

Accordo di Programma MSE/ENEA 2009-11

RICERCA **DI SISTEMA ELETTRICO**

Risultati del secondo anno di attività

A cura di
Marina Ronchetti

Con i contributi di

M. Sepielli, G. Abbate, M. Ciotti, P.C. Incalcaterra,
G. Grasso, E. Negrenti, A. Pizzuto, A. Cucchiario,
M. Annunziato, S. Fumagalli, C. Meloni, S. Pizzuti**APRILE 2012**

Accordo di Programma MSE-ENEA 2009-11

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO
Risultati del secondo anno di attività

A cura di *Marina Ronchetti*

con i contributi di

*M. Sepielli, G. Abbate, M. Ciotti, P.C. Incalcaterra, G. Grasso, E. Negrenti,
A. Pizzuto, A. Cucchiaro, M. Annunziato, S. Fumagalli, C. Meloni, S. Pizzuti*

2012 ENEA
Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile

Lungotevere Thaon di Revel, 76
00196 Roma

ISBN 978-88-8286-265-7



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

Accordo di Programma MSE-ENEA 2009-11

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del secondo anno di attività

a cura di

Marina Ronchetti

con i contributi di

M. Sepielli, G. Abbate, M. Ciotti, P.C. Incalcaterra, G. Grasso, E. Negrenti,
A. Pizzuto, A. Cucchiaro, M. Annunziato, S. Fumagalli, C. Meloni, S. Pizzuti

APRILE 2012

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento ai colleghi che hanno partecipato all'elaborazione della pubblicazione:

Vincenzo Cincotti
Vincenzo Gerardi
Agostino Iacobazzi
Rosa Provaroni

Presentazione.....	7
<i>GOVERNO, GESTIONE E SVILUPPO DEL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE</i>	
Fissione nucleare: metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata	9
<i>Responsabile scientifico: Massimo Sepielli</i>	
Fusione nucleare: attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER, denominate Broader Approach	29
<i>Responsabile scientifico: Aldo Pizzuto</i>	
<i>RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA</i>	
Tecnologie “smart” per l’integrazione della illuminazione pubblica con altre reti di servizi energetici e loro ottimizzazione	57
<i>Responsabile scientifico: Mauro Annunziato</i>	
Elenco documenti tecnici	119
Abbreviazioni ed acronimi.....	123

Presentazione

Il presente volume illustra i risultati delle attività svolte dall'ENEA, in collaborazione con le principali università nazionali e la società partecipata FN Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, nella seconda annualità (Piano Annuale di Realizzazione 2010) dell'Accordo di Programma 2009-2011 con il Ministero dello Sviluppo Economico sulla Ricerca di Sistema Elettrico.

La Ricerca di Sistema riguarda un insieme complesso di attività finalizzate all'innovazione del Sistema Elettrico Nazionale per migliorarne l'economicità, la sicurezza e la compatibilità ambientale ed assicurare al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico (2009-11), il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato Accordi di Programma con vari soggetti, tra cui l'ENEA.

Le attività sono finanziate attraverso un fondo (istituito presso la Cassa Conguaglio per il Settore Elettrico) alimentato dal gettito della componente A5 della tariffa di fornitura dell'energia elettrica, il cui ammontare viene periodicamente stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

La Ricerca di Sistema prevede sia attività di ricerca fondamentale sia studi di carattere sistemico e prenormativo. I risultati scientifici ottenuti sono a totale beneficio degli utenti del sistema elettrico nazionale e pertanto sono pubblici e divulgati attraverso un apposito piano di diffusione.

La seconda annualità dell'Accordo di Programma 2009-2011 comprende tre progetti di ricerca inseriti in due Aree prioritarie d'intervento del Piano Triennale della Ricerca: "Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale" e "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica".

Nella prima area sono incluse attività rivolte allo sviluppo di energia nucleare sia da fissione che da fusione. È opportuno ricordare che il Piano operativo 2010 prevede per la prima volta lo svolgimento di attività nel settore della fusione nucleare. Sono stati condotti studi e ricerche programmati all'interno dell'accordo "Broader Approach" negoziato tra Europa e Giappone, da svolgere parallelamente alla sperimentazione di ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) e finalizzate ad accelerare lo sviluppo di energia da fusione. In particolare il progetto prevede la realizzazione del magnete superconduttore di una nuova macchina Tokamak denominata JT-60SA, la progettazione e costruzione di un bersaglio per IFMIF (International Fusion Irradiation Facility) per la produzione di neutroni e lo sviluppo di materiali compositi avanzati per applicazioni ad alte temperature.

La seconda area, nella quale sono previste attività relative all'efficienza energetica nell'illuminazione pubblica, è inserito un progetto finalizzato allo sviluppo di tecnologie "smart" per l'integrazione dell'illuminazione pubblica con altre reti di servizi energetici.

Nel volume viene descritta l'attività svolta e i principali risultati conseguiti all'interno di ciascuno dei tre progetti. Maggiori informazioni possono essere acquisite dal sito web ENEA sulla Ricerca di Sistema (http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ricerca-di-sistema-elettrico), che consente di accedere alla documentazione tecnica prodotta nelle diverse annualità dell'Accordo di Programma.

Vincenzo Porphiglia
Responsabile Unità di Progetto
Ricerca di Sistema Elettrico

Fissione nucleare: metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata

L'attuale scenario internazionale dei reattori di generazione evolutiva lascia facilmente prevedere che, ancora per molti decenni, la tipologia di riferimento resterà con tutta probabilità quella dei reattori ad acqua leggera, segnatamente di tipo pressurizzato. È pertanto necessario che ricercatori ed esperti italiani approfondiscano e sviluppino le proprie competenze anzitutto relativamente a tali filiere. Tale formazione risulterà fondamentale anche in vista del salto di generazione che dovrebbe arrivare non prima della metà del secolo ma che non potrà prescindere dall'acquisizione dello stato dell'arte sulle tecnologie attualmente in operazione.

Le analisi e le verifiche eseguite nell'ambito del presente progetto sono pertanto centrate sulle tematiche che hanno portato a definire tali reattori come innovativi o evolutivi, anche alla luce delle raccomandazioni degli stakeholder che hanno contribuito allo sviluppo di nuovi criteri di sicurezza, soprattutto a seguito delle rivisitazioni rese necessarie dopo l'incidente di Fukushima.

Tra i reattori ad acqua pressurizzata (PWR, Pressurized Water Reactors), vi sono alcune filiere di probabile maggior successo, al momento in fase di progettazione e/o di costruzione in vari paesi del mondo da parte di diversi costruttori. Tali reattori rappresentano l'evoluzione tecnologica dei reattori già esistenti, a seguito della introduzione di migliorie volte essenzialmente all'ottimizzazione delle dotazioni di sicurezza e salvaguardia. Il progetto è, infatti, stato improntato prioritariamente alla forte riduzione della frequenza e dell'effetto delle conseguenze di incidenti severi sia di natura interna (es. fusione del nocciolo e relativi problemi di dispersione e raffreddamento), sia provenienti dall'esterno dell'impianto (es. impatto di agenti esterni sull'edificio di contenimento). Ciò ha portato da un lato a importanti semplificazioni d'impianto, che parallelamente consentono tempi di realizzazione più brevi, dall'altro all'introduzione di sistemi attivi e passivi di sicurezza ed emergenza di livello molto più avanzato. La riduzione dei tempi di costruzione è ottenuta anche ricorrendo a un'ingegneria che consente di realizzare parti importanti in officina con semplificazione dell'assemblaggio in situ.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il progetto, impostato inizialmente per sviluppare competenze e capacità tecniche sui reattori ad acqua leggera pressurizzata di generazione evolutiva, è stato ampliato in corso d'opera in relazione agli aspetti di sicurezza collegati all'incidente di Fukushima. Scopo finale è quello di svolgere un ruolo di supporto alle Istituzioni pubbliche, in particolare Ministero dello Sviluppo Economico e ASN (Agenzia sulla Sicurezza Nucleare), su tematiche legate alla gestione sicura e in linea con quanto sviluppato nei paesi più avanzati su ogni aspetto del ciclo nucleare: scelte tecnologiche, valutazioni di sicurezza, studi sul combustibile nucleare.

Il progetto ha comunque mantenuto la sua struttura base articolata in quattro linee di attività che prevedevano quanto descritto nel seguito.

LINEA A: COMPONENTI E SISTEMI DELL'IMPIANTO

A.1 Componenti e sistemi con funzioni di sicurezza e di gestione dell'impianto

Studio e predisposizione di test su componenti di particolare rilevanza e che debbono presentare elevati standard di affidabilità in termini di comportamento in fase di intervento, quali ad esempio valvole di non ritorno e valvole di depressurizzazione comandata ed automatica; analisi del comportamento in esercizio di nuovi componenti integrati (tubazioni realizzate in unico forgiato e simili). Le attività sono affiancate da studi approfonditi di modellistica, di simulazione di transitori di funzionamento e analisi di dati sperimentali già disponibili per la validazione dei modelli impiegati negli appositi codici di calcolo, quali ASTEC e MELCOR. Sviluppo di metodologie di qualificazione dei materiali e dei procedimenti di saldatura per componenti di centrali nucleari armonizzate agli standard internazionale (ASME, ISO) e a codici nucleari specifici (RCC-MX). Analisi termomeccanica, mediante il codice CAS3M e validazione nell'ambito di progetti europei (NESC7), dell'influenza del fenomeno WPS (Warm-PreStressing) sui materiali strutturali e sul vessel, volte a dimostrare la possibilità di estendere la lifetime del vessel rispetto ai limiti attuali (con implicazioni sulle procedure di licensing, sulla base della validazione dell'effetto WPS che comporta un incremento della resistenza a frattura fragile).

A.2 Sistemi attivi e passivi di sicurezza

Impostazione di uno studio esaustivo dei sistemi di sicurezza attivi e passivi volti a garantire sia l'integrità del nocciolo sia il raffreddamento e l'integrità del contenimento. Vengono condotti altresì studi miranti ad indagare e valutare le caratteristiche di maggior sicurezza intrinseca dei reattori di prossima costruzione. Le attività sono effettuate tramite modellazione di sistemi passivi e attivi per il raffreddamento del contenimento e per la rimozione del calore residuo.

A seguito di quanto accaduto in Giappone nella linea è stato integrato un terzo obiettivo:

A.2.1 Studio dei fenomeni osservabili a seguito di transitori di impianto estesi oltre i limiti di progetto, con particolare approfondimento per il rilascio di radionuclidi dal nocciolo al sistema di contenimento in condizioni incidentali

LINEA B: STUDI SUL COMBUSTIBILE E MATERIALI STRUTTURALI

B.1 Metodi di progettazione di combustibili ad alto burn-up per i reattori di III Generazione

Sviluppo di metodi di progettazione di combustibili ad alto burn-up per i reattori di III Generazione (UOX alto arricchimento, MOX, Inert Matrix), mirati all'analisi di prestazioni e comportamento termomeccanico in reattore.

B.2 Aspetti di back-end nel ciclo combustibile

Messa a punto di tecniche di processi di ritrattamento del combustibile esausto, al fine di minimizzare i prodotti a fine vita ad alta attività e recuperare materie prime ulteriormente sfruttabili, Vengono approfonditi i processi che attualmente sembrano maggiormente promettenti per rimpiazzare l'originale metodo PUREX; individuazione di facilities da attrezzare presso ENEA e progetto di massima delle utilities e degli interventi infrastrutturali necessari per avviare prove di ritrattamento: in particolare l'indagine viene concentrata su attrezzature sperimentali e procedure operative che permettano di lavorare in ambiente ostile (alte dosi e alta attività).

B.3 Processi nucleari innovativi

L'obiettivo prevede attività di ricerca fondamentale e sperimentazione in laboratorio su nuovi processi finalizzati alla trasmutazione degli elementi radioattivi a lunga vita. Si esamina inoltre la fattibilità per la realizzazione di nuovi rivelatori per sorgenti neutroniche pulsate anisotrope e a spettro variabile.

Gli obiettivi B.2 e B.3 sono fondamentalmente interconnessi (problematiche e tecnologie relative al ritrattamento del combustibile esausto).

LINEA C: STUDIO SULLA STRUMENTAZIONE DI NOCCILO E SIMULAZIONE

C.1 Analisi e studio di nuova strumentazione "in core"

Analisi e studio di nuova strumentazione "in core" per la determinazione fine del flusso neutronico all'interno del reattore; eventuali realizzazioni di prototipi da verificare e testare anche con utilizzo di reattori di ricerca TRIGA e TAPIRO. Vengono progettate, attraverso l'uso di codici avanzati di modellazione di nocciolo, nuove tipologie di rivelatori di neutroni ad alto flusso per reattori PWR.

C.2 Strumentazione di supervisione, controllo e protezione

Analisi delle prestazioni dei sistemi di supervisione, controllo e protezione con particolare riguardo alla loro interconnessione ai fini della garanzia di corretto funzionamento sia in fase di normale esercizio, sia in fase di intervento di emergenza. Vengono effettuati studi miranti a verificare l'assenza di interferenze negative tra i sistemi digitali di protezione e controllo, anche tenendo conto del SW utilizzato per la loro implementazione. Inoltre saranno condotte analisi sui limiti di Simulatori attuali sia ingegneristici che di addestramento a i fini di supporto alla progettazione, verifica e validazione dei sistemi digitali di controllo ed addestramento di operatori di impianto. Impiego di metodologie sistematiche e teoriche per la validazione formale delle procedure di gestione dell'impianto

C.3 Analisi dell'integrazione tra i sistemi d'impianto

Sono previste analisi mirante a valutare il comportamento integrato dei vari sistemi d'impianto. Si analizza il mutuo comportamento tra la dinamica neutronica, i circuiti termoidraulici di reattore (primario, circuiti di emergenza, ultimate heat sink, ecc.), i sistemi computerizzati di controllo e l'integrazione tra di essi. Tali analisi vengono condotte facendo riferimento ai simulatori ingegneristici attualmente disponibili a livello internazionale, ed in vista di elementi innovativi, quali interazione tra impianto e territorio, rappresentazioni in virtual reality e velocizzazione dei simulatori per realizzare sistemi di supporto operatore.

LINEA D : TECNICHE E STRUMENTI DI CALCOLO PER LA DINAMICA DI NOCCIOLIO DI UN PWR

D.1 Studio dei modelli di analisi per la dinamica spaziale di nocciolo

Valutazione dello stato dell'arte dei moduli di analisi neutronica, termoidraulica e termomeccanica e del loro accoppiamento, finalizzata alla definizione di un modello di riferimento inteso all'analisi dinamica spaziale del nocciolo di un reattore ad acqua pressurizzata. Studio dei codici esistenti utilizzabili a supporto del modello candidato all'analisi dinamica di nocciolo.

D.2 Aggiornamento dati nucleari in "tempo reale"

Analisi delle metodologie che consentono l'aggiornamento in "tempo reale" delle sezioni d'urto neutroniche in funzione dell'effetto della temperatura sull'allargamento Doppler dei picchi di risonanza delle medesime - ovvero della possibilità di ottenere set di dati nucleari appropriati in contemporanea con l'esecuzione dei codici di neutronica che ne fanno uso - in relazione ai feedback ricavabili da analisi termoidrauliche accoppiate a quelle neutroniche. Studio del possibile accoppiamento di codici di neutronica tipo Montecarlo che implementino moduli per il processamento in tempo reale delle sezioni d'urto con codici di termoidraulica di nocciolo.

In questa linea si sono aggiunte attività che hanno riguardato le "Conseguenze del terremoto Tohoku-Taiheiyou-Oki sugli impianti nucleari giapponesi, ipotesi di ricostruzione della sequenza incidentale" (Obiettivo D.1.1)

Prodotto finale delle attività del progetto è un insieme di attrezzature e prove sperimentali, programmi e piattaforme di calcolo, analisi di sistema e di sicurezza, progettazioni concettuali di sistemi e componenti d'impianto, sviluppi di tecnologie per il trattamento e lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi, studi, valutazioni di opzioni scientifiche e tecnologiche.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

Linea A. Componenti e sistemi dell'impianto

La natura delle attività che si riteneva di dover sviluppare sul tema della linea A è stata inevitabilmente influenzata dall'evento Fukushima e dalle conseguenze sulle successive scelte di politica energetica in Italia, nonché dagli orientamenti delle autorità di sicurezza a livello internazionale.

Si è quindi cercato di mantenere le attività quanto più possibile attinenti agli orientamenti dell'Accordo di Programma, includendo comunque un realistico riferimento sia alla mutata collocazione dell'energia nucleare nello scenario italiano sia alla pressante esigenza di approfondire specifici aspetti riguardanti l'interazione sisma-centrale nucleare in condizioni estreme.

Ciò ha portato a un significativo ampliamento degli scopi del programma originale della presente linea con conseguente maggior impegno dell'ENEA e dei diversi partecipanti al progetto per affrontare anche gli aspetti legati agli "stress test", nella formulazione presentata da ENSREG (European Nuclear Safety REGULATORY Group) a seguito dei quesiti posti dal Consiglio d'Europa il 25/3/2011.

Alla linea A è stato aggiunto un ulteriore obiettivo per dare adeguato spazio agli studi di simulazione di transitori di funzionamento del nocciolo e analisi dei dati sperimentali già disponibili per la validazione dei modelli impiegati in appositi codici di calcolo (ASTEC e MELCOR), specifici anche per eventi di fusione del nocciolo e quindi particolarmente attuali nell'ottica dell'evento Fukushima. Tali studi, peraltro già previsti nel programma originario, hanno pertanto avuto un risalto maggiore.

Nel seguito si riporta una descrizione sintetica dell'attività svolta, evidenziando i risultati conseguiti, con i relativi prodotti realizzati, per maggiori dettagli si rimanda ai rapporti tecnici completi disponibili sul sito web ENEA nella sezione dedicata alla Ricerca di Sistema Elettrico.

A.1 Componenti e sistemi con funzioni di sicurezza e di gestione dell'impianto

Le attività di studio e progettazione svolte nell'ambito del presente obiettivo riprendono e proseguono le attività portate a termine nell'ambito del Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2008-2009 nella Linea Progettuale 5 "Qualifica componenti".

A seguito delle decisioni del Governo in materia di energia nucleare, gli orientamenti iniziali dell'obiettivo sono stati aggiornati, anche perché la mancanza di prospettive immediate nel settore nucleare ha comportato la perdita

d'interesse dell'Industria in un possibile riadeguamento delle infrastrutture ENEA dedicate alla qualifica componenti per impiego in impianti PWR.

L'indirizzo dato alle attività ha mantenuto il concetto informatore originale, ossia studio di componenti e sistemi d'impianto, ma si sono modificati gli oggetti della ricerca, orientandoli verso studi finalizzati in generale alla sicurezza d'impianto. In sintesi:

- è stato effettuato uno studio per identificare sistemi e componenti di servizio dell'isola nucleare di un tipico reattore PWR GEN III o GEN III+ con funzioni rilevanti per la sicurezza (spegnimento nocciolo, asportazione calore residuo, iniezione ad alta pressione e altri);
- sono state analizzate le tipologie di componenti di tipo passivo, operanti ad alta pressione e temperatura e rilevanti ai fini delle funzioni di spegnimento sicuro del nocciolo e di asportazione del calore di decadimento, presenti in impianti PWR di tipo avanzato, su cui è di interesse condurre campagne sperimentali al fine di ottenere informazioni utili per la loro caratterizzazione termoidraulica. Sono stati esaminati tre progetti di diversa taglia: il reattore di grande taglia AP1000, il reattore di media taglia IRIS e il reattore di piccola taglia MASLWR, base per il reattore NUSCALE.
- infine è stata effettuata la progettazione di dettaglio di un impianto sperimentale di piccola taglia per l'esecuzione delle suddette campagne sperimentali (Figura 1), con avvio delle azioni finalizzate alla sua realizzazione; tra queste rientra anche l'adeguamento di una hall tecnologica dell'ENEA che ospita già una facility per qualifica di grandi componenti e sistemi d'impianto (tipicamente per primari BWR e PWR) e che è stata adattata anche per alloggiare piccoli impianti sperimentali. Questa azione è stata implementata con una duplice prospettiva:
 - costituire, anche con l'apporto dell'Università, un centro per il mantenimento di competenze nella termoidraulica delle alte pressioni e temperature;
 - non disperdere la capacità di qualificare in Italia componenti meccanici di rilievo, tenendo conto di un'eventuale partecipazione di Industrie nazionali ad opportunità che potrebbero essere offerte dall'Estero.

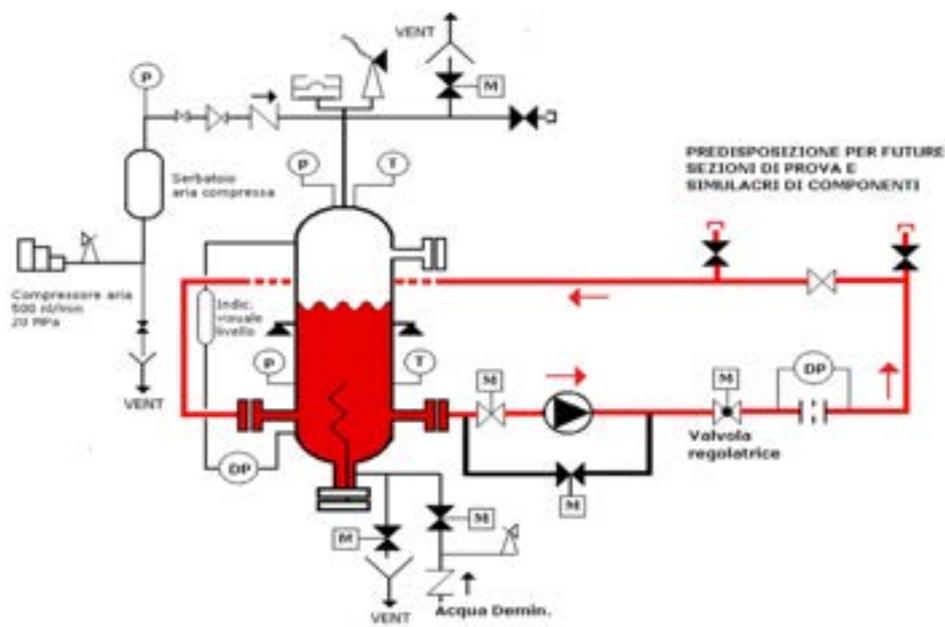


Figura 1. Schema dell'impianto sperimentale ($P_{\text{eser}} = 18 \text{ MPa}$, $T_{\text{eser}} = 365 \text{ °C}$)

A.2 Sistemi attivi e passivi di sicurezza

Si prevedeva originariamente di impostare uno studio dei sistemi di sicurezza attivi e passivi volti a garantire sia l'integrità del nocciolo sia il raffreddamento e l'integrità del contenimento, completato da un'indagine per valutare le caratteristiche di maggior sicurezza intrinseca dei reattori di prossima costruzione. L'attività prevedeva inoltre la modellazione di sistemi passivi e attivi per il raffreddamento del contenimento e per la rimozione del calore residuo.

Per le valutazioni del rilascio di radionuclidi dal nocciolo al sistema di contenimento nei reattori nucleari ad acqua leggera in condizioni incidentali e poi dal sistema di contenimento all'esterno, servono strumenti di calcolo in grado di fornire, in tempi relativamente brevi, indicazioni sullo stato dell'impianto e dell'evoluzione dell'incidente.

Attualmente non esiste un unico strumento di calcolo capace di fornire tutte le indicazioni necessarie e sufficienti per giungere a valutazioni complete di danno strutturale, di intake energetico alle persone e di impatto ambientale a fronte di situazioni incidentali, generate da eventi iniziatori a bassa e alta pressione. Ciò costringe a doversi servire di strumenti diversi, eterogenei, progettati per funzionare al meglio in ambienti di lavoro differenti, che necessitano quindi di armonizzazione e di utenti esperti. La complessità dei sistemi da valutare, a seconda delle finalità della ricerca, richiede l'uso di codici integrali, multimodulari o meccanicistici ad effetto singolo.

La struttura di calcolo è basata su un approccio fisico-matematico detto "a parametri concentrati", molto utile per avere risposte in tempi relativamente brevi pur assicurando una buona validità scientifica dei risultati. Indagini con uso di codicistica a parametri concentrati sono spesso indirizzate ad aspetti di termofluidodinamica e di trasporto del termine sorgente rilasciato in fase incidentale. Quando il dettaglio locale da analizzare richiede estrema puntualità e forte concentrazione in un'area poco estesa, ma molto importante ai fini delle decisioni da prendere, si fa ricorso ai codici "multidimensionali fluidodinamici".

Attualmente in ENEA per l'analisi e la valutazione delle conseguenze di incidenti severi negli impianti nucleari, si usano:

- Il codice integrale d'impianto MELCOR, per analisi legate a sequenze individuate a seguito di studi di PSA di livello 2 (impianto), sviluppato dal Sandia National Laboratories (USA) per conto della USNRC;
- il codice multimodulare d'impianto ASTEC, per analisi legate a sequenze individuate a seguito di studi di PSA di livello 2 (impianto), sviluppato dalle europee IRSN (Francia) e GRS (Germania), in fase di validazione dal Network of Excellence SARNET, progetto finanziato dalla UE nell'ambito del Settimo Programma Quadro EURATOM, a cui l'ENEA partecipa.

Nell'ambito di questo obiettivo ENEA e CIRTEN (Università di Bologna) hanno effettuato una dettagliata analisi, finalizzata all'identificazione dei principali parametri che giocano un ruolo fondamentale durante le fasi di rilascio e di trasporto del termine sorgente dal nocciolo al contenimento, con particolare attenzione sulla speciazione chimica dei prodotti contaminanti radioattivi, al fine di identificare i giusti percorsi di rilascio. Riuscendo ad individuare al meglio il ventaglio di composti realmente presenti nelle aree incidentate e conoscendo le loro caratteristiche chimico-fisiche, si può giungere ad una più realistica valutazione del termine sorgente. Questo fatto si traduce in una più realistica valutazione delle conseguenze incidentali e quindi in una più appropriata scelta delle azioni da attivare in fase di gestione incidentale e postincidentale. Nel documento completo che espone le attività svolte (disponibile sul sito web ENEA dedicato alla Ricerca di Sistema Elettrico) si descrivono le principali caratteristiche e capacità di calcolo del codice integrale a parametri concentrati MELCOR e le caratteristiche dei modelli in esso utilizzati per le valutazioni dei principali parametri termofluidodinamici e della dinamica del trasporto, diffusione e deposizione dei materiali componenti il termine sorgente (prodotti di fissione, aerosol, particolati e residui strutturali). Si riportano inoltre alcune considerazioni sull'evoluzione del codice verso una struttura più avanzata e potente, implementata nella più recente release.

Linea B. Studi sul combustibile e materiali nucleari

B.1 Combustibili ad alto burn-up in reattori di III Generazione e ritrattamento mediante pirometallurgia

Combustibili ad alto burn-up per reattori di III Generazione

Il burn-up (definito come l'energia termica prodotta mediante fissione per unità di massa di combustibile nucleare) è stato via via aumentato per diminuire i costi del ciclo del combustibile ed i volumi di combustibile utilizzato. Nei reattori di III Generazione i valori di burn-up sono dell'ordine di 60-70 GWd/t.

I reattori di III Generazione impiegano come combustibile ossido di uranio (UO₂) a diverso grado di arricchimento percentuale o combustibile MOX, in granuli o pellets, ottenuti da un miscuglio di polveri di biossidi di uranio e plutonio in specifici rapporti.

L'aumento del burn-up offre anche il vantaggio di diminuire il pericolo di proliferazione nucleare, poiché il plutonio prodotto nel reattore è in gran parte consumato durante il funzionamento del reattore stesso e quello che rimane nel combustibile è troppo ricco dell'isotopo ²⁴⁰Pu e successivi per poter essere usato direttamente per la fabbricazione di ordigni nucleari.

E' tuttavia necessario caratterizzare bene il comportamento di combustibili ad alto burn-up, in condizioni di funzionamento normale, ma soprattutto in condizioni di incidente.

Per gli incidenti base di progetto è in corso a livello internazionale la verifica delle prescrizioni normative per un eventuale adeguamento. Per gli incidenti non previsti in fase di progetto sono in corso programmi internazionali di ricerca basati su esperimenti e su sviluppo-validazione di codici di calcolo in grado di prevedere le prestazioni del combustibile, in particolare per valutare le condizioni di danneggiamento dello stesso e la rottura delle guaine in incidenti tipo RIA (Reactivity Initiated Accident), LOCA (Loss of Coolant Accident), transitori anticipati in assenza di scram nei BWR, ecc.. Per migliorare i modelli sarà necessario disporre di dati nucleari misurati più accuratamente. Un fenomeno del quale sarà necessario approfondire la comprensione è il rilascio di gas di fissione nel combustibile irraggiato.

