

Autore: Stefano Moret

Relatore: Prof. Marco Noro

Correlatore: Prof. Alessandro Sona

Titolo tesi: “Energy efficiency in lighting: daylight harvesting optimization and Wireless Sensor Networks”

### *ABSTRACT*

Gli edifici residenziali e commerciali sono responsabili per circa un terzo dei consumi energetici su scala mondiale e, di questo consumo, una quota compresa tra il 20% e il 50% è attribuibile all'illuminazione, responsabile per il 19% del consumo globale di energia elettrica. Interventi di efficienza energetica nell'illuminazione hanno dimostrato, attraverso la sostituzione delle lampade con tecnologie più efficienti in combinazione con sistemi di controllo, un potenziale di risparmio energetico che arriva fino al 60-80% rispetto al “business as usual”. Gli interventi di efficienza energetica che portano a questi valori di risparmio sono sovente di semplice implementazione e poco onerosi, con periodi di “simple payback” degli investimenti spesso sotto i cinque anni. Un'attenzione a questa voce del consumo energetico degli edifici, pertanto, ha un potenziale di riduzione di un ordine di grandezza rispetto al consumo energetico attuale, ma molta strada deve ancora essere fatta, e a livello legislativo, e a livello culturale e formativo: ne sono esempio le lacune nella legislazione in Italia a riguardo (l'illuminazione non è contemplata, ad oggi, nella normativa europea EPDB per la certificazione energetica degli edifici) e la scarsa accettazione del mercato statunitense della sostituzione delle lampade ad incandescenza con tecnologie maggiormente efficienti.

Tra gli interventi di efficienza energetica nell'illuminazione con maggiore potenziale di risparmio energetico, il presente lavoro di tesi è focalizzato sul “daylight harvesting”, termine usato per definire l'implementazione di sistemi di controllo che permettano l'utilizzazione della luce naturale per la riduzione del consumo energetico nell'illuminazione degli edifici; l'elaborato riassume il lavoro di ricerca svolto dall'autore presso University of California, prima nel campus di Berkeley nel contesto di un progetto finanziato dalla NASA Sustainability Base di Ames (CA), e successivamente presso il California Lighting Technology Center dislocato presso il campus di Davis.

Il “daylight harvesting” ha enormi potenziali di risparmio energetico, arrivando a punte del 50% di riduzione del consumo energetico nell'illuminazione degli edifici, ma un'implementazione efficace richiede lo studio attento di diversi fattori interagenti, ad esempio l'impatto che questo intervento ha sui sistemi HVAC di riscaldamento, ventilazione e

raffrescamento, il comfort visivo e termico degli utenti, sulla necessità di controllare i sistemi di “shading” e di ottimizzare le performance delle superfici trasparenti in base alle diverse condizioni climatiche. La sottostima dei fattori interagenti sopracitati può portare ad errate implementazioni ed avere effetti disastrosi sui carichi termici degli edifici, fino anche a vanificare i benefici generati dalla riduzione del consumo energetico nell’illuminazione. La complessità delle dinamiche in gioco richiede, quindi, un approccio di simulazione numerica che, tuttavia, non è applicabile per la maggioranza degli edifici a causa della necessità di competenze specifiche e dei notevoli investimenti in termini di tempi e costi che la stessa richiede.

Le migliori implementazioni di “daylight harvesting”, inoltre, contemplano anche l’uso di sistemi dinamici di gestione delle finestre, come vetri elettrocromici e lucernari automatici, per ottimizzare la performance degli edifici attraverso la regolazione della trasmittanza visiva (VLT) e termica (SHGC) dei sistemi stessi. Tuttavia, la caratterizzazione di questi sistemi è, allo stato attuale, mal regolamentata e generalmente scadente, con il risultato che spesso vengono installati negli edifici senza una vera conoscenza delle proprietà visive e termiche.

Nell’ultimo decennio, per la riduzione dei costi d’installazione dei sistemi di controllo in edifici già esistenti, applicazioni di “daylight harvesting” sono state realizzate attraverso le reti di sensori wireless (Wireless Sensor Network), nelle quali sensori ed attuatori vengono installati su dei nodi della rete (con piattaforme note come “motes”), risparmiando i costi di ricablaggio del sistema. A tal proposito, uno degli obiettivi principali è quello di riuscire ad avere un network “deploy and forget”, in cui la micro-energia necessaria per alimentare i sensori è ricavata dall’ambiente attraverso sistemi di “energy harvesting”, che allo stato attuale sono tuttavia ancora in fase di ricerca e con costi troppo elevati per facilitarne la diffusione.

