoveTime = 0;
unsigned long lastReadTime = 0;

// --- FASE 1: INIZIALIZZAZIONE DEL SISTEMA ---
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Wire.begin();
```

```
    // Inizializzazione sensore I2C con blocco di sicurezza in
    caso di errore
    if (!mySensor.begin()) {
        Serial.println("Errore: sensore SCD40 non rilevato.");
        while (1);
    }

    // Configurazione attuatore e posizionamento iniziale di sicu-
    rezza (0°)
    myServo.attach(servoPin);
    myServo.write(currentAngle);
    delay(2000); // Attesa per stabilizzazione hardware
}

// --- FASE 2: ACQUISIZIONE DATO E MAPPATURA LOGICA ---
void loop() {
    unsigned long currentMillis = millis();

    // Acquisizione temporizzata non bloccante (ogni 5 secondi)
    if (currentMillis - lastReadTime >= readInterval) {
        lastReadTime = currentMillis;

        if (mySensor.readMeasurement()) {
            int co2Value = mySensor.getCO2();

            // Mappatura proporzionale a cascata (CO2 ppm -> Gradi)
            if (co2Value <= 800) {
                targetAngle = 0; // Condizione ottimale
            } else if (co2Value <= 1000) {
                targetAngle = map(co2Value, 800, 1000, 50, 100); // Ac-
                cettabile
            } else if (co2Value <= 1200) {
                targetAngle = map(co2Value, 1000, 1200, 100, 110); //
                Transizione
            } else if (co2Value <= 1500) {
                targetAngle = map(co2Value, 1200, 1500, 110, 150); //
                Inadeguata
            } else {
                targetAngle = 150; // Oltre i limiti (sicurezza mecca-
                nica)
            }

            Serial.print("CO2: "); Serial.print(co2Value);
            Serial.print(" ppm | Target: "); Serial.println(targetAn-
            gle);
        }
    }
```

```

    }

    // --- FASE 3: ATTUAZIONE PROGRESSIVA DEL SERVOMOTORE ---
    // Movimento fluido non bloccante: interpolazione di 1 grado
    alla volta
    if (currentAngle != targetAngle) {
        if (currentMillis - lastMoveTime >= moveDelay) {
            lastMoveTime = currentMillis;

            if (currentAngle < targetAngle) currentAngle++;
            else currentAngle--;

            myServo.write(currentAngle);
        }
    }
}del servo con
    // la posizione obiettivo appena calcolata.
    //
    // Se le due posizioni non coincidono, il motore non viene
    spostato in modo
    // istantaneo, ma tramite incrementi o decrementi di un gra-
    do alla volta.
    // Tale soluzione riduce brusche accelerazioni, limita le
    sollecitazioni
    // meccaniche e produce un comportamento più fluido e con-
    trollato.
    if (currentAngle != targetAngle) {
        if (currentMillis - lastMoveTime >= moveDelay) {
            lastMoveTime = currentMillis;

            // Avvicinamento progressivo all'angolo di destinazione.
            if (currentAngle < targetAngle) {
                currentAngle++;
            } else {
                currentAngle--;
            }

            // Invio del nuovo valore angolare al servomotore.
            myServo.write(currentAngle);
        }
    }
}
}