Riprocessamento del combustibile nucleare mediante pirometallurgia

Il recupero degli attinidi dal combustibile nucleare irraggiato, come pure il riciclo di questi elementi nei reattori di potenza, è da sempre un obiettivo della ricerca nel campo nucleare.

Le prime tecnologie di riprocessamento si basavano su processi in soluzione acquosa per il recupero di plutonio da impiegare in ordigni nucleari. Il processo PUREX (Plutonium Uranium Extraction), sviluppato all'inizio degli anni '50, è stato usato negli Stati Uniti per scopi sia civili che militari.

Il programma americano IFR (Integral Fast Reactor) rappresenta oggi un sistema innovativo integrato per il riciclaggio del combustibile esaurito e si basa su un procedimento combinato di pirometallurgia e di elettrochimica ("pyroprocessing"). Obiettivo nello sviluppo di questa tecnologia è stato quello di mettere a punto un processo economicamente conveniente, in grado di contribuire alla non proliferazione di armamenti nucleari, e dotato di un'elevata operatività, associata ad una bassa produzione di rifiuti. Il recupero di radionuclidi a lunga vita viene incontro, per quanto possibile, all'esigenza di evitare lo smaltimento dei rifiuti ad alta attività in strati geologici profondi, che sta incontrando la crescente opposizione dell'opinione pubblica.

La possibilità di applicare la pirometallurgia al riprocessamento di diverse tipologie di combustibile nucleare (metallico, ad ossidi misti, a nitruri, ad alto "burn-up", ecc.) consente il recupero dei radionuclidi a lunga vita ed il loro riciclo in diversi tipi di reattori ai fini della trasmutazione. Inoltre, con il venir meno dei requisiti di estrema purezza per il combustibile nucleare, il recupero degli attinidi minori (nettunio, americio, curio) avviene simultaneamente al plutonio, grazie alle proprietà termodinamiche del sistema di sali fusi in cui opera l'elettrorefinatore.

Le caratteristiche di questi ultimi offrono altri importanti vantaggi: l'elevata stabilità alle radiazioni consente il riprocessamento di combustibile esaurito ad elevata attività (combustibile con un tempo di raffreddamento breve), senza che questo comporti un aumento dei rifiuti prodotti; poiché il sale fuso non è un moderatore di neutroni (a differenza dell'acqua), può essere trattata, al confronto, una grande quantità di materiale fissile, il che si ripercuote sulla compattezza ed economicità degli apparati sperimentali utilizzati. Inoltre è ridotto il numero degli stadi di conversione chimica, grazie all'eliminazione del ciclo solido-soluzione acquosa-solido, necessario nei processi in fase acquosa, ed i rifiuti con prodotti di fissione si presentano in forma secca e concentrata, quindi più facilmente gestibili. Sotto il termine "processo pirometallurgico" è compresa una serie di operazioni finalizzate al recupero di attinidi dal combustibile esaurito, ed al loro riciclo nel reattore come materiali per nuovi elementi di combustibile. Si tratta di un processo a più stadi, che inizia con lo smantellamento ed il sezionamento degli elementi di combustibile irraggiato, i quali vengono ridotti a dimensioni di circa 6-7 cm, per essere poi caricati in un cestello d'acciaio, che viene quindi immerso in un elettrorefinatore. Quest'ultimo ha il compito di separare gli attinidi dai prodotti di fissione presenti nel combustibile esaurito (Figura 3). Trattasi dello stesso processo di elettrorefinazione impiegato per molti anni nell'industria mineraria: un metallo impuro, che costituisce l'anodo, viene depositato al catodo in condizioni di maggiore purezza mediante trasporto elettrico attraverso un adatto elettrolita. Nel caso in questione, uranio puro è raccolto ad un catodo solido, mentre una

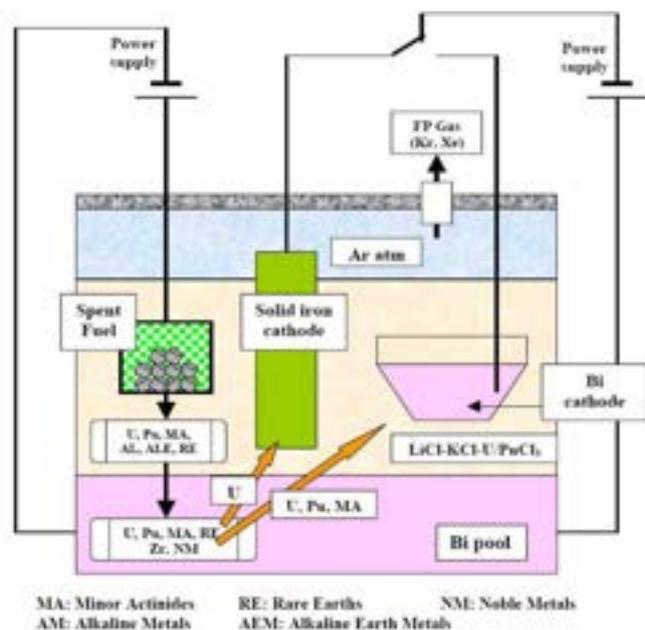


Figura 3. Diagramma schematico del processo di elettrorefinazione

miscela di plutonio, americio, nettunio, curio, uranio, e alcuni prodotti di fissione delle terre rare vanno a depositarsi ad un catodo di cadmio (o bismuto) liquido, sospeso nell'elettrolita salino (miscela eutettica cloruro di litio - cloruro di potassio). I rimanenti prodotti di fissione si raccolgono nel sale e nello strato di cadmio sottostante il sale stesso. Il sistema opera alla temperatura di 500 °C.

I depositi catodici vengono recuperati e processati in una fase successiva, allo scopo di realizzare nuovi elementi di combustibile. Il processo genera rifiuti gassosi (^3H , He, Kr), rifiuti metallici (metalli nobili recuperati dalla distillazione del cadmio), e rifiuti salini (essenzialmente metalli alcalini, alcalino-terrosi e terre rare rimaste nell'elettrolita salino).

Il processo pirometallurgico, descritto genericamente per il combustibile metallico, può essere applicato a vari tipi di combustibile fra cui i combustibili previsti per i reattori di IV generazione (UO_2 , MOX, a carburi, a nitruri, ecc.), e rappresenta l'unica effettiva possibilità di trattamento, non essendo applicabili in questi casi i più comuni e collaudati metodi di idrometallurgia.

B.2 - B.3 Processi di ritrattamento del combustibile esausto, tecnologie di separazione e recupero di materie prime ulteriormente utilizzabili, ricerca sperimentale su nuovi processi per la trasmutazione di elementi radioattivi a lunga vita

Per quanto riguarda gli aspetti di back-end nel ciclo combustibile, sono stati condotti studi sui processi di ritrattamento del combustibile esausto, mirati alla minimizzazione dei prodotti ad alta attività e al recupero di materie prime ulteriormente sfruttabili.

Il riprocessamento (o ritrattamento) del combustibile esausto è un processo atto a recuperare il materiale nucleare pregiato (uranio e plutonio) che può essere riutilizzato nella fabbricazione del combustibile. L'idea di riprocessare il combustibile scaricato dai reattori nucleari nasce dalla considerazione che questo contiene ancora una quantità di uranio sotto forma di ^{235}U , che, una volta separato, potrà essere nuovamente utilizzato come combustibile. Inoltre il riprocessamento riduce la quantità di materiale radioattivo da stoccare in depositi geologici. Considerato che nel panorama internazionale c'è una forte spinta verso il nucleare di quarta generazione, che oltre ad utilizzare insieme all'uranio 235 anche il plutonio e gli attinidi minori, tende ad un ciclo chiuso del combustibile, un approccio serio e sistematico al tema del riprocessamento è necessario e non procrastinabile. Nell'ambito di questa attività sono state analizzate le principali metodologie di riprocessamento del combustibile al fine di individuare i processi più promettenti per la situazione italiana.

I processi di ritrattamento possono dividersi in due grandi categorie:

- processi per via umida;
- processi per via secca.

Alla prima categoria appartengono tutti i processi che comportano una solubilizzazione del combustibile irraggiato in soluzioni acquose di acidi minerali, seguita da una separazione selettiva dei diversi componenti.

I processi per via umida analizzati sono elencati di seguito:

- metodo PUREX (Plutonium URanium EXtraction) è un processo tecnologico di recupero di uranio e plutonio dal combustibile nucleare esausto basato sull'estrazione liquido-liquido;
- metodo UREX (URanium EXtraction) è una versione modificata del processo PUREX che impedisce il recupero del plutonio ai fini di non proliferazione;
- metodo TRUEX (TRans Uranium EXtraction), sviluppato in USA, estrae sali di attinidi e lantanidi con una buona efficienza a partire dai rifiuti ad attività elevata;
- metodo DIAMEX (DIAMide EXtraction), sviluppato in Francia, estrae sali di attinidi e lantanidi dai rifiuti, con una buona efficienza senza generare a sua volta rifiuti;
- metodo SANEX (Selective ActiNide EXtraction) che opera una separazione selettiva dei radionuclidi a lunga vita, (Americio e Curio);
- metodo UNEX (UNiversal EXtraction) ideato per rimuovere la maggior parte dei radionuclidi problematici (Sr, Cs ed MA) dalle soluzioni estrattive raffinate in uscita dagli impianti di estrazione dell'uranio e plutonio da combustibile esausto;
- un processo elettrochimico in soluzione alcalina sulla dissoluzione del combustibile esausto sotto forma di pellet di UO_2 in una soluzione acquosa di carbonato.

I processi per via secca sono stati messi a punto negli Stati Uniti e possono essere divisi in due grandi categorie:

- processi pirometallurgici, nei quali il combustibile è estratto selettivamente da fasi liquide metalliche e saline;

- processi per volatilizzazione, nei quali il combustibile è ritrattato mediante trasformazione dei componenti in composti volatili.

Per maggiori dettagli sui singoli processi si rimanda al rapporto tecnico completo disponibile sul sito web ENEA.

Considerato il panorama energetico nazionale e la scelta di rinuncia agli attuali sistemi di produzione di energia elettrica da fonte nucleare, è ragionevole supporre che il ritorno al nucleare sarà possibile solo quando saranno disponibili i reattori di IV Generazione. Il presente studio è arrivato alla conclusione che per la situazione italiana la pirometallurgia è la strada più idonea per il riprocessamento di combustibile esausto proveniente dai reattori di prossima generazione, soddisfacendo i requisiti di non proliferazione e di minimizzazione dei rifiuti.

Inoltre, al fine di ridurre la quantità dei rifiuti nucleari a lunga vita, è in corso un'attività sperimentale innovativa rivolta al trattamento di sostanze radioattive mediante (Figura 4). Lo scopo della ricerca è quello di studiare gli effetti della pressione ultrasonica sui tempi di emivita di diversi radionuclidi e capire se e in che modo questo trattamento possa essere utilizzato, in seguito, per trattare direttamente elementi di combustibile esausto. Sono state effettuate alcune prove sperimentali nel tentativo di replicare i risultati ottenuti in letteratura.



Figura 4. Dispositivo per lo studio degli effetti della pressione ultrasonica

Linea C. Studi sulla strumentazione di nocciolo e simulazione

Le attività hanno riguardato due aspetti specifici: la strumentazione in core e la strumentazione di supervisione, controllo e protezione dell'impianto.

C.1 Analisi e studio di nuova strumentazione "in core" per la determinazione fine del flusso neutronico all'interno del reattore

I sistemi di strumentazione e controllo di un impianto nucleare per la produzione di energia possiedono tre ruoli fondamentali. Il primo è quello di costituire gli "occhi" e le "orecchie" dell'operatore. Se accuratamente progettati e realizzati forniscono aderenti ed appropriate informazioni e consentono di prendere decisioni ed adottare contromisure efficaci a fronte di normali ed anomale condizioni operative. Sono quindi, con gli operatori, elementi essenziali per una conduzione dell'impianto sicura ed efficiente. Secondariamente, durante le condizioni operative "normali", operano il controllo dell'impianto e dei suoi ausiliari consentendo agli operatori di dedicarsi all'osservazione del comportamento dell'impianto e, se richieste, operare rapidamente le necessarie azioni correttive. Il terzo aspetto è legato alla funzione di protezione dell'impianto da possibili conseguenze provenienti da errori umani o del sistema automatico di controllo stesso. In condizioni anomale costituiscono la barriera di protezione dell'impianto e dell'ambiente.

I requisiti dei sistemi di protezione e controllo di un impianto nucleare sono diversi, generalmente più complessi e stringenti, di quelli di un impianto convenzionale. Le principali ragioni sono:

- la disponibilità di un impianto nucleare è estremamente importante grazie agli elevati costi associati. Assicurare il buon funzionamento dell'impianto è strettamente dipendente dalla qualità delle misure dei parametri e del loro controllo. Argomenti simili sono anche riconducibili alla necessità di estrarre, in sicurezza, la massima potenza possibile;
- poiché il reattore è pressoché inaccessibile durante la conduzione, il suo stato e lo stato di tutti i sottosistemi, devono essere riportati in sala controllo e da là gestiti;
- per assicurare, quando richiesto, uno spegnimento automatico sicuro dell'impianto è necessario disporre di sistemi di sicurezza ridondanti ed altamente affidabili.

Nonostante l'importanza dei sistemi di controllo nella gestione sicura ed efficiente degli impianti, essi giocano un ruolo limitato nella scelta del tipo di reattore e del sistema convenzionale associato. Tale scelta è generalmente guidata da altri criteri. E' anche vero però che tale limitato impatto non ha riscontro nelle fasi successive di realizzazione ed operazione, nelle quali le scelte progettuali assumono notevole importanza.

In tal senso la realizzazione del sistema di controllo e protezione, e della strumentazione in genere, risulta pervasivo e presente in molte funzioni critiche di impianto quali procedure operative, sistemi di processo, fisica

sanitaria, controllo delle radiazioni e, naturalmente, la “nuclear safety” che rappresenta una delle motivazioni principali di tale studio.

Sono stati individuati due piani di analisi: uno è dedicato all’approfondimento dei criteri generali utilizzati nella progettazione della strumentazione di impianto, e in particolare quella interna al nocciolo, delle due principali filiere attualmente presenti sul panorama industriale, il francese EPR e l’americano AP1000, che rappresentano anche le rispettive esemplificazioni dei due moderni approcci alla sicurezza, quello attivo ed il passivo. Il secondo riporta i primi risultati di uno studio metodologico che affronta uno dei problemi più delicati e critici ai fini della sicurezza rappresentato dalla ricostruzione delle mappe di potenza all’interno del nocciolo ed in particolare l’individuazione del punto a massima potenza lineare. Sono quindi stati realizzati, in collaborazione con il CIRTEN tramite l’Università degli Studi di Roma “Sapienza” due studi.

Nel primo lavoro vengono descritte le problematiche inerenti la strumentazione interna al nocciolo (in-core) di reattori ad acqua leggera nelle due filiere più rilevanti attualmente presenti nel mercato della produzione di energia elettrica da nucleare: il francese EPR e lo statunitense AP1000. Nella prima parte in particolare viene esaminata la strumentazione nel contesto più ampio della “safety” nei due approcci dei sistemi di sicurezza di tipo “attivo” e “passivo”. Oltre agli aspetti funzionali vengono analizzati anche quelli tecnologici e costruttivi con un particolare accento alle misure di flusso neutronico effettuate dagli SPND (Self Powered Neutron Detectors) e dagli Aeroballs che rappresentano un’ampia classe di dispositivi largamente usati all’interno dei noccioli di reattori ad acqua. Sono inoltre stati contestualizzati e descritte alcune esperienze condotte su altre filiere (il sistema russo VVER-440) che hanno fornito importanti apporti allo sviluppo della tecnologia relativa alla strumentazione ed al suo impiego.

Una seconda fase del lavoro ha analizzato alcuni criteri di progetto la cui applicazione rende tali sistemi perfettamente integrati ed integranti i moderni approcci alla sicurezza dei reattori nucleari.

Nel secondo studio viene analizzato un metodo mediante il quale l’informazione ottenuta in tempo reale attraverso un sistema di dispositivi di misura neutronica SPND (collettroni) inseriti nel nocciolo di un reattore nucleare di potenza (in particolare, un PWR) consente la rilevazione in tempo reale di un eventuale punto caldo durante l’operazione dell’impianto. Il metodo si basa sulle tecniche perturbative GPT (Generalized Perturbation Methods), per il calcolo dei coefficienti di sensibilità delle quantità integrali misurate con i collettroni rispetto ai parametri considerati per rappresentare il punto caldo, e nell’uso di tecniche di inferenza statistica che tengono conto degli errori associati alle misure. La metodologia consente anche di valutare l’effetto sulla qualità del sistema di rilevazione dovuto al possibile degradarsi dei dispositivi di misura durante il ciclo di vita del nocciolo. Questa informazione può essere utilizzata per poter predisporre una strategia di protezione adeguata in termini di qualità, numero e distribuzione dei collettroni.

La metodologia è stata implementata con il codice di calcolo neutronico ERANOS 2.1 nella modalità di calcolo GPT. I risultati dell’esercizio di simulazione prendendo in considerazione un reattore PWR di piccole dimensioni (MARS) hanno dimostrato la potenzialità della metodologia proposta.

C.2 Strumentazione di supervisione, controllo e protezione

Facendo seguito alle attività svolte nel PAR 2008-09, ENEA ha deciso di concentrare le analisi delle prestazioni dei sistemi computerizzati di supervisione, controllo e protezione su due particolari sotto-sistemi di un PWR. La scelta è caduta sul sistema di controllo del pressurizzatore e dello “steam dump system” poiché chiaramente interconnessi durante alcuni transitori operazionali. Questo lavoro è stato oggetto dell’attività condotta dal Gruppo di San Piero a Grado dell’Università di Pisa-CIRTEN.

Dopo aver effettuato uno studio dello stato dell’arte dei simulatori ingegneristici esistenti, ENEA ha proceduto concretamente alla realizzazione dei primi step per la reintroduzione del simulatore ingegneristico effettuando:

- acquisti di hardware e licenze software di codici di sistema (RELAP5-3D[®], RELAP/SCDAPSIM, HELIOS-2);
- sviluppo di un modello generico “PWR-ENEA” per il codice di sistema termoidraulico RELAP5-3D[®];
- installazione e testing del software sviluppato dall’Università di Pisa nel sistema “PWR-ENEA”.

Test mirati e benchmark hanno evidenziato la necessità di una modellazione dettagliata del sistema di controllo, cosa che può essere effettuata soltanto attraverso l’utilizzo di apposite routine esterne validate ed accoppiate con il codice di sistema. Il lavoro svolto all’interno del presente obiettivo ha consentito di mettere in luce le problematiche relative alla modellistica dettagliata di un sistema di controllo di un PWR e di evidenziare l’effetto di alcune semplificazioni sulle logiche del sistema di controllo sulla simulazione ingegneristica.

Si è inoltre provveduto all’installazione di apposito software atto alla simulazione nucleare presso il laboratorio SIMING dell’Unità Tecnica Tecnologie e Impianti per la Fissione (Centro ENEA Casaccia).

Le attività future andranno ad investigare altri sistemi di controllo di un sistema PWR e le problematiche relative alla loro implementazione.

C.3 Analisi dell'integrazione tra i sistemi d'impianto

L'evoluzione dei reattori nucleari negli ultimi anni è stata improntata al miglioramento delle prestazioni e dei costi unitari per kilowattora prodotto ma soprattutto al potenziamento dei sistemi di sicurezza (attivi e passivi) in grado di garantire un maggior grado di affidabilità anche in presenza di situazioni incidentali rilevanti. Tale approccio, che ha guidato la progettazione di reattori di cosiddetta terza generazione evolutiva (Gen III/III+), risulta quanto mai attuale alla luce del recente incidente nucleare di Fukushima, tanto da ispirare le future linee guida sulla sicurezza che emergeranno a valle della riflessione sulle "lessons learned" dell'incidente giapponese condotta a vari livelli in ambito internazionale.

Nell'ottica di un progetto orientato all'ottimizzazione della sicurezza d'impianto, accanto all'impiego sempre più rilevante dei sistemi passivi, un ruolo di primo piano è senz'altro giocato dall'insieme dei sistemi automatici che consentono le funzioni di supervisione, controllo e protezione, fornendo a operatori e tecnici, istante per istante, le informazioni complessive e di dettaglio sullo stato di funzionamento dell'impianto nucleare e intervenendo nei casi di malfunzionamento o guasto secondo le procedure di sicurezza previste.

Tali sistemi di supervisione, controllo e protezione, oltre a essere vitali per la sicurezza dell'impianto rappresentano una risorsa fondamentale a garanzia delle prestazioni dell'operatore, offrendo a quest'ultimo gli strumenti per ottimizzare il numero e i tempi dei suoi interventi in condizioni di funzionamento normale, e a protezione dello stesso, intervenendo in modo automatico a fronte di situazioni anomale o, in caso di errore umano, annullando o riducendo drasticamente i rischi per l'impianto e per l'ambiente circostante.

Il progetto generale dei sistemi di controllo e della componentistica associata deve dunque soddisfare contemporaneamente i requisiti imposti dalle specifiche di processo, di sicurezza e di operatività. Tipicamente i sistemi di controllo ricadono nella categoria più ampia dell'I&C (Instrumentation and Control systems), la quale comprende dispositivi ed apparecchiature elettriche ed elettroniche come sensori e trasduttori (che trasformano i segnali rilevati in segnali elettrici), controllori programmabili (che processano tali segnali e guidano gli attuatori) e sistemi di supervisione (pannelli di controllo, allarmi, sistemi avanzati di visione, sistemi di supporto alle decisioni).

Tali sistemi, sulla base dei dati rilevati e misurati sono in grado di fornire comandi automatici ai sistemi d'impianto tali da garantire che i parametri del processo controllato siano mantenuti stabili all'interno dell'intervallo di sicurezza o di attuare azioni di protezione per ricondurli in detto intervallo.

Normalmente, il controllo dell'operatore è assicurato dalla centralizzazione delle informazioni in sala di controllo principale e nelle sale di controllo satelliti.

Ogni sottosistema I&C è tipicamente caratterizzato sulla base delle sue funzioni e del suo ruolo in termini di sicurezza e operatività. Normalmente, si impiega una classificazione in livelli o classi a seconda della rilevanza del sistema ai fini della sicurezza. Il livello 0 è quello di interfaccia con l'impianto e comprende sensori e dispositivi in grado di fornire dati provenienti da misure e processabili per il controllo, la sorveglianza e la protezione degli operatori in sala controllo. Il livello 1 è quello di automazione e coinvolge tutti quei dispositivi e sottosistemi che garantiscono l'attuazione dei comandi nei confronti dei sistemi d'impianto (reattore, pressurizzatore, generatore di vapore, e così via). Il livello 2, infine, comprende le funzioni di supervisione e monitoraggio e si avvale di dispositivi come workstation, schermi, palmari e così via per garantire all'operatore la migliore efficacia e il minor tempo di risposta. Tale livello, detto anche Man-Machine Interface (MMI), si occupa anche dell'interfaccia tra i vari livelli.

Poiché, dunque, i reattori evolutivi di terza generazione nascono prevalentemente per rispondere all'esigenza di incrementarne la sicurezza intrinseca, è quanto mai opportuno uno studio che abbia come obiettivo quello di fornire una conoscenza ragionata dei sistemi di controllo implementati dalle filiere oggi in commercio o in esercizio.

A partire da tale studio sarà poi possibile individuare i principali controllori disponibili per applicazioni nucleari, realizzare una modellazione del loro comportamento in condizioni dinamiche, effettuare una simulazione della risposta a sollecitazioni in funzionamento normale e incidentale e sulla base dei risultati ottenuti ricavare informazioni utili sulle performance operative e di sicurezza di tali controllori.

Il lavoro svolto, oltre a fornire indicazioni indipendenti sulle prestazioni dei controllori oggi disponibili, può essere visto come un primo, importante passo nello sviluppo di un prototipo di simulatore ingegneristico in grado di simulare impianti evolutivi di terza generazione sia nelle condizioni di normale funzionamento sia in condizioni incidentali. La realizzazione di un tale simulatore, data la complessità legata al suo sviluppo e alla sua validazione,

rappresenta necessariamente un progetto di lunga durata, che coinvolge specialisti di vari settori e di varia provenienza (enti di ricerca, università, industria) ma che una volta completato, potrà fornire fondamentali contributi alle valutazioni e analisi di sicurezza e all'addestramento di tecnici e ricercatori su impianti attualmente in operazione.

In tale attività sono stati sviluppati un insieme di moduli software in grado di simulare separatamente i vari controllori implementati e di fornire come output l'andamento nel tempo delle grandezze fisiche controllate (pressione, temperatura,...). L'ambiente di sviluppo scelto è il Simulink di MATLAB, grazie alle sue proprietà di piattaforma "multi-scopo" ideale per la progettazione e la simulazione dei sistemi di controllo e ambiente aperto all'integrazione con altri linguaggi di programmazione ad alto livello come il linguaggio C/C++ e il FORTRAN o con codici di sistema di ambito prettamente nucleare, come per esempio RELAP5, con i quali poter realizzare una piattaforma di simulazione completa dei sistemi di supervisione, controllo e protezione di un impianto nucleare di generazione avanzata.

Inoltre, in virtù della modularità dello sviluppo, il sistema si presta ad un processo di espansione funzionale continua, con aggiunta di moduli più complessi o più raffinati via via che il progetto progredirà.

L'ambiente di simulazione così sviluppato è stato fornito in versione di prototipo ad ENEA, per impiego come banco di prova per lo sviluppo ed il test di sistemi di controllo per reattori nucleari ad acqua in pressione di generazione evolutiva.

Linea D. Tecniche e strumenti di calcolo per la dinamica di nocciolo di un PWR

D.1 Studio dei modelli di analisi per la dinamica spaziale di nocciolo

Le attività di studio svolte nell'ambito dell'obiettivo D.1 si affiancano a quelle portate a termine nell'ambito del precedente Piano Annuale di Realizzazione (2008-2009) dalla Linea Progettuale 3 relativa ai "Reattori di IV generazione", pur a fronte di inevitabili differenze di spettro neutronico e di refrigerante, si riconosce infatti la possibilità di una sinergia metodologica nello studio delle tecniche di accoppiamento tra moduli di neutronica, termoidraulica e termomeccanica impiegati nelle analisi di reattori refrigerati ad acqua e dei reattori di IV generazione refrigerati a metallo liquido.

Lo studio è stato pertanto focalizzato non solo su una disamina dei codici che rappresentano lo "stato dell'arte" nelle simulazioni neutroniche, termoidrauliche e termomeccaniche dei reattori ad acqua, ma anche su una più attenta analisi delle differenze metodologiche richieste per la corretta simulazione del trasporto di neutroni in un sistema caratterizzato da uno spettro energetico termico, proprio dei reattori ad acqua, rispetto a quello veloce dei reattori oggetto dell'affine studio condotto nel precedente PAR.

In dettaglio.

- è stato effettuato uno studio dei modelli e dei metodi numerici richiesti per la simulazione delle peculiari fenomenologie di trasporto neutronico proprie di un reattore termico, comparandone le prestazioni sia in termini di fedeltà di simulazione che di dispendio di risorse di calcolo;
- sono stati analizzati i principali moduli di simulazione neutronica, termoidraulica e termomeccanica comunemente usati in tutto il mondo, avvalendosi dell'esperienza maturata sullo studio dei reattori commerciali in esercizio, confrontando, anche in questo caso, le performance numeriche di simulazione di tali moduli;
- è stata effettuata una valutazione generale della versatilità di tali strumenti ad un loro mutuo accoppiamento, sia intimo, a livello di codice sorgente, sia esterno, appoggiandosi a routine da crearsi ad hoc per lo scambio di informazioni tra file di input e di output dei moduli stessi.

