

An Innovative Technique for Smart Lighting in Buildings through Multi-Objective Particle Swarm Optimization

F. Viani, A. Polo, P. Garofalo, N. Anselmi, M. Salucci, and E. Giarola

Abstract

The smart control of lighting in modern buildings is a key feature in order to improve as much as possible the comfort of the persons as well as to reduce the overall energy consumption. Within this framework, this work presents an innovative technique for the smart lighting of buildings based on the distributed sensing capabilities of a low-cost wireless sensor network (*WSN*). The acquired information by the *WSN* nodes is processed by a central unit in order to adaptively control the intensity of lights starting from the real-time measurement of the brightness conditions and energy consumption. A multi-objective evolutionary algorithm based on the particle swarm optimizer (*PSO*) is exploited in order to minimize a suitable cost function accounting for conflicting user-defined requirements. The effectiveness of the proposed methodology is assessed through a set of laboratory-controlled experiments.

Notazione

k: numero di iterazioni dell'algoritmo.

Φ : fitness della soluzione, risultato del calcolo del funzionale di costo.

Φ_n : fitness dell'obiettivo n-esimo.

Lux Measured: valore di lux che si riceve come feedback da un sensore.

$\{l_j\}$, $j=0, \dots, L$: lampada j-esima.

$\{d_j\}$, $j=0, \dots, L$: valore di dimming della lampada j-esima, compreso tra 0 e 100%.

$\{s_j\}$, $j=0, \dots, S$: sensore j-esimo.

$\{m_j\}$, $j=0, \dots, S$: valore di lux misurato dal sensore j-esimo.

$\{x_j\}$, $j=0, \dots, L$: valore di dimming della lampada j-esima normalizzato tra 0 e 1.

$\{t_j\}$, $j=0, \dots, T$: target j-esimo.

$\{w_j\}$, $j=0, \dots, L$: valore di potenza consumata dalla lampada j-esima, compreso tra 0 e 6. [watt]

D: valore di luminosità desiderato. [lux]

$\{D_j\}$, $j=0, \dots, S$: valore di luminosità desiderato dal sensore j-esimo. [lux]

L: numero di lampade totale del sistema.

S: numero di sensori totale del sistema.

P: numero di particelle dell'algoritmo.

T: numero di target totale del sistema.

W: valore di potenza desiderato. [watt]

$\{W_j\}$, $j=0, \dots, L$: valore di potenza desiderato dalla lampada j-esima. [watt]

target: coppia di valori di luminosità e di consumo desiderati. [lux, watt]

α : coefficiente obiettivo luminosità.

β : coefficiente obiettivo potenza.

1 Introduzione

Il controllo intelligente dell'intensità luminosa è un aspetto chiave per gli smart buildings in quanto permette di migliorare il comfort dell'ambiente e allo stesso tempo di ridurre il consumo di energia. L'idea alla base dell'implementazione del controllo luminosità si basa principalmente sull'uso di Wireless Sensor Network (WSN), una rete di sensori distribuita che misurerà le condizioni di luminosità presenti. I dati raccolti dalla WSN verranno poi processati da un'unità di controllo tramite un algoritmo che regolerà le lampade, o eventuali fonti di illuminazione, per ottenere il livello di luminosità desiderato. In questo modo si garantisce sempre il livello di comfort ottimale e si evita il consumo di energia quando non necessario. Questo progetto punta allo studio e allo sviluppo di una metodologia per il controllo di luminosità in edifici intelligenti e alla validazione sperimentale della soluzione trovata.

2 Stato dell'arte del controllo luminosità per Smart Buildings

Le strategie di realizzazione di sistemi di smart lighting si possono suddividere principalmente in tre casi:

- Strategie orientate al risparmio.

Obiettivo: riduzione dei consumi del sistema.

Implementazione: utilizzo di algoritmi in grado di ridurre significativamente i costi.

Svantaggi: il livello di comfort ne risente creando ambienti "scomodi" che influenzano negativamente la produttività.

- Strategie orientate alle persone.

Obiettivo: migliorare il comfort dell'ambiente in base alle preferenze dell'utente.

Implementazione: utilizzo di standard che definiscono i livelli ottimali di parametri di luminosità per garantire un ambiente il più confortevole possibile; utilizzo di PEM (Personal Environment Modules) che consentono all'utente di controllare direttamente l'ambiente.

Svantaggi: aumento dei costi che non vengono considerati.

- Strategie miste (le più diffuse).

Obiettivo: trovare un compromesso tra comfort ambientale e consumi.

Implementazione: utilizzo di WSN (Wireless Sensor Network) a basso costo.

Svantaggi: difficoltà nel trovare un compromesso, la trasmissione dei dati può comportare un aumento dei costi, l'utilizzo di modelli predittivi per ridurre la frequenza di trasmissione può comportare una riduzione della precisione.

3 Sviluppo di un algoritmo per Smart Lighting

Strategia adottata: mista, si cercherà di trovare il compromesso ideale tra livello di luminosità desiderato e riduzione dei consumi.

Implementazione: algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization) multiobiettivo.

Scenario: lo scenario prevede:

- L lampade presenti nell'ambiente;
- S sensori di luminosità presenti nell'ambiente;
- T target, coppia di valori di luminosità e consumo desiderati;