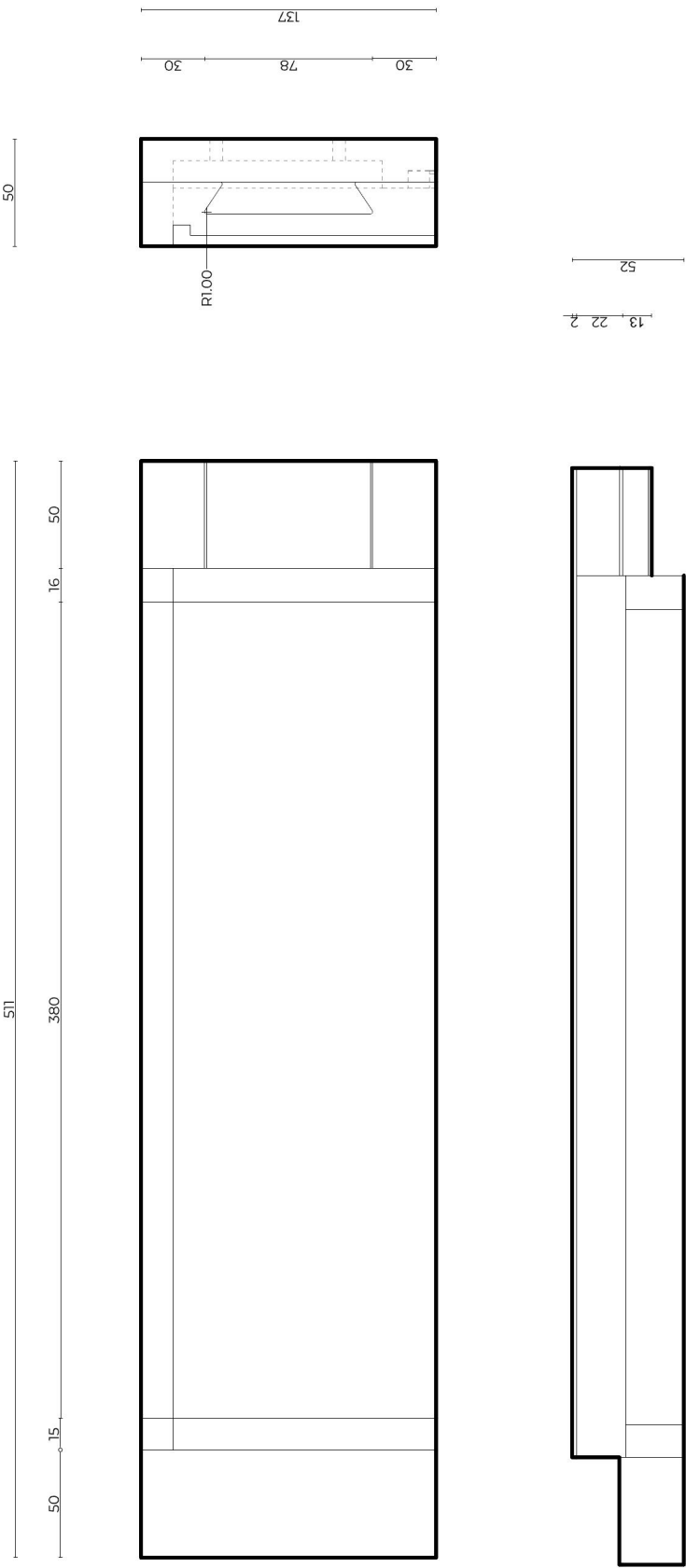
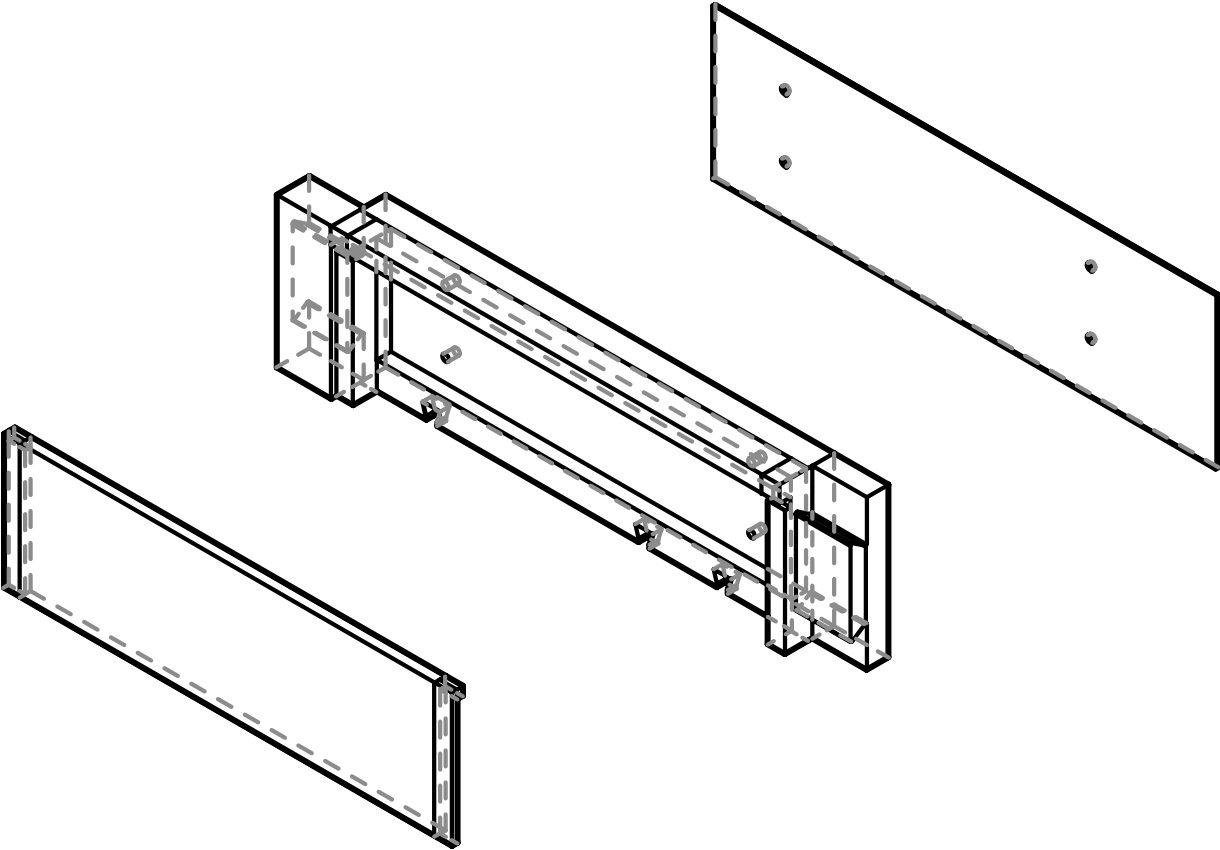
```



# Disegni Costruttivi e d'Insieme

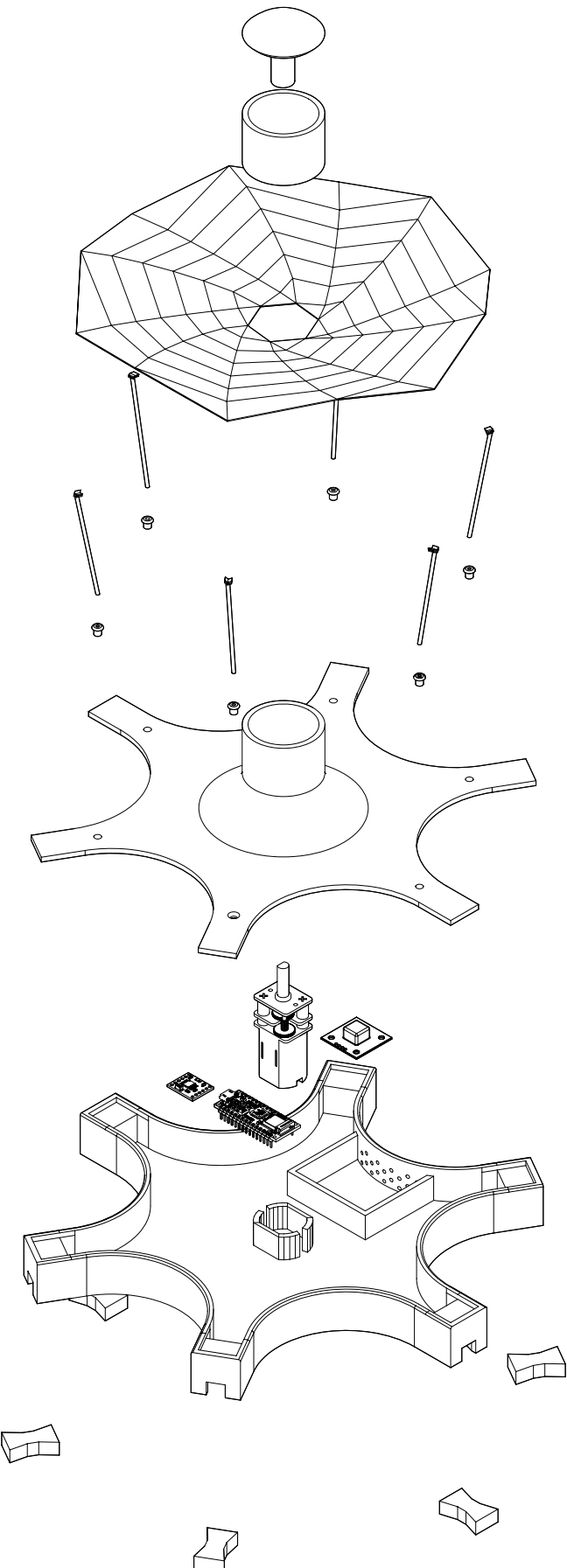
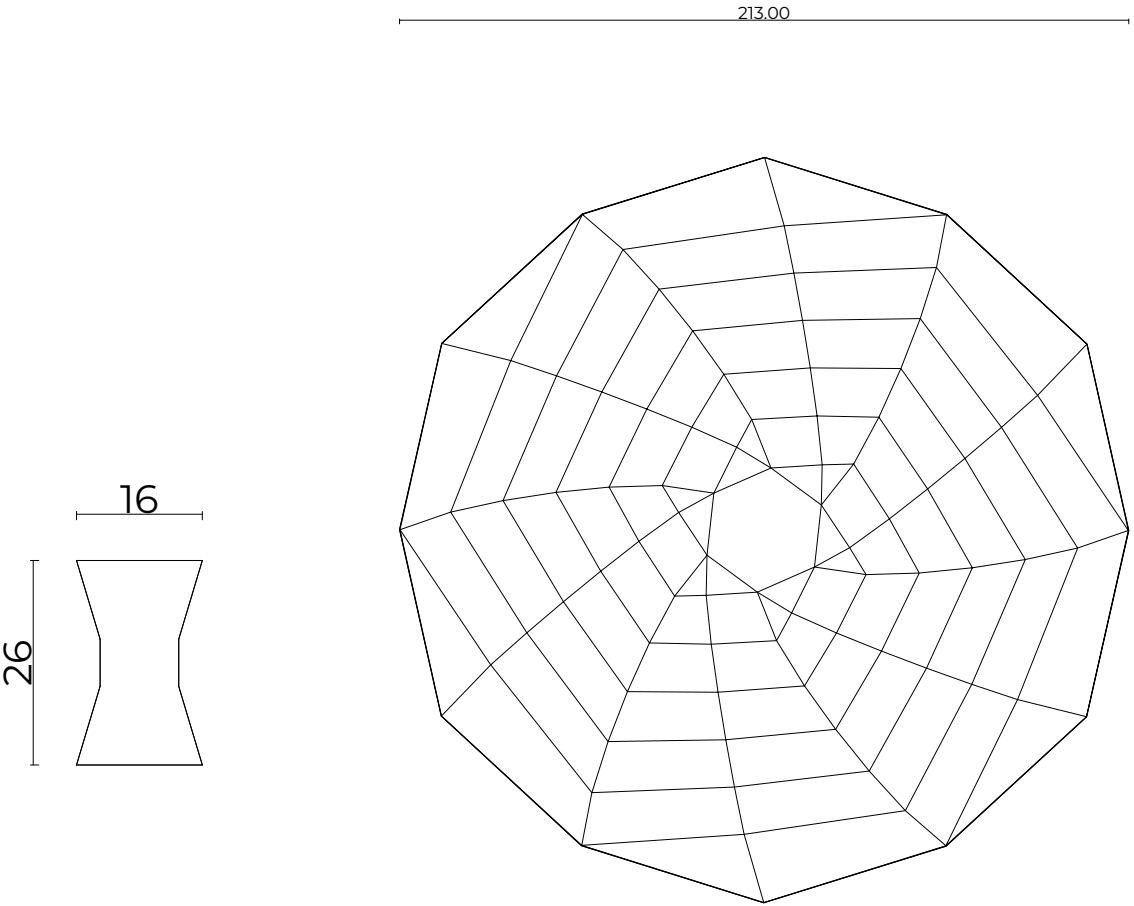
## Scocca modulo di alimentazione

La scocca del modulo di alimentazione è concepita come elemento di supporto e connessione dell'intero sistema. Fissata alla parete mediante una lamina di alluminio di spessore 2 mm, essa assicura il sostegno del modulo e definisce una base stabile per l'aggregazione degli altri elementi. Pur svolgendo una funzione tecnica, l'involucro è progettato per collegarsi fisicamente a moduli analoghi, così da garantire continuità visiva, coerenza formale e unitarietà percettiva dell'insieme.

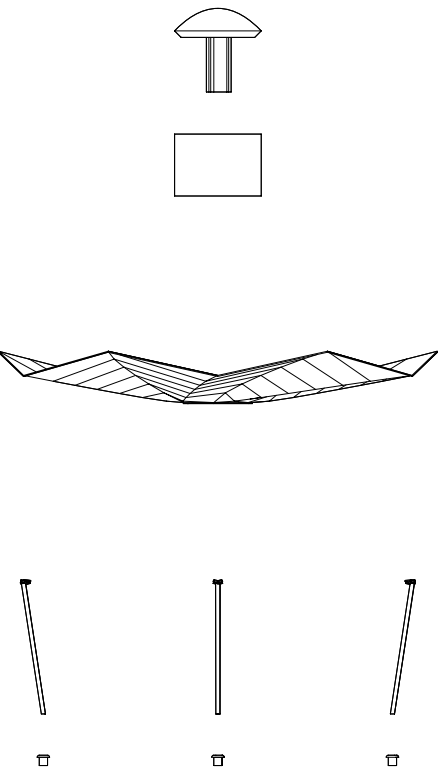
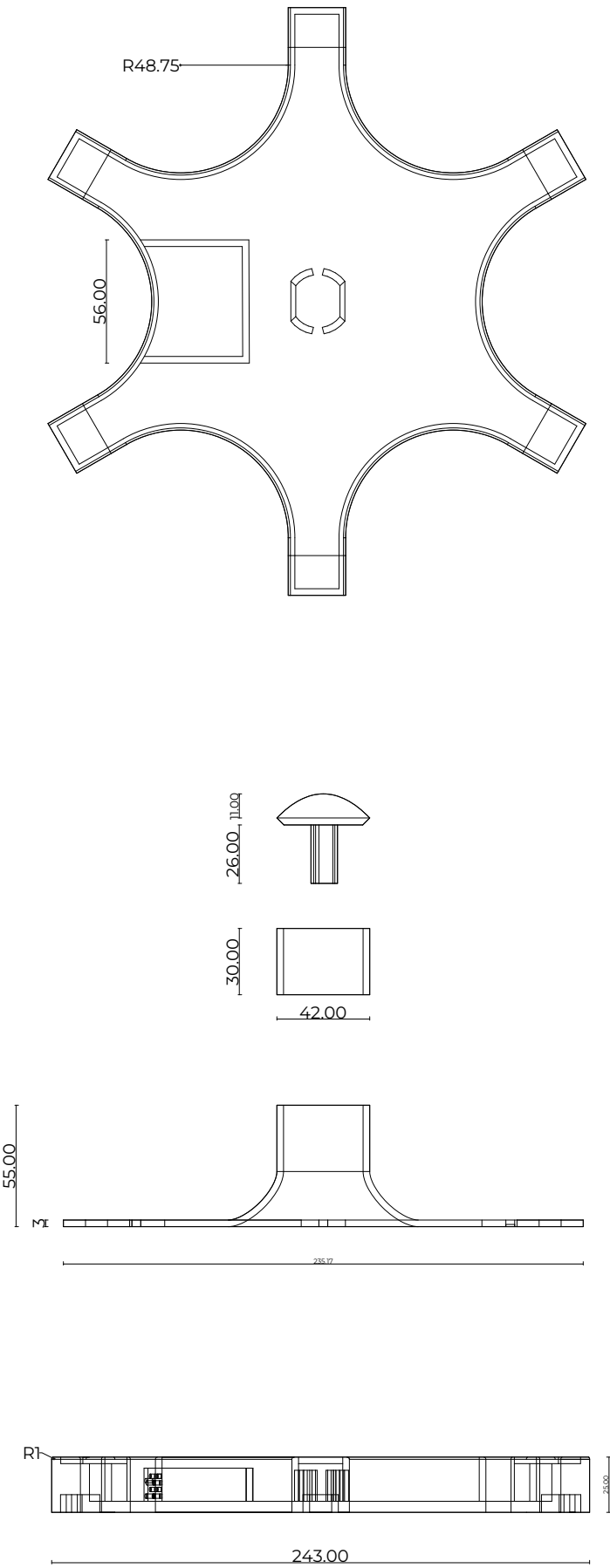


# Modulo di comunicazione

Il modulo di comunicazione traduce l'informazione in forma fisica, basandosi sui principi delle Tangible User Interfaces (TUI). In questo componente, la comunicazione del dato è affidata esclusivamente al movimento spaziale dell'origami, che diventa il vero medium percettivo. La progettazione della scocca è stata quindi subordinata all'elemento flessibile, assumendo una funzione di puro supporto strutturale: l'involucro si rende discreto per lasciare assoluta preminenza visiva e meccanica ai cinematismi di dilatazione e contrazione del materiale piegato.

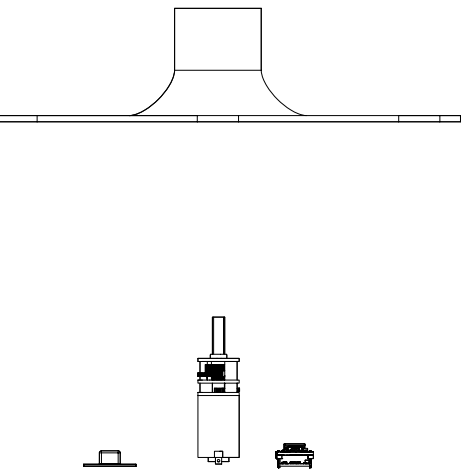






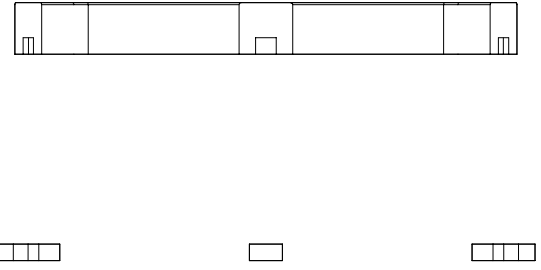
**Parte superiore**

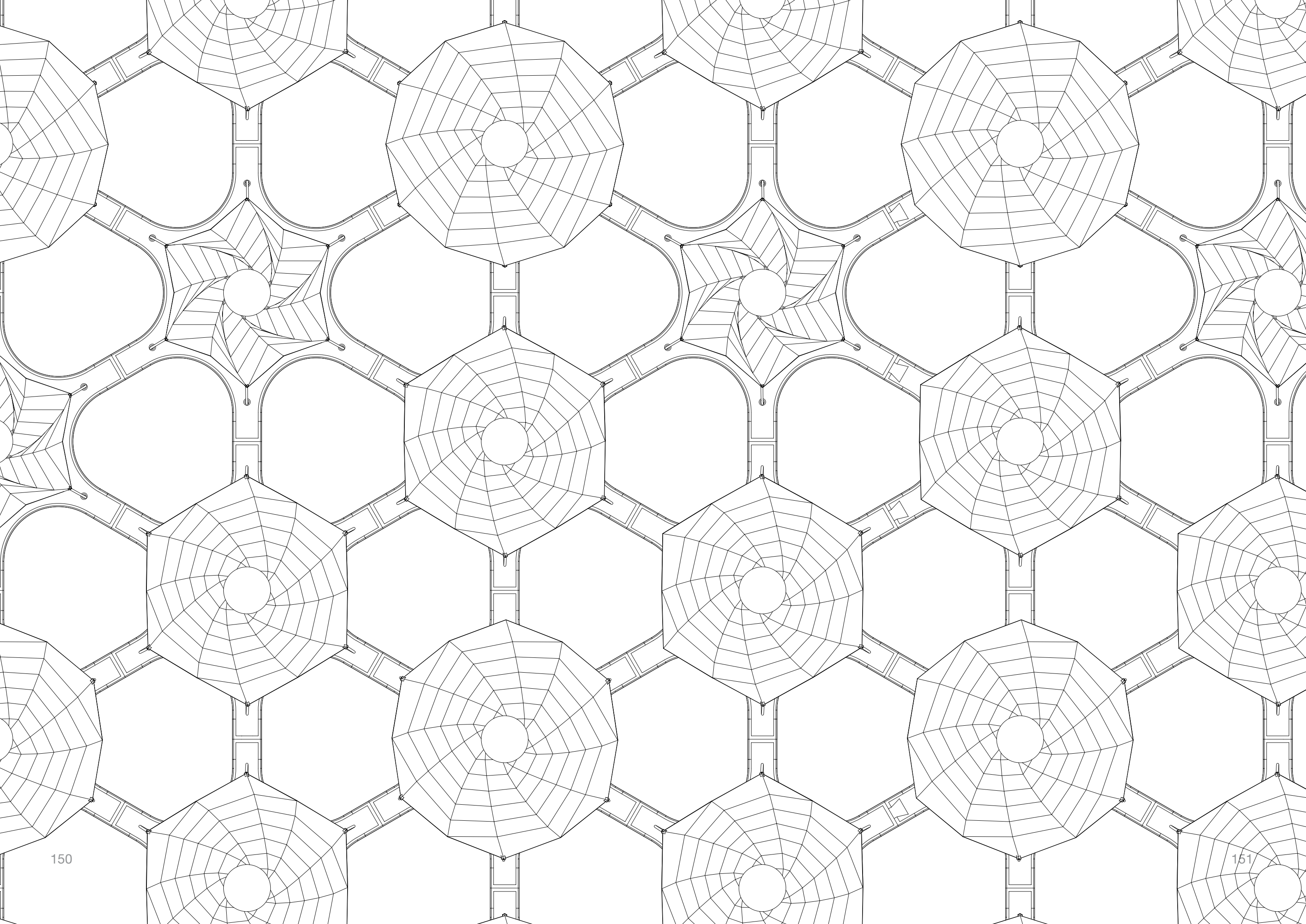
Comprensiva del meccanismo di fissaggio attraverso le aste metalliche flessibili dell'origami e di parte della scocca per permettere la rotazione



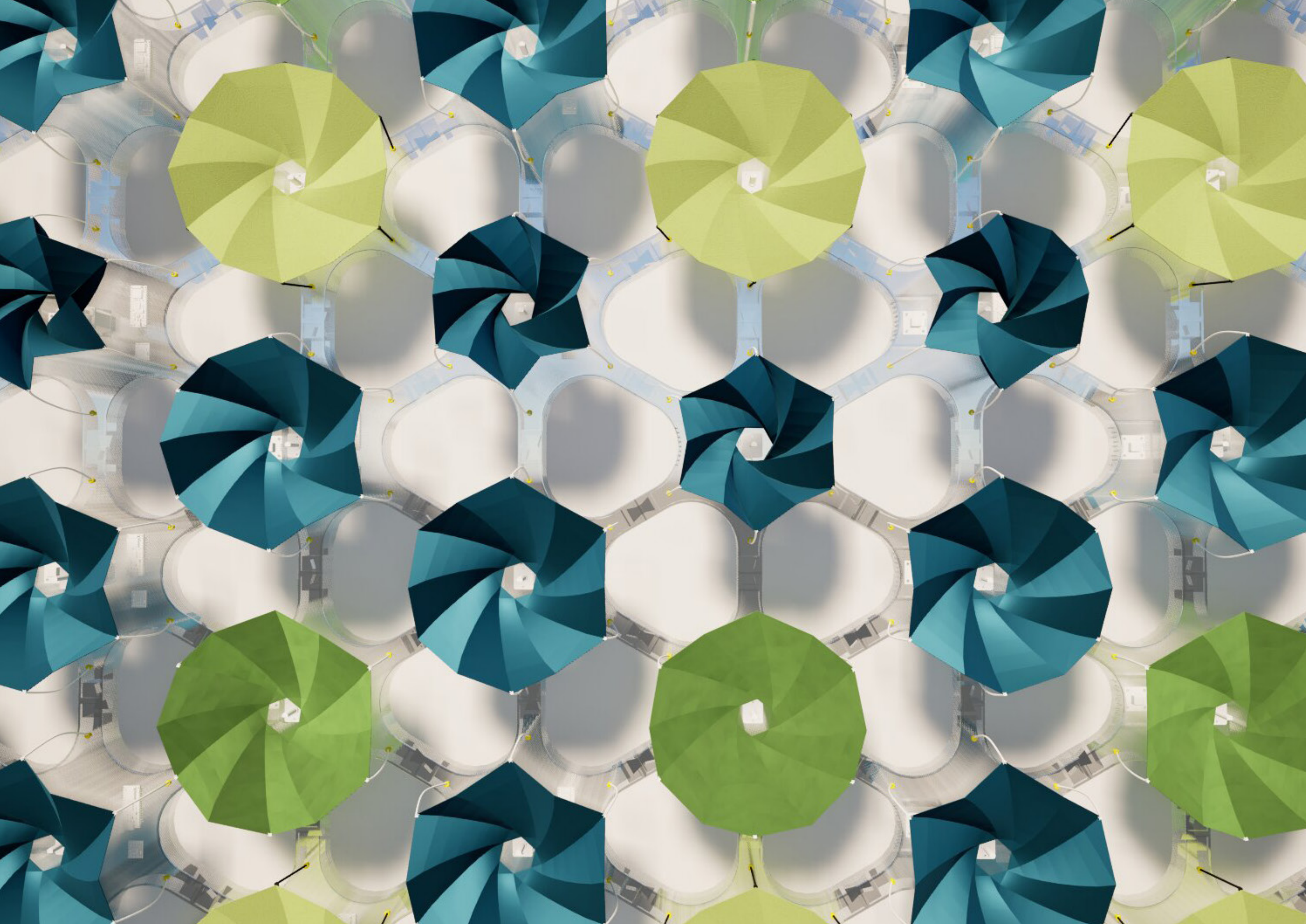
**Parte Inferiore**

Comprende la scocca di chiusura e contiene tutta la sensoristica comprensiva di parte elettrica per il collegamento dei vari componenti che consentono il movimento ed il collegamento del singolo modulo ad altri moduli facenti parte dello stesso sistema di comunicazione.



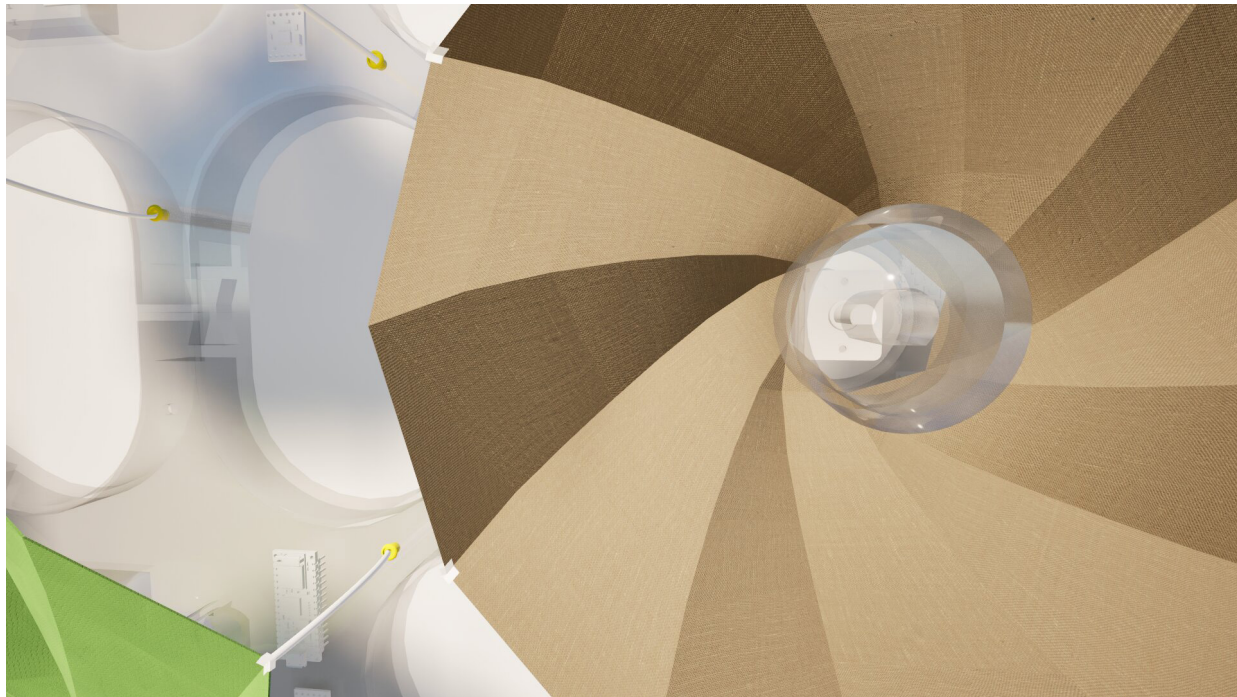
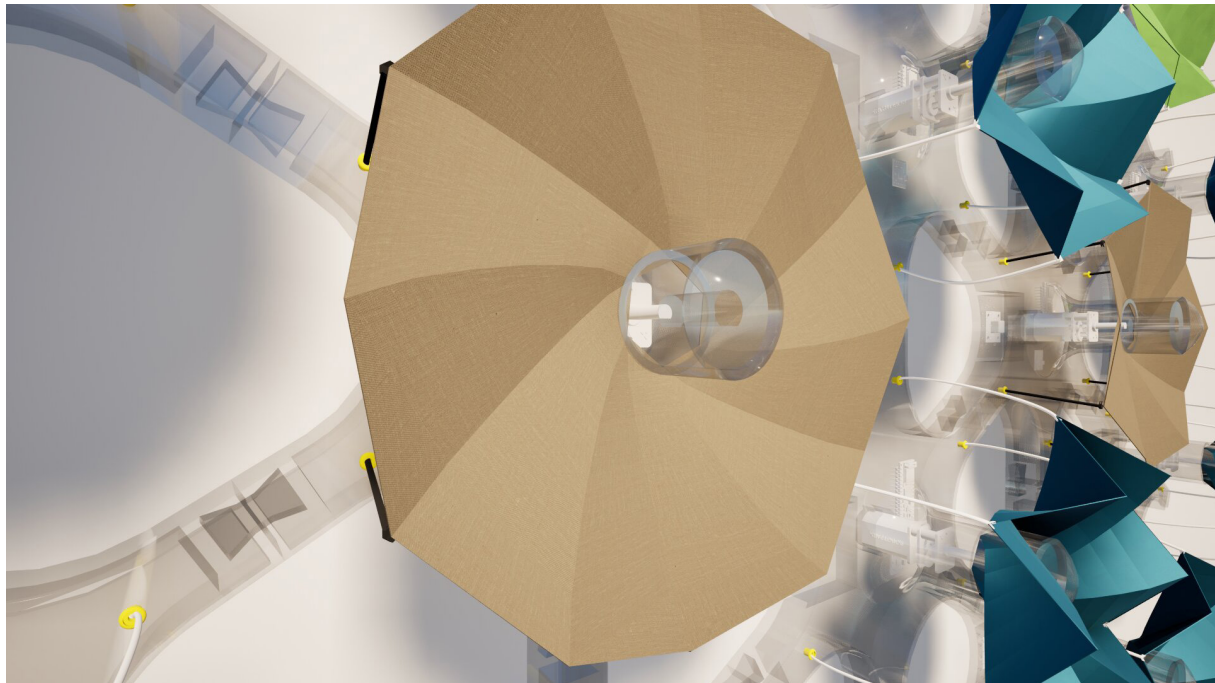
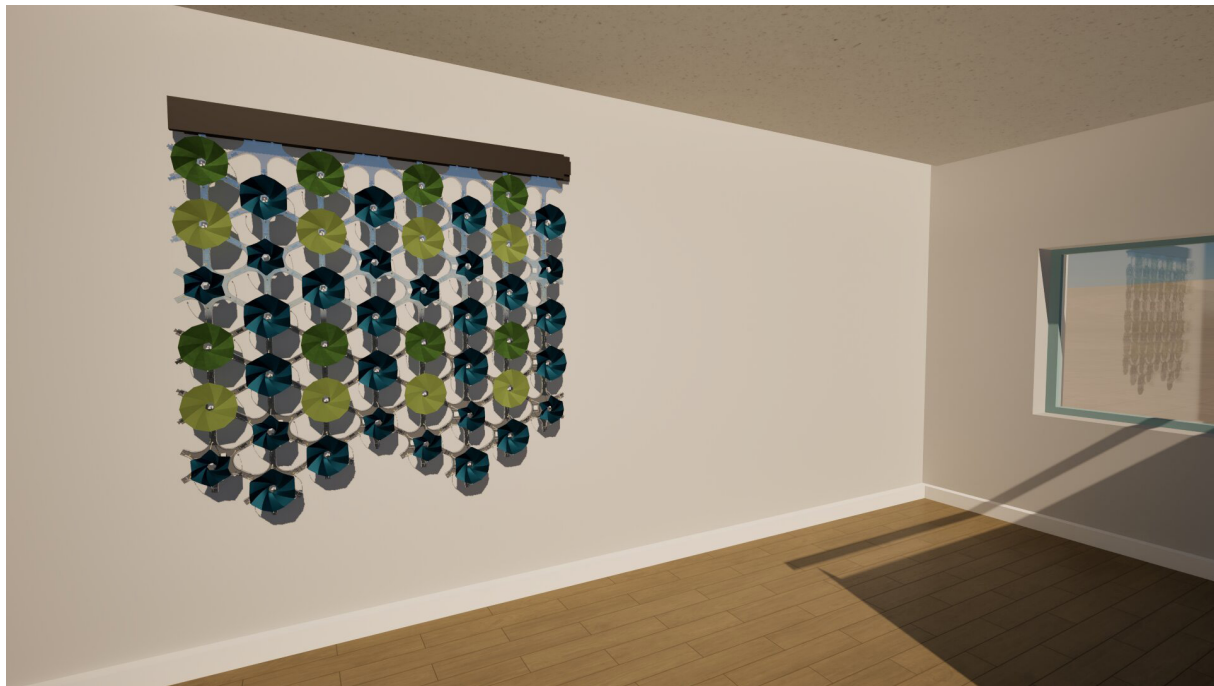
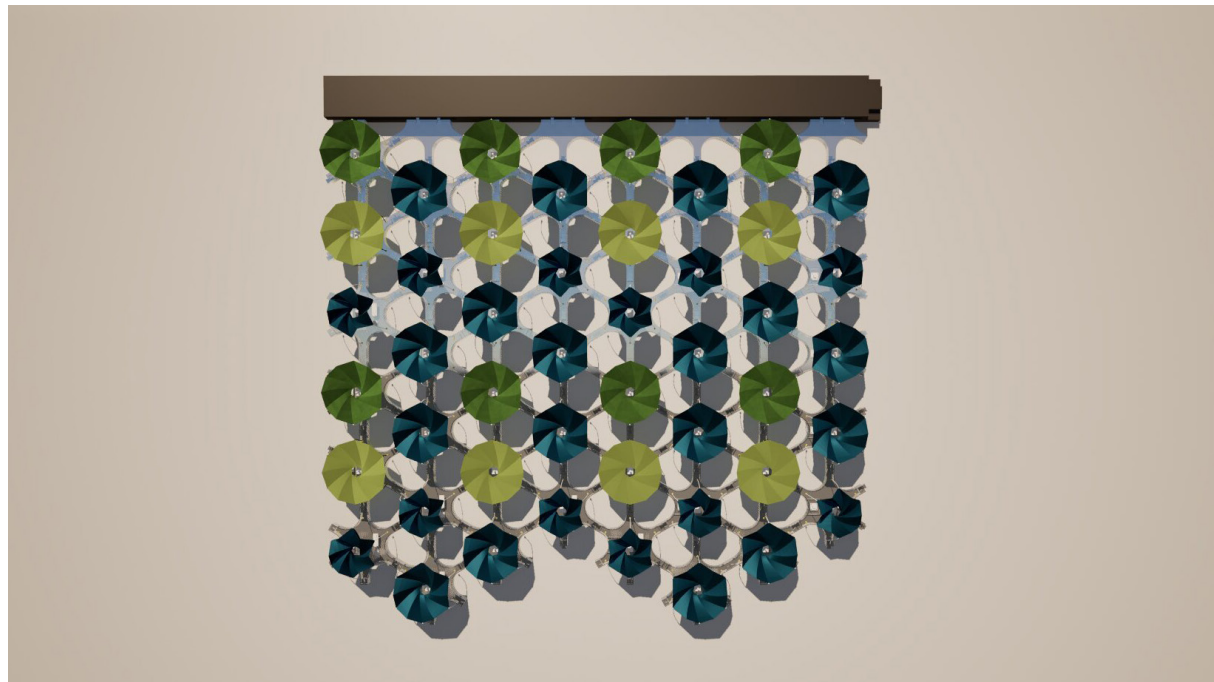








# Render del Progetto





# Scelta dei materiali

## Ingegnerizzazione Materica: Laminato Composito in Poliestere e TPU

La transizione di un Shape-Changing Ambient Display dalla fase concettuale alla prototipazione fisica richiede la risoluzione di sfide meccaniche complesse, prime fra tutte la resistenza alla fatica dei materiali (fatigue failure). I modelli origami in carta tradizionale o in cartoncino subiscono un rapido deterioramento lungo le linee di piegatura dopo poche centinaia di cicli operativi, rendendoli inadatti a un'installazione permanente in uno spazio di coworking.

Per ovviare a tale criticità ed evitare la complessità e l'alto consumo energetico dei materiali attivi a memoria di forma (SMA), il progetto adotta una soluzione strutturale passiva basata su un materiale composito laminato. Nello specifico, la struttura dell'origami è realizzata accoppiando uno strato rigido di Poliestere (PET/Poliethylene Tereftalato o tessuto poliestere ingegnerizzato) con uno strato elastomerico di TPU (Poliuretano Termoplastico). Questa scelta sfrutta la complementarità meccanica dei due polimeri per creare delle perfette flexure hinges (cerniere flessibili o "living hinges") ispirate ai principi della Soft Robotics:

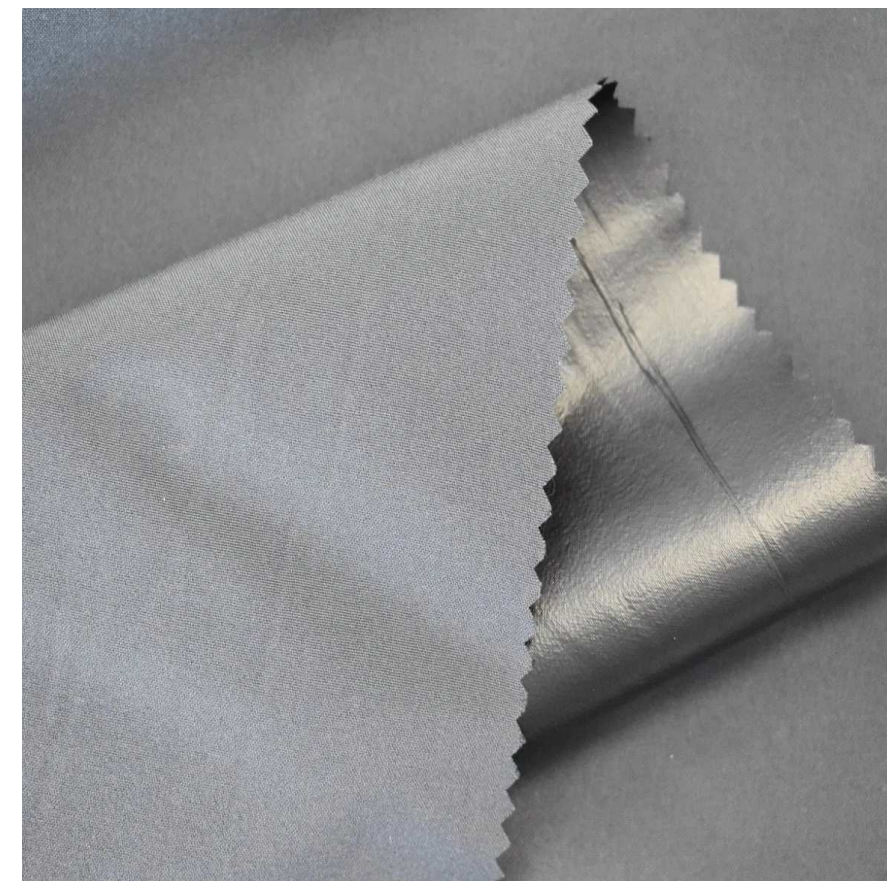
Lo strato in poliestere agisce come l'esoscheletro del display. Viene tagliato al laser in pannelli poligonali separati (corrispondenti alle facce piane del pattern origami). Questo materiale garantisce la rigidità planare necessaria affinché l'oggetto mantenga le sue geometrie precise nello spazio senza collassare sotto l'azione della gravità.