Nel rapporto "Studio di fattibilità per lo sviluppo di un modello multi-fisica (neutronica, termoidraulica e termomeccanica) di dinamica spaziale di nocciolo: rapporto di analisi della codicistica esistente a supporto dello sviluppo di uno strumento di dinamica spaziale di nocciolo", emesso congiuntamente da ENEA e CIRTEN, si analizza la codicistica neutronica, termoidraulica e termomeccanica esistente, impiegata per la simulazione di reattori ad acqua, e le pregresse esperienze di accoppiamento tra tali codici per studiare la fattibilità di un nuovo strumento di analisi multifisica 3D della dinamica di un reattore ad acqua. L'obiettivo è quello di impostare il lavoro che consentirà ad ENEA di dotarsi di uno strumento finalizzato alle analisi di sicurezza dei reattori delle presenti generazioni. Per questo motivo tale strumento dovrà racchiudere lo stato dell'arte dei modelli di analisi e delle tecniche di simulazione ad oggi disponibili - ferma restando la loro qualifica a garanzia della validazione dello strumento finale. Al termine della disamina degli strumenti disponibili sul panorama internazionale, sono identificate le linee guida per lo sviluppo del codice di dinamica.

D.1.1 Conseguenze del terremoto Tohoku-Taiheiyou-Oki sugli impianti nucleari giapponesi, ipotesi di ricostruzione della sequenza incidentale

L'evento occorso agli impianti della centrale di Fukushima-Dai-ichi ha posto in evidenza la necessità di analizzare a fondo i fenomeni che hanno determinato l'incidente, così da individuare ulteriori necessità di modellazione che consentano allo strumento di analisi dinamica oggetto dell'Obiettivo D.1 di simulare, tra i transitori che esulano dalle normali condizioni operative di un reattore, anche scenari analoghi a quello occorso agli impianti di Fukushima.

L'11 marzo 2011 l'esercizio di 14 dei 54 reattori nucleari giapponesi - quelli installati su siti individuati sulla costa che si affaccia sull'Oceano Pacifico - è stato automaticamente interrotto in risposta al sisma Tohoku-Taiheiyou-Oki, in accordo con i criteri di sicurezza dettati in materia di eventi sismici. Durante la gestione della risposta di questi impianti allo spegnimento, le 6 unità della centrale di Fukushima-Dai-ichi sono andate incontro ad una sequenza incidentale dovuta alle conseguenze dello tsunami abbattutosi sulle coste delle province nord-orientali del Paese, determinando una condizione di emergenza presso tale sito.

Lo studio eseguito ha ricostruito la possibile sequenza incidentale avvenuta presso le unità 1, 2, 3 e 4 della centrale nucleare di Fukushima-Dai-ichi. In Figura 5 sono mostrate due immagini della centrale di Fukushima-Dai-ichi prima e dopo lo tsunami, mentre in Figura 6 sono riportate viste aeree di dettaglio, per meglio comprendere l'impatto dello tsunami sull'integrità delle strutture antistanti l'impianto.



Figura 5. Condizioni del sito prima e dopo lo tsunami



Figura 6. Immagini del sito subito dopo lo tsunami: riflusso dell'acqua dopo l'inondazione (sinistra) e dettagli delle strutture antistanti al complesso danneggiate dalle onde (destra)

Sulla base dell'analisi delle sequenze incidentali ipotizzate è stato possibile trarre alcune considerazioni preliminari in merito all'evento in sé ed alla gestione dell'emergenza:

- le strutture dei diversi reattori, progettate negli anni '60 e oggetto di adeguamenti successivi, hanno mostrato un'ottima capacità di resistere tanto alle azioni sismiche quanto a quelle dovute allo tsunami, entrambe ampiamente al di sopra dei valori di progetto;
- i sistemi attivi di sicurezza, concepiti senza applicare pienamente la filosofia di progettazione attuale - basata sui concetti di ridondanza e diversificazione - hanno presentato, a fronte di un evento esterno, una "common failure mode" (indisponibilità dei generatori diesel di emergenza) che li ha messi tutti fuori servizio;

- i pochi sistemi passivi, e la loro limitata capacità, hanno messo in evidenza il ruolo fondamentale del grace time d'impianto, anche solo per consentire una gestione più semplice ed efficace dell'emergenza;
- pur a fronte della peggiore evenienza possibile per questa tipologia di reattori (il blackout completo dell'impianto), e nonostante tutte le difficoltà ed i limitati strumenti rimasti a disposizione a causa delle condizioni in cui versava il sito stesso, la gestione dell'emergenza da parte dei tecnici della TEPCO è stata la più appropriata ed efficace possibile, perfettamente in linea con le procedure di gestione dell'incidente definite dalla NISA ed implementate dalla stessa TEPCO.

D.2 Effetto di un riflettore sulla risposta dei rivelatori "ex-core"

Lo studio dettagliato dell'effetto di un pesante riflettore neutronico sulla risposta dei rivelatori posti all'esterno del nocciolo di un tipico reattore ad acqua pressurizzata di grossa taglia di ultima generazione (Gen III+) consente di definire l'affidabilità che può essere riconosciuta a tali rivelatori, dunque la loro utilizzabilità durante transitori che implicano escursioni di potenza a livelli sufficientemente bassi da inficiare la risposta dei rivelatori stessi.

Avvalendosi di dati d'impianto forniti direttamente dai costruttori di un simile reattore, è stato pertanto modellato, per mezzo di codici Monte Carlo, il nocciolo e tutte le strutture che circondano questo, e che possano influenzare la fluenza neutronica ai rivelatori oggetto dell'indagine.

Dopo una verifica preliminare del modello, sono infine stati ricavati i dati di flusso presso i rivelatori - ergo la risposta di questi - in funzione del flusso neutronico presente in core, facendo ricorso ad opportune tecniche di riduzione della varianza, opportunamente incluse nella sorgente del codice MCNP-5.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

CIRTEN - Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare

L'impegno del Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica (CIRTEN) per lo sviluppo del programma di ricerca concordato e coordinato con quello dell'ENEA, comprende attività svolte presso le seguenti Università consorziate:

1. Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale;
2. Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia;
3. Università di Pisa, Dipartimento di ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione e Gruppo Ricerche Nucleari San Piero a Grado;
4. Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica e Energetica;
5. Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica.

Fermo restando che il lavoro dei soggetti esterni è già incluso nel capitolo precedente in questa sezione si descriveranno le attività svolte dalle suddette Università nell'ambito degli obiettivi delle singole linee.

Linea A. Componenti e sistemi dell'impianto

- *Componenti e sistemi con funzioni di sicurezza e di gestione dell'impianto (Università di Roma La Sapienza, in collaborazione con il Dipartimento dell'Energia dell'Università di Palermo)*

CIRTEN ha svolto uno studio su reattori di tre taglie diverse, individuando i principali componenti cui sono affidati compiti di sicurezza e di salvaguardia dell'integrità del nocciolo e proponendo un'attività sperimentale su alcuni di essi, di taglia adeguata per essere provati su impianti sperimentali di semplice gestione.

CIRTEN ha inoltre progettato un impianto sperimentale di piccola taglia, adatto a tali test, avviando le azioni necessarie per la sua realizzazione.

- *Sistemi attivi e passivi di sicurezza (Politecnico di Milano e Università di Pisa)*

CIRTEN ha fornito uno studio sulla risposta di un reattore GEN III+ dotato di sistemi passivi (tipicamente AP-1000) ad un evento tipo Fukushima (sisma + allagamento con black-out), ed uno studio su misuratori neutronici "self-powered" per il controllo del flusso neutronico in-core, che rientrano tra gli elementi critici per assicurare l'integrità del nocciolo.

A quest'attività si è aggiunto uno studio, svolto presso l'Università di Pisa, sull'applicazione degli "stress test requirements", che è stato oggetto di uno specifico documento.

- *Studi in appoggio alle valutazioni di sistema con codici integrali ASTEC e MELCOR (Università di Bologna)*

CIRTEEN ha analizzato le principali caratteristiche del codice integrale a parametri concentrati MELCOR e le caratteristiche di alcuni modelli in esso utilizzati per le valutazioni dei principali parametri termofluidodinamici e della dinamica del trasporto, diffusione e deposizione dei componenti del termine sorgente (prodotti di fissione, aerosol, particolati e residui strutturali). E' stato inoltre svolto uno studio sull'evoluzione del codice fino alla struttura più avanzata e potente, implementata nella più recente release.

Linea B. Studi sul combustibile e materiali nucleari

- *Modellazione del comportamento di elio in combustibili MOX ad alto burn-up ai fini dell'estensione degli strumenti di simulazione e di supporto alla progettazione delle barrette di combustibile per i reattori di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata (Università di Milano)*

Lo studio del comportamento termomeccanico delle barrette di combustibile è di fondamentale importanza sia nella loro progettazione sia al fine di effettuare valutazioni di sicurezza in condizioni incidentali. E' stata quindi affrontata una valutazione delle caratteristiche richieste agli strumenti di simulazione per le analisi di prestazioni e comportamento termomeccanico in reattore di barrette di combustibile ad alto burn-up, combustibili MOX in particolare. Con riferimento al codice integrale di performance TRANSURANUS, utile strumento di supporto alla progettazione, sono state trattate come "caso studio" le problematiche di modellazione del comportamento dell'elio (dalla produzione al rilascio) in combustibili a ossidi misti (MOX) durante l'irraggiamento ad alti burn-up in reattori ad acqua leggera. In particolare, è stato sviluppato e validato - sulla base di dati sperimentali e simulazioni con codici di trasporto neutronico e bruciamento - un modello per la produzione di elio. Inoltre, si è avviato uno studio sul trasporto di elio nel combustibile, utile ai fini della messa a punto di un modello preliminare per il rilascio di elio all'interno dell'intercapedine tra combustibile e guaina. Lo sviluppo dei suddetti modelli di produzione e rilascio di elio permetterà simulazioni più affidabili, tramite TRANSURANUS, di barrette di combustibile MOX ad alti tassi di bruciamento, dove la produzione di elio diventa rilevante, offrendo utili indicazioni di cui ci si potrà avvalere nella fase di progetto.

- *Comportamento del combustibile nucleare durante rampe di potenza: analisi di esperimenti con codici di calcolo di comportamento del combustibile, in particolare in condizioni di alto burn-up (Università di Pisa)*

Dopo anni di residenza del combustibile in un reattore, lo spazio tra la camicia e la pasticca di combustibile può chiudersi, come risultato di diversi fenomeni che avvengono all'interno del combustibile stesso, per effetto non solo della temperatura ma anche dell'irraggiamento. In caso di aumento localizzato di potenza si possono generare tensioni circonferenziali nella camicia dovute alla differente espansione di pasticca e camicia. In presenza di prodotti di fissione corrosivi (e.g. Iodio) e oltre specifici limiti di tensione, si può innescare il meccanismo della crescita della cricca dalla superficie interna della camicia. La cricca può progredire verso l'esterno, ed in certi casi può causare la rottura del combustibile stesso. Questo fenomeno è noto come "pellet cladding interaction-stress corrosion cracking" PCI-SCC o anche solo PCI, ed è stato identificato come problema dagli anni '70. Per investigare questo problema, in particolare in condizioni di alto burnup, è stato selezionato il progetto sperimentale "PWR Super-Ramp", effettuato nel reattore di ricerca R2 di Studsvik in Svezia, per essere analizzato con il codice di calcolo TRANSURANUS. I dati disponibili per simulare gli esperimenti fanno parte del database IFPE dell'OECD. Le attività hanno riguardato l'analisi dei dati sperimentali disponibili, la preparazione degli input necessari, idonei per essere utilizzati con il codice di calcolo TRANSURANUS e le analisi di sensibilità. L'obiettivo è valutare la possibilità di utilizzare il codice TRANSURANUS per combustibili ad alto burn-up. I risultati ottenuti si sono focalizzati sui principali fenomeni che caratterizzano i test durante le rampe di potenza ed hanno mostrato che il codice TRANSURANUS predice la rottura delle barrette in modo conservativo.

Linea C. Studi sulla strumentazione di nocciolo e simulazione

- *Proposte di strumenti innovativi per la misura di flussi in core (Università di Roma La Sapienza)*

L'attività prevedeva l'analisi e lo studio di nuova strumentazione "in core" per la determinazione fine dei parametri neutronici fondamentali, con particolare rilievo ai fini della sicurezza, all'interno del nocciolo.

Il lavoro ha previsto una prima fase in cui sono state approfondite le problematiche inerenti la strumentazione interna al nocciolo (in-core) di reattori ad acqua leggera nelle due filiere più rilevanti attualmente presenti nel mercato della produzione di energia elettrica da nucleare: il francese EPR e lo statunitense AP1000. Inizialmente è stata esaminata la strumentazione nel contesto più ampio della "safety" nei due approcci dei sistemi di sicurezza di tipo "attivo" e "passivo". Oltre agli aspetti funzionali vengono analizzati anche quelli tecnologici e costruttivi con un particolare accento alle misure di flusso neutronico effettuate dagli SPND (Self Powered Neutron Detectors) e dagli Aeroballs. Sono inoltre state contestualizzate e analizzate alcune esperienze condotte su altre filiere (il sistema russo VVER-440) che hanno fornito importanti apporti allo sviluppo della tecnologia relativa alla

strumentazione ed al suo impiego. Infine sono stati analizzati alcuni criteri di progetto la cui applicazione rende tali sistemi perfettamente integrati ed integranti i moderni approcci alla sicurezza dei reattori nucleari.

In una fase successiva, come già descritto in una precedente sezione, è stato analizzato un metodo mediante il quale l'informazione ottenuta in tempo reale attraverso un sistema di dispositivi di misura neutronica SPND (collettroni) inseriti nel nocciolo di un reattore nucleare di potenza (un PWR) consente la rilevazione in tempo reale di un eventuale punto caldo durante l'operazione dell'impianto. Il metodo si basa sulle tecniche perturbative GPT, per il calcolo dei coefficienti di sensitività delle quantità integrali misurate con i collettroni rispetto ai parametri considerati per rappresentare il punto caldo, e nell'uso di tecniche di inferenza statistica che tengono conto degli errori associati alle misure. La metodologia consente altresì di valutare la degradazione del sistema di rilevazione a seguito di possibili guasti dei collettroni, e di decidere quindi sul loro numero ottimale per un intero ciclo di vita del nocciolo e sulla loro migliore distribuzione.

La metodologia è stata implementata con il codice di calcolo neutronico ERANOS 2.1 nella modalità di calcolo GPT, che consente di ottenere i coefficienti di sensitività necessari. I risultati della prova di simulazione eseguita prendendo in considerazione un reattore PWR di piccole dimensioni (MARS) hanno dimostrato la potenzialità della metodologia proposta

- *Implementazione della logica di regolazione e protezione della pressione e livello del pressurizzatore e dello Steam Dump System per un reattore PWR (Gruppo di Ricerca di San Piero a Grado, Università di Pisa)*

Il comportamento di un impianto nucleare durante i transitori operazionali ed incidentali è fortemente influenzato dalla risposta del sistema di controllo. Per simulare tale sistema si utilizzano in genere, modelli conservativi, soprattutto nel caso in cui debba eseguire una simulazione per il "licensing" dell'impianto. Per applicazioni come i simulatori "full scope" o ingegneristici, invece, la scelta dei modelli ricade su quelli cosiddetti di "best-estimate". Nel documento prodotto dall'Università di Pisa viene descritta un'applicazione dei due possibili approcci. L'approccio conservativo viene mostrato attraverso la modellazione del sistema di controllo e protezione del pressurizzatore e dello steam-dump di un PWR utilizzando il codice di calcolo Relap5-3D. L'approccio "best-estimate" viene invece perseguito accoppiando al Relap5-3D una routine Fortran che descrive fedelmente le contoreazioni del sistema di controllo e protezione. Il Relap5-3D viene impiegato, in questo caso, per il solo calcolo del feedback termoidraulico. Entrambi gli approcci di simulazione del sistema di controllo e protezione vengono poi mostrati effettuando una simulazione di due transitori operazionali.

Linea D. Tecniche e strumenti di calcolo per la dinamica di nocciolo di un PWR

Le attività del CIRTEN, svolte nel quadro dell'obiettivo D1 "Studio dei modelli di analisi per la dinamica spaziale di nocciolo", hanno riguardato uno studio sui modelli ed i codici che rappresentano lo "stato dell'arte" per la simulazione di fenomeni neutronici, termoidraulici e termomeccanici di reattori nucleari ad acqua leggera, individuandone punti di forza e di debolezza intrinseci, ed alla luce di un loro impiego in mutuo accoppiamento (intimo o per file di input/output) tra loro.

- *Studio dei codici "stato dell'arte" di neutronica per reattori termici (Università di Bologna).*

Una valutazione dei codici di calcolo deterministici utilizzabili per la modellizzazione dei reattori ad acqua (e con efficacia comparabile con i codici Monte Carlo che sembrano essere divenuti uno standard di riferimento) deve prendere in considerazione non solo la capacità di affrontare il tema della descrizione di strutture fortemente eterogenee, ma anche aspetti prettamente computazionali, quali in particolare la portabilità in ambiente massicciamente parallelo, unica via per raggiungere l'obiettivo in modo competitivo. Questo criterio di analisi porta ad individuare alcuni codici su cui in questi anni si è molto investito in termini di efficacia di programmazione e di implementazione di tecniche numeriche avanzate.

- *Confronto fra le tecniche di soluzione dell'equazione del trasporto per reattori termici (Politecnico di Torino).*

La progettazione di sistemi nucleari, attraverso decenni di sviluppi, ha raggiunto livelli di prestazioni ritenute soddisfacenti da un punto di vista ingegneristico, portando, di fatto, ad un arresto dell'innovazione dei modelli e degli strumenti utilizzati a supporto della progettazione. Solo recentemente la comunità tecnico-scientifica ha rifocalizzato il proprio interesse allo sviluppo e all'aggiornamento di una nuova generazione di codici ad elevate performance e affidabilità. Diversi progetti sono in corso in tutto il mondo, alcuni dei quali particolarmente ambiziosi, puntando alla realizzazione di uno strumento computazionale omnicomprensivo, capace di descrivere accuratamente l'intera fenomenologia multi-fisica propria del funzionamento di un reattore nucleare, senza penalizzare in alcun modo l'esatta descrizione geometrica e materiale del sistema in esame. Il documento prodotto dal Politecnico di Torino riassume pertanto i principali aspetti dello stato dell'arte dei codici di neutronica, rivolgendo particolare attenzione allo sviluppo dei metodi di trasporto neutronico in questi implementati.

- *Valutazione delle caratteristiche di codici di termoidraulica di nocciolo ai fini delle analisi di sicurezza: stato dell'arte dei codici di termoidraulica di nocciolo (Università di Pisa, Gruppo di Ricerche Nucleari San Piero a Grado).*

È stato esaminato lo stato dell'arte dei più importanti codici per l'analisi di sicurezza delle centrali nucleari. La rassegna include una descrizione generale di diversi tipi di codici di termoidraulica: codici di sistema, codici di sottocanal e codici di CFD, e anche dei più comuni codici di cinetica neutronica tridimensionale. Particolare attenzione è stata data nel presentare diversi esempi di attività svolte sull'accoppiamento tra codici, aspetto cruciale per un'analisi di sicurezza delle centrali nucleari completa e accurata. Negli ultimi decenni, è stato compiuto a livello mondiale un notevole sforzo di ricerca sulle problematiche dell'accoppiamento. Nessun codice può infatti, da solo, trattare tutti i fenomeni inerenti al campo della sicurezza nucleare. Per questo motivo, codici differenti, ciascuno applicabile in un diverso ambito tecnologico, sono necessari per realizzare l'analisi di sicurezza.

- *Definizione delle caratteristiche richieste ad un modulo di termomeccanica in un codice multifisica di dinamica tridimensionale per reattori termici (Politecnico di Milano)*

Il lavoro svolto ha portato a definire le caratteristiche richieste a un modulo di termomeccanica integrato in un codice multifisico di dinamica tridimensionale per reattori termici, attraverso la presentazione dei fenomeni fisici che devono essere trattati a livello sia di nocciolo che, in particolar modo, della barretta di combustibile, e l'analisi delle interazioni tra il modulo in esame e gli altri moduli di neutronica e termoidraulica. Sulla base di queste informazioni si indicano le linee guida per una progettazione concettuale del modulo attraverso un approccio "a blocchi". Nel rapporto prodotto vengono descritti i potenziali codici per la realizzazione del modulo di termomeccanica, alcuni dei quali disponibili commercialmente, altri sviluppati da istituti di ricerca come parte di codici accoppiati. Si fornisce inoltre un esempio di modulo di termoelasticità inserito in un codice ad hoc sviluppato in un unico ambiente di calcolo.

Università Politecnica delle Marche, Dip.to di Fisica ed Ingegneria dei Materiali e del Territorio

Nell'ambito della linea B è svolta un'attività di ricerca fondamentale e sperimentazione in laboratorio su nuove tecniche di misura per processi finalizzati alla minimizzazione degli elementi radioattivi a lunga vita nel combustibile irraggiato ("scorie").

Le attività hanno compreso lo studio di misure innovative per processi che abbiano come obiettivo la riduzione del contenuto di radionuclidi a lunga vita nel combustibile esausto o nella coda dei processi di ritrattamento o riprocessamento, nonché la sperimentazione in laboratorio delle tecniche ipotizzate in linea teorica.

Per l'analisi micro-strutturale di tali materiali sono state utilizzate tecniche di diffrazione, tecniche di visualizzazione e tecniche di analisi elementale, volte a rivelarne le eventuali modifiche microstrutturali o la formazione di diverse fasi.

Come primo passo verso la determinazione delle variazioni isotopiche indotte da neutroni mediante processi innovativi, sono state studiate le variazioni di composizione di campioni sottoposti ad un trattamento ad ultrasuoni che causava evidenti danneggiamenti superficiali. Secondo l'interpretazione di alcuni autori, i danneggiamenti sarebbero causati da emissioni neutroniche.

Al fine di indagare sperimentalmente questo fenomeno, si è provveduto all'acquisto dell'attrezzatura necessaria per allestire sezioni di prova, sono stati identificati i protocolli sperimentali di base ed eseguite misure preliminari per le sperimentazioni necessarie alla misura.

Università degli Studi di Pavia, Laboratorio Energia Nucleare Applicata (LENA)

La collaborazione tra ENEA e il Laboratorio Energia Nucleare Applicata dell'Università degli Studi di Pavia ha riguardato attività di ricerca fondamentale e sperimentazione in laboratorio su nuove metodologie di calcolo finalizzate alla trasmutazione degli elementi radioattivi a lunga emivita ed è stata svolta all'interno della Linea B.

- *Validazione di una metodologia di analisi per lo studio dell'evoluzione temporale della composizione del combustibile nucleare*

Sono state sviluppate e validate, mediante codici di calcolo e misure dirette, metodologie flessibili per lo studio dell'evoluzione del combustibile nucleare.

La conoscenza della composizione del combustibile nucleare è di fondamentale importanza sia per quanto riguarda gli aspetti di esercizio degli impianti (dinamica dell'avvelenamento del nocciolo, margini di controllo e di spegnimento), sia per quanto riguarda la gestione del combustibile post-irraggiamento (*back-end* del ciclo del combustibile). È stata sviluppata una metodologia di analisi, mediante impiego di codici di calcolo Monte Carlo (MCNP ver. 4C) e misure dirette, per lo studio del burn-up del combustibile nucleare del reattore TRIGA Mark II del

LENA. La metodologia è stata validata confrontando i valori calcolati di burn-up del combustibile nucleare con i valori ricavati dai dati e dai parametri di esercizio dell'impianto.

- *Validazione di una metodologia di analisi per la valutazione dell'efficienza di trasmutazione dei prodotti di fissione a lunga emivita e degli attinidi minori in campi neutronici misti (termici e veloci)*

Sono state sviluppate e validate, mediante codici di calcolo e misure dirette, metodologie flessibili per lo studio della produzione e trasmutazione degli elementi transurani) e dei prodotti di fissione a lunga emivita presenti nel combustibile irraggiato.

La conoscenza della composizione del combustibile nucleare, durante la permanenza in reattore e allo scarico, è di fondamentale importanza per l'economia di gestione del nocciolo e del ciclo di back-end. Lo sviluppo di una metodologia di analisi flessibile dal punto di vista della composizione del combustibile nucleare e della geometria del nocciolo del reattore risulta quindi di particolare importanza ed utilità.

E' stata pertanto sviluppata una metodologia di analisi, mediante impiego di codici di calcolo Monte Carlo (MCB e MCNP ver. 4C) e misure dirette, per la valutazione dei tassi di produzione dei prodotti di fissione a lunga emivita e degli elementi transuranici in campi neutronici con diverso spettro energetico e in materiali nucleari diversi (uranio naturale e torio).

Università de L'Aquila - Centro di Eccellenza DEWS

La collaborazione con l'Università de L'Aquila riguarda lo studio dei sistemi di supervisione, controllo e di protezione per reattori nucleari ad acqua pressurizzata di nuova generazione svolti all'interno della Linea C.

- *Analisi della dinamica dei sistemi di supervisione, controllo e protezione in reattori ad acqua pressurizzata di generazione evolutiva*

Lo studio offre una presentazione dettagliata dei sistemi di supervisione, controllo e protezione per il circuito primario di reattori ad acqua in pressione di generazione III/III+. Dato il suo fondamentale ruolo di mantenimento della pressione del circuito primario all'interno di un intervallo specificato, tale studio si concentra in modo prevalente sul pressurizzatore, del quale sono studiate le specifiche progettuali e le caratteristiche funzionali, per esempio l'impianto idraulico termico, i collegamenti con il sistema di raffreddamento del reattore, la surge line, i controlli di livello dell'acqua e della pressione, i sensori di pressione. Sono inoltre analizzate, in virtù del loro ruolo fondamentale di coordinamento e supervisione dei segnali di controllo, la sala di controllo principale e le sale di controllo satelliti, in particolare per quanto riguarda i segnali dal/al circuito primario e, soprattutto, dal/al pressurizzatore.

- *Studio comparativo di controllori per la supervisione, il controllo e la protezione in reattori ad acqua pressurizzata di generazione evolutiva"*

To studio ha riguardato la modellizzazione matematica del circuito primario del reattore finalizzata ad individuare le proprietà dei controllori coinvolti e valutarne le prestazioni, anche in risposta a perturbazioni esterne o interne. Il modello del circuito primario elaborato offre una descrizione del comportamento dell'intero sistema nel dominio del tempo di tipo semplificato, ma sufficientemente accurata da cogliere la natura intrinsecamente non-lineare, tempo-variante e a commutazione dell'impianto. A partire dal modello generale viene presentato un controllore dinamico del livello dell'acqua nel pressurizzatore e due controllori dinamici per la pressione del pressurizzatore.

Tali modelli sono stati sviluppati nell'ambiente di simulazione Simulink, strumento di tipo general purpose universalmente impiegato per la modellistica, la simulazione e l'analisi di sistemi dinamici multi-dominio. L'impiego di un tale ambiente garantisce semplicità d'impiego e ottima affidabilità e versatilità.

I controllori progettati garantiscono buone prestazioni, anche in presenza di incertezze e perturbazioni. La loro caratteristica a commutazione, che riflette la natura dinamica a commutazione del pressurizzatore, assicura migliori comportamenti durante i transitori. Di conseguenza, essi possono essere considerati come un'evoluzione e un miglioramento rispetto ai classici controllori PID (Proporzionale-Integrale-Derivativo), di solito implementati in azioni di controllo classiche.

- *Studio delle prestazioni dei sistemi di controllo in presenza di guasti e/o incidenti di riferimento in reattori ad acqua pressurizzata di generazione evolutiva*

E' stato condotto uno studio delle prestazioni dei sistemi di controllo in presenza di guasti e/o incidenti di riferimento nei reattori evolutivi ad acqua in pressione sulla base di un modello più accurato di un pressurizzatore per PWR.

Come primo passo, si è scelto di implementare tale modello in linguaggio C++ e interfacciarlo con l'ambiente Simulink. Successivamente, si potrebbe prevedere di estendere tale studio a codici di sistema più avanzati, come RELAP5, che offrono una risoluzione maggiore in termini di variabili di impianto.

Le prestazioni dei controllori per il livello dell'acqua e della pressione del pressurizzatore, precedentemente sviluppati, sono stati testati nel caso di una situazione incidentale tipica come il "turbin trip", causato dalla chiusura della valvola di arresto della turbina a causa di un guasto o malfunzionamento.

L'ambiente di simulazione così sviluppato è stato fornito in versione prototipale all'Unità Tecnica Tecnologie e Impianti per la Fissione e la Gestione del Materiale Nucleare (Centro Ricerche ENEA Casaccia) per impiego come banco di prova per lo sviluppo ed il test di sistemi di controllo per reattori nucleari ad acqua in pressione di generazione evoluti.