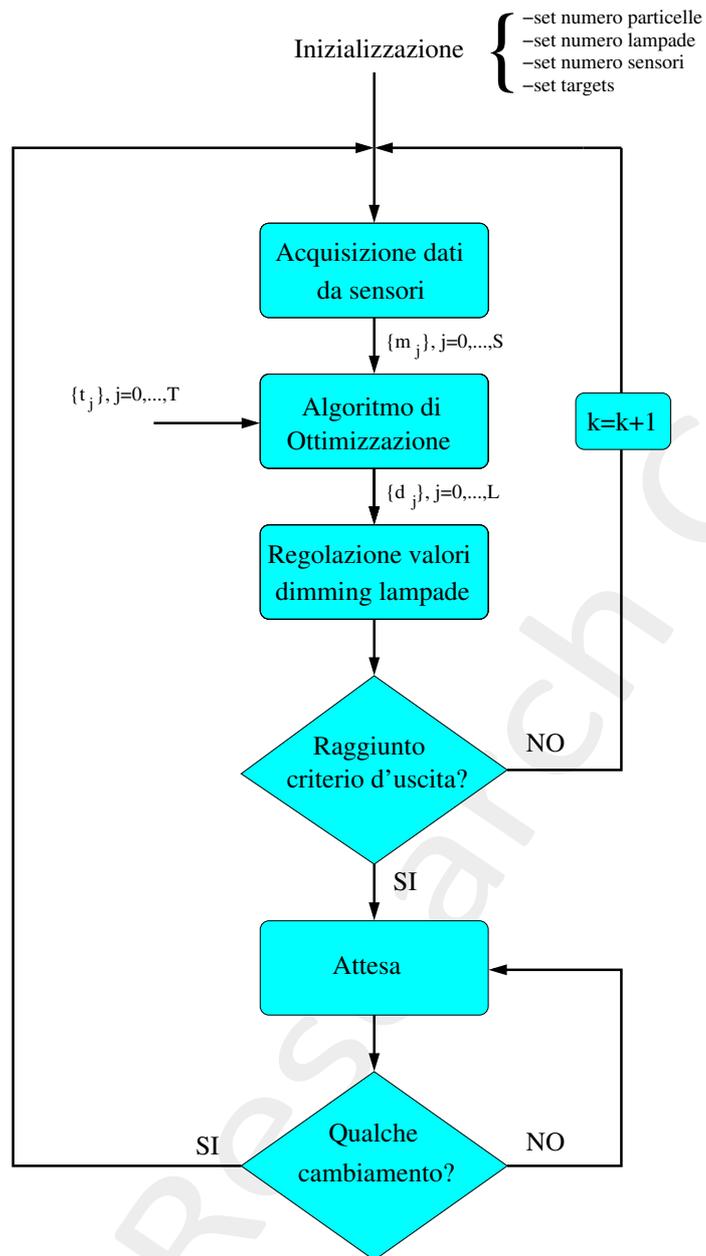


Figure 1: Diagramma di flusso algoritmo implementato.

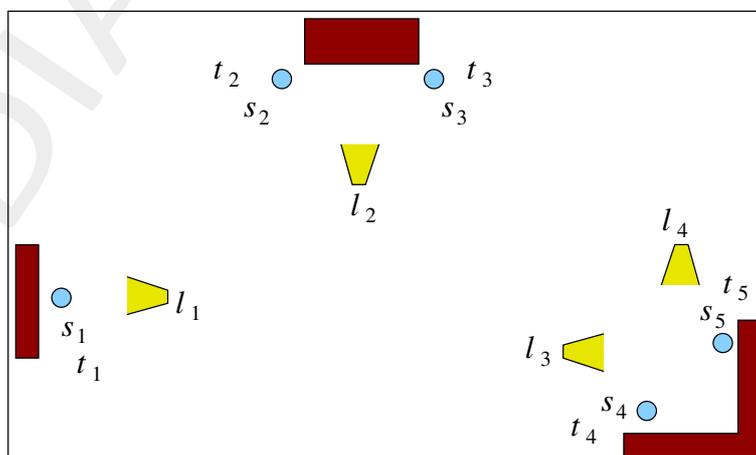


Figure 2: Esempio di possibile scenario con $L=4$, $S=5$, $T=5$.

4 Validazione

4.1 Test Preliminari

Implementazione: algoritmo PSO a singolo obiettivo, si considera solo il valore di luminosità desiderato e non i consumi. I criteri di uscita dell'algoritmo è solamente il numero massimo di iterazioni.

Descrizione: sono stati fatti dei test semplici per verificare il corretto funzionamento dell'algoritmo. Nello scenario ipotizzato il numero di sensori coincide con il numero di lampade in modo che vi sia una relazione uno a uno tra lampada e sensore. Per simulare i valori misurati dai sensori i dati passati alle lampade vengono elaborati dalla funzione Eq.(1):

$$m_j = 1000 \cdot \ln(1.5 \cdot x_j + 1) \quad [lux] \quad (1)$$

$$x_j = \frac{d_j}{100} \quad (2)$$

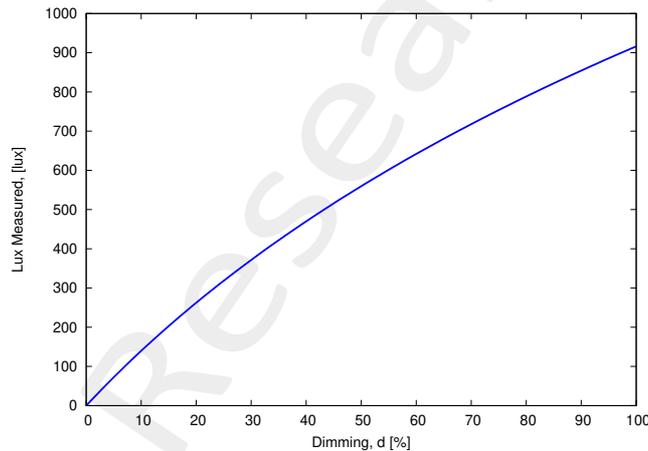


Figure 3: Funzione per simulazione valori misurati dai sensori

Il valore di luminosità desiderato è lo stesso per tutte le lampade. Anche il calcolo del funzionale di costo è stato semplificato rispetto ad un caso reale. Il fitness di una particella viene calcolato con la formula Eq.(3).

$$\Phi = \sum_{j=0}^L |D - m_j| \quad (3)$$

Svolgimento: i test sono stati svolti impostando il programma perchè funzioni con 50 particelle; il valore desiderato di luminosità impostato è di 500 lux con un valore massimo di 1000 lux; sono stati fatti dei test con 250 iterazioni; è stato ipotizzato di utilizzare 5 o 10 lampade/sensori.

Osservazioni: dal grafico di Fig.4 dell'andamento del miglior fitness dello sciame si può osservare come da un fitness iniziale di circa 500 si sia ridotto nel giro di 50 iterazioni ad un valore prossimo a zero. Osservando

l'andamento del valore di dimming delle lampade (Fig.4) si può osservare che ogni lampada tende a portarsi ad un valore di dimming tale che il valore di lux misurato dai sensori sia il valore desiderato (500 lux).