Il Poliuretano Termoplastico viene laminato a caldo o

incollato come strato continuo e sottile sopra i pannelli di poliestere. Negli spazi vuoti lasciati tra i pannelli rigidi (le linee di piegatura), il TPU rimane l'unico materiale presente. Data la sua altissima flessibilità, la sua natura elastomerica e la sua eccezionale resistenza allo strappo, il TPU agisce come una cerniera viva in grado di sopportare migliaia di cicli di flessione senza snervarsi o rompersi.

### Vantaggi per l'Interazione e l'Attuazione

Dal punto di vista della Human-Building Interaction, questa composizione materica offre due vantaggi fondamentali. In primo luogo, il TPU fornisce una naturale resistenza elastica: quando il sistema meccanico interno (es. tendini tirati da un piccolo servo-motore silenziato) rilascia la tensione, la memoria elastica del TPU aiuta l'origami a tornare spontaneamente e fluidamente alla sua posizione "aperta" di riposo, mimando in modo molto organico l'atto dell'espiazione.



### Progettazione della Scocca: Contenimento Elettronico e Attuazione Meccanica

Il polycarbonato trasparente costituisce un materiale polimerico di particolare interesse nell'ambito della progettazione di involucri tecnici, in quanto combina elevata trasparenza ottica, notevole resistenza meccanica e buona stabilità dimensionale in esercizio. Dal punto di vista chimico-fisico, esso appartiene alla famiglia dei tecnopolimeri termoplastici amorfi e si distingue per una struttura molecolare che consente di mantenere un significativo livello di trasmissione luminosa, generalmente compreso tra circa l'86% e il 92%, rendendolo idoneo per applicazioni in cui la leggibilità visiva del contenuto interno rappresenta un requisito progettuale rilevante. Tale caratteristica risulta particolarmente pertinente nel caso del modulo origami, nel quale la scocca non assolve esclusivamente una funzione protettiva, ma partecipa anche alla costruzione percettiva dell'oggetto, permettendo la visione del meccanismo, della geometria pieghevole e della relazione tra struttura interna e involucro esterno.

Sotto il profilo meccanico, il polycarbonato si contraddistingue per una resistenza all'urto estremamente elevata, spesso descritta in letteratura tecnica come largamente superiore a quella del vetro, fino a valori dell'ordine di 250 volte maggiori in specifiche condizioni comparative. Questa prestazione conferisce al materiale un comportamento particolarmente vantaggioso nella realizzazione di scocche sottili o alleggerite, poiché consente di contenere gli spessori senza compromettere in misura significativa la capacità dell'involucro di assorbire urti accidentali, sollecitazioni localizzate e fenomeni di danneggiamento fragile. In un sistema modulare destinato all'interazione e alla movimentazione, tale proprietà assume un valore strategico, in quanto riduce la vulnerabilità del componente e incrementa l'affidabilità complessiva del prodotto nel ciclo d'uso. A ciò si aggiunge una massa volumica contenuta, pari a circa  $1,2 \text{ g/cm}^3$ , che contribuisce al mantenimento di un peso ridotto dell'insieme e favorisce una progetta-

zione più efficiente sotto il profilo ergonomico e costruttivo.

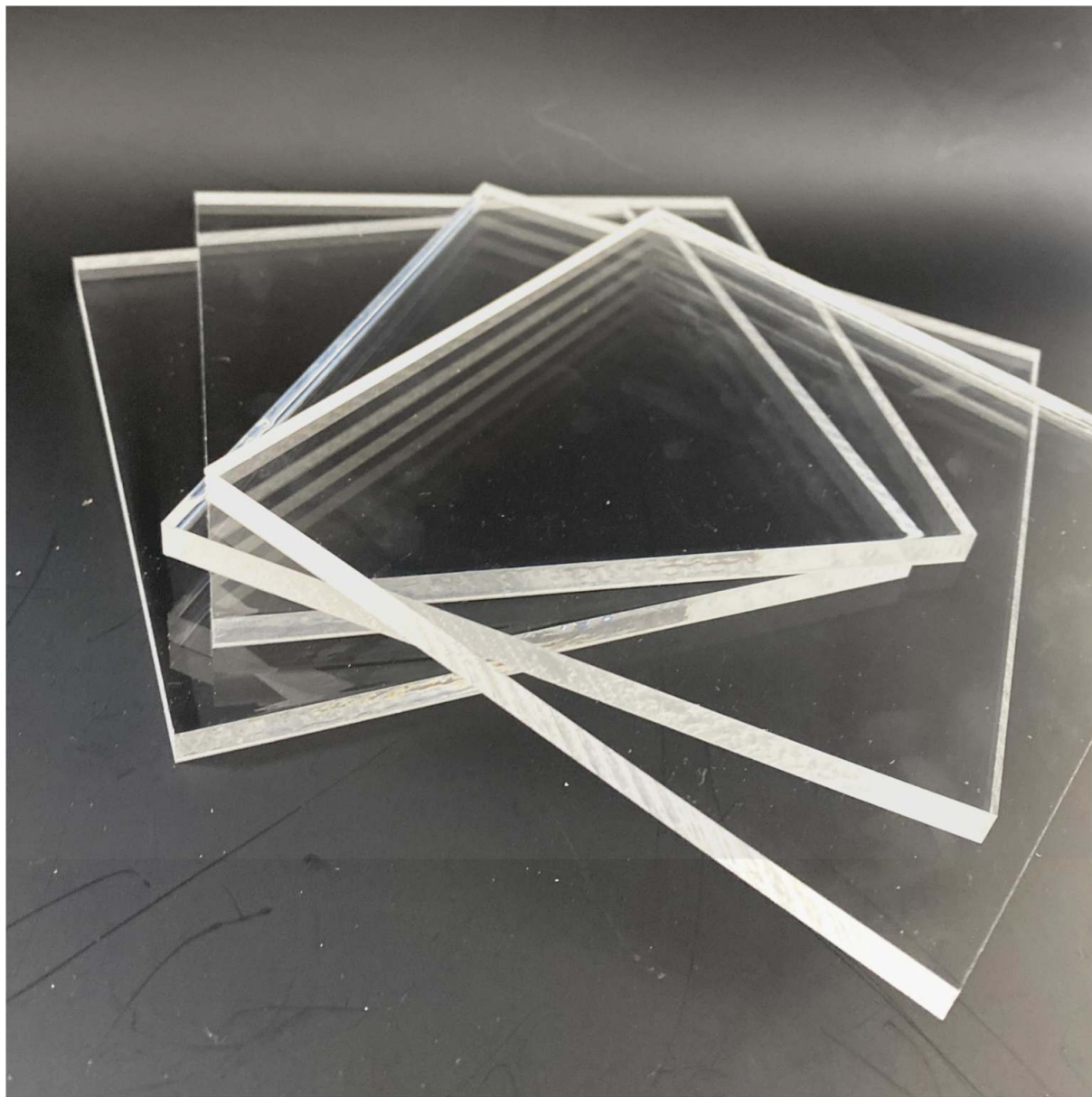