Fusione nucleare: attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER, denominate Broader Approach

La fusione termonucleare controllata è oggi considerata un'opzione molto concreta come fonte di energia sicura, compatibile con l'ambiente e praticamente inesauribile. A conferma di ciò, Europa, Cina, Corea del Sud, India, Giappone, Federazione Russa e Stati Uniti hanno riunito i loro sforzi in un progetto di grande prestigio, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), che rappresenta una tappa fondamentale per arrivare alla realizzazione del primo reattore dimostrativo a fusione (DEMO). ITER dovrà produrre 500 MW di potenza e dimostrare la possibilità di mantenere la reazione per un tempo sufficientemente lungo. L'impianto consentirà di verificare le tecnologie rilevanti per il reattore e fornirà gli elementi utili per la progettazione di DEMO.

A margine dei negoziati per decidere il sito di ITER, Europa e Giappone hanno ratificato un accordo di collaborazione denominato Broader Approach destinato ad accelerare lo sviluppo dell'energia da fusione. L'accordo è regolato da specifici "Agreement of Collaboration" con l'Agenzia Europea "Fusion for Energy" che impegnano i vari Paesi a fornire il proprio contributo. L'accordo, al quale l'Italia ha aderito, comprende una serie di attività sia di fisica che di tecnologia che prevedono:

- la costruzione di una macchina Tokamak denominata JT-60SA: macchina superconduttrice delle dimensioni del JET destinata a studiare scenari operativi rilevanti per DEMO;
- la realizzazione di una facility in cui saranno provati i componenti di IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), complessa struttura di ricerca finalizzata allo studio del danneggiamento dei materiali provocato dal flusso di neutroni di alta energia, quali quelli generati nella reazione di fusione. Si tratta del prototipo del primo stadio dell'acceleratore di ioni di deuterio che dopo essere accelerati fino ad energie di 40 MeV vanno a collidere un bersaglio di litio producendo un flusso di neutroni molto intenso capace di produrre un danneggiamento di 80 Superconductor la realizzazione di un prototipo del bersaglio per la produzione di neutroni di IFMIF su cui far scorrere a forte velocità il litio liquido e i dispositivi per la sua manutenzione remota;
- la creazione dell'International Fusion Energy Research Center (IFERC) che include attività per DEMO tra le quali lo sviluppo di materiali avanzati come il SiC/SiC e un centro di supercalcolo.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'Italia si è impegnata a contribuire allo sviluppo del Programma Broader Approach (BA) ed a ENEA sono state affidate le attività descritte nel seguito.

Costruzione magnete Tokamak JT-60SA

JT-60SA è un Tokamak superconduttore di raggio maggiore di circa 3 m, in grado di confinare plasma di deuterio con una corrente massima di 5,5 MA, con singolo o doppio nullo. Il Tokamak JT-60SA (Figura 7) sarà installato in Giappone a Naka nella Torus Hall che attualmente ospita il Tokamak JT-60U.

La macchina JT-60SA è stata progettata per raggiungere scenari di funzionamento quasi stazionari con impulsi della durata di circa 100 s che richiedono l'impiego di magneti superconduttori.

Il sistema magnetico di JT-60SA, i cui parametri operativi sono riportati in Tabella 1, è costituito di tre sottosistemi: 18 magneti superconduttori (NbTi) di campo toroidale (TF) (Figura 8); 4 moduli che costituiscono il solenoide centrale in Nb₃Sn necessario per indurre la corrente nel plasma; 6 magneti in NbTi che generano il campo poloidale necessario per stabilizzare il plasma. In particolare, i 18 moduli di magnete toroidale TF saranno di forma a D avvolti con un cavo in NbTi, raffreddato da un flusso forzato di elio supercritico alla temperatura di 4,4 K. Dei 18 moduli TF che costituiscono il magnete, 9 saranno realizzati dall'ENEA e 9 dal CEA francese.

Ciascun avvolgimento della bobina è formato da 6 doppi pancake collegati in serie da giunti elettrici interni per assicurare la continuità elettrica; giunti esterni garantiscono la connessione elettrica con le bobine contigue mentre dei collettori provvedono alla distribuzione del flusso di elio.

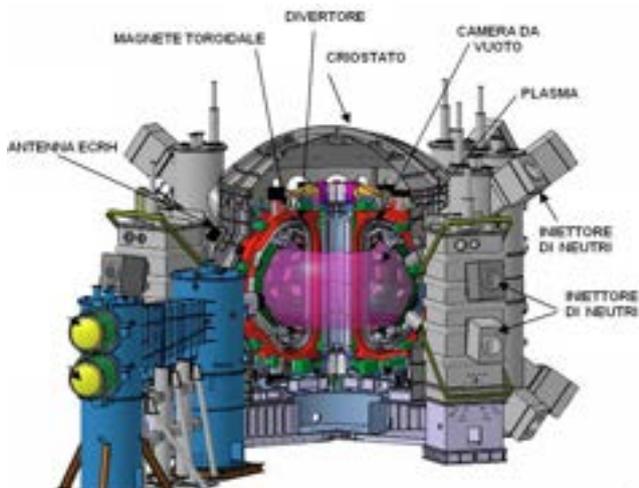


Figura 7. Vista assonometrica del Tokamak JT-60SA

Tabella 1. Parametri operativi di JT-60SA

Corrente di plasma	5,5 MA/3,5 MA
Campo toroidale	2,7 T
Raggio maggiore	3 m
Raggio minore	1 m
Durata impulso di plasma	100 s
Potenza di riscaldamento	41 MW
Flusso termico al divertore	15 MW/m ²

Ogni pancake è formato da sei spire, con un isolamento di spira dello spessore di 1 mm. L'isolamento elettrico è realizzato con tele di vetro e resina epossidica impregnata sotto vuoto. La realizzazione delle 9 bobine richiede lo sviluppo di impianti ed attrezzature prototipali che rivestono carattere innovativo e di ricerca, sia per lo sviluppo delle soluzioni costruttive, che per la definizione delle procedure realizzative degli elementi componenti la bobina toroidale. L'avvolgimento della bobina è contenuto in una cassa in AISI che costituisce il principale componente strutturale del sistema magnetico ed è caratterizzato da precisioni molto accurate per garantire il corretto accoppiamento con la bobina stessa.

La cassa delle bobine toroidali è una struttura saldata di piastre con spessore nell'intervallo 15-100 mm. Le casse delle bobine toroidali forniranno il supporto meccanico per tutto il sistema magnetico di JT-60SA.

Le alimentazioni elettriche di tutto il sistema magnetico di JT-60SA, per un totale di 13 alimentatori ad alta tensione e corrente con relativi interruttori più quattro trasformatori, richiedono una progettazione specifica e sono di dimensioni e caratteristiche tali per cui vi è un forte interesse da parte della nostra industria. Il ruolo dell'ENEA è di fondamentale importanza perché la progettazione di tutti i componenti in questione richiede un know how specifico da sviluppare in continuità con quanto fatto finora in questi settori.

Nello specifico per la macchina JT-60SA l'ENEA è impegnata a realizzare:

- nove delle 18 bobine superconduttrici di NbTi che costituiscono l'intero magnete; le altre nove saranno realizzate dal CEA;
- le casse di contenimento per tutte le 18 bobine costituite da componenti in acciaio austenitico dotate di precisioni molto accurate per garantire il corretto posizionamento delle bobine che devono ospitare;
- le alimentazioni elettriche di parte del sistema magnetico di JT-60SA, per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente con relativi interruttori più quattro sistemi di interruzione della corrente continua.

IFMIF e IFERC

Parallelamente all'impiego di ITER, la comunità scientifica, è impegnata a individuare e provare i materiali strutturali più adatti a rispondere alle differenti richieste di un prototipo dimostrativo di reattore a fusione. La fusione termonucleare pone una doppia sfida agli specialisti di materiali: alte temperature (fino ad 800 °C) ed alti flussi di neutroni da 14 MeV che in un anno inducono danneggiamenti quantificabili in 50 dpa. La conduzione di ricerche appropriate in questa area di sviluppo, che appare fortemente strategica per tutto il settore industriale, richiede la realizzazione e l'impiego della sorgente di neutroni IFMIF. Per tale motivo nell'ambito delle attività tecnologiche di Broader Approach è prevista la progettazione e realizzazione di una sorgente di neutroni da

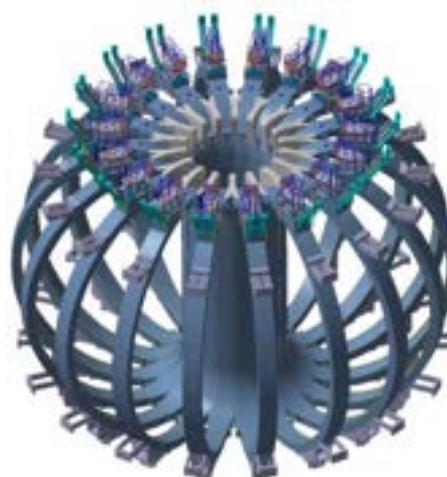


Figura 8. Vista assonometrica del sistema magnetico toroidale del Tokamak JT-60SA

14 MeV completa di due acceleratori di deutoni accoppiati in parallelo, un circuito per purificazione e pompaggio litio e tre dispositivi per prove meccaniche sui materiali candidati all'impiego fusionistico.

L'impianto IFMIF è una facility di ricerca di cospicuo rilievo, con una lunghezza di oltre 200 metri, progettata ad hoc. I suoi componenti principali saranno:

- una sorgente di ioni (tipicamente ioni di deuterio);
- due acceleratori lineari, di grande potenza (complessivamente 10 MW), che accelerano gli ioni di deuterio fino all'elevatissima energia di 40 MeV, facendo convergere i fasci di ioni sullo stesso bersaglio (target);
- un target costituito da litio fuso in circolazione forzata ad alta velocità, su cui gli ioni di deuterio accelerati impattano, sviluppando neutroni di elevata energia mediante opportune reazioni nucleari.

L'ENEA, in ambito europeo, è responsabile dello sviluppo del target per la produzione di neutroni. Il progetto è basato su un efflusso libero di litio ad alta velocità (20 m/s) che, investito normalmente da un fascio di deutoni, rilascia, per la reazione nucleare di stripping, una corrente di neutroni sufficientemente energetici per poter esercitare, sui materiali in prova lo stesso danneggiamento neutronico che ha luogo in un reattore a fusione.

La proposta progettuale di ENEA comprende anche l'intercambiabilità della parete posteriore del componente al fine di consentirne la sostituzione quando il danneggiamento del materiale con cui è realizzato raggiunge livelli inaccettabili.

Nella ricerca sulla fusione, particolare rilevanza assume inoltre lo sviluppo dei materiali e nello specifico dei composti ceramici. Ai composti ceramici si guarda, infatti, con grande interesse per l'utilizzo sia come materiale strutturale sia come materiale funzionale per barriere termiche ed elettriche. Lo studio di composti di SiC/SiC è una delle attività di ricerca e sviluppo del programma DEMO.

L'ENEA ha il compito di studiare le proprietà meccaniche e chimico-fisiche dei composti in SiC/SiC e di sviluppare un'analisi di modello in grado di simulare ed interpretare le prove meccaniche su campioni di SiC/SiC. Ai composti ceramici si guarda con grande interesse per l'utilizzo sia come materiale strutturale sia come materiale funzionale per barriere termiche ed elettriche.

Nell'ambito della collaborazione internazionale "Broader Approach", le attività di cui ENEA ha la responsabilità, sono:

- studio e progettazione del magnete di JT-60SA (bobine superconduttrici e strutture di contenimento), redazione delle specifiche, emissione di ordini per acquisti di materiali, impianti e attrezzature per la realizzazione delle bobine;
- studio e progettazione delle alimentazioni elettriche degli avvolgimenti di JT-60SA, redazione specifiche tecniche, procedure di gara ed aggiudicazione, revisione del progetto ed inizio della realizzazione di 6 alimentatori degli avvolgimenti di campo poloidale e 2 alimentatori degli avvolgimenti di controllo della posizione del plasma tutti con i loro sistemi di crow-bar e i loro relativi 4 trasformatori;
- progettazione e redazione delle specifiche tecniche, procedure di gara ed aggiudicazione, revisione del progetto e inizio della realizzazione di 4 sistemi di switching per la generazione di impulsi di alte tensioni negative;
- studio e progettazione delle alimentazioni elettriche del magnete di JT-60SA, redazione specifiche tecniche e realizzazione di parte dei 13 alimentatori degli avvolgimenti di campo poloidale e verticale con relativi interruttori e trasformatori;
- studi, progettazione e costruzione di un prototipo del target per prove fluidodinamiche, realizzazione e fornitura di sensori di misura, prove di corrosione/erosione e di purificazione nell'impianto a litio liquido Lifus 3 del Brasimone;
- progettazione d'insieme completa del target di IFMIF; progettazione componente di purificazione del litio da azoto per IFMIF; realizzazione del sistema di manutenzione remota e prove prototipiche di manutenzione in piattaforma di prova;
- misure delle caratteristiche fisiche di componenti in SiC/SiC. Sviluppo di modelli reologici per simulare il comportamento dei composti ceramici;
- progettazione e realizzazione di un dispositivo per prove di erosione/corrosione di target di SiC/SiC in movimento in litio liquido ad alta temperatura.

Il progetto complessivo si svolge nell'arco di sei anni. Il Piano Annuale di Realizzazione 2010 prevede gli obiettivi descritti nel seguito.

A. Macchina JT-60SA

L'obiettivo è rivolto allo studio e progettazione del magnete di JT-60SA (bobine superconduttrici e strutture di contenimento) e alla redazione delle specifiche tecniche; studio e progettazione delle alimentazioni elettriche del magnete di JT-60SA e redazione delle relative specifiche tecniche, procedure di gara ed aggiudicazione e design review; progettazione dei sistemi di switching per la generazione di alte tensioni e redazione delle relative specifiche tecniche, procedure di gara ed aggiudicazione e design review.

L'attività è suddivisa in 4 task principali:

A.1 Progettazione bobine superconduttrici magnete toroidale JT-60SA e realizzazione attrezzature

L'ENEA dovrà fornire, alla fine del programma 9 bobine superconduttrici. Nel primo anno sono previste le azioni preparatorie all'emissione degli ordini d'acquisto ed è prevista la realizzazione delle attrezzature per la fabbricazione delle bobine superconduttori di JT-60SA.

A.2 Progettazione strutture di contenimento bobine toroidali JT-60SA

Sviluppo dei disegni costruttivi e di dettaglio relativo ai componenti di assemblaggio della cassa di contenimento bobina. Sviluppo del programma di garanzia di qualità descrivendo tutte le aree interessate dalla fornitura in connessione alle attività di pianificazione, sviluppo progettazione costruttiva, identificazione fornitori, controllo delle fasi esecutive e gestione non conformità. Definizione della struttura organizzativa articolata secondo i livelli di autorità, le responsabilità funzionali, le linee di comunicazione tra le varie posizioni organizzative e le interfacce operative. Sviluppo del programma di garanzia di qualità. Sviluppo del piano di controllo della qualità con particolare riferimento alla analisi dei materiali, ai controlli delle saldature e controlli intermedi e finali con laser track. Emissione del programma di qualifica relativo alle procedure di messa a punto dei processi di saldatura e realizzazione del prototipo di trave rettilinea finalizzata all'analisi delle deformazioni prodotte dalla saldatura. Sviluppo dei disegni costruttivi e di dettaglio relativo ai componenti di assemblaggio della cassa di contenimento bobina.

In particolare l'obiettivo prevede la stesura dei documenti necessari all'organizzazione della commessa ed alla emissione degli ordini di acquisto dei materiali.

A.3 Progettazione degli "switch network unit"

Studi e progettazione per la realizzazione di quattro sistemi di switching per l'ottenimento di impulsi di alta tensione sugli avvolgimenti della macchina JT-60SA. In dettaglio si prevede l'espletamento di tutte le azioni per la gara e l'aggiudicazione della fornitura e l'avvio della revisione della progettazione prodotta dalla ditta aggiudicataria

A.4 Progettazione alimentatori dei magneti poloidali e toroidali di JT-60SA

Studi e progettazione per la realizzazione di otto alimentatori AC/DC e relativi quattro trasformatori, per gli avvolgimenti poloidali e di controllo della macchina JT-60SA. In dettaglio si prevede l'espletamento di tutte le azioni per la gara e l'aggiudicazione della fornitura e l'avvio della revisione della progettazione prodotta dalla ditta aggiudicataria.

B. Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility)

L'attività ha come obiettivo lo sviluppo progettuale del target rimovibile per IFMIF, del suo sistema di sostituzione e del dispositivo di purificazione continua da azoto del litio. L'attività è suddivisa in cinque task principali che coprono tutte le fasi inerenti la progettazione costruttiva, la qualifica sperimentale, le procedure operative, i processi fabbricativi e l'applicabilità dei materiali.

B.1 Forniture ed implementazioni comuni per progettazione, costruzione ed operazioni riguardanti l'impianto a litio EVEDA Loop per IFMIF

La partecipazione di ENEA alle attività sperimentali presso l'impianto a litio EVEDA-Loop consiste nella fornitura di prototipi da implementare nella realizzazione e nella partecipazione alle attività sperimentali. In particolare:

- progettazione di prototipo del target IFMIF per verifiche sperimentali di fluidodinamica;
- realizzazione e fornitura di misuratore di resistività del litio per misure di impurezze contenute;
- realizzazione e fornitura di misuratore di cavitazione;
- sperimentazione presso l'impianto EVEDA Loop.

B.2 Forniture ed implementazioni comuni per sperimentazioni della corrosione/erosione per IFMIF

Scopo dell'attività è la caratterizzazione, in termini di perdita di peso e di modificazione metallografica di alcuni acciai strutturali di interesse IFMIF, dopo esposizione in litio fluente ad alta velocità (20 m/s) per tempi significativi. L'attività è condotta nell'impianto Lifus 3 del Centro ENEA del Brasimone, dopo la messa a punto dell'apparato sperimentale sono previste sperimentazioni di differenti durate e condizioni.

B.3 Forniture ed implementazioni comuni per la qualifica sperimentale del sistema di purificazione litio per IFMIF

Scopo dell'attività è la qualifica sperimentale del sistema di purificazione del litio, dalle principali impurezze, basato su tre diversi getter solidi. La sperimentazione viene condotta sull'impianto Lifus 3. Dopo la messa a punto del sistema di purificazione è prevista l'effettuazione di prove atte a quantificare l'efficienza della rimozione delle impurezze da litio in diverse condizioni operative.

B.4 Forniture ed implementazioni comuni per sviluppo e qualifica di sistema di manipolazione remotizzata del target di IFMIF

Il contributo ENEA consiste in tutte le fasi di sviluppo necessarie a pervenire alla progettazione e qualificazione sperimentale del sistema di rimozione e ripristino della piastra posteriore del target per via remota. In particolare le azioni previste sono:

- progettazione del sistema di manipolazione remotizzata;
- progettazione del mockup di target per effettuare le esperienze di qualificazione;
- prove tecnologiche per qualificare il corretto impiego dei materiali;
- adeguamento dell'area sperimentale;
- acquisizione di componentistica già industrializzata (braccio mobile, dispositivo di avvitamento/ svitamento).

B.5 Forniture ed implementazioni comuni per progettazione completa di target a litio per IFMIF e di dispositivo di purificazione litio dall'impurezza azoto

Scopo dell'attività è la progettazione d'insieme completa del target di IFMIF e del componente di purificazione del litio da azoto. I progetti sono comprensivi di calcoli termo-meccanici, neutronici e termoidraulici in condizioni operative (stazionarie e transitorie) ed incidentali. Le scelte progettuali sono tutte accompagnate da giustificazioni fondate su qualifiche teoriche o sperimentali. In particolare le azioni previste sono:

- progetto del target assembly;
- verifiche termo-meccaniche in condizioni stazionarie;
- analisi neutronica e di danneggiamento;
- analisi di funzionalità e di interfaccia.

C. Attività per IFERC (International Fusion Energy Research Center)

L'obiettivo prevede lo sviluppo e la caratterizzazione di materiali composti ceramici in matrice e fibra di silicio ed è suddiviso in due task principali:

C.1 Caratterizzazione proprietà fisiche composito ceramico SiC/SiC

Scopo dell'attività è la misura della conducibilità termica di un composito ceramico SiC/SiC al fine di caratterizzare termicamente il materiale per l'utilizzo in ambito fusionistico.

L'attività di modellazione dei materiali composti è finalizzata a sviluppare tecniche computazionali che partendo dalle proprietà meccaniche e di resistenza dei materiali costituenti il composito ceramico siano in grado di caratterizzare le corrispondenti proprietà del manufatto finale.

Le azioni previste sono:

- integrazione, in un codice commerciale agli elementi finiti, di programmi in grado di definire il comportamento meccanico dei materiali composti;
- esecuzione di prove meccaniche sui materiali composti ceramici per ottenere i dati di ingresso per i codici di calcolo sviluppati.

C.2 Caratterizzazione del composito ceramico SiC/SiC in litio liquido

In quest'ambito è prevista la realizzazione di un apparato per prove ad alta temperatura (1200 °C) di un target rotante di SiC/SiC in litio-piombo al fine di caratterizzare i fenomeni di erosione-corrosione.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Macchina JT-60SA

A.1 Progettazione bobine superconduttrici magnete toroidale JT-60SA

Sono state completate le attività di progettazione ed eseguite tutte le azioni preparatorie all'emissione degli ordini d'acquisto. In particolare:

- studio e progettazione del magnete di JT-60SA (bobine superconduttrici e strutture di contenimento);
 - stesura completa dei disegni costruttivi del doppio pancake della bobina, completo dei particolari di ingresso di elio di refrigerazione, giunti elettrici intermedi, giunti elettrici di terminazione e riempitivi necessari all'avvolgimento della bobina;
 - emissione del programma di qualifica relativo alle procedure di messa a punto dei processi di manifattura e realizzazione di prototipi quali: ingresso elio di refrigerazione, realizzazione della giunzione elettrica, prototipo del doppio pancake;
 - progettazione della linea di avvolgimento delle bobine ed emissione delle specifiche di acquisto dei componenti dell'impianto di avvolgimento ed emissione dei relativi ordini.
- *Disegni costruttivi della bobina di JT-60SA*

Sono stati completati i disegni costruttivi della bobina di JT-60SA completi di tutti i particolari quali: doppi pancake della bobina, ingresso di elio di refrigerazione, giunti elettrici intermedi e terminazione riempitivi necessari all'avvolgimento della bobina. I disegni su tavole in 2D sono estratti da un modello in 3D elaborato su software CATIA 5.

- *Prescrizioni tecniche necessarie alla realizzazione della bobina di JT-60SA*

La specifica tecnica comprende le prescrizioni necessarie alla realizzazione della bobina di JT-60SA. La macchina JT-60SA è stata progettata per raggiungere scenari di funzionamento quasi stazionari con impulsi della durata di circa 100 s che richiedono l'impiego di magneti superconduttori.

Il sistema magnetico toroidale di JT-60SA è costituito da 18 moduli di magneti di forma a D avvolti con un cavo in NbTi, raffreddato da un flusso forzato di elio supercritico alla temperatura di 4,4 K. Il cavo superconduttore è costituito da una treccia di fili di rame per garantire il trasporto di corrente in caso di transizione dei fili superconduttori e da fili di una lega NbTi immersi in una matrice di rame.

Ciascun avvolgimento della bobina è formato da 6 doppi pancake collegati in serie da giunti elettrici interni per assicurare la continuità elettrica; giunti esterni garantiscono la connessione elettrica con le bobine contigue mentre dei collettori provvedono alla distribuzione del flusso di elio (Figura 9 e 10). Ogni pancake è formato da sei

spire, con un isolamento di spira dello spessore di 1 mm. Ciascun doppio pancake è avvolto da isolante con uno spessore di 1 mm; mentre l'intero avvolgimento ha un isolamento verso massa di 3 mm.

L'isolamento elettrico è realizzato con tele di vetro e resina epossidica impregnata sotto vuoto. L'intero pacco di avvolgimento della bobina ha dimensioni nominali di 345 mm (toroidalmente) e 150 mm (radialmente).

La realizzazione delle 9 bobine richiede lo sviluppo di impianti ed attrezzature prototipali che rivestono carattere innovativo e di ricerca, sia per lo sviluppo delle soluzioni costruttive, che per la definizione delle procedure realizzative degli elementi componenti la bobina toroidale. L'avvolgimento della bobina è contenuto in una

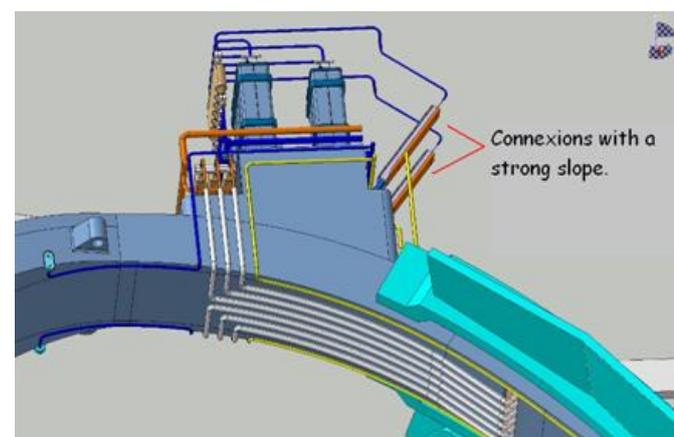


Figura 9. Particolare delle giunzioni elettriche e del sistema di refrigerazione delle bobine toroidali

cassa in AISI che costituisce il principale componente strutturale del sistema magnetico.

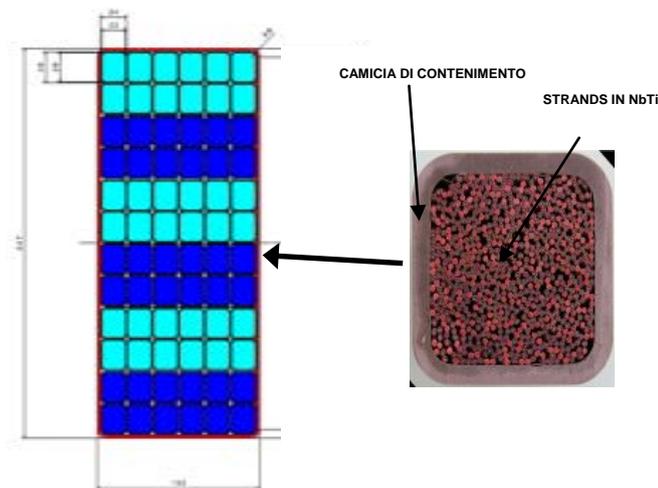


Figura 10. Sezione della bobina e del conduttore

- *Attrezzature ed impianti necessari per la realizzazione delle sequenze costruttive della bobina JT-60SA e ordini emessi da ASG*

Camera da vuoto e gruppo di pompaggio (per la preparazione del conduttore)

Relativamente alla camera da vuoto per la preparazione del conduttore (Figura 11) sono state eseguite le verifiche necessarie per l'utilizzo di una camera da vuoto esistente in ASG, questa consente di ospitare il conduttore per i test di accettazione (vuoto e pressurizzazione).

Bancali di avvolgimento con supporti regolabili (per l'isolamento contro massa del doppio pancake)

Relativamente alla postazione di isolamento contro massa del singolo doppio pancake (DP), è stata studiata ed ordinata una postazione di lavoro composta da una serie di supporti che dovranno essere allineati per creare una superficie di appoggio dove verrà posizionato il doppio pancake, dopo avvolgimento, per l'applicazione manuale dell'isolamento. All'interfaccia con l'avvolgimento, la superficie superiore dei supporti è mobile in modo tale da consentire la regolazione in altezza e la rimozione per permettere il passaggio del nastro di isolamento; inoltre su ogni supporto è previsto un sistema di regolazione laterale per contenere le deformazioni del DP (Figura 12 e 13).