Alla luce delle problematiche delineate nei paragrafi introduttivi, il lavoro di tesi si è posto i seguenti obiettivi:

1. Identificazione dei migliori strumenti di simulazione per la determinazione della performance energetica e visiva dei sistemi di “daylight harvesting”, considerati nella loro migliore configurazione attualmente disponibile, i.e. come combinazione di sistemi di controllo per l’illuminazione uniti a sistemi di dinamici di fenestrazione;
2. Realizzazione di un modello teorico, validato alle derivate parziali attraverso cicli di simulazioni parametriche, per stimare l’impatto sul bilancio energetico degli edifici di interventi di “daylight harvesting” in funzione di un gruppo ristretto di variabili chiave dell’edificio in analisi, senza dover ricorrere necessariamente a simulazioni numeriche;

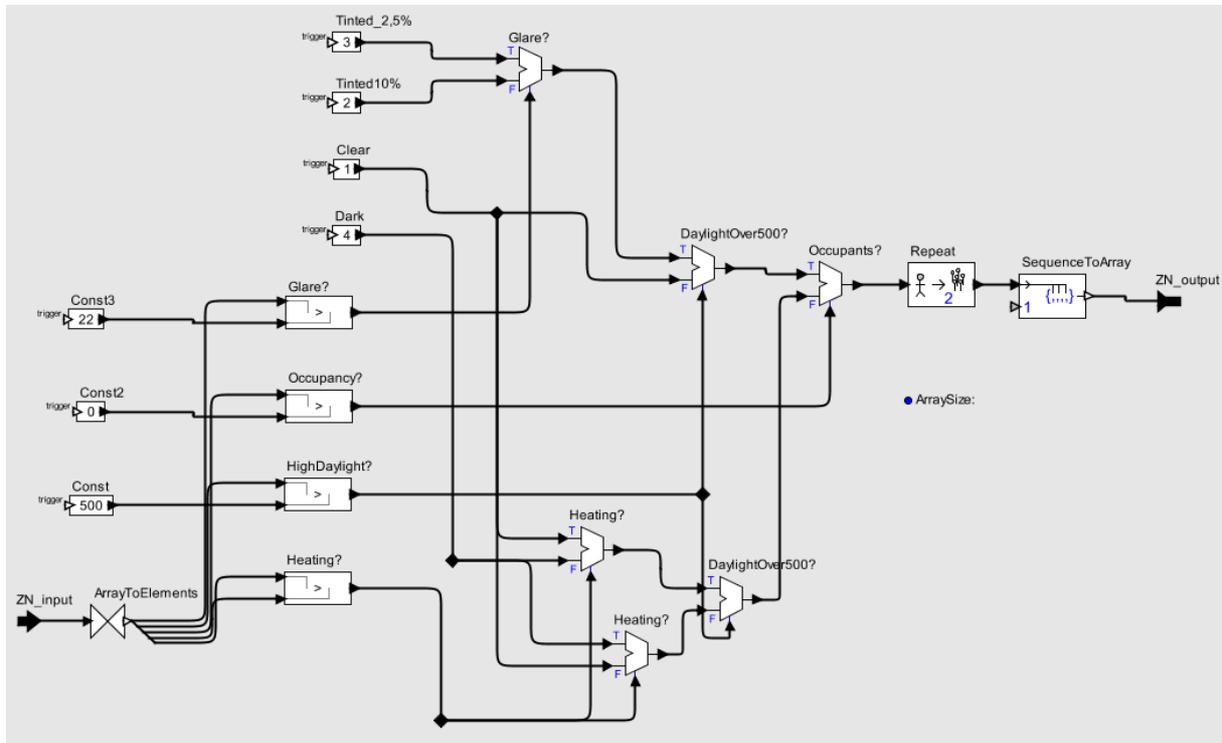
3. Definizione di un nuovo sistema di caratterizzazione per lucernari e sistemi automatici di fenestrazione: presentazione di una nuova metodologia per la caratterizzazione della trasmittanza visiva basata sull'utilizzazione della sfera di Ulbricht;
4. Realizzazione di un sistema di "energy harvesting" sfruttando l'energia luminosa del sistema d'illuminazione artificiale interno dell'edificio per l'alimentazione dei nodi di una rete WSN.

