

## I PICCOLI BOX NELLA RUOTA GIGANTESCA

Expo Dubai 2020 è ormai nel pieno del suo svolgimento e l'afflusso di visitatori, come prevedibile, è fortissimo, sospinto dalle numerose attrazioni e dal fatto che è la prima volta che Expo si svolge in un paese arabo. Ma oltre che dall'abbondanza di quanto è stato allestito per l'occasione, chi giungerà a Dubai sarà certamente impressionato dalla grande ruota panoramica Ain Dubai, che è stata messa in funzione contestualmente all'Expo nel quartiere Jumeirah Beach, il 21 Ottobre 2021.



Figura 1  
*La grande ruota panoramica di Dubai (<https://www.aindubai.com/en/>)*

Qualche numero: 250 metri è il diametro (quasi il doppio del London Eye), 192 le connessioni con il pignone (2.400 km di cavi), 9.000 tonnellate il peso totale; circa 40 minuti è la durata del giro, 1750 il numero massimo di passeggeri, 48 sono le cabine panoramiche climatizzate, da circa 30 m<sup>2</sup> (40 passeggeri), di cui alcune, riservate e allestite per spazi sociali, eventi o banchetti.

Ogni cabina, che gira sul proprio asse orizzontale in sincronia con il movimento della ruota, è dotata, all'esterno, di alcuni box, solidali alla ruota stessa mediante un'apposita piastra, che contengono le apparecchiature elettroniche per il comando e il controllo di tutti gli apparati interni alla cabina: rotazione motorizzata, climatizzazione e ventilazione, sistema audio-video, comunicazione e allarme. In simili casi, per il raffreddamento di quadri elettrici o apparecchiature elettroniche in condizioni estreme, si ricorre spesso ad elementi refrigeranti ad effetto Peltier, che hanno il pregio di essere completamente statici e quindi con ridottissime probabilità di guasto; per contro possono essere notevolmente ingombranti e hanno efficienza molto bassa, specie nelle condizioni operative di cui si tratta.

Per i quarantotto box destinati alle apparecchiature della rete dati ci è stato richiesto di valutare la possibilità di controllare la temperatura al loro interno in modo passivo, mediante solo scambio termico diretto con l'ambiente, per differenza di temperatura, senza dispositivi attivi di raffreddamento.



*Figura 2*  
*Sotto la cabina sono visibili le unità contenenti le apparecchiature elettroniche*  
*(<https://whatson.ae/2021/08/sneak-peek-take-a-look-inside-ain-dubais-premium-cabins/>)*

La potenza termica massima prodotta all'interno di ciascun box dalle apparecchiature elettroniche al suo interno è limitata, pari a 45 W, ma se non viene correttamente smaltita all'esterno il surriscaldamento è inevitabile. I vincoli erano molteplici: i box sono ermeticamente chiusi, per evitare l'ingresso di sabbia, con grado di protezione IP 65, e non consentono quindi la ventilazione diretta mediante aria esterna.

È quindi necessario valutare gli effetti dello scambio termico in sequenza per smaltire il carico termico generato: tra i dispositivi elettronici e l'aria interna, tra questa e la superficie interna del box e, trascurando la resistenza termica del sottile spessore di lamiera, tra la superficie esterna e l'ambiente circostante.

Le condizioni di riferimento sono basate sulle caratteristiche del clima di Dubai: temperatura dell'aria esterna pari a 50 °C e irraggiamento solare pari a 1000 W/m<sup>2</sup>; la temperatura dell'aria all'interno dei box deve comunque essere inferiore a 63 °C.

Le dimensioni del box sono vincolate dallo spazio massimo disponibile, pari a 80 cm x 80 cm x 30 cm. Il box in realtà, nel corso della rotazione in parte è colpito dalla radiazione solare, in parte è ombreggiato dalla stessa cabina, ma la situazione più cautelativa corrisponde ad una piena esposizione solare con ruota ferma nella posizione più sfavorevole rispetto ai raggi solari. A questa situazione, in regime stazionario data la modestissima capacità termica del box, si è fatto dunque riferimento nello studio.