Figura 11. Camera da vuoto per la preparazione del conduttore



Figura 12. Bancali di composizione e controllo di composizione bobina

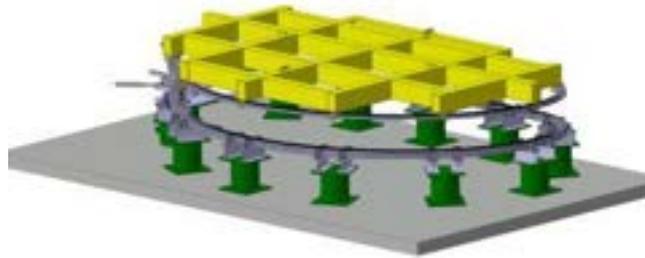


Figura 13. Bilancino di movimentazione del doppio pancake

Bancali di composizione dell'avvolgimento della bobina, attrezzatura di costruzione delle giunzioni intermedie, saldatrice orbitale per la realizzazione del circuito elio, attrezzatura per prove di tenuta (per l'impilaggio dei sei doppi pancake costituenti la bobina)

La postazione di composizione della bobina (Winding Pack, Figura 14) è stata studiata e ordinata in modo tale da realizzare una postazione di lavoro, composta di una serie di supporti che dovranno essere allineati per creare una superficie di appoggio dove saranno posizionati in sequenza i diversi doppi pancake; la superficie superiore dei supporti è mobile in modo tale da consentire la regolazione in altezza e su ogni supporto è previsto un sistema di regolazione laterale per il posizionamento del singolo DP nella corretta posizione. Inoltre, poiché su questa postazione di lavoro deve essere realizzata anche l'applicazione dell'isolamento contro massa, la parte superiore risulta rimovibile per consentire il passaggio del nastro di isolamento.

Per la realizzazione delle giunzioni intermedie è stato previsto l'impiego di un sistema di pressatura per la compattazione delle scatole uscite attorno ai terminali dei DP; tale sistema verrà impiegato una volta completate le operazioni di "stacking" dei diversi DP nella stessa postazione di lavoro.

Riguardo alla saldatrice per la realizzazione del circuito elio è stato ordinato un generatore di saldatura per saldatura orbitale con diverse serie di inserti in modo da poter gestire le diverse dimensioni di tubo previste per i circuiti idraulici della bobina.

Per le prove di tenuta locali è previsto l'impiego di cercafughe; tali attrezzature di collaudo, risultando mobili, possono essere impiegate nelle diverse postazioni di lavoro.

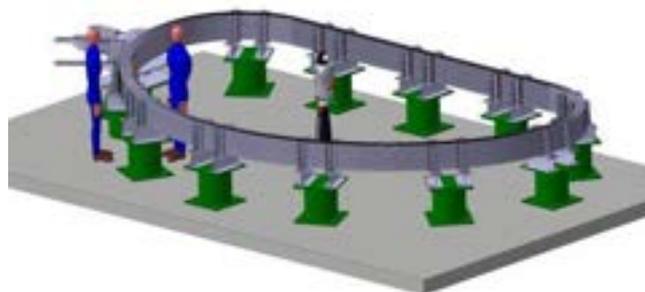


Figura 14. Attrezzatura di composizione della bobina

Stampo di impregnazione della bobina, piastre, staffe di pressatura, alimentatore per il riscaldamento dell'avvolgimento della bobina, attrezzo di sollevamento (per l'impregnazione dell'avvolgimento della bobina)

Per l'impregnazione della bobina verrà utilizzato un opportuno banco sul quale sarà posizionato il Winding Pack che verrà introdotto in una scatola di impregnazione realizzata in lamierino in acciaio inox saldato, in modo da realizzare, attorno all'avvolgimento, una camera a tenuta di vuoto che verrà successivamente riempita con la resina di impregnazione (Figura 15).

Attorno a tale scatola verranno posizionate le piastre di riscaldamento e di distribuzione del carico di pressatura sulle quali agiscono le staffe di pressatura ancorate alla struttura. A completamento dell'impianto verrà realizzato il sistema di riscaldamento completo di alimentatore e candelette riscaldanti.

Per il sollevamento e posizionamento della bobina sull'attrezzatura verrà impiegato il bilancino di sollevamento precedentemente descritto; sull'attrezzatura dovranno quindi essere previsti gli stessi punti di interfaccia in modo tale da consentire l'impiego dello stesso attrezzo.



Figura 15. Stampo di impregnazione della bobina toroidale completo di staffe di pressatura

Laser tracker, alimentatori e strumentazione per prove elettriche (per le prove intermedie di accettazione bobina)

Relativamente all'esecuzione dei rilievi dimensionali è previsto un sistema di misura laser tracker capace di eseguire il rilievo della geometria dell'avvolgimento e grazie al software di analisi comparare direttamente le dimensioni del manufatto con il modello 3D dello stesso.

Per le prove elettriche è previsto l'impiego di rack di misura, contenenti tutta la strumentazione necessaria, inclusi gli alimentatori ad alta tensione; tali attrezzature di collaudo, risultando installate in opportuni armadi movimentabili e possono essere impiegate nelle diverse postazioni di lavoro.

Relativamente all'esecuzione dei test di tenuta e di pressione verrà impiegata una camera da vuoto anulare in grado di ospitare l'intera bobina.

▪ *Linea di avvolgimento del doppio pancake della bobina toroidale JT-60SA*

Sono state prese in considerazione le diverse tecniche e metodologie di avvolgimento possibili per il progetto in questione ed è stata preparata la specifica per l'ordinazione della linea di avvolgimento e dei suoi componenti. Sulla base di tale documento è stato ordinato l'impianto di avvolgimento (Figura 16) che verrà realizzato su una linea che comprenderà tutti i componenti necessari ad eseguire le differenti fasi di lavorazione per la realizzazione dei doppi pancake; in particolare la linea sarà composta da:

- a) un aspo svolgitoro sul quale verrà installato il rocchetto del conduttore necessario per l'avvolgimento;
- b) una raddrizzatrice, realizzata con un sistema di rulli contrapposti, per eliminare la curvatura residua del conduttore e per consentire il trascinamento del conduttore per l'alimentazione della linea;
- c) una struttura a portale che supporterà la macchina curvatrice per la sagomatura del conduttore;
- d) una tavola roto-traslante che ospiterà la forma di avvolgimento sulla quale verrà deposto il cavo dopo la sagomatura.

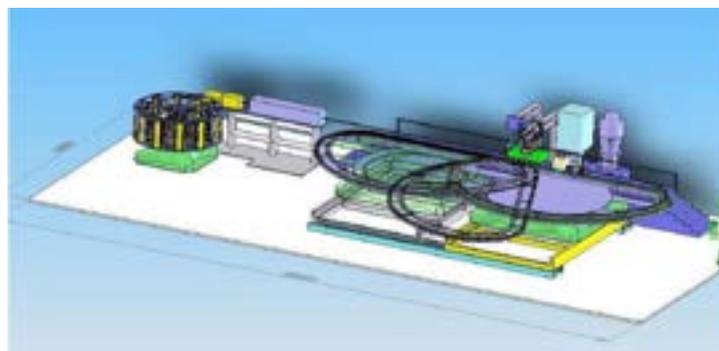


Figura 16. Linea di avvolgimento

Sulla linea verrà inoltre realizzata la pulizia del conduttore, la sabbiatura dello stesso per il conferimento della rugosità superficiale necessaria all'adesione dell'isolamento, e l'applicazione del nastro di vetro per la realizzazione dell'isolamento di spira.

A completamento della linea sono previste attrezzature accessorie per la realizzazione del salto di strato, per la fresatura del conduttore per consentire l'applicazione dell'ingresso elio e per la correzione locale dell'avvolgimento.

Per la movimentazione dei singoli doppi pancake è previsto l'impiego di un bilancino di sollevamento che deve interfacciarsi con la linea di avvolgimento e con le altre postazioni di lavoro (Figura 17).

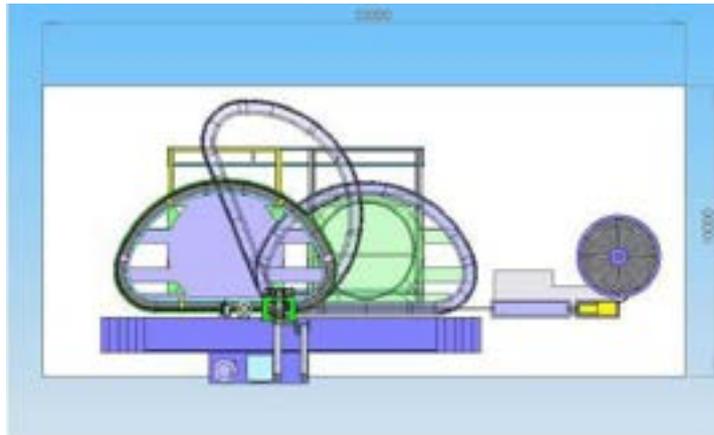


Figura 17. Movimentazione tavola di avvolgimento

- *Analisi del comportamento elettro-termo-fluido-dinamico del pancake centrale della bobina di JT-60SA durante le condizioni nominali di funzionamento*

In particolare, ipotizzando l'avvio dell'instabilità nell'ultimo istante prima della normale conclusione del flat-top, è stato applicato un impulso di calore sulla gamba interna della bobina per indurre l'instabilità di quench. Lo studio è stato condotto in maniera parametrica al fine di identificare la sensibilità alla variazione di alcuni parametri assunti nelle simulazioni da parte delle caratteristiche di pressione e temperatura. In questo modo è stato, inoltre, possibile valutare la robustezza dei parametri di riferimento operativi e delle scelte progettuali. In tutti i casi studiati la pressione massima si è mantenuta al di sotto di 2,5 MPa e la temperatura al di sotto di 150 K al termine della simulazione. Infine le indicazioni provenienti dai risultati prodotti hanno permesso di congelare i parametri di funzionamento del sistema di scarica.

- *Analisi del comportamento elettro-termo-fluido-dinamico del pancake centrale della bobina di JT-60SA nei transitori rapidi (quench) indotti durante i test a freddo*

Obiettivo principale dello studio è stato quello di definire la pressione massima conseguente al raggiungimento della condizione di instabilità, denominata *quench*, indotta attraverso un lento ma progressivo aumento della temperatura di ingresso dell'elio. La valutazione del comportamento elettro-termo-fluidodinamico ha permesso di definire le caratteristiche dei sistemi di scarica sia elettrico che fluidodinamico necessari ad evitare il danneggiamento della bobina. A tal fine sono state condotte diverse simulazioni utilizzando un codice ad elementi finiti unidimensionale (codice Gandalf) per definire il più opportuno set di parametri in termini di ritardo, tempo di scarica e pressione di ingresso. E' opportuno, infatti, ricordare, che durante i test di qualifica la bobina sarà sottoposta al solo autocampo magnetico, mentre nelle condizioni operative il campo sarà dato dalla combinazione dei campi magnetici prodotti da tutte le bobine. La Figura 18 mostra la distribuzione del campo di pressione all'interno del *pancake* in cinque diversi istanti di tempo successivi all'applicazione del disturbo che ha provocato l'insorgere dell'instabilità nel superconduttore. E' possibile osservare come nella condizione mostrata la pressione si mantenga limitata al di sotto di 2,5 MPa.

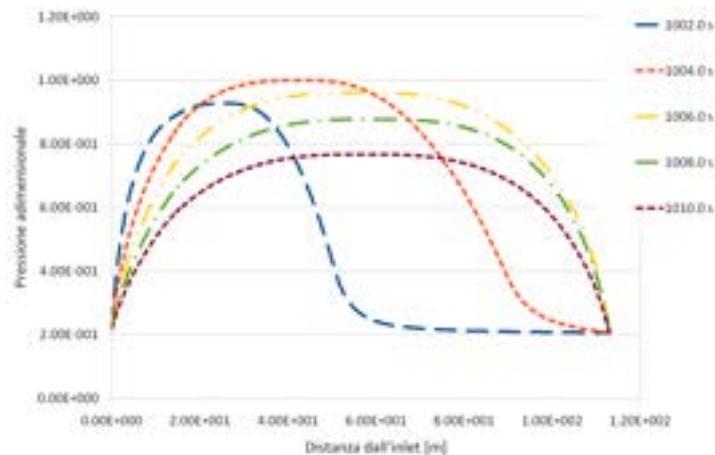


Figura 18. Evoluzione della pressione durante i test a freddo prevista con il codice Gandalf

- *Studio del comportamento termo-fluido-dinamico dei canali di raffreddamento delle casse di contenimento delle bobine.*

Questi canali, originariamente disegnati con una geometria quadrata, sono stati riprogettati con geometria circolare e un confronto delle capacità di raffreddamento delle due opzioni è stato ritenuto necessario. In particolare, limitando lo studio ad un modello semplificato bi-dimensionale, i due canali sono stati posti a contatto con un blocco di acciaio, che simulasse le casse, posto ad una temperatura iniziale di 20 K. Successivamente, è stato simulato un uguale flusso di elio alla temperatura di 4,4 K all'interno dei canali e l'andamento della temperatura in un punto del blocco di acciaio più lontano dai canali è stato registrato e confrontato tra le due opzioni. I risultati hanno mostrato che le due opzioni sono equivalenti dal punto di vista termo-fluido-dinamico per cui la scelta dell'una o dell'altra dipende esclusivamente da questioni manifatturiere.

A.2 Progettazione strutture di contenimento bobine toroidali JT-60SA

Nel quadro di questa attività è stata sviluppata la documentazione tecnica necessaria all'emissione degli ordini di acquisto dei materiali. Nello specifico le azioni svolte hanno riguardato:

- pianificazione delle attività e relativo programma di garanzia di qualità e piano di controllo con particolare riferimento all'analisi dei materiali, ai controlli delle saldature e controlli intermedi e finali;
 - sviluppo dei disegni costruttivi relativi ai componenti di assemblaggio della cassa di contenimento bobina;
 - programma di qualifica relativo alle procedure di messa a punto dei processi di saldatura e mock-up per la validazione della tecnologia di saldatura;
 - selezione del materiale costruttivo e relativa specifica d'ordine.
- *Disegni della cassa di contenimento della bobina di JT-60SA*

L'avvolgimento della bobina è contenuto in una cassa in AISI che costituisce il principale componente strutturale del sistema magnetico ed è caratterizzato da precisioni molto accurate per garantire il corretto accoppiamento con la bobina stessa.

La cassa delle bobine toroidali è una struttura saldata di piastre con spessore nell'intervallo 15-100 mm. Ogni cassa sarà composta da un numero limitato di sottoinsiemi per minimizzare le saldature necessarie all'assemblaggio finale. I supporti meccanici delle bobine poloidali esterne e del trasformatore centrale saranno saldati. Il sistema magnetico di JT-60SA è supportato attraverso le casse delle bobine toroidali. I disegni su tavole in 2D sono estratti da un modello in 3D elaborato su software CATIA 5.

- *Specifiche tecniche per la realizzazione della cassa di contenimento della bobina di JT-60SA*

Per ragioni di praticità la cassa di contenimento è realizzata da 4 sottoassiemi ottenuti da saldatura a partire da forgiati o laminati, con saldature profonde al massimo circa 70 mm (Figura 19).

La segmentazione dei sottoassiemi e il relativo processo di saldatura, dovrà comportare distorsioni compatibili con un adeguato sovrassessore (5-10 mm) lasciato sulle superfici esterne da lavorare dopo la saldatura finale e la

chiusura delle casse. Saranno eseguiti tutti i controlli non distruttivi che la geometria dei manufatti consentirà di realizzare. La qualifica del processo di saldatura sarà importante per garantire l'integrità del manufatto.

ENEA fornirà 18 gruppi di sottoassiemi di casse per bobina toroidale di JT-60SA che saranno consegnati ai due costruttori della bobina (ASG ed Alstom) i quali procederanno all'inserimento della bobina stessa nella cassa e alla chiusura finale. In aggiunta saranno forniti dei mock-up per la qualifica delle saldature di chiusura.

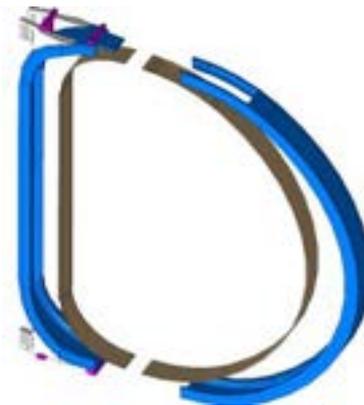


Figura 19. Gruppo di componenti meccanici della cassa di contenimento

A.3 Progettazione degli switch network unit

L'ENEA ha condotto studi e progettazione preliminare per la realizzazione di quattro sistemi di switching per l'ottenimento di impulsi di alta tensione sugli avvolgimenti delle bobine del trasformatore centrale della macchina JT-60SA.

E' previsto che ENEA fornisca 4 Switching Network Unit (SNU) per i 4 solenoidi centrali del tokamak JT-60SA. A questo scopo, sono state elaborate le specifiche tecniche e gli altri documenti necessari alla realizzazione ed all'integrazione finale degli SNU ed alla emissione degli ordini di acquisto. Le specifiche tecniche elaborate precisano i parametri funzionali del sistema, la modalità di funzionamento e i limiti di esercizio.

In principio, uno SNU può essere visto come un interruttore per la corrente continua che inserisce molto rapidamente un resistore nel circuito di alimentazione allo scopo di produrre l'alta tensione necessaria al breakdown ed alla formazione del plasma. E' utile rilevare che le prestazioni non comuni richieste agli SNU (in termini di corrente, tensione, tempi di intervento) non possono essere ottenute mediante dispositivi commerciali esistenti e richiedono quindi un progetto specifico basato su configurazioni innovative.

I disegni di layout o comunque relativi ad edifici, strutture e servizi di JT-60SA sono stati discussi e concordati con l'Agenzia Europea Fusion for Energy (F4E) e con la Japan Atomim Energy Agency (JAEA) e possono esistere diverse versioni adattate alle esigenze di ciascuna agenzia.

Ogni SNU fornita consiste in un interruttore veloce principale (SS), un making switch (MS), due set di resistori di breakdown (R1 e R2) regolabili tramite i relativi selettori, due interruttori di sicurezza per la messa a terra (GS). Inoltre, deve essere supportata da ogni sistema di controllo, protezione, misura, raffreddamento necessario al suo funzionamento. In Figura 20 si riporta lo schema funzionale di un sistema SNU.

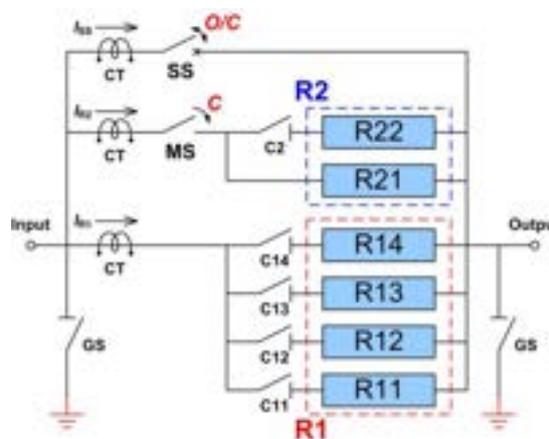


Figura 20. Schema funzionale del sistema SNU

Gli scenari di corrente di un tokamak (Figura 21) prevedono una prima fase caratterizzata da una lenta salita (ramp-up) della corrente prodotta dal convertitore a tiristori (Base PS), fino a un massimo valore prestabilito (inferiore a 20 kA nel caso dei CS). Quando questo valore è stato raggiunto, la SNU, inserendo un'opportuna resistenza R1 in serie all'avvolgimento, produce una brusca derivata di corrente che non potrebbe essere sostenuta dal solo convertitore a tiristori. Tale derivata di corrente induce la necessaria tensione toroidale nel plasma.

Dopo l'avvio del plasma (tipicamente dopo qualche decina di millisecondi), lo scenario può richiedere una seconda fase di funzionamento della SNU in cui la derivata di corrente è meno ripida. Questa variazione viene ottenuta inserendo, tramite il MS, una seconda resistenza R2 in parallelo a R1 che riduce la resistenza equivalente in serie all'avvolgimento.

Le operazioni precedentemente descritte non sono affatto banali con i dispositivi elettrici normalmente utilizzati. L'unica soluzione pratica percorribile è quella di realizzare l'interruttore SS con un approccio "ibrido", cioè sfruttando il parallelo di più dispositivi, in parte elettromeccanici in parte statici. L'accuratezza temporale può essere ottenuta solo utilizzando uno static circuit breaker (SCB) in grado sia di aprire sia di chiudere il circuito sotto carico. Esso deve essere composto da almeno 6 IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristors) in parallelo (in base alla ridondanza desiderata).

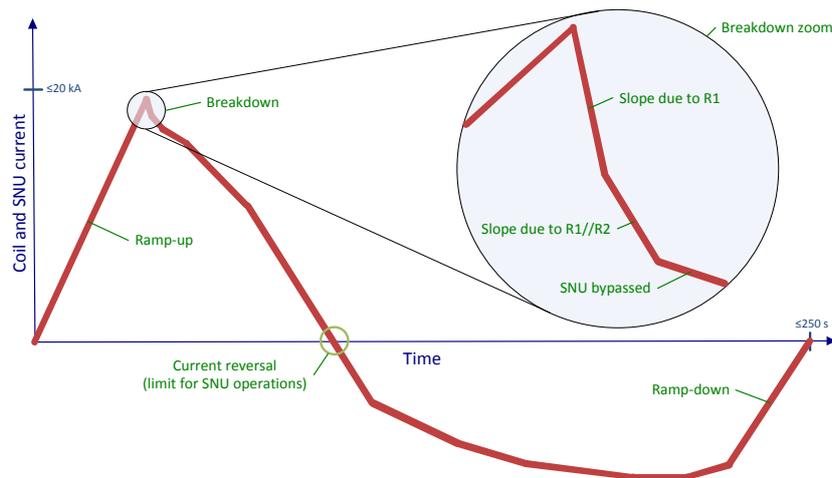


Figura 21. Esempio di scenario di corrente per un CS. La fase di break down è ingrandita per enfatizzare il ruolo dello SNU

E' importante rilevare che sia la serie che il parallelo degli IGCT sono critici e necessitano di un'attenta selezione dei componenti nonché una rete di componenti aggiuntivi (snubber, diodi di protezione, ecc.). Poiché i componenti dell'interruttore SCB non potrebbe mai supportare (specialmente per motivi termici, ma anche perché è unidirezionale) tutto lo scenario di corrente, è necessario inserire un by-pass switch (BPS) elettromeccanico dimensionato per un funzionamento di 20 kA (più un margine di 3 kA in caso di disruzione del plasma) per 250 s.

L'interruttore BPS potrebbe interrompere la corrente anche da solo, ma lo farebbe con una grande incertezza rispetto ai tempi e producendo un arco elettrico ad ogni operazione che richiederebbe interventi di manutenzione frequenti (si tenga presente che lo SNU interviene normalmente in ogni esperimento sul plasma). Per questo, la parte SCB deve sostenere una chiusura e riapertura per ogni operazione sia di apertura che di chiusura dell'interruttore BPS. I tempi e la sincronizzazione di questi automatismi devono essere attentamente studiati e regolati, inviando il comando in anticipo quando necessario.

Il controllo generale delle operazioni è affidato ad un controllore locale (LCC) connesso al resto del sistema da una rete deterministica basata su reflective memory (RM). Sono anche previsti segnali di emergenza con connessioni dedicate. Per garantire un'efficiente diagnostica delle operazioni sono richieste misure di corrente in ogni ramo con una banda di almeno 5 kHz.

A.4 Progettazione alimentatori dei magneti poloidali e toroidali di JT-60SA

L'ENEA ha condotto gli studi e la progettazione per la realizzazione di otto alimentatori AC/DC e relativi quattro trasformatori, per gli avvolgimenti poloidali e di controllo della macchina JT-60SA.

L'ENEA deve fornire parte delle alimentazioni elettriche del sistema magnetico di JT-60SA (Figura 22), per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente (6 alimentatori per le bobine CS1, CS2, CS3, CS4, EF1 e EF6; 2 alimentatori per le bobine FPPCC-Fast Plasma Position Control Coil) con relativi interruttori più quattro trasformatori.

Il sito di installazione è il centro di ricerca di Naka-Ibaraki circa 150 km a nord di Tokyo in Giappone. Questi sistemi non verranno installati in "green field" ma dovranno essere inseriti in sistemi e impianti esistenti e, in parte ad essi collegati. Per questo si sono avuti slittamenti dei tempi dovuti agli smontaggi, revisioni delle zone di allocazione dovute alle facility necessarie e in ultimo alle verifiche strutturali post sisma.

Le specifiche tecniche elaborate precisano i parametri funzionali del sistema, la modalità di funzionamento e i limiti di esercizio.

Le alimentazioni elettriche degli avvolgimenti devono fornire una corrente continua regolabile in grado di riprodurre gli scenari di corrente desiderati.

In Figura 23 si schematizza la versione corrente del circuito di alimentazione di due bobine del central solenoid (CS). In particolare, sono mostrati i seguenti elementi funzionali:

- trasformatori di potenza (anche per ragioni di economicità, gli accordi internazionali prevedono di riutilizzare per quanto possibile i trasformatori esistenti in JT-60SA);
- convertitori AC/DC a tiristori a 4 quadranti (Base PS);
- crow-bar (circuito di protezione, soprattutto per le sovratensioni);
- SNU;
- quench protection circuit (QPC) che scarica l'energia magnetica accumulata nel superconduttore in caso di quench del superconduttore stesso o in caso di altri guasti o spegnimenti;
- current reversing link (CRL) per consentire operazioni con un capo magnetico toriodale di polarità inversa;
- avvolgimenti a superconduttori.

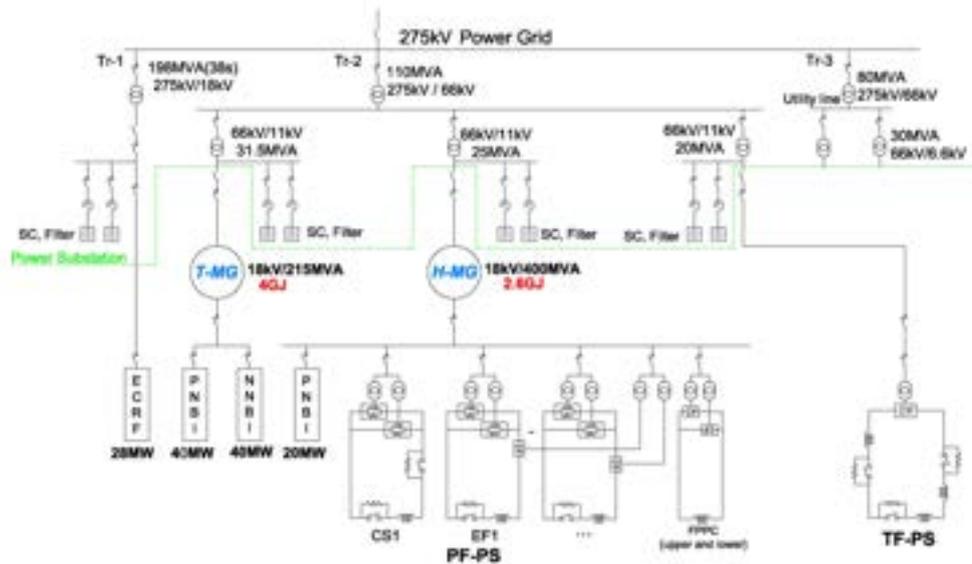


Figura 22. Impianto elettrico di alimentazione della macchina Tokamak JT-60SA

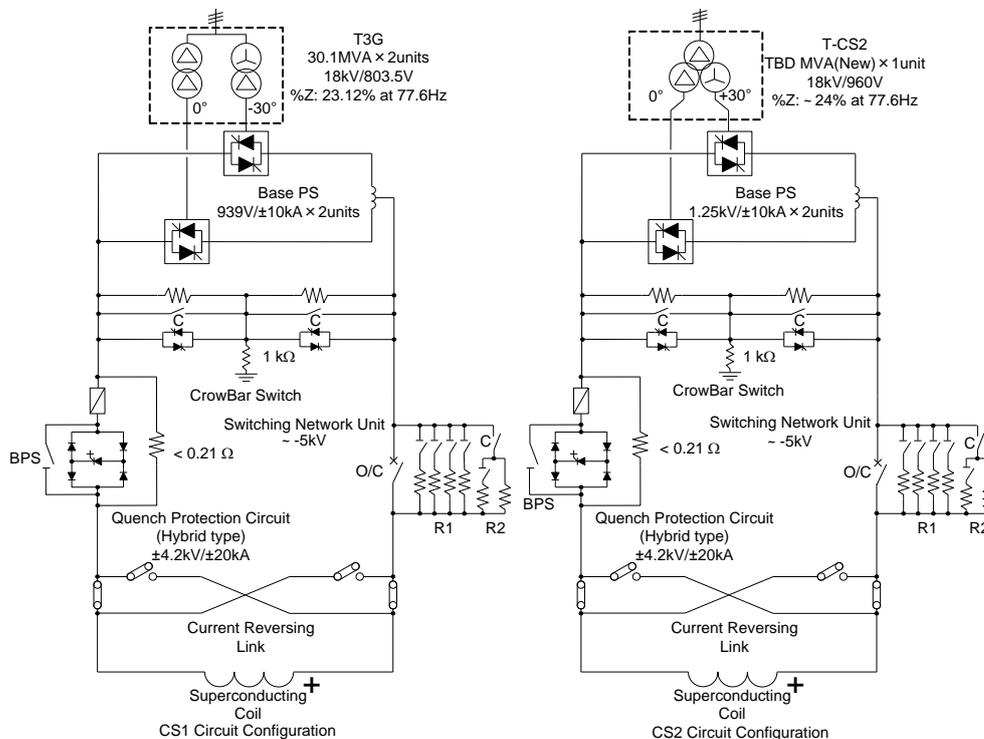


Figura 23. Schema delle alimentazioni degli avvolgimenti CS1 e CS4

B. Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility)

L'attività ha come obiettivo lo sviluppo progettuale del target per la produzione di neutroni per IFMIF, del suo sistema di sostituzione e del dispositivo di purificazione continua da azoto del litio.