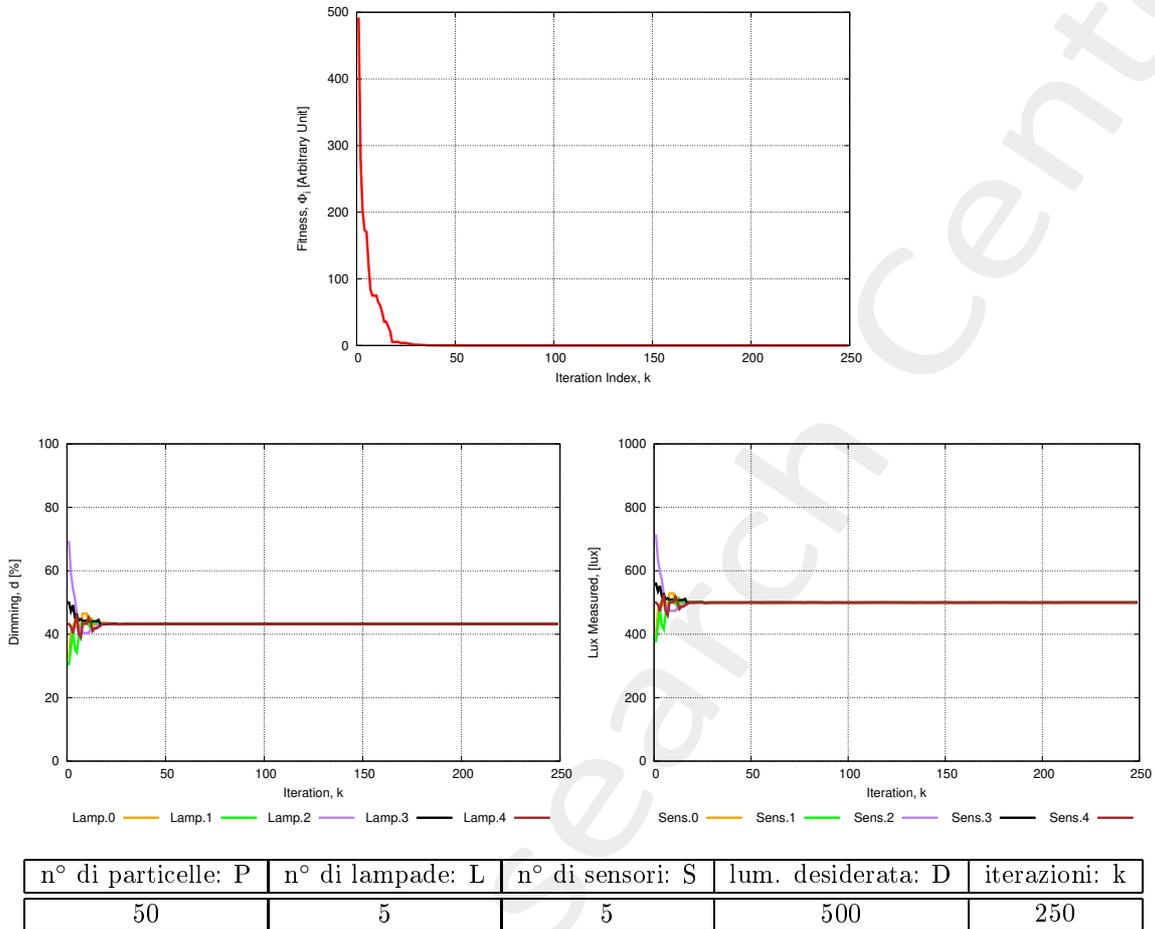


Figure 4: Fitness, valore di dimming delle lampade, valori misurati dai sensori e dati simulazione.

A questo punto, verificato il corretto funzionamento del programma possiamo passare a provarlo in un sistema reale.

4.2 Applicazione dell'algoritmo in un sistema reale

Implementazione: algoritmo MOEA multi-obiettivo.

Obiettivi: valore di luminosità desiderato D e valore di potenza desiderato W.

Descrizione: sono state fatte delle simulazioni su un sistema reale. Lo scenario prevede 2 sensori di luminosità e 3 lampade posizionati come da Fig.5. La potenza consumata da una lampada è stimata con la seguente formula (Eq.4):

$$w_j = \frac{d_j \cdot 6}{100} \quad (4)$$

Vengono calcolate 2 fitness, una per obiettivo, con le seguenti formule (Eq.5 e Eq.6):

$$\Phi_1 = \sum_{j=0}^S \left| \frac{D - m_j}{D} \right| \quad (5)$$

$$\Phi_2 = \sum_{j=0}^L \left| \frac{W - w_j}{W} \right| \quad (6)$$

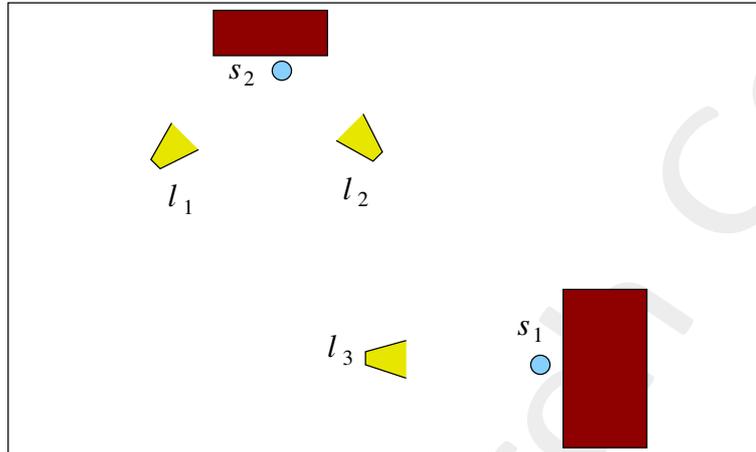


Figure 5: Scenario test in sistema reale.

Svolgimento: sono stati fatti i seguenti test (Tab.1):

Test	particelle P	lampade L	sensori S	lum. desiderata D [lux]	pot. desiderata W [watt]	iterazioni k
1	10	3	2	500	3	50
2	20	3	2	500	3	25
3	10	3	2	500	3	100
4	20	3	2	500	3	50
5	10	3	2	500	3	500
6	20	3	2	500	3	250

Table 1: Tabella dati simulazioni.

Risultati: le soluzioni trovate per ogni test sono in Fig.6.