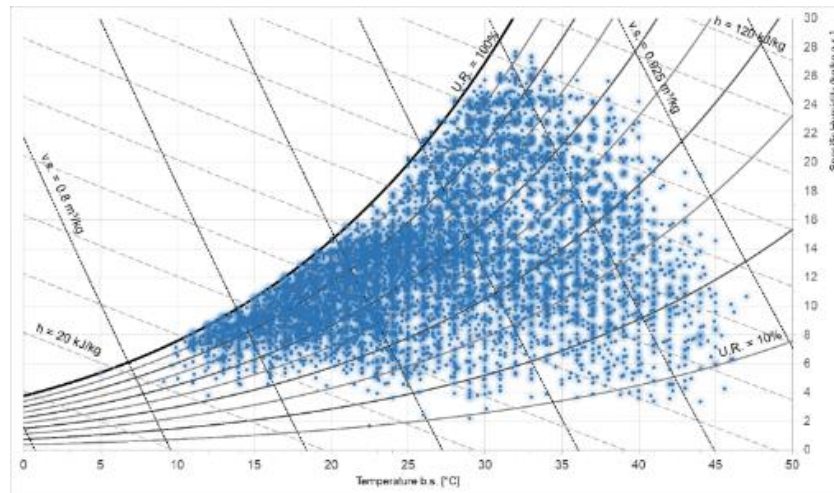


Figura 3  
Impronta climatica di Dubai

Il primo passo è stato quello di valutare sperimentalmente le condizioni di scambio termico tra gli apparati elettronici e l'aria che li lambisce e tra l'aria stessa e la superficie interna del box: la geometria complessa degli apparati e la forma del box rendevano praticamente impossibile l'applicazione, per quanto approssimata, delle complesse correlazioni di scambio termico per convezione naturale che governano questo tipo di fenomeni. È stato pertanto allestito un prototipo, attrezzato con alcune resistenze termiche che simulavano gli apparati e dotato di numerose sonde di temperatura. Dai rilievi di temperatura e con l'ausilio di riprese termografiche è stato così possibile ricavare un valore del coefficiente di convezione medio interno.

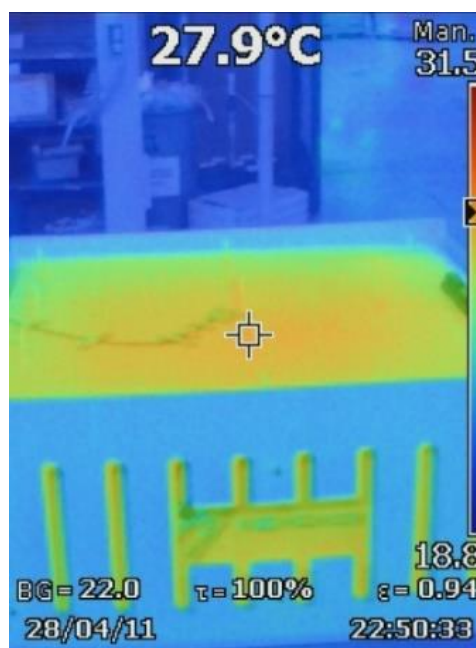


Figura 4  
Immagine termografica di un box nel laboratorio

Il problema dell'ottimizzazione del sistema è stato quindi affrontato mediante una opportuna modellizzazione matematica facendo ricorso a due diverse metodologie.

La prima metodologia consiste in un modello a parametri concentrati, basato sull'analogia elettrica. In questo modo di procedere si rappresenta il sistema considerato mediante un numero discreto di elementi significativi e si individuano i parametri dei quali si vuole conoscere il valore: nella fattispecie si tratta delle temperature (considerate uniformi) dei diversi elementi e della temperatura dell'aria interna. Si identificano le relazioni tra tali parametri collegandoli virtualmente mediante una rete equivalente che, nell'ipotesi specifica di regime stazionario, è una rete puramente resistiva costituita dalle resistenze termiche di convezione e radiazione, creando così un circuito analogico in cui i nodi identificano i punti di valutazione delle temperature. Vengono quindi istituiti bilanci energetici relativi ai diversi nodi, tenendo conto anche degli scambi con l'esterno (radiazione termica, convezione con l'aria esterna) e della potenza elettrica dissipata all'interno del box, ottenendo un sistema di equazioni algebriche lineari (poiché il ridotto campo di escursione delle grandezze in gioco consente di linearizzare i fenomeni), in cui le incognite sono i valori delle temperature, che una volta risolto, mediante la tecnica di inversione di matrice, porge una visione complessiva delle condizioni di equilibrio alle quali il sistema si porta nelle ipotesi assunte.