B.1 Forniture ed implementazioni comuni per progettazione, costruzione ed operazioni riguardanti l'impianto a litio EVEDA Loop per IFMIF

L'ENEA ha eseguito attività sperimentali presso l'impianto a litio EVEDA-Loop, realizzato a Oarai in Giappone, che hanno riguardato:

- progettazione di un prototipo del target IFMIF per verifiche sperimentali di fluidodinamica;
- realizzazione e fornitura di misuratore di resistività del litio per misure di impurezze;
- realizzazione e fornitura di misuratore di cavitazione;
- sperimentazione presso l'impianto EVEDA Loop.

▪ Progettazione del prototipo del target per l'EVEDA loop

È stata completata la progettazione ingegneristica del Target Assembly (TA) con back-plate rimovibile a baionetta che costituisce il concetto europeo di target, alternativo a quello integrale sviluppato dal JAEA, per l'EVEDA Lithium Test Loop.

ENEA ha sviluppato e completato sia il design della back-plate in EUROFER che del supporto di interfaccia (in F82H) con la rimanente parte fissa del target assembly progettata dal JAEA.

Sono state individuate ed ottimizzate tutte le soluzioni ingegneristiche ritenute più idonee per quanto riguarda il sistema di centraggio, la tipologia e i materiali della guarnizione di tenuta, le caratteristiche funzionali dei pattini, l'accoppiamento tra la back plate e il frame di interfaccia, ecc..

E' stata inoltre eseguita un'analisi termomeccanica dettagliata con riferimento sia alle condizioni nominali che a quelle di progetto. I risultati indicano che il componente è in grado di sopportare i carichi termici e meccanici previsti garantendo una buona performance complessiva anche per quanto concerne gli spostamenti relativi tra il frame e la back-plate che risultano contenuti nei massimi valori ammissibili.

▪ Sistemi di monitoraggio di fenomeni di cavitazione e di impurezze non metalliche nel circuito litio liquido

Presso il centro di ricerche di Oarai in Giappone è in fase di realizzazione un impianto a litio fluente avente l'obiettivo di validare sperimentalmente il progetto del circuito litio della macchina IFMIF. Condizioni operative fondamentali sono sia la regolarità fluidodinamica del flusso del litio liquido, sia l'assenza di impurezze di varia natura chimica in esso disciolte (in particolar modo non metalli). Ciascuno di questi aspetti, necessitando di un'approfondita verifica sperimentale, ha richiesto lo svolgimento di una linea di attività dedicata.

Per quanto concerne la regolarità fluidodinamica, va verificata l'assenza di fenomeni di cavitazione, in grado di innescarsi in zone del circuito litio caratterizzate da alte velocità e basse pressioni del metallo liquido (in particolare nella zona di aspirazione della pompa elettromagnetica).

Per quanto riguarda il controllo e la misura delle impurezze chimiche, il sistema è funzionale al mantenimento di valori di concentrazioni di tali impurezze inferiori ai valori fissati dal progetto IFMIF, corrispondenti a 10 wppm (parti per milioni ponderali) di elementi non metallici (H, C, N, O) nella massa del litio. Tale monitoraggio viene gestito attraverso l'impiego di un resistivity meter, ossia di un misuratore in linea della resistività del litio liquido.

Misuratore di cavitazione

Il sistema sviluppato da ENEA, denominato CASBA, è utilizzato per monitorare le vibrazioni dovute all'implosione di bolle prodotte da fenomeni di cavitazione o di ebollizione. Tale sistema è costituito da un accelerometro, un amplificatore di segnale ed un oscilloscopio. Le vibrazioni dovute dall'implosione delle bolle vengono rilevate dall'accelerometro piezoelettrico dopo di che il segnale viene filtrato e amplificato prima di essere inviato all'oscilloscopio. Prove sperimentali hanno dimostrato che il CASBA rileva più velocemente di altri sistemi di misura l'insorgenza di fenomeni di cavitazione o di ebollizione sotto-raffreddata.

Si è stabilito di installare sull'impianto a litio fluente di Oarai due unità CASBA: una in corrispondenza della back-plate del target e l'altra all'aspirazione della pompa elettromagnetica. A questo scopo è stato progettato un apposito componente meccanico di interfaccia tra l'impianto e l'apparecchiatura. Tale componente consiste in una guida d'onda costituita da una barra di acciaio ed ha anche la funzione di disaccoppiare dal punto di vista termico l'accelerometro dall'impianto.

Sistema di monitoraggio per la misura in linea della concentrazione di azoto nel litio liquido

Il sistema proposto si basa sull'aumento della resistività elettrica del litio liquido, rispetto al litio puro, determinato dalla presenza di azoto disciolto dentro di esso. Sulla base dell'esistenza di questa relazione funzionale, è stato ideato e poi fisicamente realizzato, in collaborazione con l'Università di Nottingham (UK), il cosiddetto "resistivity meter", mostrato in Figura 24. Il dispositivo è interamente realizzato in AISI 316L. I suoi componenti principali sono: la sorgente di ingresso del litio (A), la pompa elettromagnetica (B), il tubo a sezione capillare (C).

Il tubo capillare, avente forma di loop viene continuamente riempito con litio liquido per mezzo della pompa elettromagnetica miniaturizzata. Il condotto di tale pompa, costituito da una sezione di tubo appiattita è situato in mezzo ai poli di un magnete permanente (0,55 T) ed è isolato da esso per mezzo di sottili fogli di mica. La resistenza del litio viene misurata tra le due piastre connesse al tubo capillare con un metodo standard a quattro terminali. Per la misura viene usato un nano ohmetro ad elevata precisione. La resistività viene quindi ricavata indirettamente da quest'ultima misura.

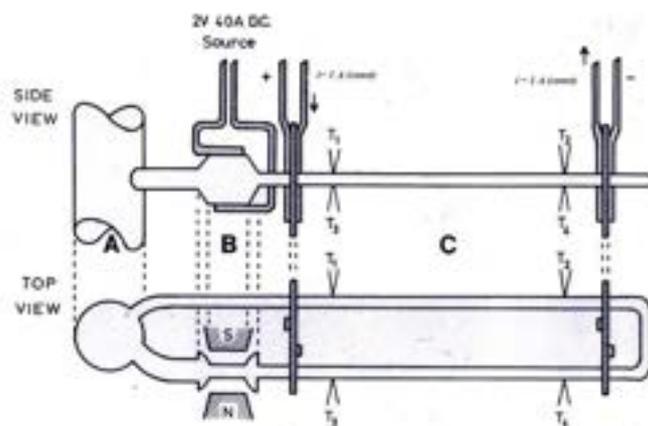


Figura 24. Schema di principio del resistivity meter

Isotherme resistività-composizione per soluzioni di azoto in litio liquido, determinate a varie temperature nell'intervallo 200-450 °C, hanno mostrato che in ogni caso, per soluzioni assai diluite, la resistività aumenta con un gradiente leggermente crescente, mentre, per soluzioni più concentrate, aumenta in maniera lineare, fino al valore di saturazione, oltre il quale rimane costante.

Nell'intervallo di esistenza della relazione di linearità, è dunque possibile correlare, previa opportuna taratura per ogni temperatura di lavoro, il contenuto percentuale di azoto con la resistività; la sensibilità della misura, cioè la variazione di resistività a parità di variazione di concentrazione (ossia la pendenza della retta), tende inoltre ad aumentare leggermente con la temperatura.

Data l'esistenza di un valore minimo registrabile nella variazione di resistività (con la strumentazione impiegata esso è pari a $\sim 0,5 \text{ n}\Omega \text{ m}$), esiste dunque anche un limite inferiore nel valore determinabile di azoto disciolto in litio: a 200 °C esso risulta pari a 175 wppm, mentre a 450 °C questo valore scende a 139 wppm. In tutto il range di temperature operative, questo limite inferiore risulta quindi ampiamente maggiore del valore di 10 wppm, richiesto come specifica di purezza del litio del target IFMIF.

Il resistivity meter, benché caratterizzato dal vantaggio di dare una risposta in linea, in tempi rapidi e senza risultare invasivo del campione indagato, non può pertanto essere impiegato come dispositivo atto a garantire con sicurezza il mantenimento dei rigidi requisiti di purezza di IFMIF. Potrà essere quindi impiegato solo per escludere il raggiungimento di elevati livelli di impurezza di azoto (un ordine di grandezza superiore alla specifica IFMIF), come una sorta di indicatore di "livello di allarme".

Esperimenti condotti con getter insolubili (cioè sostanze in grado di assorbire azoto dalla soluzione di litio) hanno comunque confermato l'efficienza del resistivity meter nel monitorare la concentrazione di azoto. Sono state infatti condotte separate campagne sperimentali, in cui si è impiegato in un caso un getter di cromo, nell'altro un getter di vanadio: in entrambi i casi, il valore di resistività misurato è subito diminuito non appena il getter è stato introdotto in soluzione in quantità tale da abbassare la concentrazione di azoto al di sotto del suo valore di saturazione; viceversa, quando nuovo azoto è stato riimmesso in soluzione, in quantità tale da eccedere la capacità assorbente del getter, la resistività misurata è subito tornata ad assumere valori più elevati.

Sistema di Acquisizione Dati

L'ENEA ha realizzato un sistema di acquisizione dati (DAQ) unico sia per il detector della cavitazione che per il resistivity meter. Questo sistema (Figura 25) è basato sulla tecnologia National Instrument Field ed è costituito da:

- Interfaccia Ethernet/seriale for compact Field point -NI- cFP-1804;
- Modulo Field point analog input -NI-cFP-AI-110;
- Modulo Field point digital output -NI-cFP-DO-410.



Figura 25. Armadio DAQ per i sensori di cavitazione e per il resistivity meter

B2. Forniture ed implementazioni comuni per sperimentazioni della corrosione/erosione per IFMIF.

Nei laboratori ENEA sono state condotte attività sperimentali per la caratterizzazione, in termini di perdita di peso e di modifica-zione metallografica di alcuni acciai strutturali di interesse IFMIF, dopo esposizione in litio fluente ad alta velocità (20 m/s) per tempi significativi.

Dopo la prima fase di sperimentazione condotta come previsto con l'impianto Lifus 3 (Lithium Fusion), avendo quest'ultimo evidenziato alcuni punti deboli, è stato deciso di realizzare una nuova infrastruttura sperimentale, più adatta alle finalità di IFMIF. Nel quadro dell'obiettivo si è proceduto quindi alla progettazione dell'impianto e all'acquisizione dei componenti per la sua realizzazione.

Progettazione dell'impianto sperimentale a litio fluente Lifus 6

La progettazione dell'impianto IFMIF richiede un'approfondita conoscenza del comportamento dei materiali strutturali esposti al litio ad alta velocità. È infatti noto che il litio, a causa delle impurezze non metalliche in esso presenti, promuove la corrosione dei materiali e che l'effetto della velocità è causa del ben più deleterio fenomeno erosivo. Per IFMIF è richiesto che il fenomeno di erosione/corrosione da litio venga limitato ad un valore non superiore ad 1 μm . L'indagine sperimentale per la determinazione di tale tasso di erosione corrosione sarà eseguita presso l'impianto Lifus 6 del CR ENEA Brasimone.

Le specifiche funzionali dell'impianto sono:

- Temperatura in sezione di prova: 350 °C;
- Velocità in sezione di prova: almeno 16 m/s;
- Disponibilità di prevalenza e attacchi per l'installazione di un sistema di purificazione e monitoraggio.

Al fine di semplificare la termoidraulica del sistema si è preferito adottare una temperatura unica per tutto l'impianto, realizzando quindi un circuito isoterma con classica geometria ad anello, il cui schema è riportato in Figura 26. Sono identificabili due circuiti: il circuito a metallo liquido, con tubazioni da 1" e le linee gas interamente realizzate con tubazioni Swagelok da 1/2".

La circolazione del litio è garantita da una pompa elettromagnetica, il cui punto di funzionamento ottimale si ha in corrispondenza ad una portata di 12 m³/h con prevalenza di 2,5 bar. Il circuito gas ha come scopo il mantenimento delle condizioni di sicurezza, e quindi di assenza di ossigeno ed acqua, in tutte le possibili condizioni di esercizio dell'impianto ed in particolare nelle fasi di caricamento e drenaggio.

La sezione di prova sperimentale (Figura 27) è una delle parti rilevanti dell'impianto perché in essa si raggiungono le condizioni rappresentative di IFMIF.

I provini hanno forma cilindrica e sono montati su un'asta a sua volta fissata nella parte superiore ad una flangia rimovibile ed appoggiata nella parte inferiore ad un sistema di centraggio. In questo modo si realizza per il litio un meato di passaggio tale da portare al valore di velocità di progetto di 16 m/s. I provini potranno essere estratti drenando l'impianto, aprendo la flangia mantenendo il circuito in atmosfera inerte e rimuovendo l'asta porta campioni. Questa procedura garantisce una limitata contaminazione del circuito e la massima sicurezza per gli operatori, riducendo i tempi di fermo per le operazioni di sostituzione.

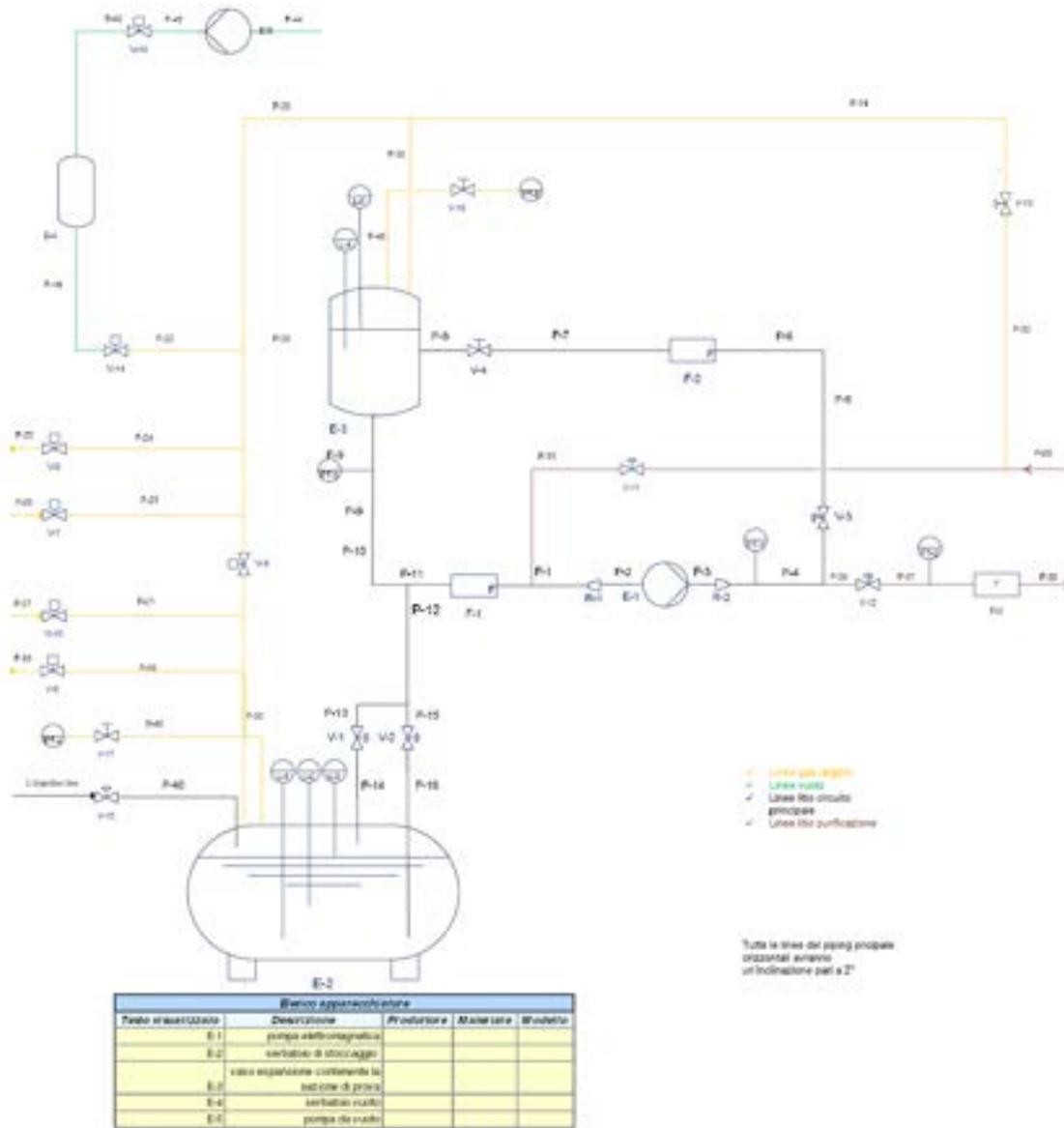


Figura 26. Schema dell'impianto Lifus 6



Figura 27. Sezione di prova Lifus 6

La progettazione dell'impianto è stata completata, nel rispetto dei principali requisiti sperimentali. La notevole semplificazione impiantistica rispetto all'impianto Lifus 3 dovrebbe garantire una notevole affidabilità e continuità operative. La sicurezza dell'impianto e degli operatori è stata tenuta nella massima considerazione, selezionando soluzioni, come per il montaggio e l'estrazione dei provini, che riducano al minimo la possibilità di contatti accidentali con il litio. La flessibilità del sistema ed il notevole sovradimensionamento della pompa elettromagnetica consentiranno inoltre l'installazione e qualificazione di sistemi di purificazione e monitoraggio delle impurezze in via di selezione.

B.3 Forniture ed implementazioni comuni per la qualifica sperimentale del sistema di purificazione litio per IFMIF

L'ENEA ha completato la progettazione di un circuito di purificazione per la qualifica sperimentale del sistema di purificazione del litio, dalle principali impurezze, basato su tre diversi getter solidi.

L'impianto Lifus 6 è una facility dedicata a test con litio liquido fluente. Il loop è suddiviso in due parti: il circuito principale, dedicato a test di corrosione e compatibilità tra acciai RAFM e litio fluente ad elevate temperature; il circuito ausiliario, o di purificazione, dedicato a prove di filtrazione, monitoraggio e purificazione del metallo liquido da impurezze non metalliche.



Figura 28. Schema del sistema trappole.
TF: trappola fredda; TY: trappola Ittrio,
TH: trappola calda (titanio)

Vi è una stretta connessione tra le due differenti attività sperimentali: la presenza di C, O, H, N disciolti in litio sotto forma ionica, aumenta e promuove i meccanismi di corrosione chimica degli acciai. Per questo i requisiti di IFMIF impongono che ciascuna delle specie sopra indicate non superi la concentrazione di 10 wppm.

Il circuito di purificazione consiste di un sistema di tre trappole (Figura 28), in acciaio AISI 316L, riscaldato elettricamente alla temperatura di esercizio e collegato in parallelo all'impianto principale tramite due valvole di stacco (sezionamento).

La prima trappola (trappola fredda; TF), riempita con una rete di acciaio a maglia larga, abbassa la temperatura del litio fino a 473 K, determinando la diminuzione di solubilità dei vari anioni del metallo e favorendone la separazione sotto forma di precipitati solidi: il contenuto residuo di C, O, H e N in soluzione si attesta rispettivamente su 2, 7, 63, 1461 wppm. Successivamente il litio liquido transita attraverso la trappola calda (TH, operante a 873 K), contenente invece un getter di titanio sotto forma di spugna, in grado di assorbire azoto dal litio riducendone il contenuto a circa 2 wppm. Infine, il litio transita attraverso la trappola di ittrio (TY, operante a 553 K), contenente appunto dei piccoli estrusi di ittrio, in grado di assorbire l'idrogeno dal litio riducendone il contenuto a circa 10 wppm. L'insieme delle tre trappole garantisce quindi che le impurezze di tutti i suddetti non metalli siano contenute al di sotto di 10 wppm.

Le trappole vengono dimensionate in maniera tale da determinare un tempo di residenza del litio in ciascuna di esse pari ad almeno 5 minuti, tempo necessario per garantire l'instaurarsi dei vari equilibri chimico-fisici e dunque la piena efficacia di funzionamento.

Per contenere il volume del circuito ausiliario di purificazione entro valori ragionevoli, il valore della portata volumetrica del litio in questo circuito sarà impostato su un valore relativamente basso, inferiore rispetto a quello del loop principale, che richiede invece, secondo le specifiche di IFMIF, elevati velocità lineari di flusso del metallo.

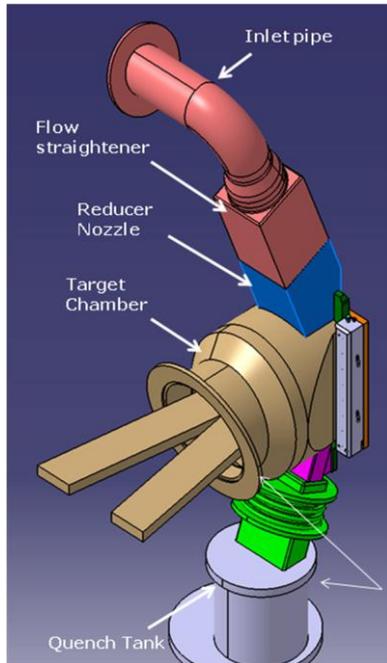
B.4 Forniture ed implementazioni comuni per sviluppo e qualifica di sistema di manipolazione remotizzata del target di IFMIF

L'ENEA ha completato le attività di progettazione e di qualifica sperimentale del sistema di rimozione e ripristino della piastra posteriore del target per via remota. In particolare sono state condotte le seguenti attività:

- progettazione del sistema di manipolazione remotizzata;
- progettazione del mockup di target per effettuare le esperienze di qualificazione;
- prove tecnologiche per qualificare il corretto impiego dei materiali;
- adeguamento dell'area sperimentale;
- acquisizione di componentistica già industrializzata (braccio mobile, dispositivo di avvitamento/svitamento).

▪ *Progettazione del sistema di manipolazione remota*

IFMIF è dotato di un target a litio che a seguito della reazione di stripping D^+ -Li crea il necessario flusso neutronico ad alta energia (14 MeV) per il test dei materiali (Figura 29). L'ambiente in cui questo componente si trova ad operare è considerato molto critico, sia durante la fase di operazione per l'irraggiamento dei materiali sia durante la fase in cui l'impianto è fermo per la manutenzione preventiva. In particolare il valore di dose gamma atteso durante la fase di manutenzione nella zona in cui il target è installato è di 10^5 Sv/h. Con questi valori di attività gamma ogni operazione di manutenzione con metodo manuale è proibita e l'unica alternativa per l'esecuzione di tali operazioni è quella di usare dispositivi comandabili da remoto.



Caratteristica	Valore
Materiale TA	Eurofer
Peso totale TA	~ 850 kg
Peso bersaglio a baionetta	~ 85 kg
Tipo di tenuta	Guarnizione metallica: Helicoflex HNV200- Soft Iron/Inconel 750x/ss304
Tasso di perdita ammesso	10^{-10} Pa m ³ /s
Pressione interna al target	10^{-3} Pa
Pressione esterna	$2 \cdot 10^3$ Pa
Tipo bersaglio (back-plate)	Rimovibile a baionetta
Connessione corpo TA con bersaglio	Sistema a pattini + bulloni
Connessione TA con altri sistemi	Flange con sistema di attacco rapido
Temperatura di funzionamento	250 °C
Temperatura litio	250 °C in ingresso 300 °C in uscita
Isolamento	Temperatura esterna < 50 °C

Figura 29. Target di IFMIF

Le operazioni di manutenzione remotizzata del target di IFMIF richiedono l'impiego di un braccio robotico avente un alto numero di gradi di libertà, per garantire la raggiungibilità delle varie posizioni in cui i tool devono operare, e una buona capacità di carico per permettere la rimozione del bersaglio. Coniugare queste esigenze in un unico braccio robotico, dovendo anche contenere i costi, non è semplice.

Il laboratorio di manutenzione remotizzata del Brasimone era già fornito di un braccio robotico avente una buona capacità di carico e 6 gradi di libertà. Ma le dimensioni dei vari giunti del braccio non consentivano un'agevole manovrabilità attorno al target stesso. Per superare questo problema il braccio robotico esistente è stato modificato per consentire anche l'impiego di un braccio robotico avente una maggiore destrezza ed in grado di gestire piccoli dispositivi.

L'idea realizzata sostanzialmente consiste nell'aver modificato il braccio originariamente presente nel laboratorio trasformandolo in un nuovo sistema integrato basato su flange ad attacco rapido che consentono di sostituire il terminale del braccio in funzione dei task previsti (Figura 30 e 31).

L'adozione di questa soluzione presenta i seguenti vantaggi:

1. riduzione dei costi: viene utilizzata una parte del manipolatore già presente;
2. facile estensibilità del sistema: possono essere inseriti nuovi end effectors (l'interfaccia è già definita);
3. la connessione e la disconnessione degli end effectors viene eseguita automaticamente da postazione remota;
4. il sistema integrato può arrivare ad avere un numero max di 10 gradi di libertà.

Inoltre, tutte le funzionalità del braccio robotico esistente vengono preservate.

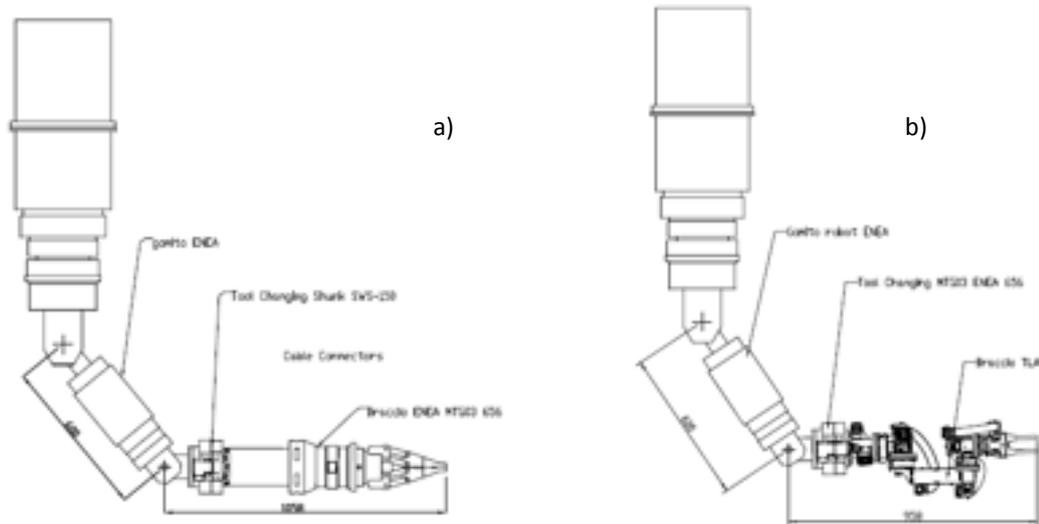


Figura 30. Braccio robotico esistente (a) e nuovo (b)

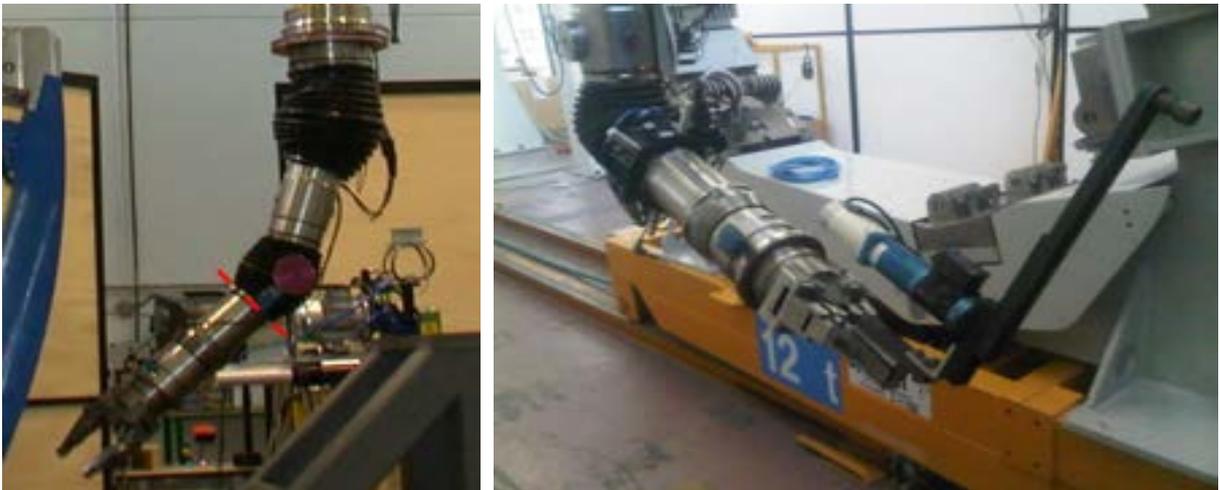


Figura 31. Braccio robotico prima e dopo la modifica

La soluzione adottata per avere la disponibilità di un sistema con alta destrezza e buona capacità di carico ha portato alla realizzazione di un sistema modulare che integra le due funzioni. Tale soluzione permette di raggiungere un grado di elevato di flessibilità con un budget tutto sommato accettabile.