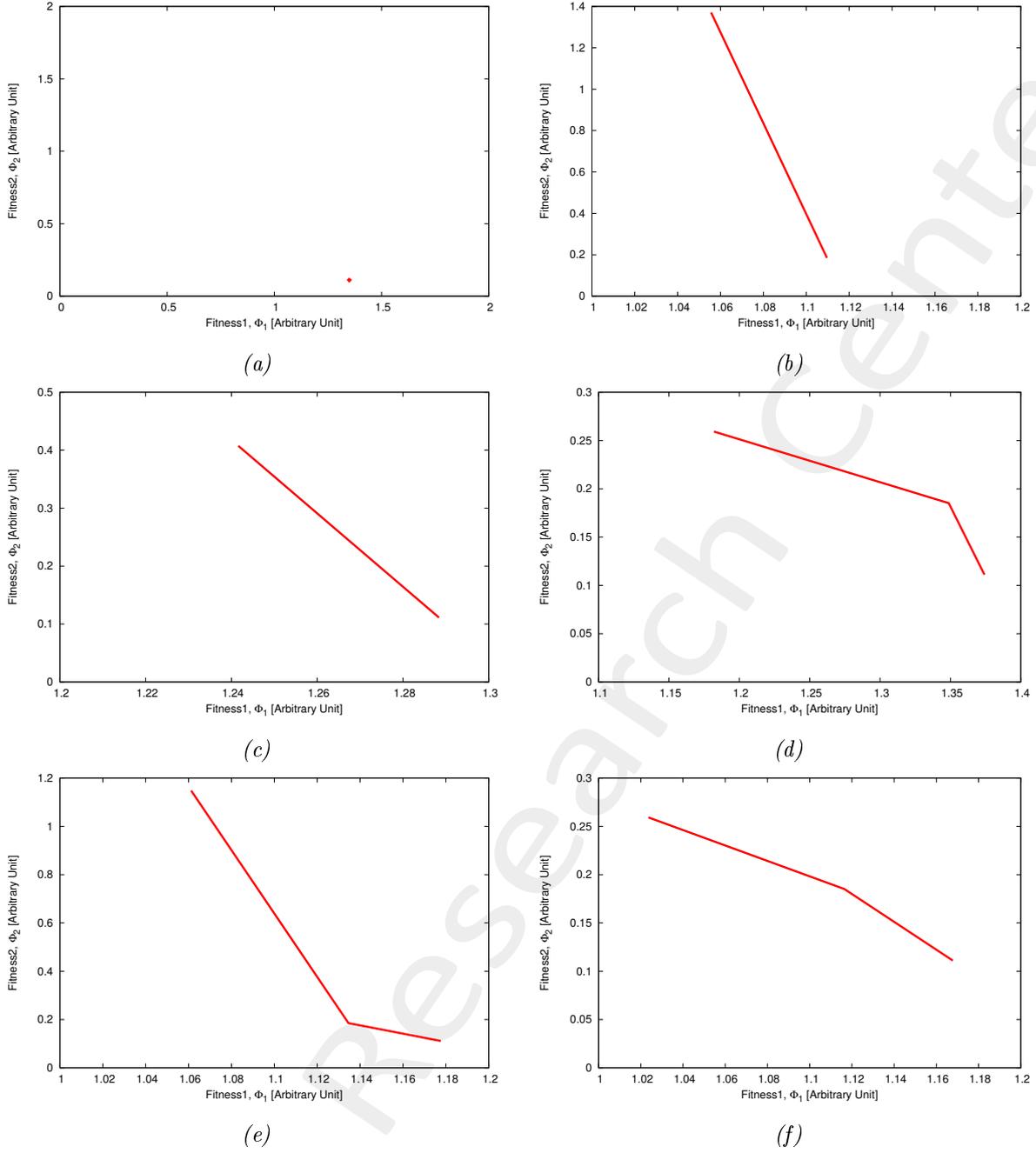


Figure 6: a) test1; b) test2; c) test3; d) test4; e) test5; f) test6.

4.3 Test in Laboratorio

Implementazione: algoritmo PSO Multi-Obiettivo.

Obiettivi: valore di luminosità desiderato D e valore di potenza desiderato W .

Descrizione: Lo scenario prevede 2 sensori di luminosità e 4 lampade posizionati come da Fig.7, nessuna fonte di illuminazione esterna. La potenza consumata da una lampada è stimata con la seguente formula (Eq.7):

$$w_j = \frac{d_j \cdot 6}{100} \quad (7)$$

Viene calcolata una fitness che tiene conto dei due obiettivi (Eq.):

$$\Phi = \alpha \cdot \sum_{j=0}^S \left| \frac{D - m_j}{D} \right| + \beta \cdot \sum_{j=0}^L \left| \frac{W - w_j}{W} \right| \quad (8)$$

- α : coefficiente obiettivo luminosità;
- β : coefficiente obiettivo potenza.

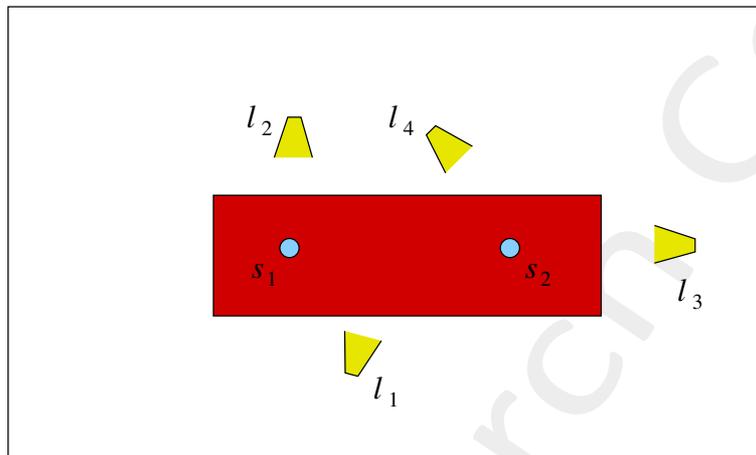


Figure 7: Scenario test in laboratorio

4.3.1 Sotto-Obiettivo 1

Sotto-obiettivo: verificare il raggiungimento dei valori desiderati.

Svolgimento: sono stati fatti i seguenti test variando i coefficienti α e β . (Tab.3):

Test	particelle P	lampade L	sensori S	lum. desiderata D [lux]	pot. desiderata W [watt]	iterazioni k
1	10	4	2	500	3	30
2	10	4	2	500	3	30
3	10	4	2	500	3	30

Test	alpha α	beta β
1	1	1
2	1	0
3	0	1

Table 3: Tabella dati simulazioni.

Risultati: le soluzioni trovate per ogni test sono in Fig.8, Fig.9, Fig.10.