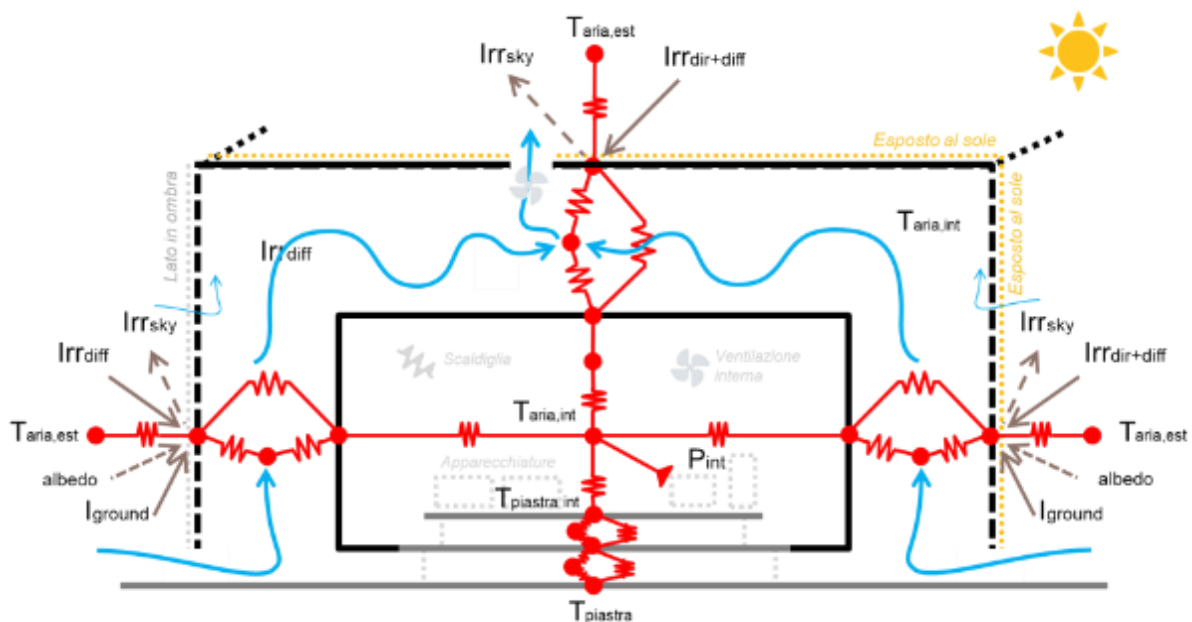
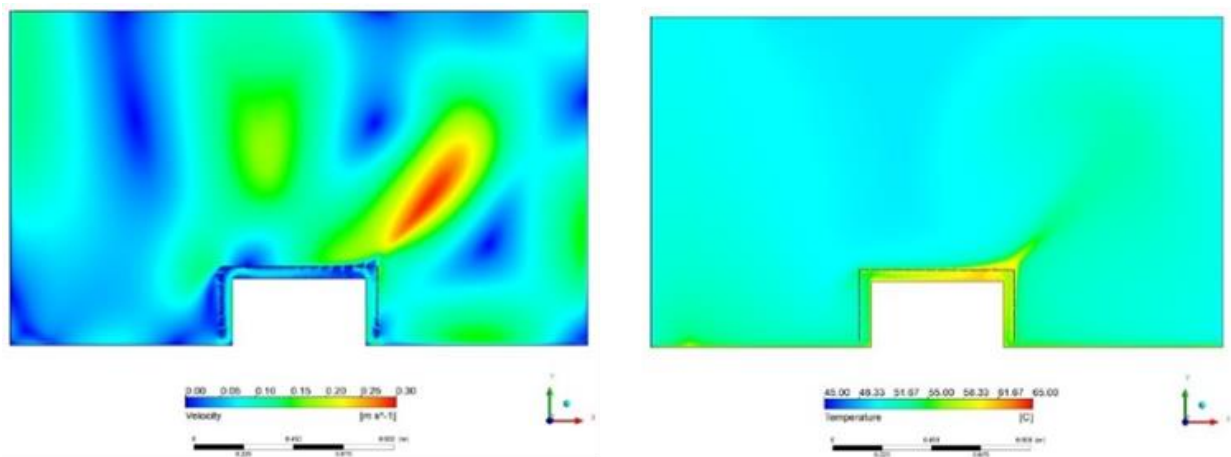


Figura 5  
Schema del modello a parametri concentrati

La seconda metodologia consiste in un modello sviluppato nell'ambiente software MatLab e non richiede la linearizzazione delle equazioni inerenti, ma risolve in sequenza, con la tecnica delle successive approssimazioni, le relazioni di scambio termico conduttivo, convettivo e radiante concomitanti tra i diversi componenti del sistema. Si è verificato che il modello di simulazione analitico applicato alle stesse geometrie e con i medesimi dati al contorno, fornisce risultati del tutto equivalenti a quelli del modello a parametri concentrati.