▪ *Verifiche tecnologiche per il Target Assembly di IFMIF*

La proposta europea del concetto di target assembly per IFMIF, conosciuto come Target a Baionetta, presenta delle peculiarità in termini di manutenibilità, di miglioramento della disponibilità d'impianto e di riduzione del materiale attivato da smaltire.

La validazione del progetto di tale concetto di target passa comunque attraverso la verifica di alcune funzionalità senza le quali non è possibile garantire gli elevati standard di sicurezza richiesti durante il funzionamento. A supporto dell'attività d'ingegneria sono stati quindi eseguiti una serie di test e di analisi teorico-computazionali per la validazione di tale concetto, che vengono descritte nel seguito.

Qualifica del sistema di tenuta della backplate

Il sistema di tenuta della backplate del target di IFMIF è realizzato mediante una guarnizione metallica per applicazioni nucleari. Essa dovrà garantire il mantenimento delle condizioni di vuoto previste nella camera del corpo del target (10^{-3} Pa) ed una perdita max 10^{-10} mbar L/s. Tutti i materiali della guarnizione sono stati scelti (in

particolare il materiale esterno della guarnizione) litio compatibili. La scelta è ricaduta su una guarnizione prodotta dalla Helicoflex, Tipo HNV 200 (C ring-low delta data) a basso carico, avente le seguenti caratteristiche:

- Materiale del liner esterno: Armco;
- Materiale molla: Inconel x750;
- Materiale del liner interno: AISI 304L.

I punti centrali della verifica da eseguire sono quelli di valutare le capacità di tenuta della guarnizione proposta riproducendo nella maniera più fedele possibile le sue condizioni operative e di misurare la quantità di materiale del rivestimento in contatto con il litio che viene asportata per i noti fenomeni di corrosione che vengono appunto promossi dal contatto con il litio stesso. Quindi, in accordo alle condizioni operative su esposte, per il test della guarnizione sono state predisposte due sezioni di prova (Figura 32). Le due sezioni di prova, realizzate in acciaio AISI 316L, comprendono due parti: il contenitore in cui viene sciolto il litio ed il coperchio in cui è alloggiata la guarnizione.



Figura 32. Progetto della sezione di prova e sezioni realizzate

L'attività svolta ha evidenziato l' idoneità della guarnizione della Helicoflex HNV 200, attualmente fino al limite di 2000 ore, di utilizzo in ambiente di litio. Si sottolinea che il test è stato eseguito in condizioni più gravose rispetto a quelle operative di IFMIF, almeno in termini di temperatura (350 °C contro i 300 °C previsti per IFMIF).

In particolare due aspetti fondamentali sono stati provati:

- la guarnizione è idonea a bloccare la permeazione del litio;
- in condizioni di funzionamento in stazionario del litio la guarnizione potrebbe non essere bagnata dal litio stesso con il conseguente vantaggio di aumentare la vita della guarnizione stessa.

Analisi e test del sistema di bloccaggio della backplate mediante pattini

Il sistema a pattino consente di chiudere le parti laterali della backplate manovrando semplicemente una vite di manovra. Il dispositivo a pattino è mostrato in Figura 33.

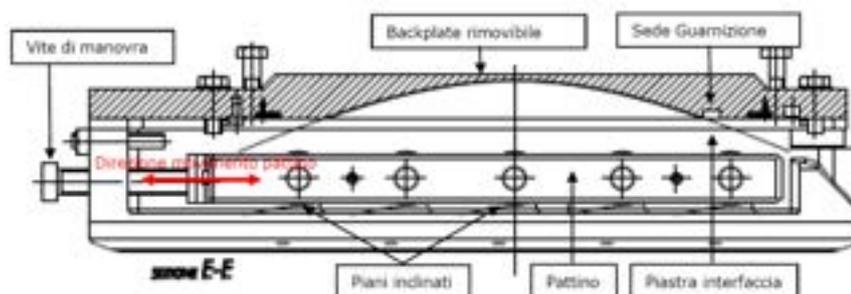


Figura 33. Dispositivo a pattino per la chiusura della backplate di IFMIF

L'inserimento di questo dispositivo consente di risparmiare tempo durante le fasi di rimpiazzo della backplate stessa. Naturalmente tale sistema deve essere sufficientemente affidabile per garantire una continua e costante

pressione sulla guarnizione in modo da mantenere il richiesto grado di vuoto nella camera del target assembly. Non sono quindi ammessi fenomeni di rilassamento delle strutture che possono pregiudicare appunto le condizioni di funzionamento del target stesso. La campagna sperimentale è stata eseguita considerando le condizioni di funzionamento operative del target:

- Temperatura: T_{amb} e 300 °C
- Pressione da esercitare sulla guarnizione: 24 t
- Coppia di serraggio: 40÷50 Nm
- Carico di test: 8 t.

Per l'esecuzione del test è stato realizzato un prototipo in scala reale della zona del pattino. In totale sono state predisposte due sezioni di prova: una per l'esecuzione della prova a temperatura ambiente e l'altra per prove a 300 °C. In Figura 34 è mostrato il prototipo del sistema a pattino per la prova a temperatura ambiente.

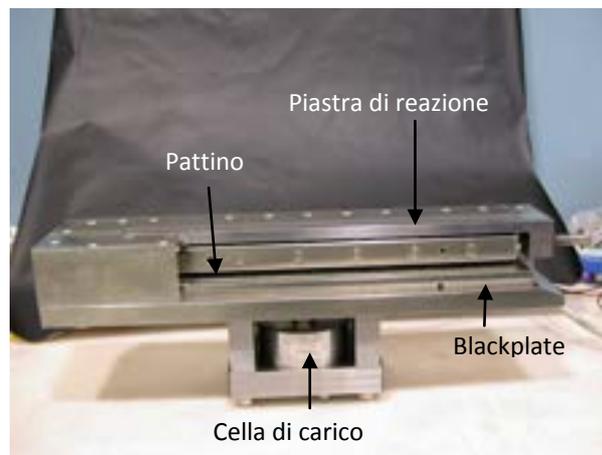


Figura 34. Prototipo del sistema a pattino (prove a T_{amb})

I risultati delle prove alla temperatura ambiente sono illustrate in Figura 35.

Una volta raggiunta la spinta di 8 t il sistema è stato monitorato per un tempo totale di 4 ore, acquisendo con una frequenza di 0,25 Hz. Il grafico mostra che sostanzialmente non vi sono apprezzabili fenomeni di rilassamento.

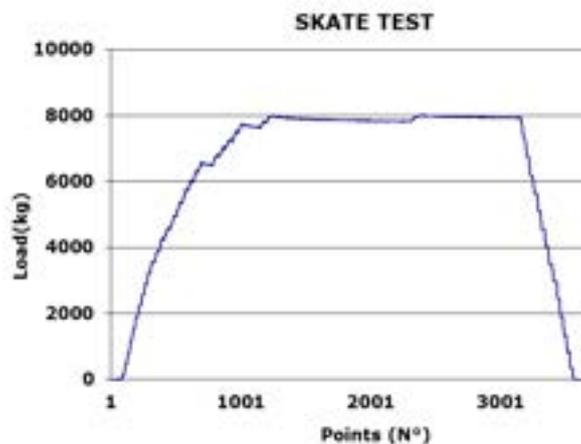


Figura 35. Stabilità del carico trasmesso sulla guarnizione

Tutte Le prove eseguite, seppure preliminari, hanno dimostrato che il sistema a pattino progettato risponde, con buoni margini di sicurezza, alle specifiche di progetto.

Analisi del fenomeno di swelling sugli accoppiamenti bullonati della backplate

Nell'ambito del programma di sviluppo su IFMIF è stata eseguita un'attività di ricerca atta ad investigare le problematiche termomeccaniche potenzialmente indotte dallo swelling da irraggiamento neutronico nelle connessioni filettate della backplate del target assembly. A tal fine si è seguito un approccio di tipo teorico-numeric fondato sul Metodo degli Elementi Finiti e si è adottato un qualificato codice FEM commerciale, ampiamente utilizzato nell'ambito degli studi di termomeccanica computazionale di componenti di reattori a fusione.

La campagna di ricerca ha mirato principalmente alla determinazione della massima deformazione volumetrica da swelling ($\Delta V/V$ %) che possa essere accettata all'interno delle viti dei collegamenti filettati in esame, perché queste possano reggere in sicurezza lo stato tensionale termo-meccanico che vi si desta e/o perché se ne possano evitare coppie di svitamento eccessivamente elevate durante le operazioni di rimozione da remoto. In particolare, l'attenzione si è focalizzata sulle viti di tipo M10, M12 e M16, candidate ad essere adottate nella backplate, investigando, per ognuna di esse, la dipendenza funzionale della massima tensione equivalente di Von Mises e della coppia di svitamento dalla deformazione volumetrica da swelling imposta. In particolare sono stati considerati valori di deformazioni da swelling variabili nell'intervallo 0,001 - 0,1%.

Per ogni tipologia di vite considerata si è sviluppato un modello FEM 3D che la riproducesse realisticamente unitamente alla sua madrevite ed alla sua regione di influenza nella connessione backplate (Figura 36).

Allo scopo di simulare realisticamente lo stato tensionale che si genera all'interno del modello ad opera del processo di serraggio della vite, del riscaldamento del target assembly nonché, infine, degli effetti dello swelling durante la tipica vita operativa della backplate, ogni singola analisi è stata articolata in tre step.

Nel primo step si è simulato lo stato tensionale che si genera nella vite, così come nel frame e nella back-plate, durante il processo di avvitamento e serraggio. Durante il secondo step, al fine di simulare il processo di riscaldamento dell'intero collegamento filettato, che ne precede l'irraggiamento, si è applicato un campo di temperatura uniforme conservativamente pari a 300 °C all'intero modello. Infine, durante il terzo step, dato che si prevede che la vite, il frame e la backplate siano esposti ad un irraggiamento neutronico a temperatura costante, si è simulata la presenza del conseguente processo di swelling, imponendo al modello un campo di deformazioni distorsive tramite la definizione di un tensore di deformazioni uniforme ed isotropo, il cui invariante del primo ordine, ϵ_{sw} , rappresentativo della deformazione volumetrica da swelling, è stato direttamente fornito in input al codice.

I risultati della simulazione sono di seguito riassunti:

1. dal punto di vista qualitativo, i dati ottenuti indicano che laddove la backplate ed il relativo frame non siano completamente liberi di espandersi, lo swelling può indurre, da un lato, l'aumento della tensione equivalente di Von Mises nella vite fino allo snervamento e dall'altro l'incremento della coppia di svitamento al punto da compromettere la fattibilità delle procedure di rimozione da remoto delle viti;
2. dal punto di vista quantitativo, quanto ottenuto, nelle ipotesi assunte, indica che le viti dal diametro maggiore risultano più sensibili agli effetti termomeccanici dello swelling, specialmente per quanto concerne la dipendenza della coppia di svitamento dalla deformazione volumetrica da swelling.

Adeguamento dell'area sperimentale destinata alle sperimentazioni full scale in condizioni rappresentative del target IFMIF

In preparazione all'attività di manutenzione remotizzata prevista per la validazione del target di IFMIF sono state effettuate alcune modifiche ai sistemi di manipolazione e alle funzionalità dell'area sperimentale in cui queste

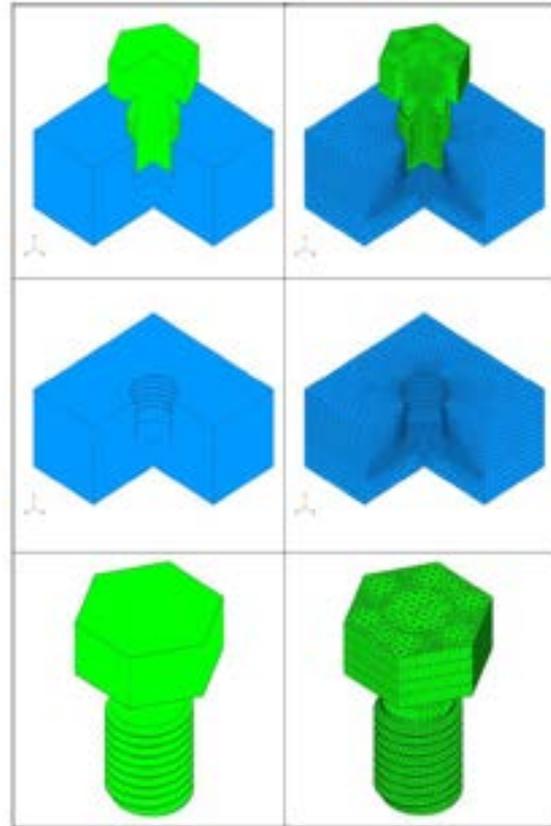


Figura 36. Modello geometrico (Vite M16)

attività saranno svolte. Tutte le attività saranno eseguite presso il laboratorio di Remote Handling del Centro ENEA del Brasimone.

Le modifiche in particolare hanno riguardato:

- l'area di lavoro con l'integrazione del nuovo braccio robotico e l'integrazione di alcune nuove telecamere utili a migliorare le possibilità di visualizzazione degli operatori;
- la sala controllo. Questa area è stata interessata dalle seguenti modifiche:
 1. modifica dei software di gestione dei dispositivi (integrazione nuovo braccio);
 2. modifica del pannello di comando, in modalità manuale, dei dispositivi;
 3. nuovo sistema di gestione remota dell'impianto di visione che include un pannello in modalità manuale ed un 'applicativo software che offre una maggiore flessibilità del sistema.

L'area sperimentale della DRP (Divertor Test Platform) del Centro ENEA del Brasimone è stata adeguata ed è adesso pronta per potere ospitare l'attività di validazione delle operazioni di manutenzione remotizzata per il target assembly di IFMIF. La strategia di manutenzione prevede due scenari: il primo relativo alla possibilità di sostituire la sola backplate ed un secondo basato sulla possibilità di sostituire l'intero target assembly con uno ricondizionato in precedenza e pronto per l'installazione..

Al momento le modifiche apportate consentono di affrontare solamente la prima fase, relativa alla sostituzione della sola backplate del target assembly, mentre per la seconda fase sono richieste ulteriori modifiche. Il sistema di manipolazione dovrà essere integrato con un nuovo dispositivo robotico idoneo a gestire pesi di 1,5 t che è quanto necessario per il test delle operazioni di sostituzione del target.

B.5 Forniture ed implementazioni comuni per progettazione completa del target a litio di IFMIF e del dispositivo di purificazione litio dall'impurezza azoto

L'attività ha comportato la progettazione d'assieme del target IFMIF e del componente di purificazione del litio da azoto. Il progetto comprende calcoli termo-meccanici, neutronici e termoidraulici in condizioni operative (stazionarie e transitorie) ed incidentali. Le scelte progettuali sono state eseguite riferendosi ad analisi teoriche o sperimentali. In particolare le azioni effettuate sono state:

- progetto del target assembly;
- verifiche termo-meccaniche in condizioni stazionarie;
- analisi neutronica e di danneggiamento;
- analisi di funzionalità e di interfaccia.

L'attività svolta si è focalizzata sull'avanzamento del progetto ingegneristico del target di IFMIF basato sul concetto di backplate rimovibile a baionetta (Figura 37). E' stato prodotto un modello 3D in CATIA del sistema, completo di tutte le varie parti (backplate, nozzle, raddrizzatore di flusso, corpo centrale, flange di interfaccia, ecc.), effettuando anche un'analisi di funzionalità per verificare la possibilità di rimuovere la backplate senza interferenze e di integrare il target con il design del loop al litio (progetto della JAEA) e della test cell (progetto del Karlsruhe Institute of Technology).

E' stata individuata ed analizzata in via preliminare la possibilità di utilizzare un sistema customizzato di tipo QDS (Quick Disconnecting System) per quanto riguarda le interfacce meccaniche del target con il loop al litio e con l'acceleratore, oppure, in seconda battuta, giunti di accoppiamento laddove l'uso del QDS risultasse impossibile.

Sono state inoltre effettuate alcune simulazioni numeriche preliminari in supporto al design, in particolare: analisi neutronica, termoidraulica e termomeccanica che hanno globalmente confermato la fattibilità del concetto di target a baionetta proposto per IFMIF e la possibilità di soddisfare le principali specifiche di progetto del sistema.

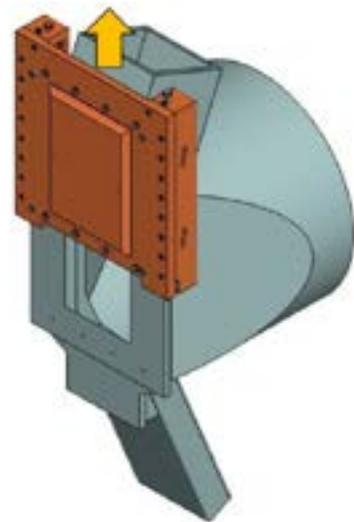


Figura 37. Target assembly con blackplate rimovibile a baionetta

C. Attività per IFERC (International Fusion Energy Research Center)

C.1 Caratterizzazione proprietà fisiche composito ceramico SiC/SiC

In laboratorio sono state condotte attività di misura della conducibilità termica di un composito ceramico SiC/SiC al fine di caratterizzare termicamente il materiale per l'utilizzo in ambito fusionistico.

Inoltre sono state eseguite attività di modellazione dei materiali compositi con il fine di sviluppare tecniche computazionali che partendo dalle proprietà meccaniche e di resistenza dei materiali costituenti il materiale composito siano in grado di caratterizzare le corrispondenti proprietà del manufatto finale.

In particolare sono state eseguite le seguenti attività:

- integrazione, in un codice commerciale agli elementi finiti, di programmi in grado di definire il comportamento meccanico dei materiali compositi;
- esecuzione di prove meccaniche sui materiali compositi ceramici per ottenere i dati di ingresso per i codici di calcolo sviluppati.

Risultati delle misure della conducibilità termica sul composito ceramico SiC/SiC

Nel rapporto tecnico, disponibile sul sito web ENEA, sono illustrati i risultati delle misure di conducibilità termica condotte su campioni di SiC/SiC con architettura 2D e 3D (Figura 38). La conducibilità termica (λ) dei campioni di SiC/SiC è stata determinata misurando la diffusività termica (α), il calore specifico (C_p) e la densità del materiale (ρ) in accordo alla formula:

$$\lambda = \alpha C_p \rho$$

Le misure sono state eseguite nell'intervallo di temperatura 25-1050 °C.

In particolare, la diffusività termica è stata misurata mediante metodo "Laser Flash", il calore specifico attraverso un "differential thermal analyser" e la densità mediante un dilatometro.



Figura 38. Campioni SiC/SiC con architetture 2D e 3D

A puro titolo di esempio in Figura 39 si riporta l'andamento della conducibilità termica in funzione della temperatura per i materiali SiC/SiC in configurazione 2D e 3D. Nell'intervallo di temperatura considerato all'aumentare di quest'ultima la conducibilità termica diminuisce da 28,5 a 17,2 W/m K per il campione 3D e da 12,6 a 9,8 W/m K per il 2D, ad indicare che la tipologia del campione influisce sulla conducibilità termica. La maggiore conducibilità termica riscontrata nel campione in configurazione 3D è imputata a due fattori, la presenza di fibre lungo la direzione trasversale e una minore porosità stimabile nel 4%.

Nel rapporto tecnico completo viene inoltre descritto il piano di lavoro relativo a ulteriori misure di conducibilità termica da eseguire su materiali forniti da FN. In particolare, sono state definite le geometrie e le principali caratteristiche dei materiali. Si tratta di compositi SiC/SiC con fibre cristalline e con carbonio depositato con il metodo CVI (Chemical Vapour Infiltration): il rapporto delle fibre in volume dovrà essere intorno al 37% e la densità attesa di circa 2,5 g/cm³.

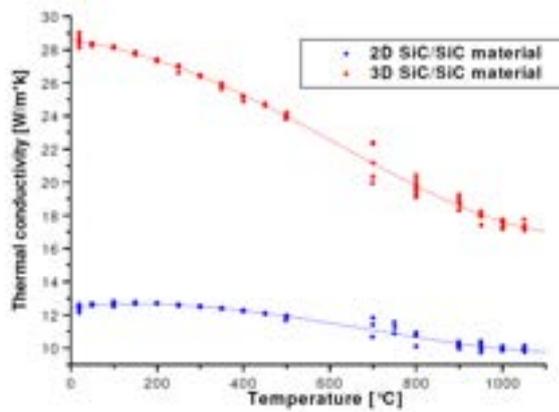


Figura 39. Conducibilità termica in funzione della temperatura per i campioni SiC/SiC 2D e 3D

Risultati del codice di modellazione dei materiali compositi e dei risultati delle prove meccaniche sul composito ceramico SiC/SiC

Nel corso di questa attività è stato messo a punto un codice di calcolo agli elementi finiti basato sulla metodologia multiscala che permette di valutare le caratteristiche meccaniche a partire dal comportamento a livello microscopico dei materiali costituenti (i.e. fibre e matrice). Il codice verrà validato mediante l'uso dei risultati sperimentali ottenuti in prove specifiche che verranno condotte successivamente. La validazione del codice è stata avviata utilizzando dati sperimentali presenti nella letteratura internazionale.

C.2 Caratterizzazione del composito ceramico SiC/SiC in litio piombo

L'obiettivo comprende la progettazione e la costruzione di una camera sperimentale per prove ad alta temperatura (1000-1200 °C) di campioni di SiC/SiC in litio-piombo.

Il programma di lavoro, così come definito nell'accordo tra F4E (per la parte ENEA) ed i giapponesi, prevede il completamento della costruzione della camera sperimentale (con collaudo da parte giapponese presso ENEA) per aprile-maggio 2013 e quindi la sua spedizione in Giappone dove saranno eseguite le prove di caratterizzazione di lunga durata.

Sono state dapprima analizzate le applicazioni previste per il composito SiC/SiC quale materiale strutturale e funzionale per le future macchine a fusione (ITER e DEMO) e sulla base di queste applicazioni sono stati individuati i requisiti di progetto del forno e le relative condizioni sperimentali:

- temperatura massima 1000 °C,
- velocità relativa LiPb/SiC nell'intervallo 0,1-0,5 m/s,
- durata delle prove fino a 3000 h.

E' stato quindi eseguito il progetto meccanico preliminare del forno che è stato realizzato sulla base dei risultati dei lavori presenti in letteratura nei quali sono stati studiati i fenomeni di erosione-corrosione di SiC/SiC in litio-piombo. Il forno consiste essenzialmente di una camera in acciaio ad alta temperatura operante in atmosfera controllata. E' inoltre previsto un sistema di movimentazione roto-traslatoria del campione di SiC (Figura 40).

E' stata completata la costruzione della camera in acciaio, del sistema di isolamento termico all'interno della stessa, il sistema di movimentazione del campione in SiC ed il sistema di sollevamento della flangia superiore della camera.

Le attività di progettazione hanno quindi previsto la conduzione di prove preliminari di erosione-corrosione condotte a 400 °C per 100 h su campioni di SiC/SiC in litio-piombo e la definizione di altri parametri progettuali che verranno utilizzati per le realizzazioni dei componenti e delle lavorazioni da eseguire nel corso del 2012.

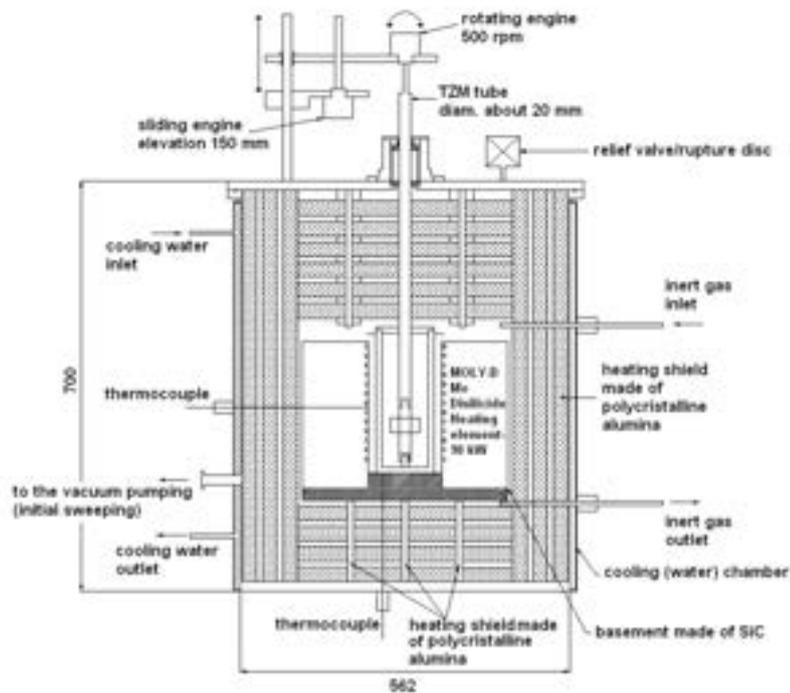


Figura 40. Schema dell'apparato sperimentale

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

ASG Superconductors SpA

Nell'ambito dell'obiettivo A con la società ASG Superconductors (Genova) è stato stipulato un contratto per la fornitura di 9 moduli di magneti toroidale della macchina sperimentale JT-60SA, costituiti ciascuno da una bobina superconduttrice inserita nella relativa cassa di contenimento, che viene fornita da ENEA.

Le principali linee di lavoro di ASG Superconductors hanno riguardato:

- lo sviluppo della documentazione tecnica necessaria alla realizzazione delle attrezzature di avvolgimento dei doppi pancake costituenti la bobina e le prescrizioni relative alle successive fasi fabbricative per l'incassamento e le prove di accettazione della bobina toroidale;
- la redazione di un documento gestionale che fornisce indicazioni per un programma di garanzia e controllo di qualità incluso un programma di qualifica relativo alle procedure di messa a punto dei processi di manifattura e realizzazione di prototipi.

FN S.p.A.

La collaborazione con FN era finalizzata alla messa a punto del processo per la realizzazione di pannelli SiCs/SiC per caratterizzazioni meccaniche ed in litio piombo (obiettivo C). Il processo realizzativo e gli impianti sono in corso di ottimizzazione sulla base delle caratteristiche dei primi componenti SiCf/SiC prodotti.

Tecnologie “smart” per l’integrazione della illuminazione pubblica con altre reti di servizi energetici e loro ottimizzazione

Nel SET (Strategic Energy Technology) Plan della Commissione Europea si sostiene che per raggiungere nel 2020 una riduzione delle emissioni di gas serra del 40%, attraverso l’uso sostenibile e la produzione di energia, è necessario adottare approcci sistemici ed innovazione organizzativa che includono efficienza energetica, tecnologie *low carbon* e gestione *smart* della produzione e della domanda di energia, in particolare misure su edifici, reti energetiche locali e trasporti dovrebbero essere i componenti principali delle iniziative. Per questi motivi la tematica “smart city” è presentata come una delle sette misure prioritarie per affrontare la problematica energetico-ambientale, con un investimento di 10-12 miliardi di euro, proponendola come terza misura in termini di consistenza dell’investimento europeo.