Per il primo obiettivo è stato individuato un "toolbox" di strumenti di simulazione per la determinazione della performance energetica e visiva degli interventi di "daylight harvesting" in diverse condizioni climatiche, avente come principali attori i software EnergyPlus per la modellazione energetica e Radiance per la simulazione del comfort visivo. Il processo simulativo è stato affrontato aumentando per gradi il livello di complessità, partendo da un semplice edificio con un lucernario sul soffitto fino ad arrivare ad avanzati modelli di controllo applicati ad edifici di riferimento validati e rilasciati dal DOE (Department of Energy) degli Stati Uniti. Lo scopo delle simulazioni è la valutazione comparativa del bilancio termico di edifici "baseline" (con fenestrazione soddisfacente i requisiti minimi ASHRAE 90.1) prima e dopo l'intervento di "daylight harvesting" con l'installazione di sensori d'illuminamento e sistemi di controllo dell'illuminazione (per consentire la riduzione del consumo energetico in base alla disponibilità di luce naturale) e di vetri elettrocromici. I risultati sono:

- Illuminazione: risparmi tra il 35% e il 40% indipendentemente dal clima;
- Raffrescamento: risparmi simili in valore assoluto indipendentemente dal clima, con punte del 29% in climi freddi e 16% in climi molto caldi, dovuti sia alla riduzione del carico termico prodotto dalle lampade sia ai sistemi di fenestrazione dinamici che riducono l'effetto negativo della radiazione solare durante i periodi estivi;
- Riscaldamento: aumento del consumo piuttosto costante, in termini percentuali, in diverse condizioni climatiche. Nei climi freddi, contraddistinti da elevati carichi termici di riscaldamento, l'effetto dell'utilizzo di sistemi di fenestrazione dinamica e dell'abbassamento dell'illuminazione artificiale in inverno può avere effetti negativi tali da annullare, in alcuni casi, gli effetti positivi di riduzione dei consumi da illuminazione.

I risultati, quindi, hanno mostrato un sostanziale potenziale di risparmio energetico per il "daylight harvesting", insieme ad una chiara necessità di analisi delle specifiche condizioni climatiche del luogo in cui l'edificio è localizzato. L'ottimizzazione degli algoritmi utilizzati per il controllo dei vetri elettrocromici, tenendo in considerazione le caratteristiche degli edifici reali (Figura 1), può notevolmente alleviare gli effetti negativi sui carichi termici di riscaldamento creati dall'utilizzazione di sistemi di fenestrazione dinamica, portando a risparmi energetici complessivi sul bilancio energetico degli edifici che toccano il 23% nei

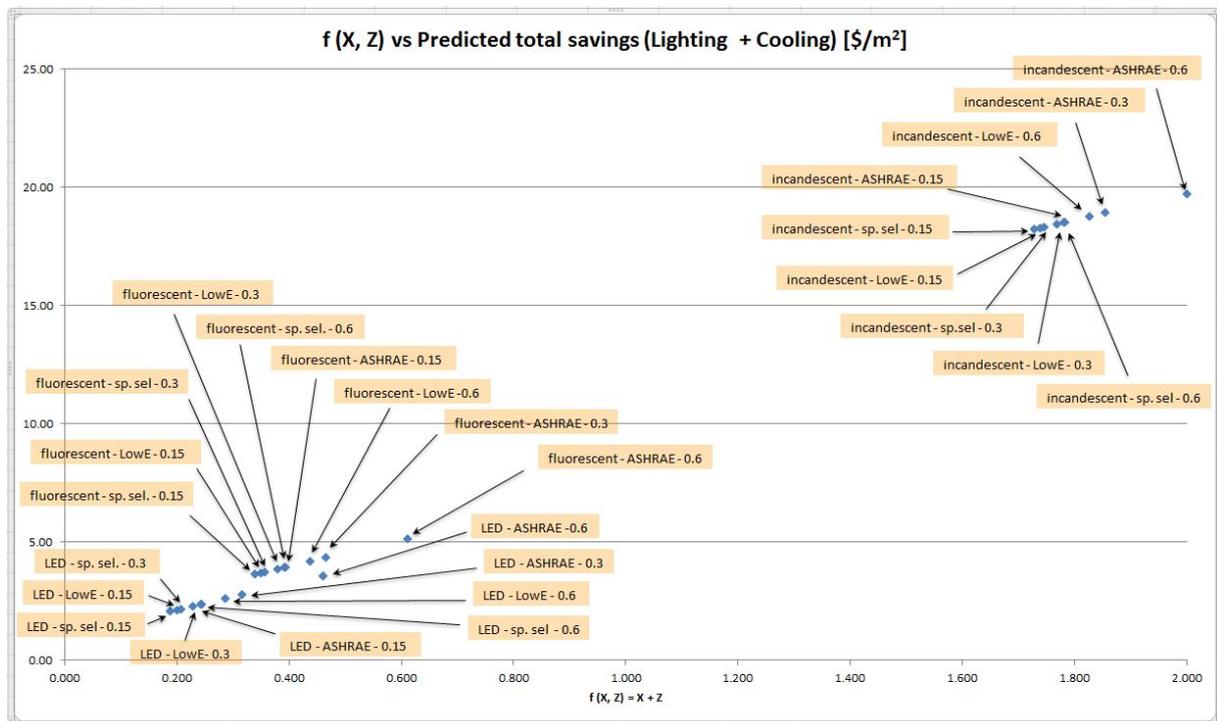
climi più caldi. L'analisi del comfort visivo attraverso simulazione in Radiance ha confermato la riduzione netta di problemi legati all'abbagliamento ("glare") consentita dai sistemi dinamici di fenestrazione, problema che spesso costituisce uno dei principali motivi di non accettazione da parte degli utenti degli interventi di "daylight harvesting".