Dal punto di vista termo-meccanico, il polycarbonato trasparente presenta una buona stabilità in un ampio intervallo di temperatura, indicato da fonti tecniche tra circa  $-40^\circ\text{C}$  e  $+135^\circ\text{C}$ , mantenendo in tale range proprietà funzionali adeguate e limitando il rischio di deformazioni indesiderate durante l'impiego. Questa caratteristica è particolarmente rilevante nei prodotti che integrano componenti elettronici, sistemi di illuminazione o elementi soggetti a riscaldamento locale, poiché la scocca deve garantire non soltanto protezione fisica, ma anche continuità prestazionale nel tempo. Parallelamente, il materiale presenta una buona resistenza all'umidità e all'acqua, aspetto che ne rafforza l'idoneità quale interfaccia protettiva verso l'ambiente esterno e ne amplia le possibilità applicative in contesti d'uso diversificati. La combinazione di inerzia relativa nei confronti degli agenti ambientali, stabilità morfologica e trasparenza rende quindi il polycarbonato un candidato coerente per la realizzazione di involucri che debbano coniugare valenza espressiva e prestazione tecnica.

Un ulteriore elemento di interesse riguarda la lavorabilità del materiale, che consente processi di sagomatura e trasformazione utili alla definizione di geometrie complesse e di componenti con requisiti sia strutturali sia formali. In termini progettuali, ciò significa poter sviluppare una scocca capace di accogliere vincoli dimensionali, sistemi di assemblaggio e dettagli funzionali senza rinunciare alla qualità estetica della superficie e alla continuità visiva dell'involucro. Rispetto ad altri polimeri trasparenti, come il PMMA, il polycarbonato offre una maggiore resistenza all'impatto e una migliore attitudine all'impiego in parti soggette a sollecitazioni, pur presentando una resistenza superficiale al graffio generalmente inferiore in assenza di specifici trattamenti. Ne deriva che la sua selezione risulta particolarmente appropriata quando la priorità progettuale non è soltanto l'elevata trasparenza, ma la capacità di integrare sicurezza, durabilità, leggerezza e prestazioni meccaniche all'interno di un unico materiale.

In conclusione, l'adozione del polycarbonato trasparente per la scocca del modulo origami può essere motivata sulla base di una serie di parametri oggettivi: elevata



trasmissione della luce, resistenza agli urti, contenuta densità, stabilità termica e buona idoneità alla trasformazione industriale. Tali proprietà ne fanno un materiale tecnologicamente avanzato e progettualmente coerente con un dispositivo in cui protezione, leggibilità del funzionamento interno e qualità percettiva della forma devono coesistere in modo integrato.



### **Lega polimerica di Policarbonato e Acrilonitrile-Butadiene-Stirene con grado di autoestinguenza UL94 V-0.**

Per la realizzazione della scocca del modulo di alimentazione è stata selezionata la lega polimerica PC/ABS in formulazione ritardata di fiamma con classificazione UL94 V-0, in quanto idonea a soddisfare simultaneamente requisiti di sicurezza elettrica, resistenza meccanica e stabilità termo-dimensionale. Tale materiale risulta particolarmente appropriato per applicazioni elettroniche, poiché combina le proprietà del policarbonato, quali elevata resistenza all'urto e buona tenuta termica, con la processabilità e la tenacità dell'ABS, permettendo la realizzazione di involucri tecnici affidabili e qualitativamente controllati.

Nel caso specifico del modulo in esame, la scocca è chiamata non soltanto a contenere l'alimentazione e il microcontrollore, ma anche a svolgere una funzione strutturale, sostenendo i moduli collegati inferiormente e assorbendo le sollecitazioni indotte dal peso e dall'uso continuativo.

La presenza della classificazione UL94 V-0 assume in questo contesto un valore determinante, poiché garantisce un comportamento autoestinguente del materiale e quindi un più elevato livello di sicurezza in presenza di possibili surriscaldamenti o anomalie del circuito.

Parallelamente, le proprietà meccaniche del blend consentono di progettare elementi di irrigidimento, sedi di fissaggio e connessioni integrate senza compromettere la robustezza complessiva del componente. Il PC/ABS si distingue infine anche per la buona qualità superficiale e per la possibilità di ottenere finiture opache o satinata, caratteristiche che ne rafforzano l'idoneità non solo sul piano tecnico, ma anche sotto il profilo formale e percettivo del prodotto.