La disponibilità di due diverse metodologie ha consentito una più efficace ed affidabile analisi dell'influenza delle diverse scelte progettuali.

I modelli hanno consentito di analizzare l'effetto delle variazioni dei numerosi parametri che influenzano il comportamento del sistema: dimensioni, presenza di uno o più schermi alla radiazione solare, colore delle superfici esposte al sole, trattamenti più o meno riflettenti delle superfici soggette a scambio termico per radiazione, e altri ancora, tenendo conto delle diverse condizioni al contorno di temperatura esterna, radiazione solare diretta e diffusa, albedo, temperatura della volta celeste. L'analisi di numerose combinazioni ha portato alla scelta della configurazione definitiva che ha confermato le dimensioni del box, dotandolo di uno schermo singolo, non isolante, per la protezione della radiazione solare. E' stata altresì riscontrata l'opportunità di installare all'interno un piccolo ventilatore che, comandato da un termostato, potesse incrementare il movimento dell'aria e quindi il coefficiente di scambio termico; per prudenziale ridondanza i ventilatori installati sono in realtà due, e la maggior potenza dissipata è ampiamente compensata dall'abbassamento della temperatura interna.



*Figura 6*  
*Simulazione fluidodinamica del moto dell'aria e degli scambi termici nell'intercapedine:*  
*a sinistra: velocità; a destra: temperatura*

Una volta individuata la geometria ottimale del sistema, si è voluto indagare se convenisse dotare lo schermo esterno di feritoie per favorire la circolazione dell'aria e raffreddare più efficacemente l'intercapedine tra box e schermo. I modelli sviluppati non si prestavano a tal fine, e quindi si è fatto ricorso a una simulazione termofluidodinamica (CFD), che ha confermato la validità della soluzione prevista.

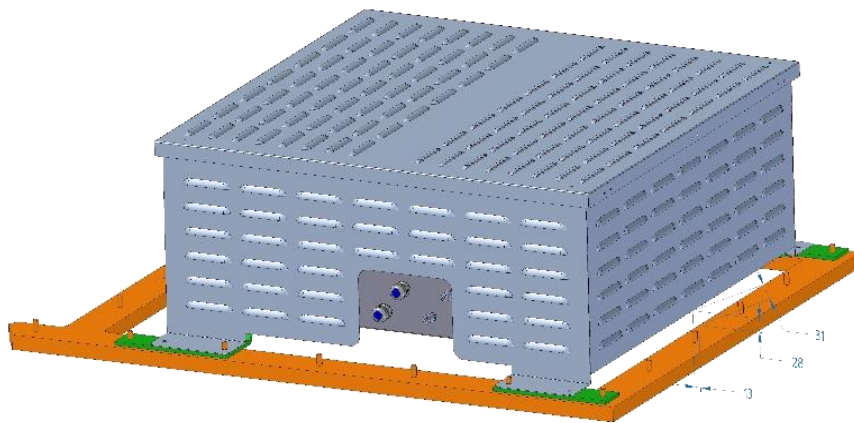
Un ultimo tema affrontato è stato quello della protezione dal rischio di condensa: in alcuni periodi dell'anno, durante la notte la temperatura dell'aria può abbassarsi a valori tali da provocare la formazione di condensa sulle superfici interne del box, tenuto conto che durante la notte la potenza elettrica dissipata dalle apparecchiature può azzerarsi. È stata pertanto prevista una scaldiglia elettrica, comandata da un termostato, che interviene quando la temperatura interna scende al di sotto di 15 °C.

Il box e il suo schermo hanno pertanto assunto la configurazione riportata in figura. Il colore in opera è un bianco RAL 9016, coerentemente con l'estetica generale della ruota.

È stato anche analizzato l'effetto di una finitura mediante vernice a basso coefficiente di assorbimento della radiazione solare, ma il modesto effetto sul risultato finale e l'incertezza sul

mantenimento nel tempo delle proprietà riflettenti hanno indotto a considerarne marginale l'impiego.

La progettazione accurata di un piccolo elemento apparentemente insignificante, ma invece di vitale importanza in un contesto così altamente tecnologico, ha dimostrato che l'impiego di strumenti progettuali avanzati, quali lo sviluppo di specifici modelli matematici o il ricorso alla fluidodinamica computazionale può trovare valida applicazione anche nello studio di piccoli dettagli e componenti.



*Figura 7*  
*La configurazione finale del box*