**Figura 1 – Algoritmi di controllo avanzati per il controllo dei vetri elettrocromici implementati in EnergyPlus per la simulazione delle condizioni reali di utilizzo degli edifici, con considerazione di presenza utenti, livello illuminamento, comfort visivo, carichi termici**

Se, da un lato, gli interventi di "daylight harvesting" hanno ottime performance in termini di efficienza energetica e comfort degli utenti, al tempo stesso una corretta implementazione degli stessi richiede uno studio che idealmente dovrebbe essere eseguito tramite simulazione numerica per ogni singolo edificio: ciò non è, per la stragrande maggioranza dei casi, possibile. Per questi motivi, è stata eseguita un'analisi teorica, validata attraverso simulazioni parametriche, volta ad indentificare i parametri chiave che influenzano la performance degli interventi di "daylight harvesting" sul bilancio energetico ed economico degli edifici, allo scopo di creare un modello lineare in grado di predire un ordine di grandezza del risparmio energetico in illuminazione e raffreddamento a partire da un ristretto gruppo di variabili in input. L'analisi ha identificato la predominanza di quattro variabili principali: WWR ("Window-to-Wall ratio"), LES ("Luminous Efficacy of Sources", efficienza luminosa delle lampade), LER ("Luminous Efficacy of Radiation", efficienza luminosa della luce solare, dipendente dal tipo di fenestrazione installato), costo dell'elettricità. Il risparmio

energetico, se si escludono le componenti di riscaldamento, si mostra piuttosto costante nelle diverse condizioni climatiche. Il modello, validato da lotti di simulazioni parametriche e generato con tecniche di regressione lineare ai minimi quadrati, ha mostrato un'ottima capacità di predizione, come mostrato dal grafico in Figura 2.



**Figura 2 – Il modello lineare predittivo sviluppato nel capitolo 3 permette di stimare l’impatto energetico ed economico di un intervento di “daylight harvesting” a partire dalla conoscenza di poche variabili chiave di un edificio**

Il modello predittivo, che ha mostrato un’ottima aderenza agli output dei lotti di simulazioni parametriche eseguite, si configura come strumento ideale per analisi d’investimento e strumento di supporto per la definizione di politiche d’incentivi volte al supporto degli interventi di risparmio energetico negli edifici.

A partire dagli anni '80 vi sono stati notevoli sviluppi nella produzione di sistemi di fenestrazione complessi e dinamici, ma gli standard per caratterizzarne le proprietà di trasmittanza visiva (VLT) e termica (SHGC) non hanno seguito di pari passo gli sviluppi compiuti a livello industriale e dal mondo della ricerca universitaria. Ad esempio, in commercio sono disponibili lucernari statici e dinamici di svariate forme, ma gli standard ASTM e NFRC per studiarne le performance di trasmittanza visiva si basano su misure effettuate su singoli campioni mono-strato di materiale ad angolo d’incidenza normale rispetto alla superficie, generando dei risultati poco significativi in output dai test di misurazione. Per questo motivo è stata ideata e testata una nuova metodologia di

misurazione, basata sull'utilizzazione della sfera di Ulbricht, per misurare la trasmittanza totale dei lucernari statici e dinamici a diversi angoli d'incidenza: l'apparato di misura, raffigurato in Figura 3, consta di un tunnel completamente oscurato rispetto alla luce esterna avente ad un'estremità una lampada emittente un elevato flusso luminoso collimato e all'altra estremità la sfera di Ulbricht con il lucernario montato su una porta, con un sistema di riferimento che ne permette la rotazione sui piani verticale ed orizzontale.