*Dettaglio della finitura superficiale ottenibile su componenti in PC/ABS. La capacità del materiale di replicare fedelmente le micro-texture dello stampo permette di ottenere superfici tecniche opache, capaci di valorizzare il prodotto sotto il profilo estetico e di mascherare eventuali segni di usura o difetti di ritiro superficiale.*





# 05 I Dati Soggettivi



### **Metodologie di Indagine per la Valutazione del Comfort Ambientale**

La misurazione dell'Indoor Environmental Quality (IEQ) all'interno degli spazi di lavoro moderni richiede un approccio strutturato che integri i dati oggettivi dei sensori con la percezione soggettiva degli occupanti. Questo processo rientra nel framework della Post Occupancy Evaluation (POE), definibile come la valutazione sistematica delle performance e dell'efficacia di un edificio una volta che questo è stato abitato dai suoi utenti.

Storicamente, la POE si è rivelata uno strumento diagnostico fondamentale per identificare criticità invisibili, come il decadimento della qualità dell'aria (Indoor Air Quality) e le relative conseguenze sul benessere psico-fisico e sulla produttività del personale, spesso associate alla Sick Building Syndrome. Affinché la valutazione del comfort legato alle concentrazioni di CO<sub>2</sub> sia accurata, l'indagine deve catturare la risposta umana nel suo contesto reale di utilizzo, ponendo le basi per l'integrazione di strumenti di raccolta dati fisici e cognitivi.



### **Approccio Trasversale e Longitudinale nella POE**

Nella progettazione dei questionari di valutazione post-occupazionale, la scelta del dominio temporale determina la natura dei dati raccolti e la validità delle correlazioni deducibili. Un approccio di tipo trasversale (cross-sectional) prevede la raccolta dei feedback soggettivi in un singolo e specifico momento temporale, fornendo una fotografia istantanea delle percezioni di un intero campione di utenti. Pur essendo di rapida esecuzione e a basso carico cognitivo per l'utente, questo metodo non consente di tracciare l'evoluzione del comfort nel tempo né di stabilire solide relazioni di causa ed effetto.

Al contrario, un'indagine longitudinale si basa su misurazioni ripetute sugli stessi soggetti lungo un periodo prolungato (giorni o settimane), permettendo di mappare dinamicamente l'insorgenza della percezione di "aria viziata" in parallelo all'effettivo accumulo di anidride carbonica monitorato dai sensori. Nel contesto di questa ricerca, l'adozione di micro-questionari longitudinali a fine turno (exit survey) risulta l'approccio più idoneo per quantificare l'esaurimento cognitivo cumulativo causato dalla scarsa IAQ.

### **Embodied Cognition e Transizione verso Interfacce Tangibili**

Per superare i limiti di engagement tipici dei questionari grafici o cartacei ripetuti nel tempo, la presente ricerca propone di traslare la raccolta dati dalla dimensione astratta a quella fisica, avvalendosi della Tangible User Interface (TUI). Le TUI permettono agli utenti di interagire con le informazioni digitali manipolando direttamente oggetti nello spazio fisico, sfruttando la naturale destrezza e propriocezione dell'essere umano.

Questo paradigma si fonda sui principi della \*Embodied Cognition\*, la quale postula che i processi cognitivi non siano mere operazioni mentali astratte, ma siano profondamente radicati nelle interazioni sensomotorie del corpo con l'ambiente circostante. Tradurre la valutazione della qualità dell'aria in un'azione fisica permette di allineare l'esperienza sensoriale del discomfort ambientale con l'affordance dell'interfaccia. In questo modo, la POE si evolve da un formale compito di compilazione a un atto tangibile e immediato di consapevolezza corporea.