Test 1:

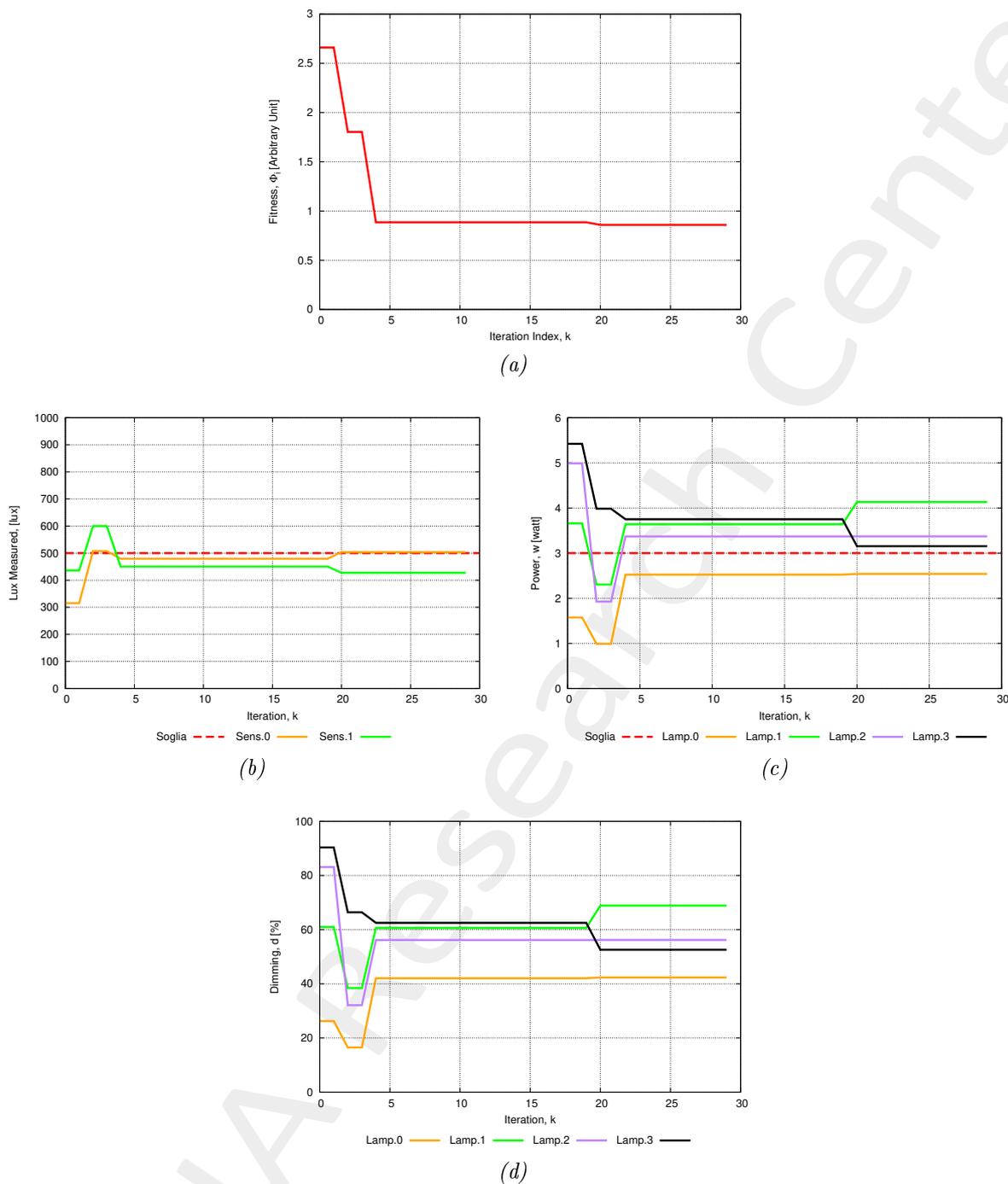


Figure 8: Test1 con $\alpha=1$ e $\beta=1$; a) fitness; b) lux misurati dai sensori; c) potenza stimata; d) dimming lampade.

Commenti: Dall'andamento dei valori di lux misurati e delle potenze stimata si osserva che l'algoritmo cerca di ottimizzare entrambi gli obiettivi.

Test 2:

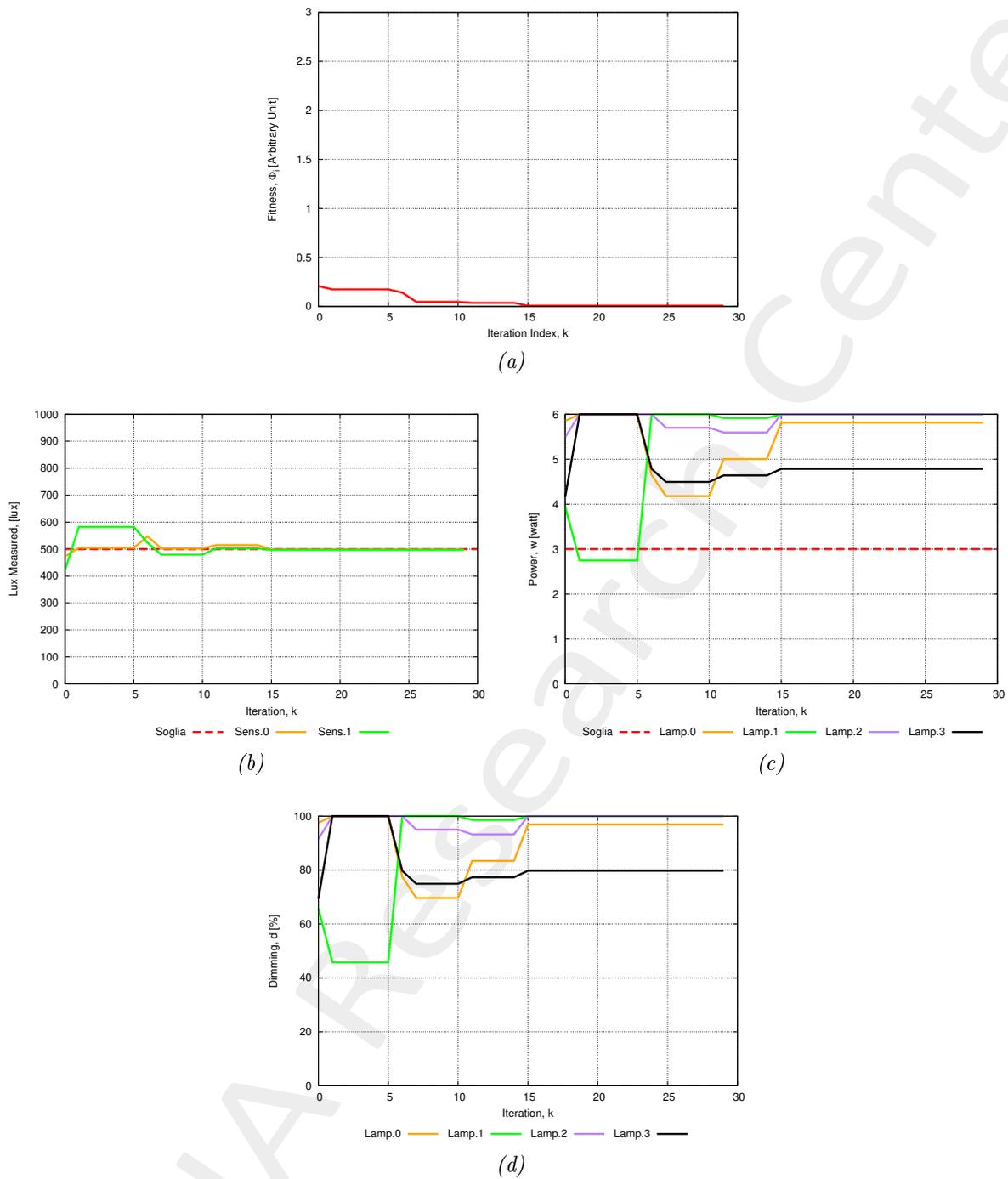


Figure 9: Test1 con $\alpha=1$ e $\beta=1$; a) fitness; b) lux misurati dai sensori; c) potenza stimata; d) dimming lampade.

Commenti: Dall'andamento dei valori di lux misurati e delle potenze stimate si osserva che l'algoritmo cerca di ottimizzare solamente l'obiettivo relativo alla luminosità e non alla potenza.

Test 3:

Nota: Questo test è stato fatto con lo stesso scenario degli altri due e con le stesse condizioni di illuminazione esterna ma in un altro punto del laboratorio.

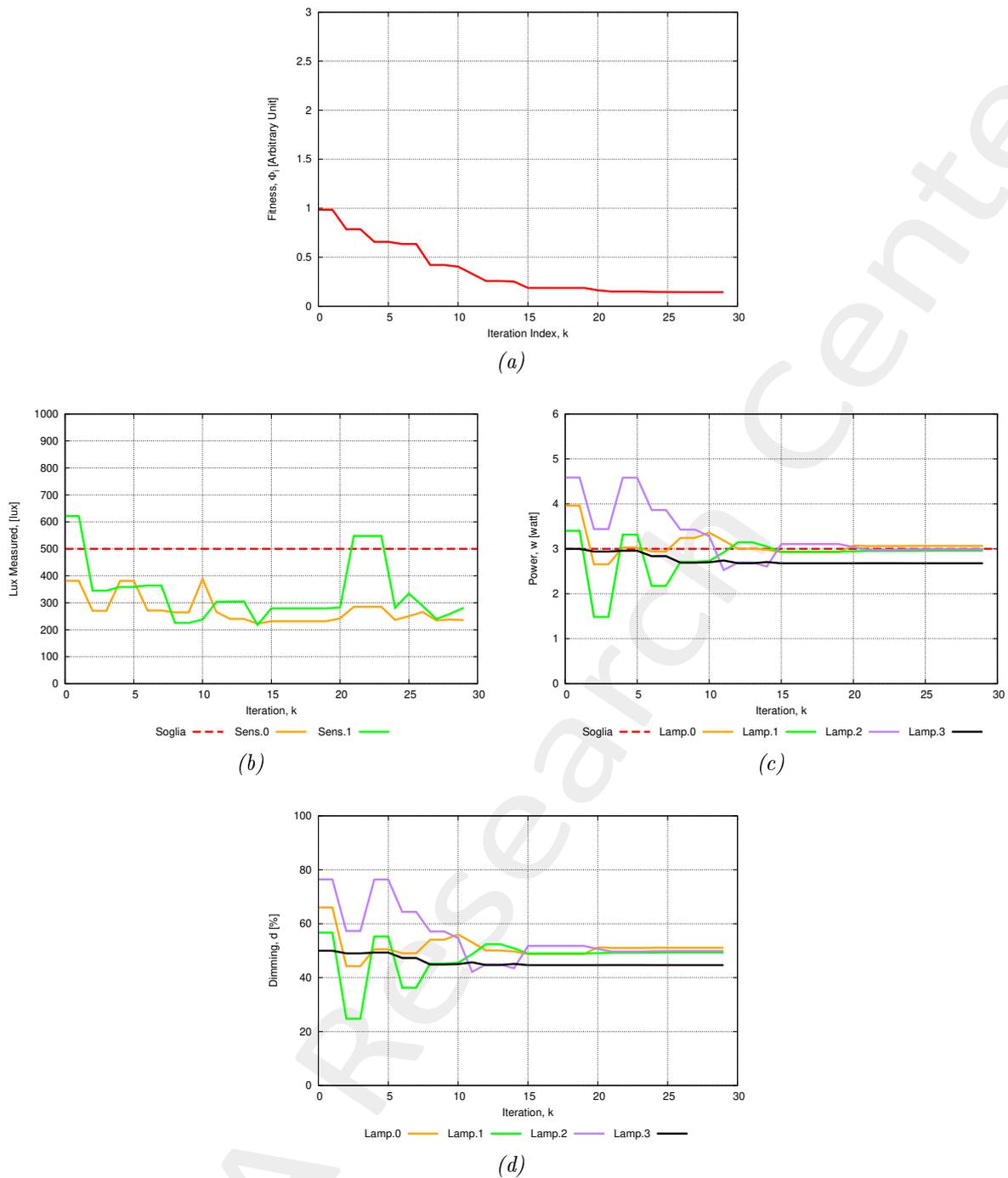


Figure 10: Test1 con $\alpha=1$ e $\beta=1$; a) fitness; b) lux misurati dai sensori; c) potenza stimata; d) dimming lampade.

Commenti: Dall'andamento dei valori di lux misurati e delle potenze stimate si osserva che l'algoritmo cerca di ottimizzare solamente l'obiettivo relativo alla potenza e non alla luminosità.

4.3.2 Sotto-Obiettivo 2

Sotto-obiettivo: verificare il mantenimento della fitness tra un'ottimizzazione e l'altra.

Svolgimento: sono stati fatti i seguenti test tenendo costanti i coefficienti α e β ($\alpha=1$, $\beta=1$) e variando o no il livello di illuminazione esterna ad ogni illuminazione. (Tab.4, Tab.5, Tab.6, Tab.7):

Test	particelle P	lampade L	sensori S	iterazioni k
1	10	4	2	30
2	10	4	2	30

Table 4: Impostazioni generali algoritmo.

Test	D_1	D_2
1	500	500
2	400	600

Table 5: Valori di luminosità desiderata.

Test	W_1	W_2	W_3	W_4
1	3	3	3	3
2	2	5	3	4

Table 6: Valori di potenza desiderata.