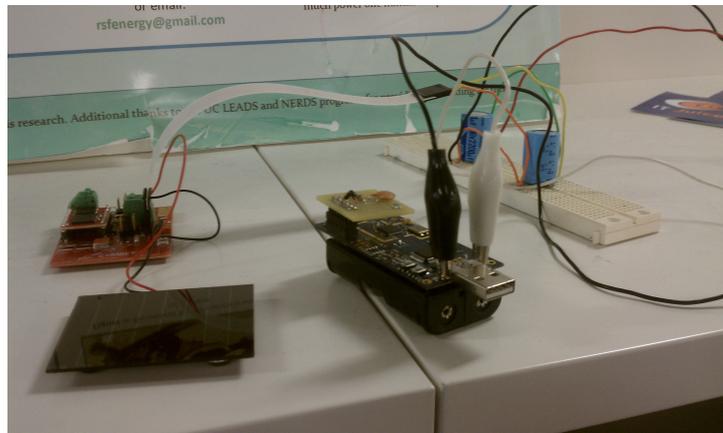


**Figura 3 – Veduta frontale e laterale del sistema di misura per lucernari statici ed automatici basato sull'utilizzazione della sfera di Ulbricht. Il sistema è stato sviluppato e testato in collaborazione con UC Davis California Lighting Technology Center**

L'apparato è tuttora in fase di ottimizzazione, ed i primi test hanno dimostrato caratteristiche di affidabilità e flessibilità che lasciano presupporre una possibile vasta applicazione del metodo di caratterizzazione a livello di standard e procedure di misura.

Per l'ultimo obiettivo, la realizzazione di un sistema di "energy harvesting" per alimentare i nodi di una rete WSN sfruttando l'energia luminosa emessa dai sistemi d'illuminazione artificiale indoor, ad una vasta analisi delle fonti presenti in letteratura è seguita la progettazione e realizzazione del prototipo attraverso diverse fasi di ottimizzazione delle performance. Il risultato finale, mostrato in Figura 4, è composto da una cella PV in silicio amorfo di 25 cm<sup>2</sup>, un microchip commerciale per la gestione della potenza raccolta dall'ambiente, due batterie per lo stoccaggio dell'energia, e un super-capacitore per mantenere la stabilità del potenziale sui terminali in output. La notevole riduzione del consumo energetico della piattaforma wireless ("mote") sulla quale sono installati i sensori di illuminamento insieme all'ottimizzazione del "design" del prototipo hanno permesso un funzionamento del sistema in totale autonomia per 500-1000 cicli di misura in condizioni di totale oscurità, risultato comparabile o migliore rispetto ai casi studio esaminati in letteratura. Il sistema è in grado di operare indefinitamente con livelli di illuminamento interno di 400-500

lux e orari di utilizzo dell'edificio standard, in linea con quanto può venire riscontrato nella maggior parte degli edifici commerciali.



**Figura 4 – Il prototipo del sistema di “energy harvesting” per sfruttare l’energia luminosa generata dall’illuminazione artificiale negli edifici**

Per i quattro obiettivi elencati in apertura del presente abstract sono stati raggiunti risultati estremamente soddisfacenti, comparabili o più avanzati se confrontati con la vasta bibliografia consultata durante la realizzazione del lavoro di tesi.

Il potenziale di risparmio energetico degli interventi di “daylight harvesting” è emerso maggiore rispetto a vari studi precedenti presi a confronto, e sono stati confermati i rischi relativi ad un’errata implementazione degli stessi. La realizzazione del modello predittivo poc’anzi presentato ha ampie prospettive di applicazione in merito, in particolare come ausilio alla progettazione nelle fasi iniziali del “design” degli edifici, analisi di investimento e definizione di politiche energetiche.

Al tempo stesso, notevoli passi avanti rispetto allo stato attuale per la caratterizzazione di lucernari e sistemi di fenestrazione complessi possono essere raggiunti attraverso l’uso della tecnica proposta, basata sull’utilizzazione della sfera di Ulbricht.

Per le applicazioni di “daylight harvesting” basate su un approccio WSN, notevoli risultati e prospettive sono emerse dalla realizzazione del prototipo sopra descritto che, essendo realizzato solamente con componenti commerciali, pone le basi per lo sviluppo di sistemi di “energy harvesting” su larga scala che permettano di avere nei prossimi anni dei WSN “deploy and forget”, dove lo sfruttamento dell’energia disponibile nell’ambiente possa eliminare la necessità di alimentare i nodi delle reti attraverso l’utilizzazione di batterie standard.