# Questionario Trasversale

## Questionario trasversale sullo stato psico-fisico dell'utente in un ambiente d'ufficio cowork

Rilevare, in un singolo momento di osservazione, la frequenza dei sintomi fisici e cognitivi riferiti dagli occupanti durante la permanenza nell'ambiente di lavoro, con particolare attenzione agli effetti soggettivi associati a condizioni di accumulo di CO2 e alla sintomatologia compatibile con la Sick Building Syndrome.

\* Indica una domanda obbligatoria

1.

In media, per quante ore continuative permane alla sua postazione prima di uscire dall'ambiente o effettuare una pausa in un altro spazio?

Contrassegna solo un ovale.

☐ Meno di 2 ore

☐ Tra le 2 e le 4 ore

☐ Tra le 4 e le 6 ore

☐ Più di 6 ore
2.

In quale fascia della giornata lavorativa percepisce generalmente il maggiore calo di energia mentale?

Contrassegna solo un ovale.

☐ Metà mattinata

☐ Subito dopo la pausa pranzo

☐ Tardo pomeriggio

☐ Non rilevo un calo evidente

3.

Con quale frequenza trascorre l'intera giornata lavorativa nello stesso ambiente chiuso?

Contrassegna solo un ovale.

☐ Mai

☐ Raramente

☐ Talvolta

☐ Spesso

☐ Sempre
4.

Sensazione di testa pesante o lieve mal di testa. (su una scala da 1 a 5) \*

Contrassegna solo un ovale.

12345

Mai☐☐☐☐☐ Molto spesso
5.

Affaticamento o bruciore agli occhi. (da 1 a 5)

Contrassegna solo un ovale.

12345

Mai☐☐☐☐☐ Spesso
6.

Secchezza o irritazione della gola. \*

Contrassegna solo un ovale.

12345

Mai☐☐☐☐☐ Spesso



7. Sensazione di sonnolenza durante il lavoro.

Contrassegna solo un ovale.

12345

Mai☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Spesso

8. Sensazione di stanchezza fisica non spiegabile esclusivamente dal carico di lavoro. \*

Contrassegna solo un ovale.

12345

Mai☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Spesso

9. Fatico a mantenere l'attenzione su un compito per periodi prolungati. \*

Contrassegna solo un ovale.

12345

Mai☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Spesso

10. Commetto più facilmente errori di distrazione nelle ultime ore di lavoro \*

Contrassegna solo un ovale.

12345

Mai☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Spesso

11. Avverto il bisogno di interrompere l'attività per recuperare concentrazione o energia. \*

Contrassegna solo un ovale.

12345

Mai☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Spesso

12. Nel complesso, quanto ritiene che l'ambiente di lavoro influisca sul suo stato di benessere fisico e cognitivo a fine giornata? \*

Contrassegna solo un ovale.

12345

Per☐ ☐ ☐ ☐ ☐ In modo decisivo

# Questionario Longitudinale

## Questionario longitudinale sullo stato psico-fisico dell'utente a fine turno

Monitorare nel tempo lo stato corporeo e cognitivo dell'utente in relazione alla permanenza quotidiana nell'ambiente di lavoro, al fine di confrontare le risposte soggettive con i dati ambientali rilevati dai sensori di CO2.

\* Indica una domanda obbligatoria

1. In questo momento, come valuta il suo livello di energia mentale? \*

Contrassegna solo un ovale.

1 2 3 4 5

Molto ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Molto buono

2. In questo momento, quanto avverte sonnolenza o difficoltà a rimanere mentalmente attivo/a? \*

Contrassegna solo un ovale.

1 2 3 4 5

Per ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ In modo estremo

3. In questo momento, quanto avverte una sensazione di testa pesante o lieve mal di testa? \*

Contrassegna solo un ovale.

1 2 3 4 5

Per ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ In modo estremo

4. Quanto avverte fastidio agli occhi, come bruciore, secchezza o affaticamento? \*

Contrassegna solo un ovale.