Test	Ottimizzazione 1	Ottimizzazione 2	Ottimizzazione 3
1	assente	luce media	luce massima
2	assente	assente	assente

Table 7: Condizioni di illuminazione esterna al sistema.

Nota: Lo scenario è quello di Fig.7. La formula per il calcolo della fitness è leggermente diversa (Eq.9):

$$\Phi = \alpha \cdot \sum_{j=0}^S \left| \frac{D_j - m_j}{D_j} \right| + \beta \cdot \sum_{j=0}^L \left| \frac{W_j - w_j}{W_j} \right| \quad (9)$$

Risultati: le soluzioni trovate per ogni test sono in Fig.11 e Fig.12.

Test 1:

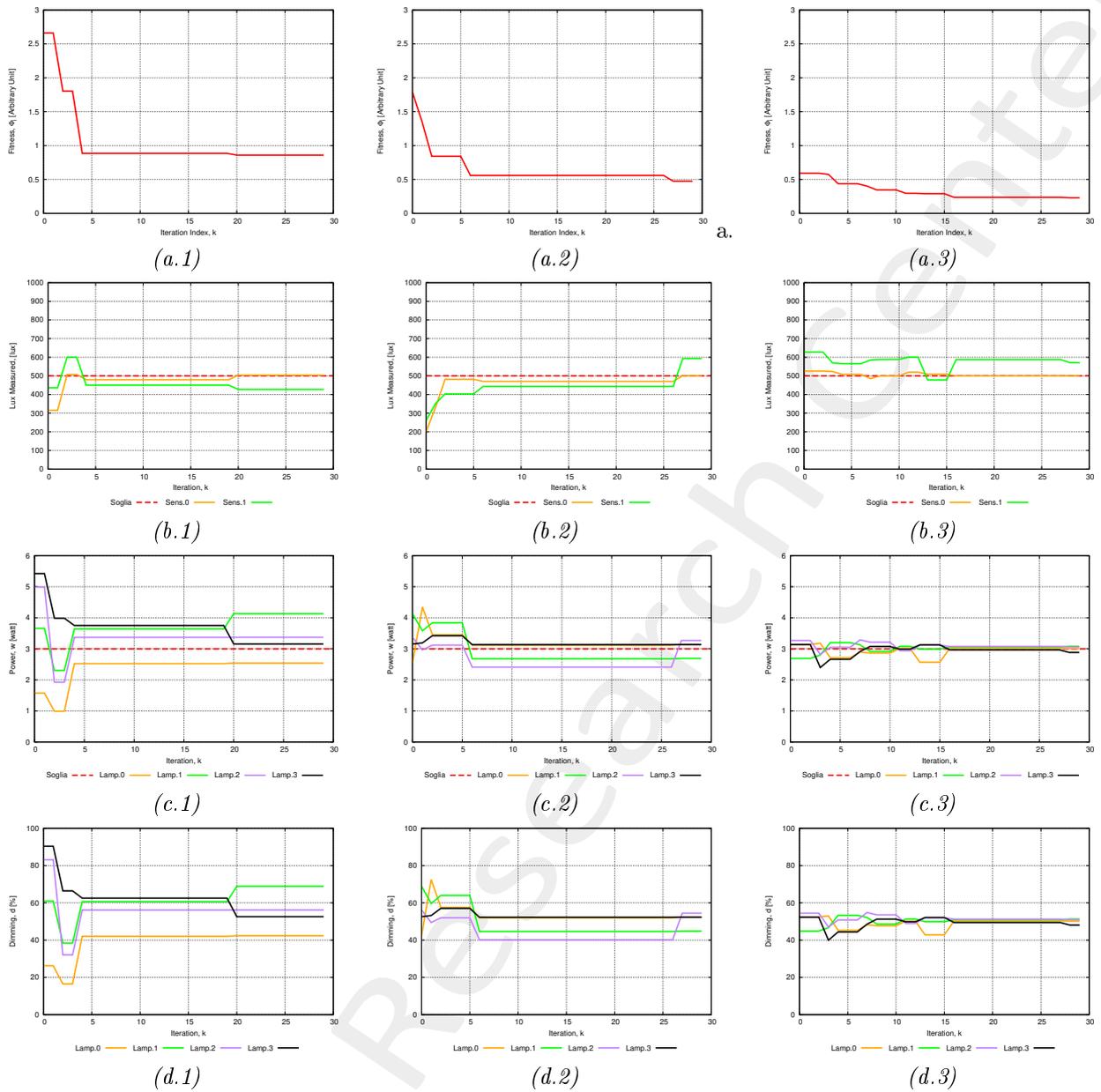


Figure 11: Test 1, andamento di a) fitness, b) lux misurati da sensori, c) potenze stimate, d) dimming lampade, durante le 3 ottimizzazioni.

Commenti: Osservando l'andamento della fitness nelle ottimizzazioni 2 e 3 (Fig.11, (a.2), (a.3)) si può osservare come questa non si discosti molto dal valore che aveva alla fine dell'ottimizzazione precedente, nonostante la variazione delle condizioni di illuminazione esterna.

Test 2:

Nota: Lo scenario del test 2 è lo stesso del test 1 (Fig.7) ma in un altro punto della stanza.