1 2 3 4 5

Per ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ In modo estremo

5. Quanto avverte fastidio alla gola o sensazione di secchezza? \*

Contrassegna solo un ovale.

1 2 3 4 5

Poco ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ In modo estremo

6. Quanto le risulta difficile mantenere la concentrazione? \*

Contrassegna solo un ovale.

1 2 3 4 5

Per ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ In modo estremo



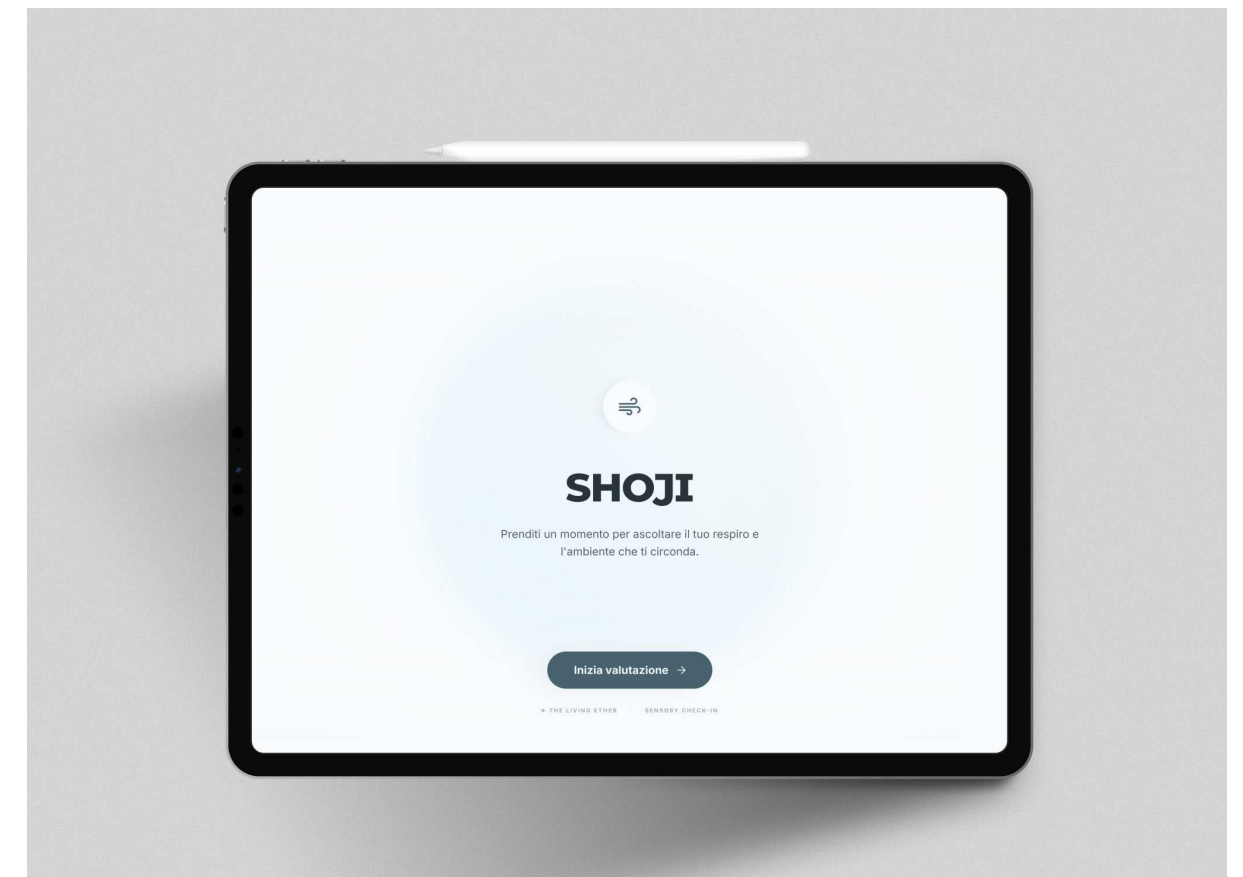
Al fine di validare l'efficacia del sistema progettato, sono stati sviluppati i mockup dell'applicazione mobile dedicata all'interazione con i moduli origami.

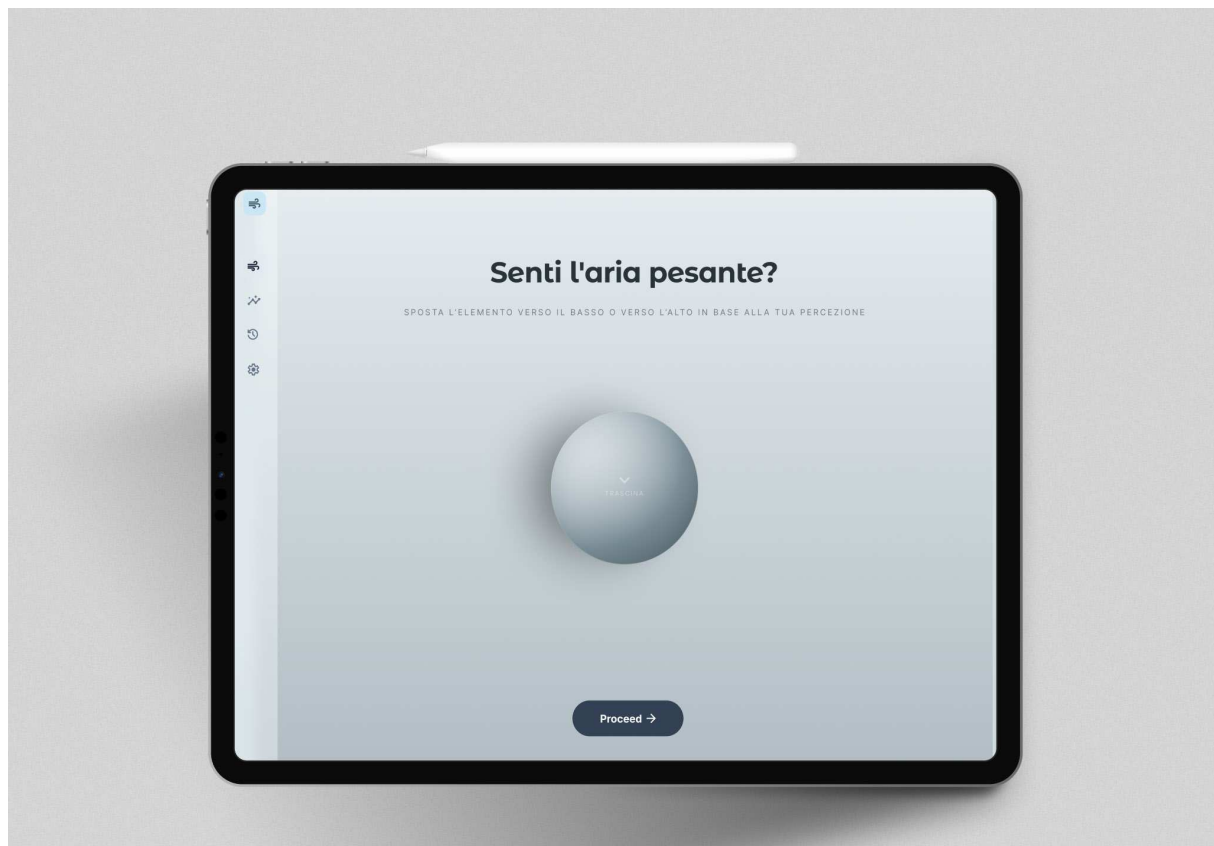
La progettazione dell'interfaccia nasce dalla necessità di superare i limiti intrinseci dei questionari tradizionali, spesso percepiti come onerosi in termini di carico cognitivo, specialmente al termine di una giornata lavorativa.

Sfruttando i principi dell'Embodied Cognition, l'interfaccia mira a tradurre la raccolta del dato soggettivo (il benessere o il discomfort percepito) in azioni fisiche, intuitive e spaziali. Invece di richiedere all'utente la compilazione di form testuali o scale numeriche astratte, il sistema propone interazioni tangibili con i moduli stessi, che fungono da interfaccia fisica (Tangible User Interface).

Il gesto, la manipolazione e l'esplorazione spaziale dell'oggetto diventano quindi il veicolo diretto per l'espressione dello stato psico-fisico, minimizzando lo sforzo attentivo e favorendo una valutazione ambientale più spontanea, immediata e integrata nella routine quotidiana.

Nei successivi elaborati grafici vengono illustrati i mockup che rappresentano parte dell'interazione.









# Bibliografia

1. Designing for situation awareness. An approach to user centered design. - Mica R. Endsley, Betty Boltè, and Debra G. Jones | Taylor & Francis Group
2. Pensieri lenti e veloci. Daniel Kahneman. | Mondadori
3. Futures by Design. | Tommaso Corà. Lucilla Fazio. Filippo Collura.
4. Kamrani, A., & Nasr, E. (2006). Rapid Prototyping: Theory and Practice. Springer Science & Business Media.
5. Fenomenologia della percezione. Studi Bompiani. Maurice Merleau-Ponty. 2003.
6. [https://reader.1lib.sk/read/258a5a81e3a0d17123f446c17c71d844cbf8d6e-4d5a158093f740d051652931c/23390332/c945e8/fast-company-innovation-by-design-creative-ideas-that-transform-the-way-we-live-and-work.html?client\\_key=1fFLi67gBrNRP1j1iPy1&extension=epub&signature=-322767d50bb446e3dff3132d606a96f22f68c82685131bf612b1a73bcdebde94&-download\\_location=https%3A%2F%2F1lib.sk%2Fdl%2F23390332%2F62c9c4](https://reader.1lib.sk/read/258a5a81e3a0d17123f446c17c71d844cbf8d6e-4d5a158093f740d051652931c/23390332/c945e8/fast-company-innovation-by-design-creative-ideas-that-transform-the-way-we-live-and-work.html?client_key=1fFLi67gBrNRP1j1iPy1&extension=epub&signature=-322767d50bb446e3dff3132d606a96f22f68c82685131bf612b1a73bcdebde94&-download_location=https%3A%2F%2F1lib.sk%2Fdl%2F23390332%2F62c9c4)
7. Allen, J. G., & Macomber, J. D. (2020). Healthy Buildings: How Indoor Spaces Drive Performance and Productivity. Harvard University Press.
8. Nagel, S. K., et al. (2005). Beyond sensory substitution—learning the sixth sense. Journal of Neural Engineering. (Teoria dell'aumento sensoriale).
9. Hallnäs, L., & Redström, J. (2001). Slow Technology – Designing for Reflection. Personal and Ubiquitous Computing.
10. Jansen, Y., et al. (2015). Opportunities and Challenges for Data Physicalization. CHI 2015.
11. Picard, R. W. (1997). Affective Computing. MIT Press. (Testo fondante sul legame tra computer ed emozioni/stati fisiologici).
12. William J. Fisk. 2000. HEALTH AND PRODUCTIVITY GAINS FROM BETTER INDOOR ENVIRONMENTS AND THEIR RELATIONSHIP WITH BUILDING ENERGY EFFICIENCY. Annual Review Environment and Resources. 25:537-566. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.537>
13. Anne Steinemann, Pawel Wargocki, Behzad Rismanchi, Ten questions concerning green buildings and indoor air quality, Building and Environment, Volume 112, 2017



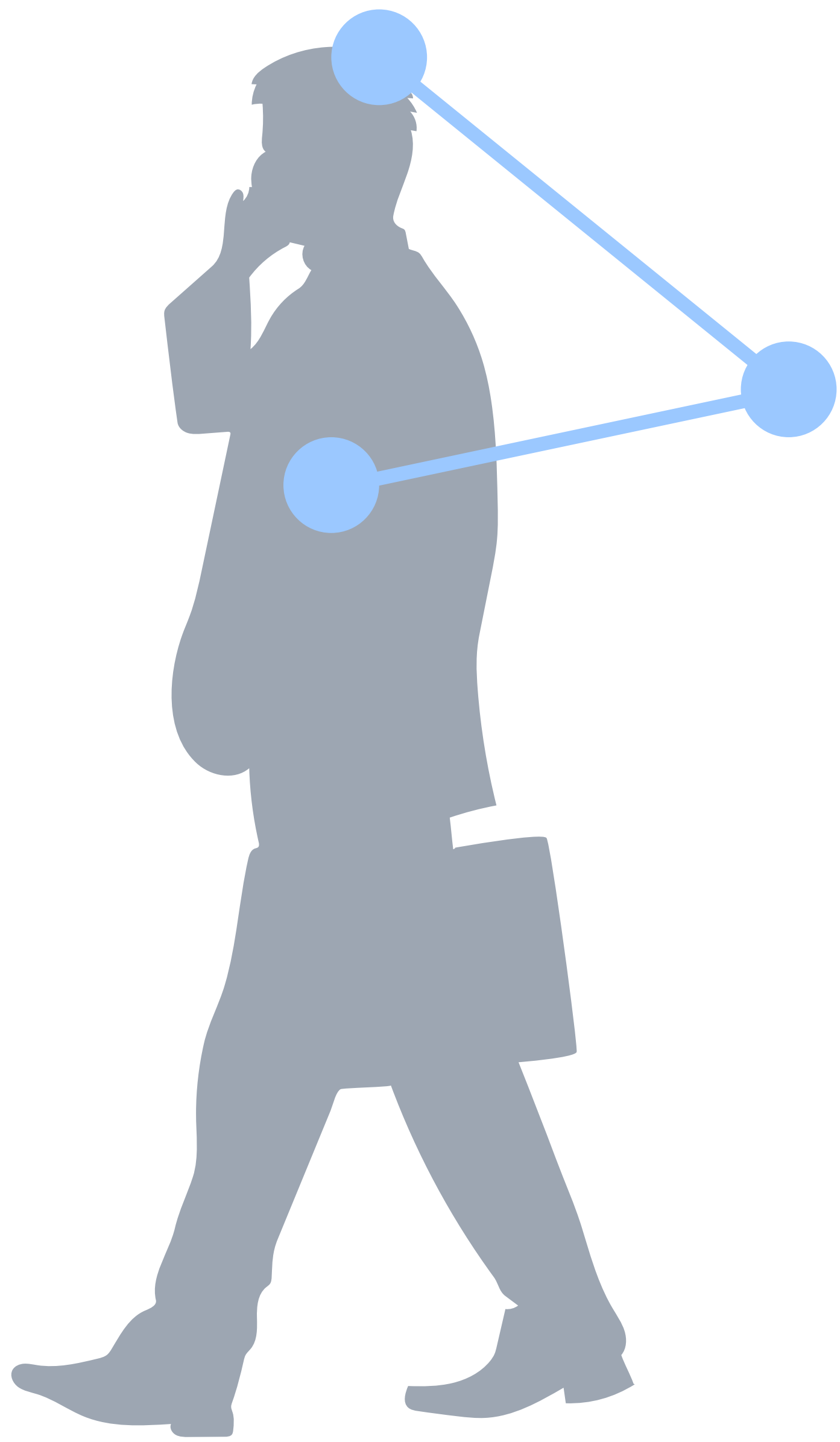
# Sitografia

1. International Journal of Design Vol. 8 No. 2 2014 - Exploring 'Immaterials': Mediating Design's Invisible Materials ↗ <https://www.ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/viewFile/1408/618>
2. Manifest the Invisible: Design for Situational Awareness of Physical Environments in Virtual Reality ↗ <https://arxiv.org/pdf/1809.05837>
3. Unobtrusive interaction: a systematic literature review and expertsurvey ↗ <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/07370024.2022.2162404?needAccess=true>
4. <https://fullclarity.co.uk/>
5. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3290607.3299003>
6. [https://materialdesign.it/media/formato2/allegati\\_5780.pdf](https://materialdesign.it/media/formato2/allegati_5780.pdf)
7. <https://www.salute.gov.it/new/>

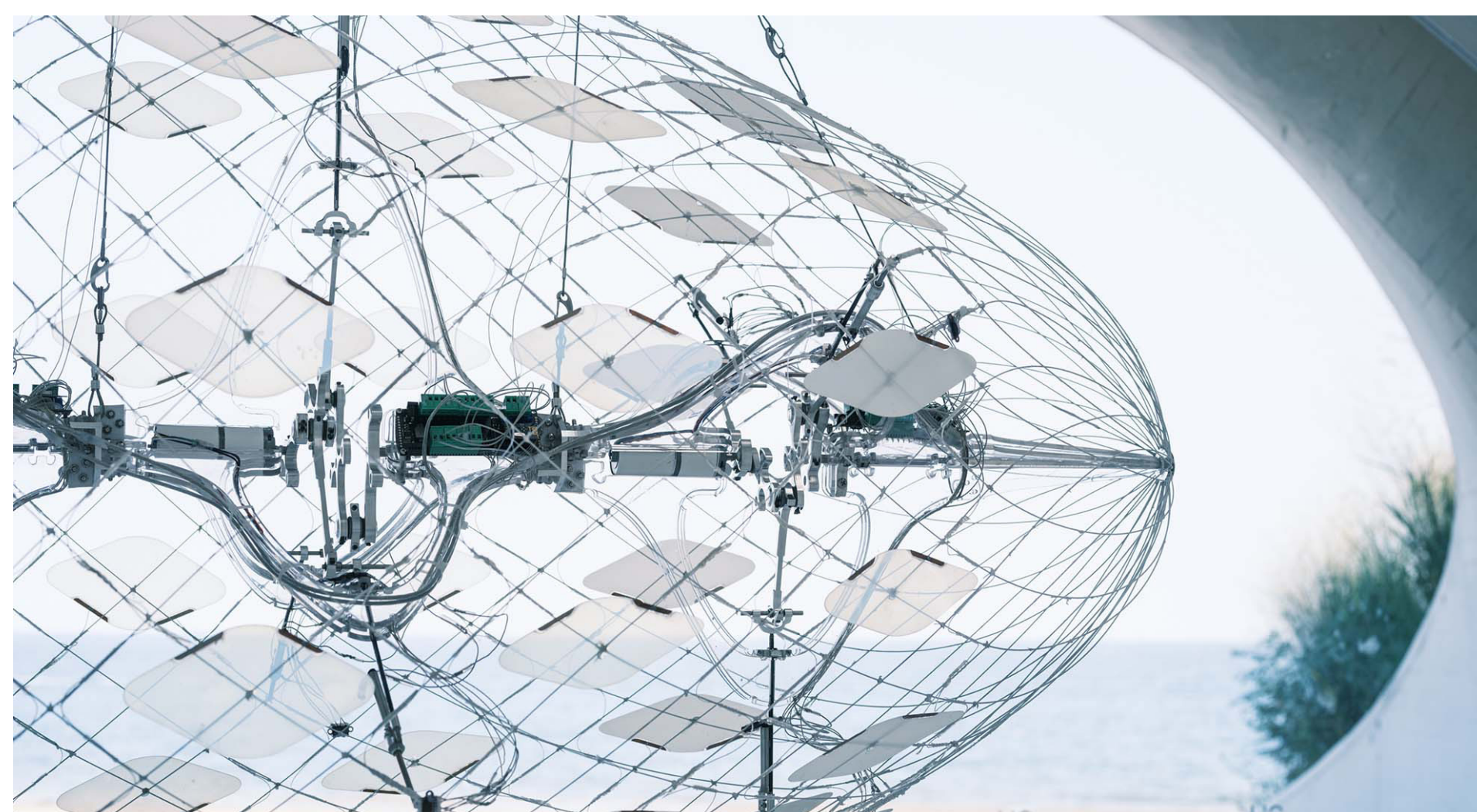




# 1 Fase di ricerca

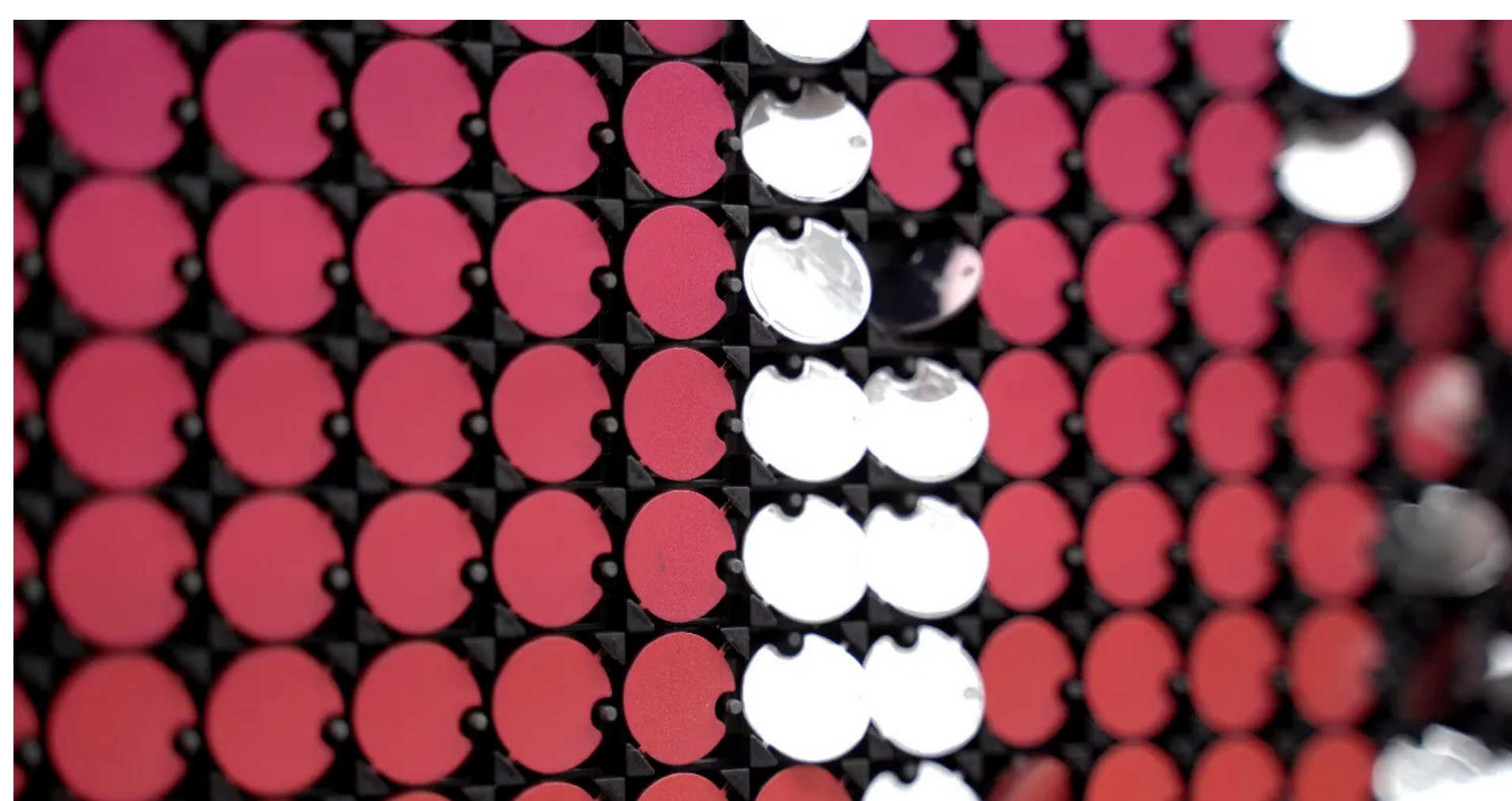


## Casi studio: Installazioni Cinetiche



### Cloud Atlas

di Zilun Nie, Yao Meng, Chun Song, Fengqi Li, Xiaolei Hu



### World Skies

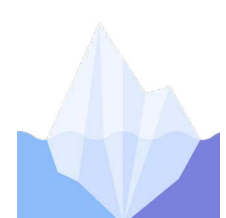
Breakfast



### Institute du Monde Arabe

Jean Nouvelle

## Evento Sensibile



Latente



Impercettibile



Nascosto

## Comfort Ambientale



Sick Building syndrome



Effetti della CO2



S A A D

Scuola di Ateneo

Architettura e Design "Eduardo Vittoria"  
Università di Camerino

CdLM in Design per l'Innovazione Digitale

**Laureanda:** Sara Montrone

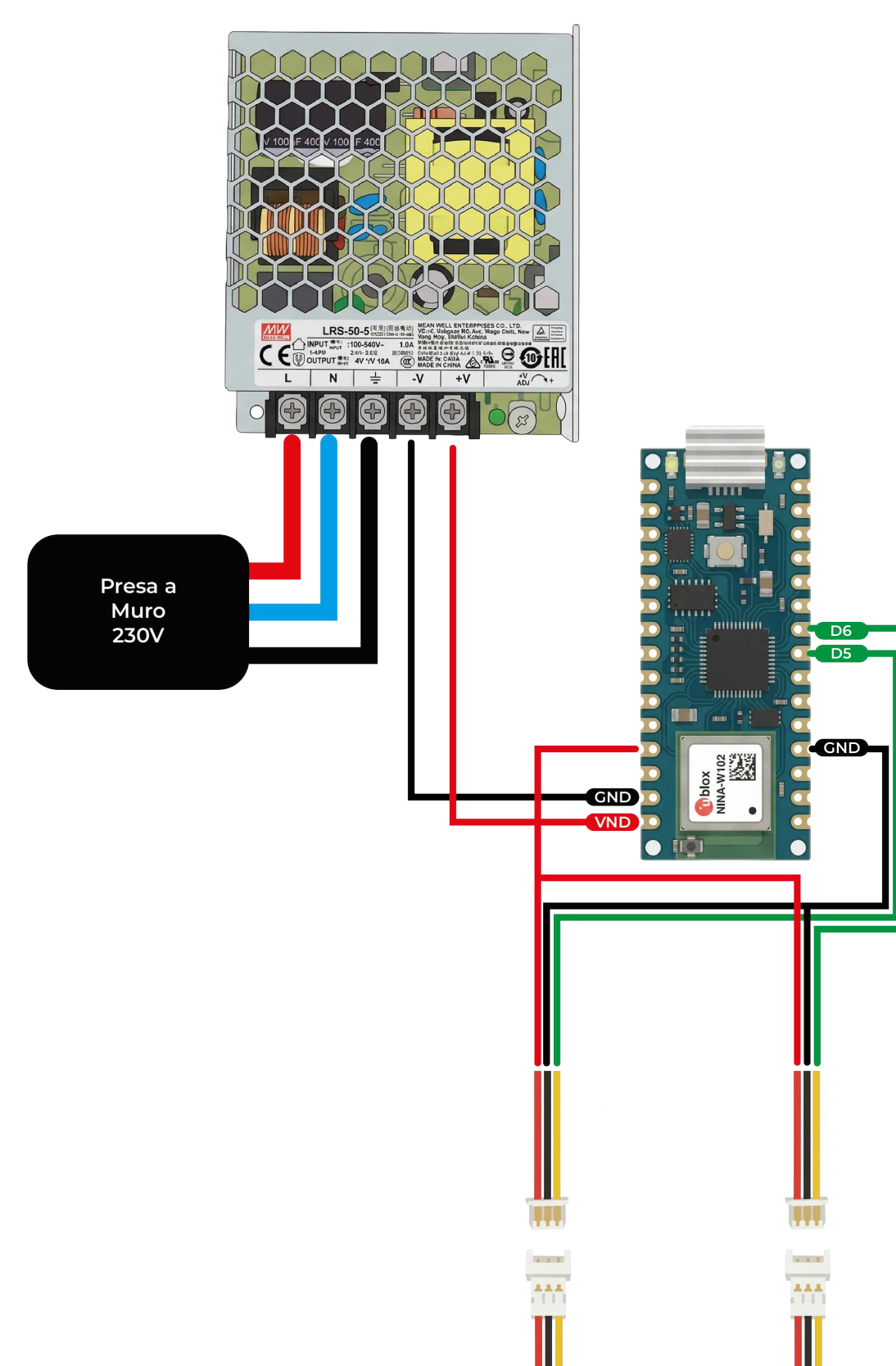
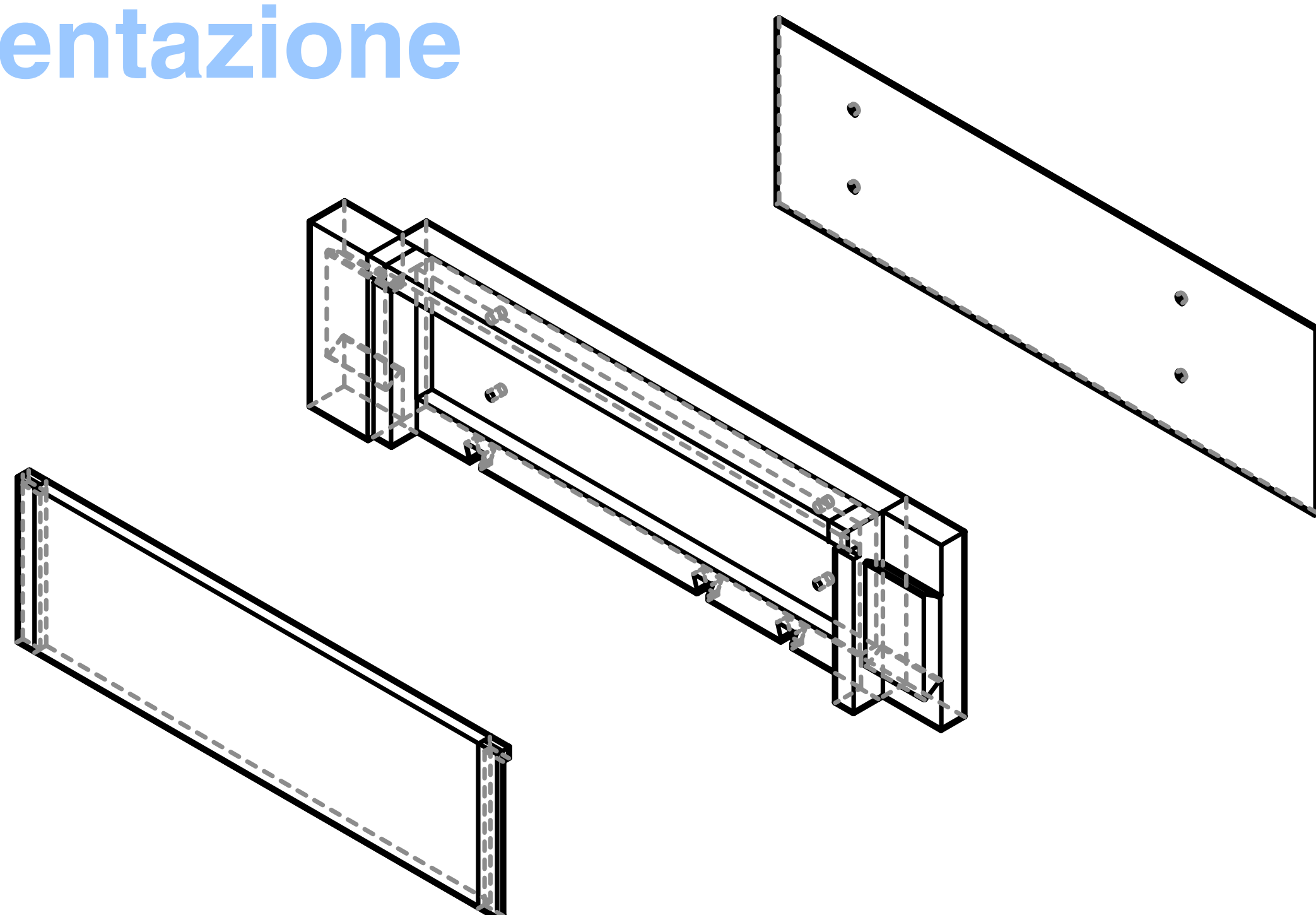
**Relatore:** Prof. Arch. Luca Bradini

**Titolo della tesi:** Shoji: Migliorare la consapevolezza agli eventi sensibili.



# 2 Fase di Progettazione

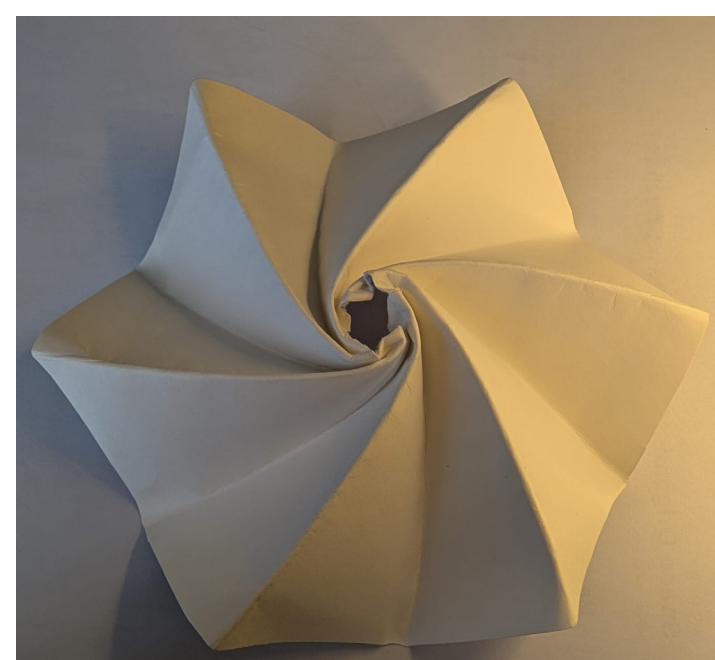
## Modulo di Alimentazione



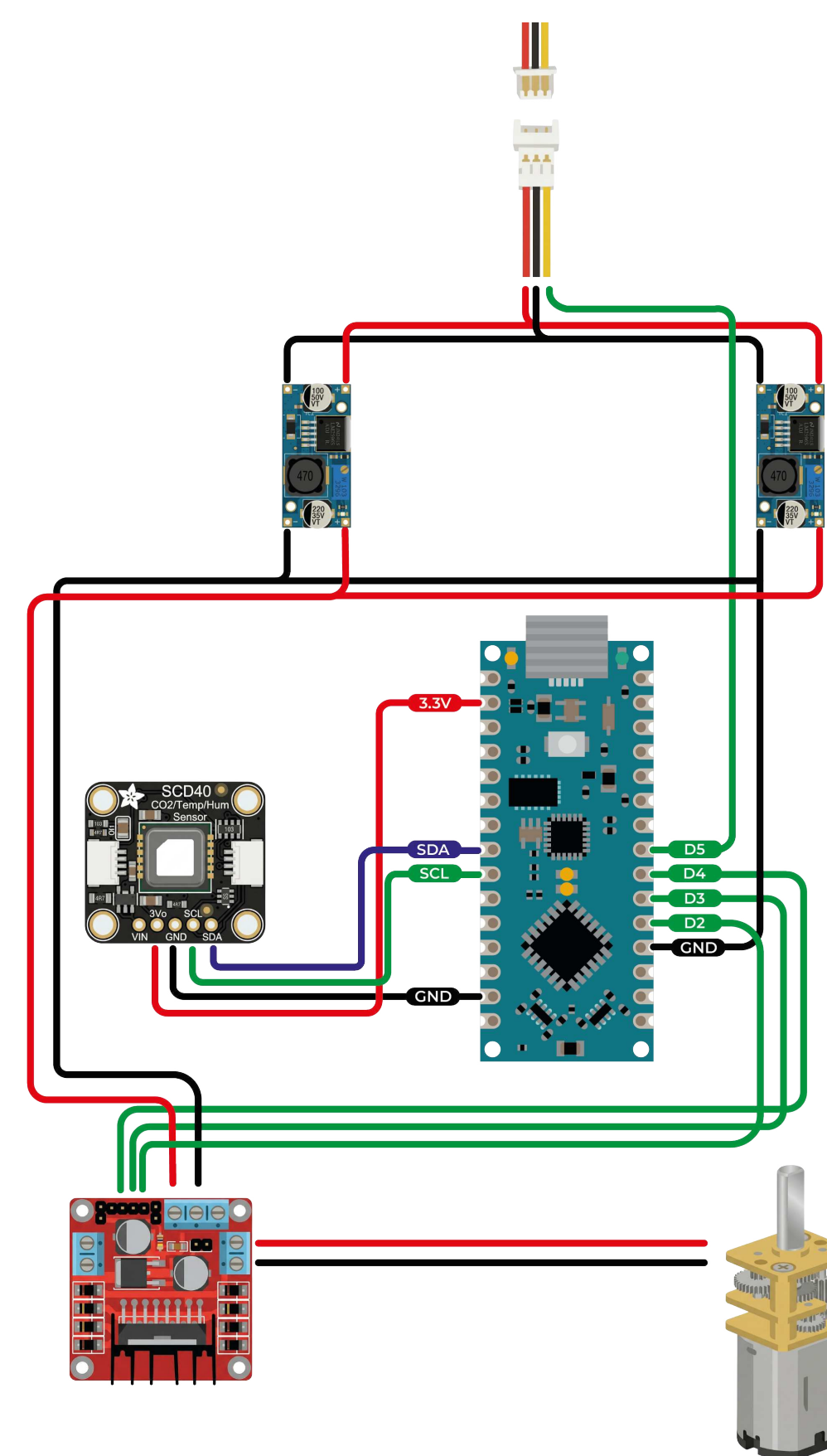
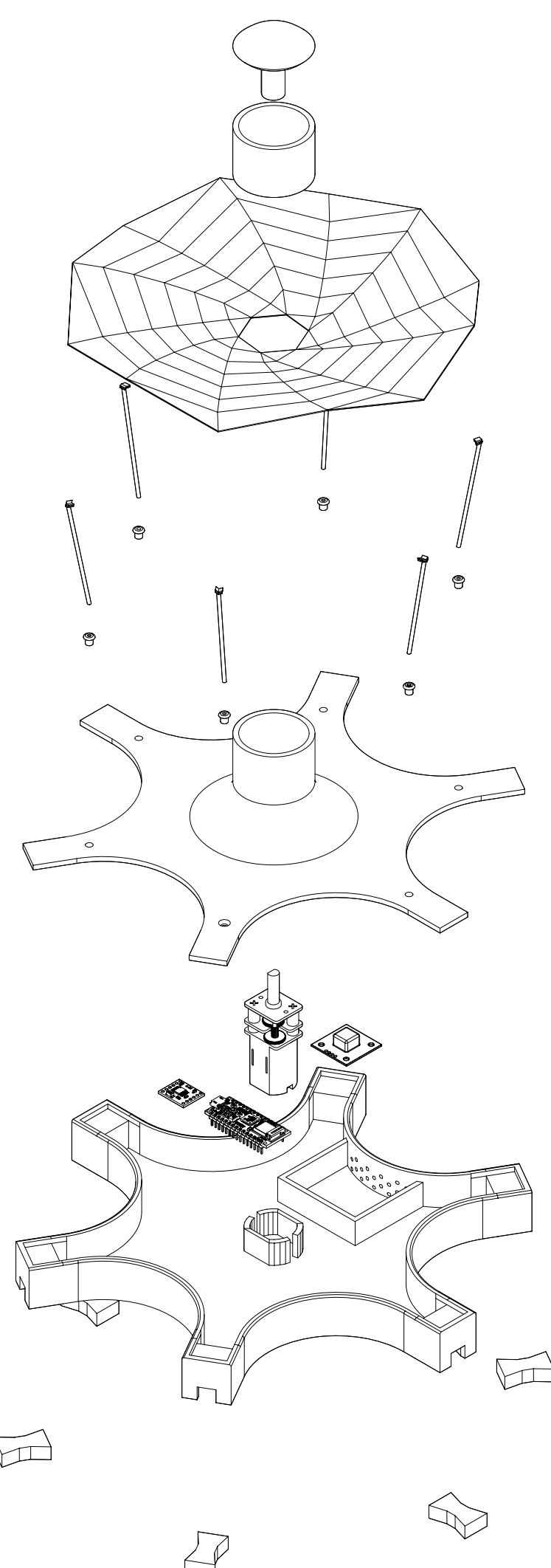
## Modulo di Comunicazione



**Fase 1**  
**Chiusura**  
**Completa**



**Fase 2**  
**Apertura**  
**Completa**



*Prove Pratiche sulla geometria dell'origami per comprendere le dinamiche di azionamento*

*Schematico di funzionamento di entrambi i moduli: Alimentazione & Comunicazione*



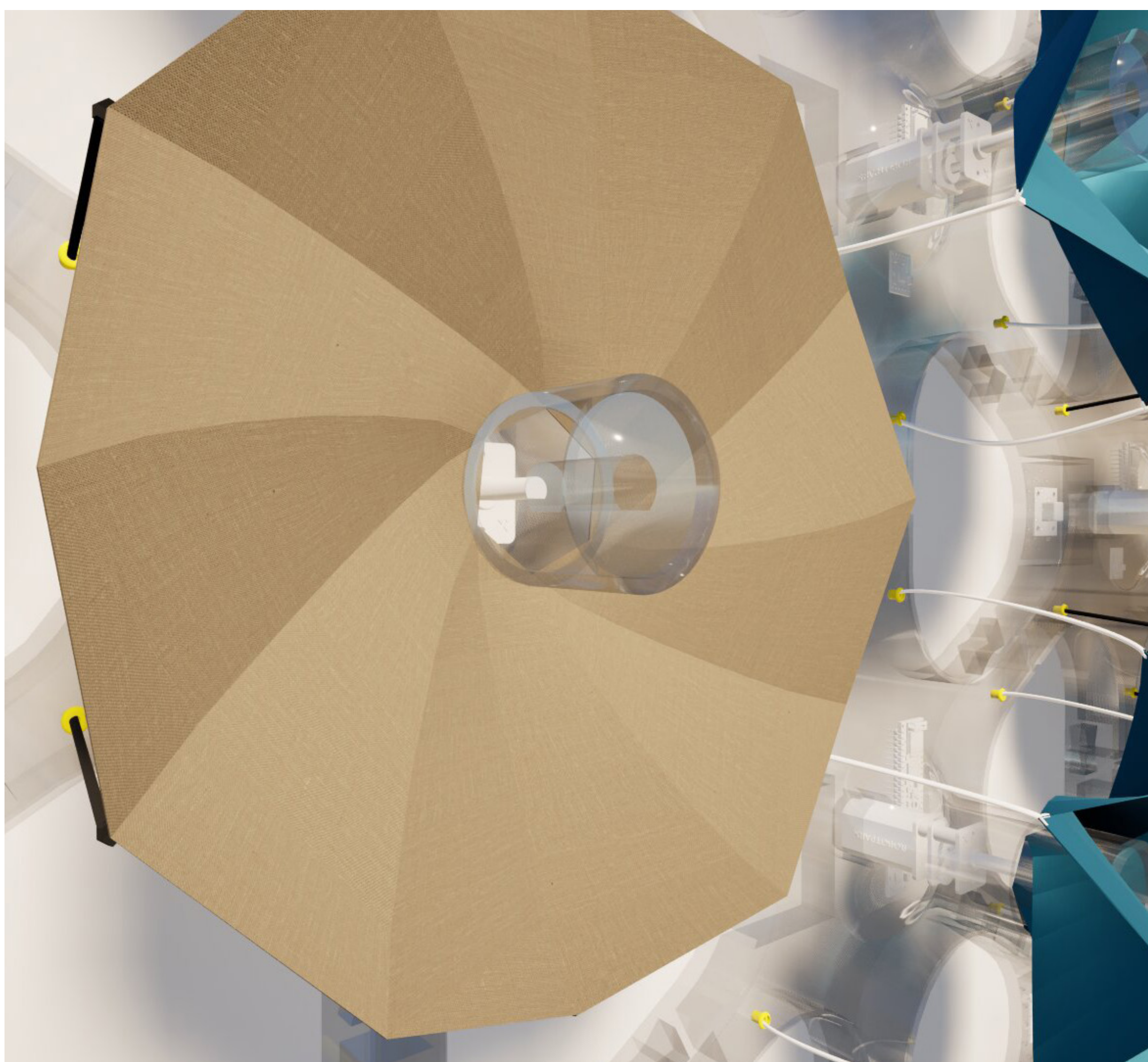
SAAD

Scuola di Ateneo  
**Architettura e Design "Eduardo Vittoria"**  
Università di Camerino

CdLM in Design per l'Innovazione Digitale  
**Laureanda:** Sara Montrone  
**Relatore:** Prof. Arch. Luca Bradini  
**Titolo della tesi:** Shoji: Migliorare la consapevolezza agli eventi sensibili.

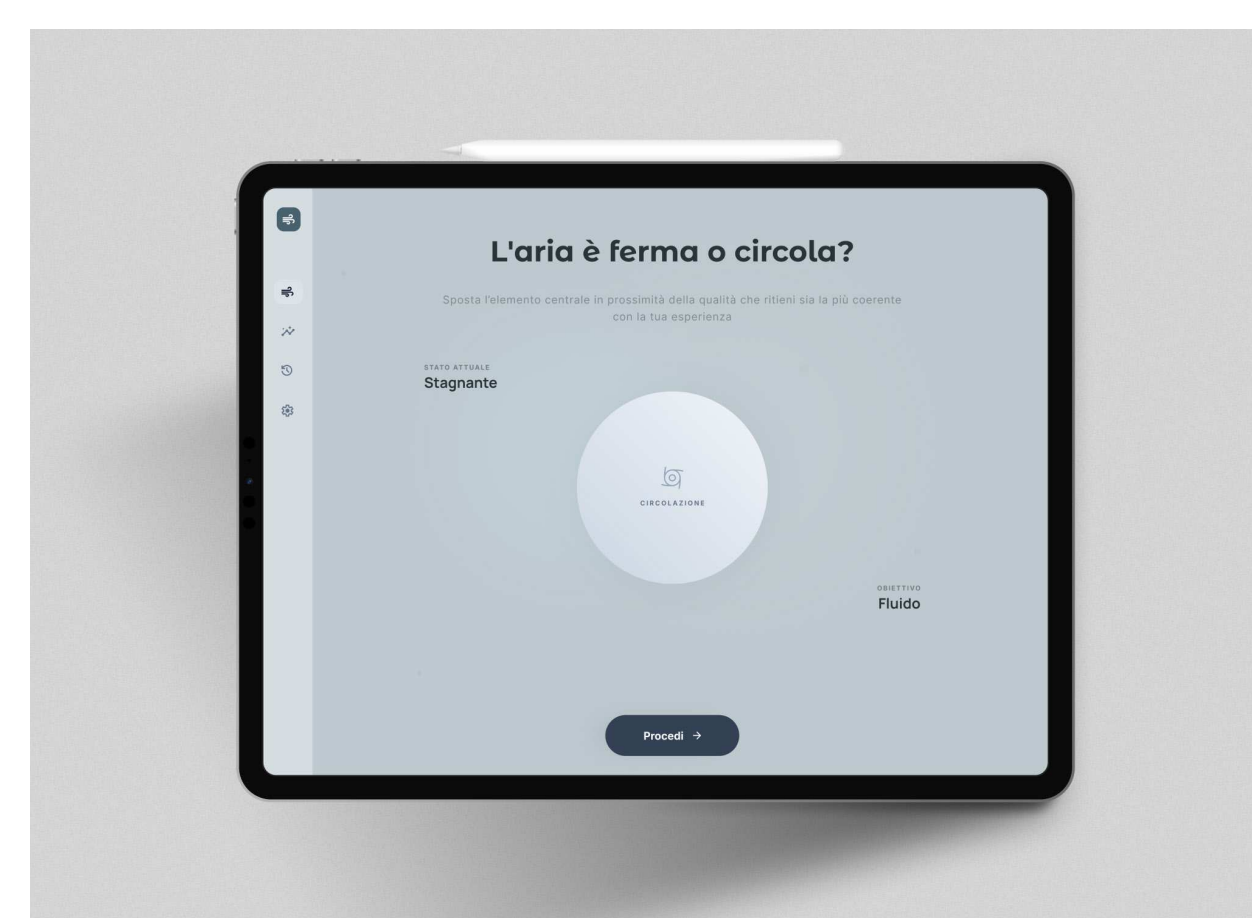
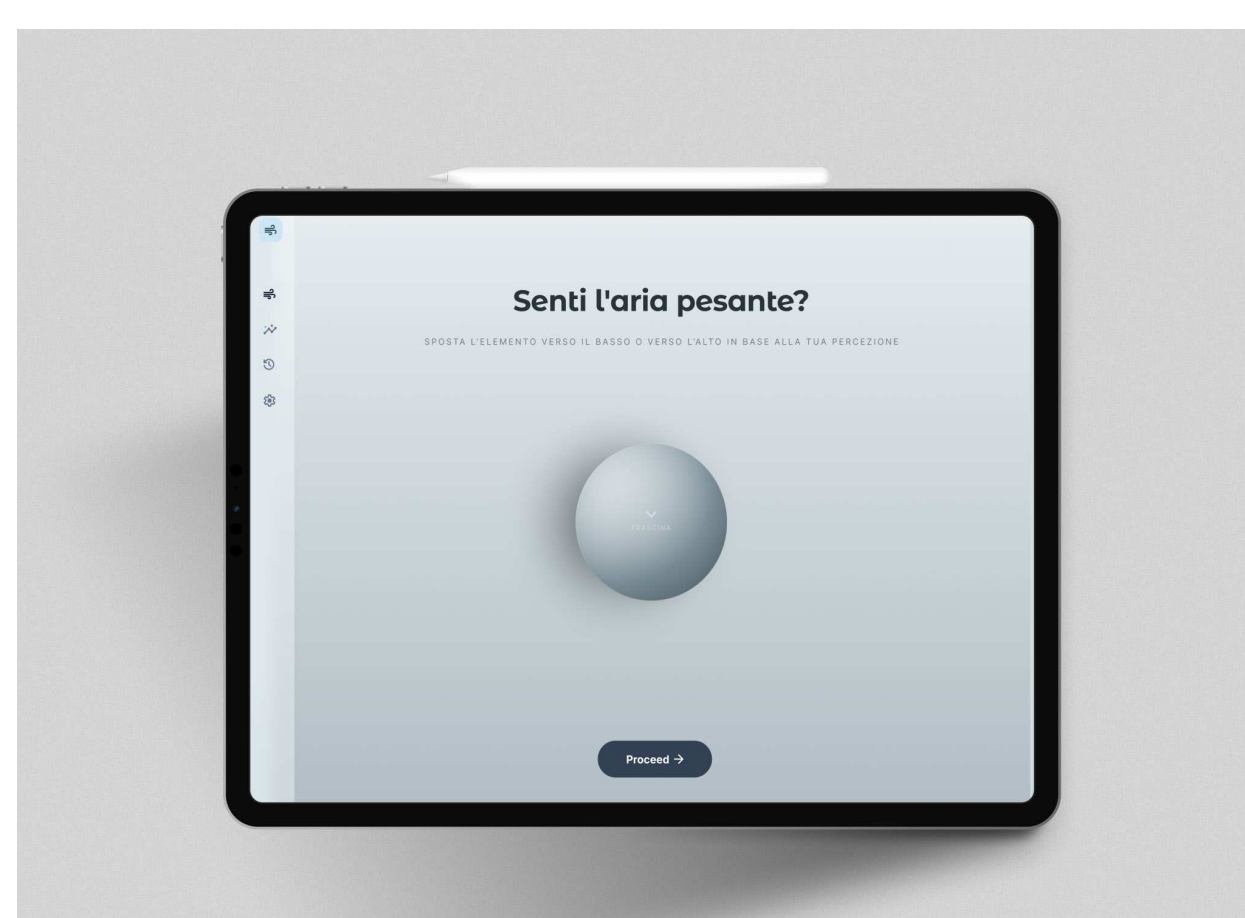


# 3 Interazione

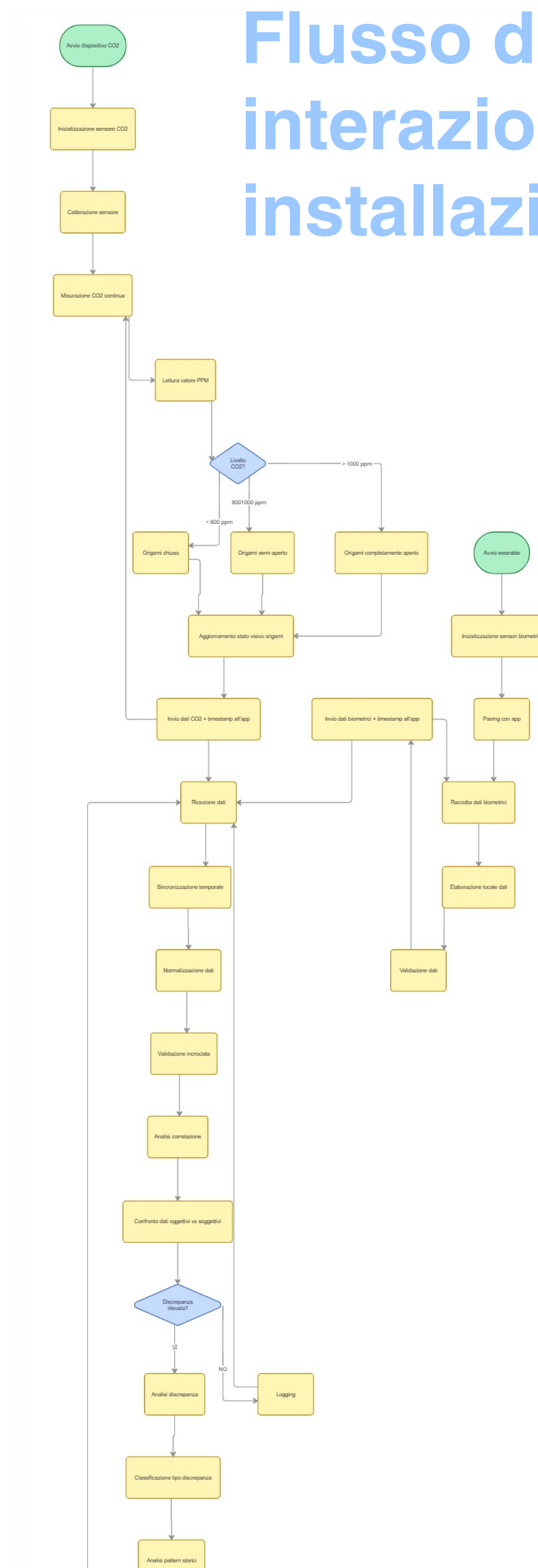


## Mockup: Questionario

*Sostituzione del classico questionario attraverso un flusso di interazione realizzato attraverso un'app, sfruttando il principio della Embodied Cognition*



## Flusso di interazione: installazione



*Realizzato con Figma*



S A A D

Scuola di Ateneo

Architettura e Design "Eduardo Vittoria"  
Università di Camerino

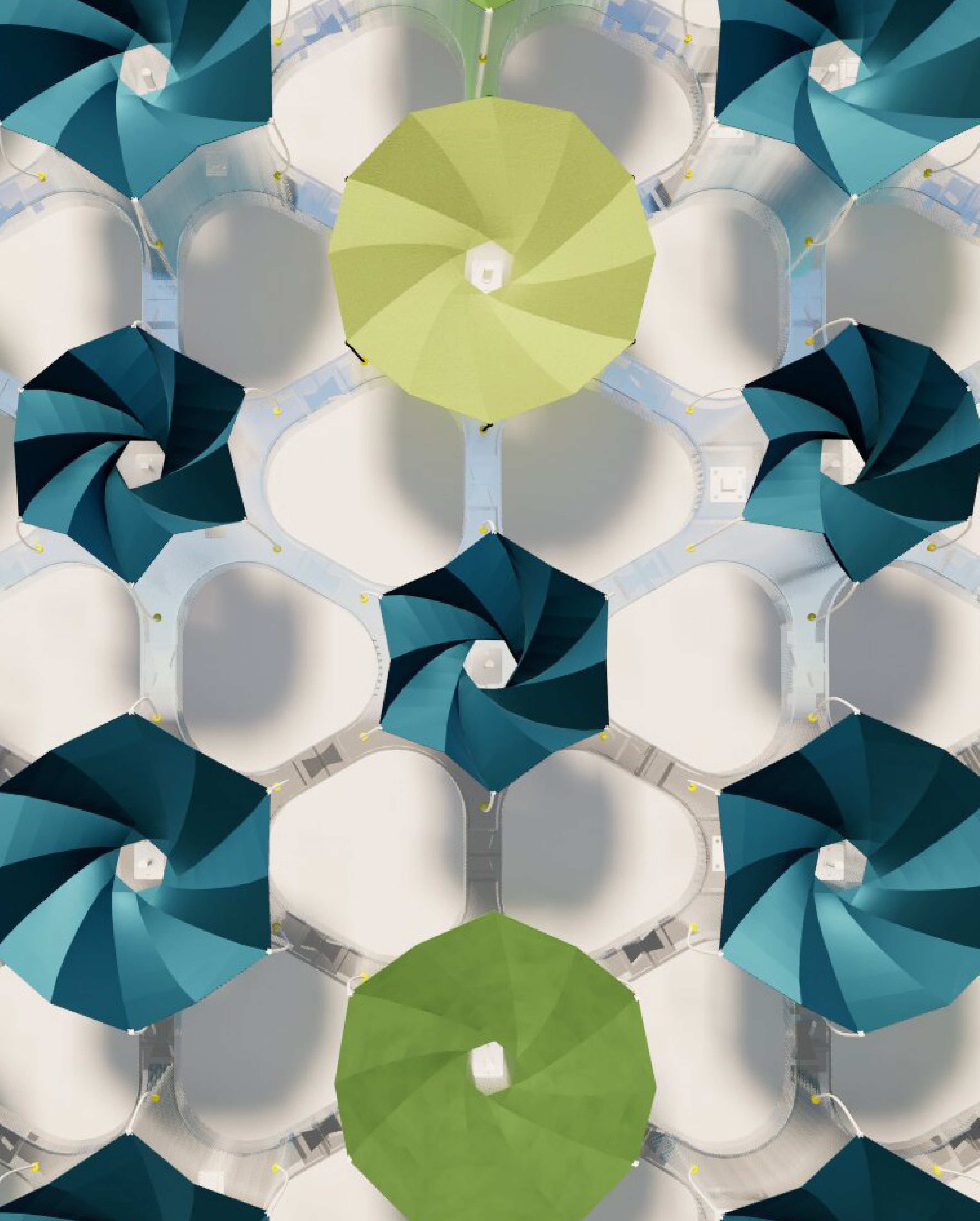
CdLM in Design per l'Innovazione Digitale

**Laureanda:** Sara Montrone

**Relatore:** Prof. Arch. Luca Bradini

**Titolo della tesi:** Shoji: Migliorare la consapevolezza agli eventi sensibili.





S A A D

Scuola di Ateneo  
**Architettura e Design "Eduardo Vittoria"**  
Università di Camerino

CdLM in Design per l'Innovazione Digitale  
**Laureanda:** Sara Montrone  
**Relatore:** Prof. Arch. Luca Bradini  
**Titolo della tesi:** Shoji: Migliorare la consapevolezza agli eventi sensibili.