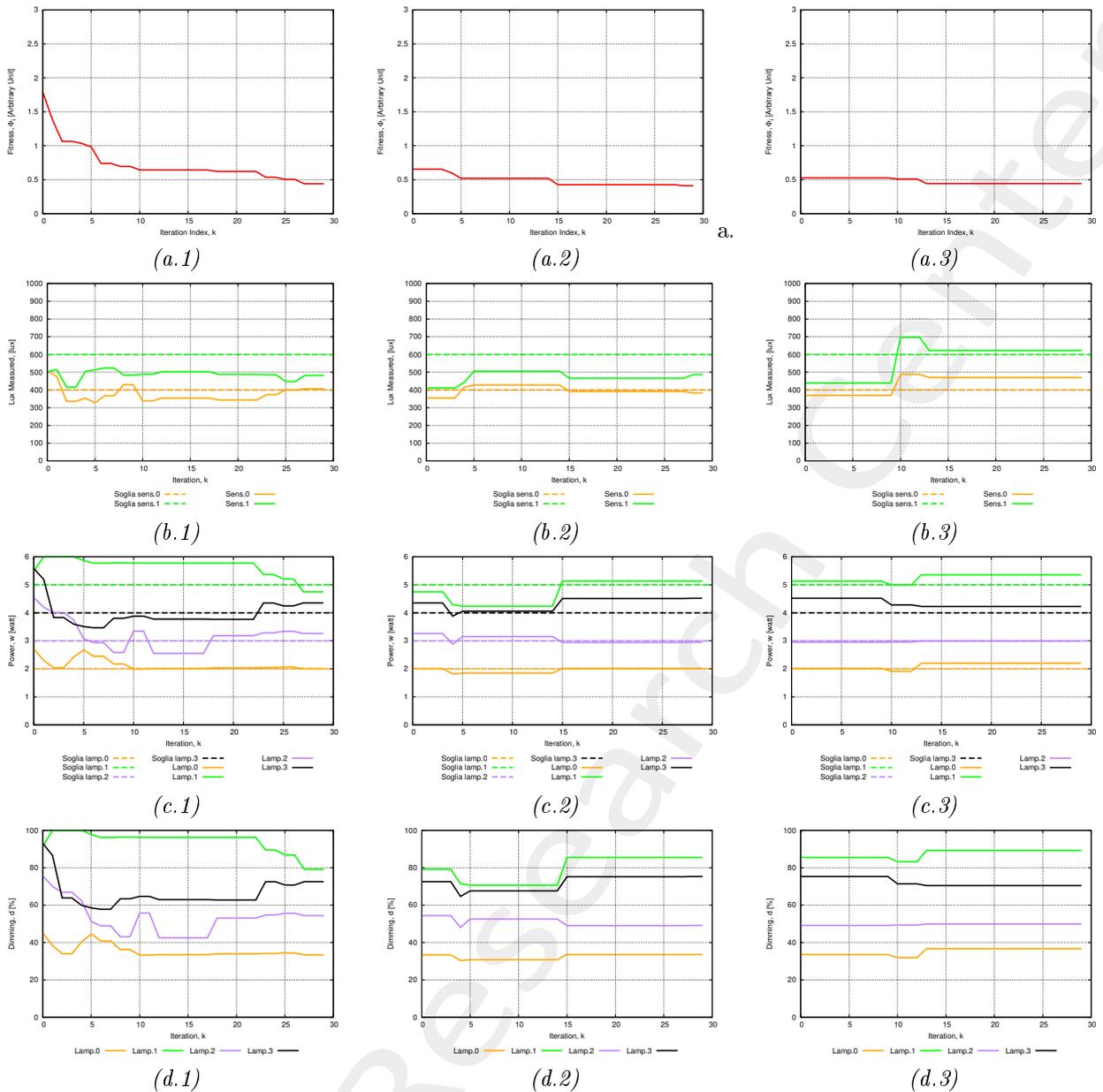


Figure 12: Test 1, andamento di a) fitness, b) lux misurati da sensori, c) potenze stimate, d) dimming lampade, durante le 3 ottimizzazioni.

Commenti: Osservando anche in questo caso l'andamento della fitness, in una situazione in cui la condizione di illuminazione esterna rimane immutata tra un'ottimizzazione e l'altra, si può notare come tenda a mantenersi ancora più vicina al valore che aveva nell'ottimizzazione precedente e come i valori di lux misurati (Fig.12, (b.1), (b.2), (b.3)) e di potenza stimate (Fig.12, (c.1), (c.2), (c.3)) tendano a convergere sempre di più ad ogni ottimizzazione ai valori desiderati.

More information on the topics of this document can be found in the following list of references.

References

- [1] P. Rocca, M. Benedetti, M. Donelli, D. Franceschini, and A. Massa, "Evolutionary optimization as applied to inverse scattering problems," *Inverse Probl.*, vol. 25, no. 12, pp. 1-41, 2009 (DOI: 10.1088/0266-5611/25/12/123003).
 - [2] P. Rocca, G. Oliveri, and A. Massa, "Differential Evolution as applied to electromagnetics," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 53, no. 1, pp. 38-49, Feb. 2011 (DOI: 10.1109/MAP.2011.5773566).
 - [3] F. Viani, P. Rocca, G. Oliveri, and A. Massa, "Pervasive remote sensing through WSNs," *Proc. of the 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Prague, Czech Republic, Mar. 2012, pp. 49-50 (DOI: 10.1109/EuCAP.2012.6206049).
 - [4] F. Viani, P. Rocca, M. Benedetti, G. Oliveri, and A. Massa, "Electromagnetic passive localization and tracking of moving targets in a WSN-infrastructure environment," *Inverse Probl.*, vol. 26, pp. 1-15, May 2010 (DOI: 10.1088/0266-5611/26/7/074003).
 - [5] F. Viani, P. Rocca, G. Oliveri, and A. Massa, "Electromagnetic tracking of transceiver-free targets in wireless networked environments," *Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Rome, Italy, Apr. 2011, pp. 3808-3811.
 - [6] F. Viani, A. Polo, P. Garofalo, N. Anselmi, M. Salucci, and E. Giarola, "Evolutionary optimization applied to wireless smart lighting in energy-efficient museums," *IEEE Sensors J.*, vol. 17, no. 5, pp. 1213-1214, Mar. 2017 (DOI: 10.1109/JSEN.2017.2647827).
 - [7] F. Viani, M. Bertolli, and A. Polo, "Low-cost wireless system for agrochemical dosage reduction in precision farming" *IEEE Sensors J.*, vol. 17, no. 1, pp. 5-6, Jan. 2017 (DOI: 10.1109/JSEN.2016.2622244).
 - [8] H. Ahmadi, A. Polo, T. Moriyama, M. Salucci, and F. Viani, "Semantic wireless localization of WiFi terminals in smart buildings," *Radio Sci.*, vol. 51, no. 6, pp. 876-892, Jun. 2016 (DOI: 10.1002/2016RS006008).
 - [9] F. Viani, A. Polo, M. Donelli, and E. Giarola, "A relocable and resilient distributed measurement system for electromagnetic exposure assessment," *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 11, pp. 4595-4604, Jun. 2016 (DOI: 10.1109/JSEN.2016.2536804).
 - [10] F. Viani, "Experimental validation of a wireless system for the irrigation management in smart farming applications," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 58, no. 1, pp. 2186-2189, Sep. 2016 (DOI: 10.1002/mop.30000).
 - [11] F. Viani, "Opportunistic occupancy estimation in museums through wireless sensor networks," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 57, no. 8, pp. 1975-1977, Aug. 2015 (10.1002/mop.29239).
 - [12] F. Viani, F. Robol, A. Polo, P. Rocca, G. Oliveri, and A. Massa, "Wireless architectures for heterogeneous sensing in smart home applications - concepts and real implementations," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 11, pp. 2381-2396, Nov. 2013 (DOI: 10.1109/JPROC.2013.2266858).
-