In tale direzione sono state avviate due iniziative che fanno parte del percorso di attuazione del SET Plan, la “Smart City European Industrial Initiative” ed il Joint Program su “Smart City” dell’EERA (European Energy Research Alliance) che coinvolgono istituzioni di ricerca ed aziende di tutti gli Stati dell’Unione Europea. ENEA in particolare coordina le attività di EERA ed ha un ruolo significativo nel gruppo sulle Smart City dove coordina la rete italiana ed una delle quattro aree in cui sono organizzate le attività europee (urban network integration).

A fronte della notevole e crescente attenzione internazionale (anche negli USA è stato avviato un importante programma sulle Smart Cities), stanno iniziando a svilupparsi progetti pilota di varia natura. Si possono citare i progetti “Amsterdam Smart City”, “Malaga Smartcity” e “Boulder Colorado” in cui reti energetiche urbane vengono interconnesse tra loro con modalità diverse.

In Italia esistono esperienze separate in vari settori (illuminazione ad alta efficienza, mobilità sostenibile, edifici a controllo remoto) ma non esiste un progetto che mira allo sviluppo di una piattaforma integrata che permetta di condividere le informazioni sensoristiche raccolte tramite il sistema di illuminazione pubblica ed utilizzarle in modo trasversale secondo un approccio adattivo.

DESCRIZIONE DELL’ATTIVITÀ

L’obiettivo finale dell’attività consiste nello sviluppo di una serie di tecnologie e metodologie che permettono di utilizzare il sistema di illuminazione pubblica come la struttura portante di una rete di sensori, di sistemi di comunicazione e di applicazioni intelligenti il cui scopo è quello di rendere più efficiente dal punto di vista energetico e funzionale la gestione di reti urbane connesse a servizi energetici pubblici. La rete dell’illuminazione pubblica assumerebbe pertanto una valenza molto più importante di quella attuale producendo al tempo stesso un abbattimento dei consumi energetici, un valore strategico dell’infrastruttura per la città, una possibilità di ritorno degli investimenti molto più interessante ed in grado di garantire la diffusione dell’innovazione tecnologica nella illuminazione pubblica, molto più efficace rispetto agli incrementi attualmente osservabili.

L’integrazione di informazioni provenienti da sensori di varia natura in un’unica piattaforma informativa permette di creare una base dati condivisa in tempo reale cui possono agganciarsi i sistemi intelligenti per le ottimizzazioni. Questo dà la possibilità di ottenere abbattimenti dell’energia consumata impossibili da ottenere con approcci parziali e contemporaneamente un abbattimento dei costi della rete infrastrutturale in quanto condivisa da diverse applicazioni. Il risparmio energetico è ottenuto attraverso lo sviluppo di modelli per l’ottimizzazione della fornitura energetica commisurata dinamicamente alla richiesta (energy on demand: fornire energia solo quando e nella misura in cui serve). Per alimentare tali modelli sono necessari metodi di rilevazione e modellizzazione della utenza e lo sviluppo di una struttura di sensori che possa “misurare” la richiesta di energia in tempo reale, una rete di trasporto dei dati ed un insieme di sistemi intelligenti che siano in grado di ottimizzare la fornitura, colloquiare con i sistemi di regolazione ed interagire con gli utenti.

I servizi smart più significativi che rientrano nel contesto del sistema elettrico, e che sono oggetto di studio in questa attività sono: l’illuminazione pubblica, la mobilità (ed in particolare la infomobilità, la mobilità elettrica e la mobilità pubblica) e la gestione energetica di edifici.

Nella Figura 41 è illustrato lo schema sviluppato nel progetto. La rete di sensori, diffusi nella città, si appoggiano ai pali intelligenti dell’illuminazione pubblica. I dati raccolti vengono inviati in tempo reale, attraverso la rete IP, verso il server dati della città. Sul server risiede una piattaforma ICT multifunzionale integrata che provvede ad

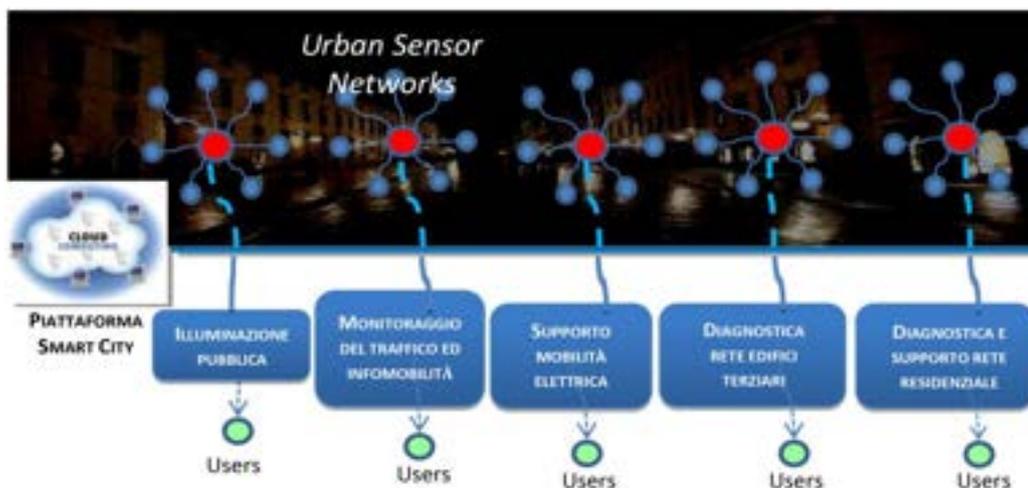


Figura 41. Schema complessivo per l'integrazione di servizi smart nella rete della illuminazione pubblica

archiviare organicamente tutti i dati, a verificarli e diagnosticare eventuali malfunzionamenti, ad effettuare un primo livello di elaborazione (data fusion) al fine di renderli disponibili ad elaborazioni successive. I dati vengono poi inviati ad applicazioni "verticali" il cui compito è quello di realizzare uno specifico servizio urbano (es. illuminazione, mobilità, edifici, ...). Tali applicazioni generalmente includono un sistema di diagnostica, un sistema predittivo, un sistema di ricostruzione spaziale delle informazioni, un sistema di regolazione adattiva ed ottimizzata. Infine tali applicazioni colloquiano via web con gli "utenti" che possono essere sistemi di attuazione del servizio, gestori del servizio o semplicemente cittadini che accedono a servizi di informazione o supporto.

L'obiettivo finale del progetto è quello di sviluppare le metodologie necessarie e di dimostrarne su casi urbani reali la fattibilità tecnica, le prestazioni funzionali ed energetiche, la competitività economica, l'accettabilità da parte del sistema dei gestori urbani e dei cittadini, la stimolazione dell'interesse industriale ad avviare progetti di ingegnerizzazione ed applicazione della metodologia sviluppata.

Le attività del progetto sono l'evoluzione tecnologica di attività avviate nelle precedenti annualità nell'area della "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica" e discendono soprattutto dalle attività del progetto "Tecnologie per il risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica". In particolare in quest'ambito nel Piano Annuale di Realizzazione 2008-2009 è stato sviluppato l'approccio della smart street e del palo intelligente che mira allo sviluppo di "profili di attività" correlati al passaggio di persone e veicoli in corrispondenza del palo intelligente e all'elaborazione predittiva di tale profilo nelle ore successive (tale modello "puntiforme" verrebbe poi applicato punto-punto a tutta la rete).

Da questa attività, il presente progetto eredita la struttura dei pali intelligenti ma ridefinisce la modellistica secondo un approccio ad archi ai fini del loro impiego per il monitoraggio del traffico oltre che per la regolazione dell'illuminazione. Tale approccio permette l'interpolazione della regolazione anche laddove i pali non vengano strumentati (per abbattere i costi), permette una diagnostica delle condizioni atipiche e l'estensione della predizione (a breve e lungo termine sia spaziale che temporale). Inoltre per ottenere il monitoraggio del traffico occorre una consistente estensione della modellistica che non può più essere puntiforme (il dato di flusso e velocità istantanea risentono di eccessive imprecisioni statistiche) ma operare su un tratto stradale e raggiungere la capacità di identificare una buona percentuale di veicoli tra due pali posti a media distanza al fine di risalire alla stima del tempo di percorrenza media che è ormai la variabile primaria sia per le pianificazioni di percorso che per la regolazione del traffico. Nell'ambito del progetto si studia inoltre la possibilità di integrazione di tali smart sensor direttamente sul corpo del lampione.

Oltre alla tematica sull'illuminazione pubblica nel progetto sono stati integrati altri elementi del PAR 2008-2009. In particolare, nei progetti "Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva" e "Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile" vengono sviluppati rispettivamente sistemi di monitoraggio e di predizione a breve e medio termine del consumo energetico di un edificio e sistemi di domotica. Nel PAR 2010 tali sistemi vengono integrati nella piattaforma smart e il loro utilizzo esteso dal singolo edificio alla "rete di edifici interattivi" per cui è prevista una sperimentazione ad hoc. Il vantaggio di integrare il controllo di una rete di edifici nell'illuminazione pubblica risiede nel fatto che in una zona urbana dove sia installata una rete PLC sull'illuminazione pubblica, è sufficiente dotare gli edifici di una centralina di monitoraggio dei consumi (elettrici e termici per le diverse utenze, temperatura, e stato dei setpoint di regolazione) anch'essa con tecnologia PLC) e il

palo intelligente di ricevitori ZigBee (comunicante con la centralina) per avere un monitoraggio efficace senza dover cablare né l'area urbana né l'edificio stesso quindi a costi molto più bassi e competitivi. In prospettiva (in un successivo programma) la "centralina" dell'edificio potrà essere interattiva sia nei confronti dell'utente che della rete e fondersi con lo smart meter per evolvere verso l'"agente intelligente" dell'edificio. Questo traguardo costituisce l'elemento di base per il nuovo concetto di "interactive building" che si sta affermando nel contesto EERA Smart City ed in generale nei contesti di ricerca. Nel presente progetto viene sviluppata soprattutto la modellistica predittiva della rete di edifici e l'aspetto diagnostico su cui in futuro si baserà l'interazione al fine di prevedere/provvedere ad errori di gestione (automazione errata o comportamento scorretto delle persone).

Infine nel progetto "Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto" (PAR 2008-2009) si sviluppano tecnologie per la gestione delle batterie dei veicoli elettrici e architetture urbane per la ricarica rapida. Tali sistemi verranno connessi alla piattaforma smart per essere integrati ai dati di traffico e di utenza ed elaborata una gestione ottimale del veicolo, delle batterie e delle ricariche.

Viene sviluppata una piattaforma ICT che integra tutte le attività sopra menzionate e permette di creare un "core" di dati condivisi, alimentato dai dati provenienti dai sensori, su cui le varie applicazioni specifiche opereranno.

Le attività del progetto si articolano in cinque obiettivi intermedi.

A. Progettazione dell'architettura funzionale per una piattaforma integrata per la smart city e realizzazione di un frame-work software prototipale

L'obiettivo prevede la progettazione dell'architettura funzionale per un sistema integrato che includa le funzionalità di raccolta dati dai sensori tramite il sistema dell'illuminazione pubblica e trasporto (eventualmente con analisi distribuita) fino ad un server dati; le applicazioni di elaborazione, diagnostica e gestione ottimale adattiva, riferentesi alla gestione dell'illuminazione pubblica, del monitoraggio della mobilità, della gestione di una flotta di veicoli elettrici ed infine di una rete di edifici.

Viene realizzato un frame-work software sperimentale per l'integrazione dei vari moduli (illuminazione pubblica, mobilità, edifici) in una unica piattaforma.

B. Sviluppo della intelligenza per la Smart Lighting e sviluppo del sistema sensoriale

Sviluppo di un modello per la gestione adattiva di una rete di illuminazione. Tale modello include l'elaborazione dei dati provenienti dai sistemi sensoriali posizionati sui pali intelligenti ed integra le seguenti funzionalità:

- sviluppo di modelli mensili, settimanali e orari degli indici di attività (presenza persone e veicoli) rilevati sui "pali intelligenti" e definizione dei profili di utenza (domanda di illuminazione);
- diagnostica di condizioni anomale dei sensori, picchi di utenza (congestioni di traffico, eventi che determinano ampi flussi di persone), eventi incidentali (che richiedono forte richiesta di illuminazione) o condizioni critiche (climatiche o sensoriali o perdita di efficienza lampade);
- analisi di correlazione dei punti di rilievo smart e stima dei profili di utenza su tutti i punti luce della rete di illuminazione;
- predizione futura a breve e medio termine dei profili di utenza su tutti i punti luce controllati;
- determinazione delle potenze di regolazione tramite sistemi di ottimizzazione evolutiva;
- attuazione delle regolazioni tramite colloquio con il sistema di regolazione dei flussi luminosi.

Viene inoltre sviluppato un prototipo per un sistema sensoriale integrato in un lampione in modo da rendere "intelligente" il lampione e permettere la comunicazione dei dati al server tramite la linea elettrica. La "testa sensoriale" verrà sperimentata in laboratorio su un modello sperimentale.

C. Sviluppo di un sistema di monitoraggio e gestione della mobilità veicolare attraverso la rete di illuminazione pubblica

L'obiettivo dell'attività è l'integrazione sul sistema di illuminazione pubblica di un sistema di gestione ottimale della mobilità, con particolare riferimento a flotte di veicoli pubblici e/o veicoli elettrici (gestione percorsi, gestione veicoli e batterie, gestione sistemi di ricarica rapida, mobility on demand, detezione e trattamento delle criticità di traffico). Vengono sviluppati strumenti per la raccolta ed elaborazione automatica di dati e informazioni sullo stato corrente del traffico veicolare e pedonale, per la previsione dell'evoluzione dello stato del traffico nell'immediato futuro e per l'identificazione di situazioni critiche o anomale ed infine per il monitoraggio del mezzo.

Tali strumenti si baseranno su sistemi sensoriali posizionati sui pali intelligenti e su veicolo ed integreranno le seguenti funzionalità:

- elaborazione delle immagini provenienti dai lampioni intelligenti con capacità di analisi della scena, conteggio dei veicoli nelle diverse corsie, analisi delle velocità medie, discriminazione dei mezzi pubblici, conteggio dei flussi delle persone passanti. Sperimentazione su registrazioni raccolte in aree urbane;
- ricostruzione dello stato attuale del traffico veicolare e previsione nell'immediato futuro della sua evoluzione a partire dagli attuali valori e dalla serie storica dei dati forniti dai lampioni intelligenti del sistema di illuminazione pubblica. Identificazione di criticità e situazioni anomale. Test su sistema di simulazione di una situazione urbana a bassa complessità;
- gestione del veicolo secondo la logica della mobility on demand. A tal fine viene approntato l'equipaggiamento strumentale di un veicolo elettrico con sistemi di acquisizione delle variabili più importanti e sistema di comunicazione con la linea di illuminazione e con la piattaforma integrata in modo da permetterne la gestione e la comunicazione con l'utente. Il sistema sarà sperimentato in un'area privata con cicli di percorso quotidiani. Viene inoltre effettuata una limitata sperimentazione in area urbana in situazioni di bassa complessità.

D. Sviluppo del sistema di predizione ed interazione della rete di edifici

Sviluppo di un sistema di supervisione di una rete di edifici (tipicamente una rete immobiliare del settore terziario pubblico) che interagiscono con la struttura di trasporto dell'informazione sulla rete della pubblica illuminazione. Il sistema include funzionalità di modellazione, diagnostica e predizione del consumo energetico dell'intera rete. Il modello predittivo ha caratteristiche di modellazione evolutiva e terrà sotto controllo, oltre ai consumi elettrici ed energetici, anche gli aspetti connessi all'utenza e ai fattori climatici. Sarà quindi in grado di monitorare cambiamenti di comportamento, effetti globali dei fattori climatici, effetti dei cambiamenti tecnologici. Il sistema viene qualificato su una reale rete di edifici attraverso la collaborazione di gestori di patrimonio immobiliare pubblico. La comunicazione con l'edificio avviene tramite un sistema che rappresenta l'evoluzione dello smart metering attuale verso il concetto di "agente distribuito ad architettura aperta". Tale sistema prevede da un lato la comunicazione con il sistema di supervisione e dall'altro l'interazione con l'utente per segnalare elementi diagnostici, dare orientamenti di gestione sostenibile dell'edificio e ricevere informazioni.

E. Partecipazione ai network europei ed identificazione di un modello di smart town competitivo per applicazioni a breve termine

Il progetto prevede la partecipazione a network europei in particolare verso le iniziative "EERA (European Energy Research Alliance) Smart City" e "Smart City European Industrial Initiative", entrambe avviate dal SET Plan Europeo. Nel primo network lo scopo è quello di mappare le iniziative europee sulla smart city e l'ENEA ha la funzione di delegato nazionale italiano, nel secondo caso l'obiettivo è quello di costruire sistemi dimostrativi a livello cittadino.

La seconda parte dell'obiettivo si concentra nell'identificazione, all'interno delle tecnologie sviluppate, di quel sottoinsieme che meglio si presta a una penetrazione nel territorio. In questo senso viene condotta un'analisi tecnico-economica per l'applicazione di una tecnologia smart town basata sul sistema della pubblica illuminazione e applicata ad uno o due territori pilota di differente tipologia. Lo studio ha lo scopo di far emergere quegli aspetti che potrebbero vedere applicazioni competitive a breve termine e quindi essere proposte ai comuni già aderenti al Network Lumiere (circa 400 comuni tra i 5000 e i 50000 abitanti) che verrà in tal modo esteso verso le tematiche della smart city.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Progettazione dell'architettura funzionale per una piattaforma integrata per la smart city e realizzazione di un frame-work software prototipale

In questo obiettivo, sviluppato da Università di Roma Tre ed ENEA, la ricerca si è concentrata sulla progettazione e realizzazione di una piattaforma integrata in grado di raccogliere ed elaborare i dati provenienti dai sensori posti sui pali intelligenti allo scopo di gestire l'illuminazione pubblica, il monitoraggio della mobilità, una flotta di veicoli elettrici e le reti di edifici.

La piattaforma ICT si pone come il nodo delle comunicazioni fra le diverse infrastrutture presenti nella Smart City. L'idea è che la piattaforma sia indipendente dalle infrastrutture presenti come livello più basso, ma consenta

l'acquisizione dei dati in maniera centralizzata per poterli analizzare ed eventualmente modificare il comportamento e quindi controllare le infrastrutture sottostanti.

L'utilità principale di questa piattaforma è, quindi, l'integrazione dei dati provenienti dai diversi sensori. Ogni infrastruttura ha una struttura verticale, poiché i dati provenienti dai sensori sono analizzati e acquisiti per attuare procedure di controllo del sistema, in maniera anche automatica, ma senza analizzare i dati di altri sistemi.

La piattaforma è una struttura orizzontale che consente la comunicazione tra i sistemi verticali, in modo da migliorare l'efficienza dei diversi sistemi sotto un punto di vista energetico, monetario e di welfare dei cittadini. E' in grado di redistribuire agli utilizzatori i dati che ha raccolto fino al momento attuale, ed è anche in grado di accorpare dati in maniera organica, fornendo indici e analisi di cause probabili quando accadono guasti.

Al momento la piattaforma è stata pensata per acquisire i dati provenienti da tre infrastrutture: l'illuminazione pubblica, la rete di edifici e l'infrastruttura di mobilità. Si è cercato di rendere la piattaforma più generica possibile, in maniera che l'aggiunta di nuove infrastrutture non debba causare la ristrutturazione del codice. In caso di nuovi sistemi è necessario solamente scrivere un *thread*, ossia una funzione ciclica, in grado di copiare i dati dal server del sistema a quello della piattaforma.

Lo sviluppo della piattaforma integrata è ispirata alla struttura degli attuali sistemi SCADA. Un sistema SCADA (Supervisor Control and Data Acquisition) è composto principalmente da un database su cui sono scritti e letti tutti i valori necessari a far funzionare il sistema che si sta controllando. I sistemi SCADA sono in grado di monitorare e controllare sistemi industriali e grandi infrastrutture anche sparse su un territorio molto vasto (tipicamente la rete elettrica). Ispirati da quanto descritto finora, si è deciso di costruire questa piattaforma integrata che mantiene alcuni dei vantaggi presenti nei sistemi SCADA.

In particolare la piattaforma è costituita da un database, una serie di moduli che svolgono funzioni quali attuazione, acquisizione dati e gestione degli allarmi ed una interfaccia web e che fornisce degli specifici servizi agli utenti, quali consultazione dei valori acquisiti dai sensori, visualizzazione di serie storiche, grafici e istogrammi.

La piattaforma è stata realizzata per acquisire ed elaborare una gamma di tipologie di sensori eterogenee tra loro, per cui il database e le tabelle che lo costituiscono sono stati realizzati secondo una struttura generalizzata, in modo tale da rendere tale piattaforma estendibile a futuri upgrade, a seguito ad esempio dell'interfacciamento con nuove tipologie di sensori. In questo momento il sistema è stato progettato per monitorare dati dedicati all'illuminazione pubblica (modulo Lighting), al consumo degli edifici (modulo Building) e dati dedicati all'infomobilità (modulo Mobility).

L'eterogeneità dei dati monitorati ha suggerito l'idea di aggiungere al sistema delle funzionalità aggiuntive, che i sistemi SCADA non hanno, ovvero la capacità di operare la fusione di diverse tipologie di dati sensoriali (*data fusion*) al fine di attuare un *situation assessment*, ossia un processo che consente di estrarre informazioni ad alto livello sullo stato del sistema aggregando in maniera appropriata dati di più basso livello.

Al fine di mantenere la piattaforma robusta ai malfunzionamenti, i moduli di acquisizione ed attuazione sono stati progettati in modo tale che possano svolgere le proprie funzionalità in maniera indipendente dagli altri moduli, per cui svolgono delle funzioni dedicate e molto specifiche. Il controllo degli allarmi è gestito da un modulo dedicato, che ciclicamente verifica se i valori dei sensori monitorati sono entro i valori di soglia specificati.

Il progetto a livello implementativo è suddiviso in due sezioni: una prettamente dedicata alla comunicazione dei dati ed al controllo degli allarmi, l'altra dedicata prettamente all'interfacciamento web ed alla fornitura di servizi web tramite apposite *servlet*. A livello logico il progetto è suddiviso in quattro strati: strato di presentazione, strato delle applicazioni, strato di *data service* e strato di interfacciamento con i sensori.

▪ *Architettura generale*

La suddivisione a livello logico è strutturata per livelli (Layers, Figura 42):

- Presentation Layer
- Application Layer
- Data Layer
- Sensor-Actuator Layer.

Il **Presentation layer** è costituito da pagine web statiche e dinamiche. In particolare tale strato offre la possibilità agli utenti di interrogare il database tramite il proprio web browser al fine di ricavare informazioni riguardanti i dati acquisiti dai sensori. Attualmente è possibile visualizzare in forma tabellare tutti i sensori monitorati dalla piattaforma ed i relativi valori "statici" (es. ubicazione fisica, valori di soglia, descrizione), visualizzare graficamente l'andamento storico di uno specifico sensore o scaricare i valori storici in formato testo o xml.

Interfaccia utenti		Presentation Layer
Web services / Business Intelligence / Gestione allarmi / Datafusion		Application Layer
Database MySQL		Data Layer
Moduli di interfaccia con il campo (altri database o reti di sensori)		Sensor-Actuator Layer
Reti di sensori		

Figura 42. Visualizzazione dei diversi strati che compongono la piattaforma ICT

L'**Application layer** contiene le funzionalità dedicate alla business intelligence del sistema Smart-Town, ovvero quell'insieme di processi dedicati alla raccolta e analisi delle informazioni. In tale strato risiede quindi l'attività di data fusion orientata al situation assessment, di controllo degli allarmi, di creazione e l'aggiornamento di un'interfaccia operatore per la visualizzazione delle criticità del sistema, di creazione e l'aggiornamento di un file di log contenente tutti gli eventi rilevanti avvenuti durante il processo e di espletamento di servizi web tramite servlet.

Il **Data layer** è lo strato relativo al *datawarehouse*, ovvero lo storage dei dati. Per la gestione di tale database è stato utilizzato il DBMS (DataBase Management System) MySQL.

Il **Sensor layer** è lo strato contenente i moduli di interfacciamento con i sensori. Ogni modulo si interfaccia con una specifica categoria di sensori e svolge la funzionalità di ricezione o di attuazione. I moduli non si interfacciano in maniera diretta con i sensori ma con dei database dedicati a loro volta all'acquisizione/attuazione dei dati dai/sui sensori. Tali database sono attualmente interfacciati con i sistemi software di controllo dell'edificio F40 (smart building, attualmente viene utilizzato il sistema commerciale "Simple Life") e dell'impianto di illuminazione a torri faro del CR ENEA Casaccia (attualmente viene utilizzato il sistema commerciale "Minos"). Si prevede in un prossimo futuro di poter aggiungere altri database o collegamenti ad altri sistemi commerciali per la ricezione di dati provenienti da altri sistemi presenti all'interno della smart city.

La suddivisione a livello implementativo è costituita da due pacchetti di lavoro principali: DataCommunication e ServerSmartTown.

Il pacchetto DataCommunication è una Java Application contenente delle classi dedicate alle funzionalità descritte nell'application layer e dei thread che svolgono le attività descritte nel sensor layer ed in parte nell'application layer.

Il pacchetto ServerSmartTown è una Java Web Application contenente alcune classi dedicate alle funzionalità descritte nell'application layer e delle servlet dedicate all'espletamento delle funzionalità descritte nel presentation layer.

I due pacchetti benché logicamente e strutturalmente differenti hanno come punto di contatto il database che è stato creato e vanno a scrivere sul medesimo file di log testuale. Per questo è evidente come alcune funzionalità appaiono in entrambi i pacchetti di lavoro.

- *Diagnostica e Data Fusion*

La funzionalità di Data Fusion ha lo scopo di operare un processo di elaborazione dei dati finalizzato alla diagnostica, monitoraggio e controllo del comportamento energetico del sistema illuminotecnico o degli edifici o del sistema della mobilità. Lo scopo è quindi quello di acquisire dati sui consumi e aggregarli in vari livelli di astrazione in modo tale da attuare un situation assessment, ovvero identificazione delle possibili cause e possibili soluzioni a delle problematiche emerse a seguito dell'elaborazione di dati sensoriali.

La problematica del situation assessment deriva dal contesto della data fusion multi-sensoriale e riguarda essenzialmente l'automatizzazione del processo cognitivo eseguito da un supervisore. Infatti, per situation assessment si intende il processo autonomo di divenire cosciente di determinate situazioni o di determinati allarmi. L'analisi dei dati provenienti dai diversi sensori e, in generale, dai diversi impianti sensoristici è obbligatorio e vitale, a causa della grande mole di informazioni che giungono alla nostra piattaforma. La piattaforma può consentire sia l'analisi di dati in maniera verticale, ossia discriminando i dati in base alla sorgente sensoristica, sia in maniera orizzontale ossia scegliendo alcuni tipi di dati provenienti da sensori diversi.

La piattaforma essendo general-purpose, offre la capacità di fornire i dati in maniera grezza sia alcuni algoritmi già implementati per l'analisi di metriche e di dati ad alto livello di astrazione.

Nella fase attuale del progetto è stata definita la metodologia di riferimento per diagnostica e data fusion comparando una serie di metodologie di riferimento con lo scopo di individuare la più adatta ai nostri scopi. In una fase successiva del progetto (PAR 2011), quando si disporrà di una base di dati sperimentali sufficienti a qualificarne le prestazioni (almeno 6 mesi di dati su diverse applicazioni verticali) verranno implementati e validati sperimentalmente dei moduli operativi.

Tra le diverse metodologie prese in considerazione vi sono la evidence theory e la fuzzy logic. La teoria dell'evidenza (evidence theory) è stata ideata da Shafer (Shafer, 1976), che rivede la teoria di Dempster (Dempster, 1967) sulle probabilità indotte, per questo motivo questa teoria è anche chiamata Dempster-Shafer. La teoria cerca di modellare un insieme, chiamato frame of discernment, che contiene tutte le risposte ad una definita domanda. Ad ogni ipotesi si assegna un grado di "belief", ossia un grado di credibilità ed una funzione di plausibilità (o plausibility), che indica quanto l'ipotesi considerata può essere probabile partendo dalle informazioni a disposizione. Nel sistema diagnostico impostato nella piattaforma ICT tale approccio mira a comprendere quanto ogni ipotesi di guasto "supporta" i "sintomi" (anomalie e trend) rilevati dai dati sensoriali. Le ipotesi maggiormente "supportate" sono quelle che verranno prese in considerazione dal sistema diagnostico (esempio in Figura 43).

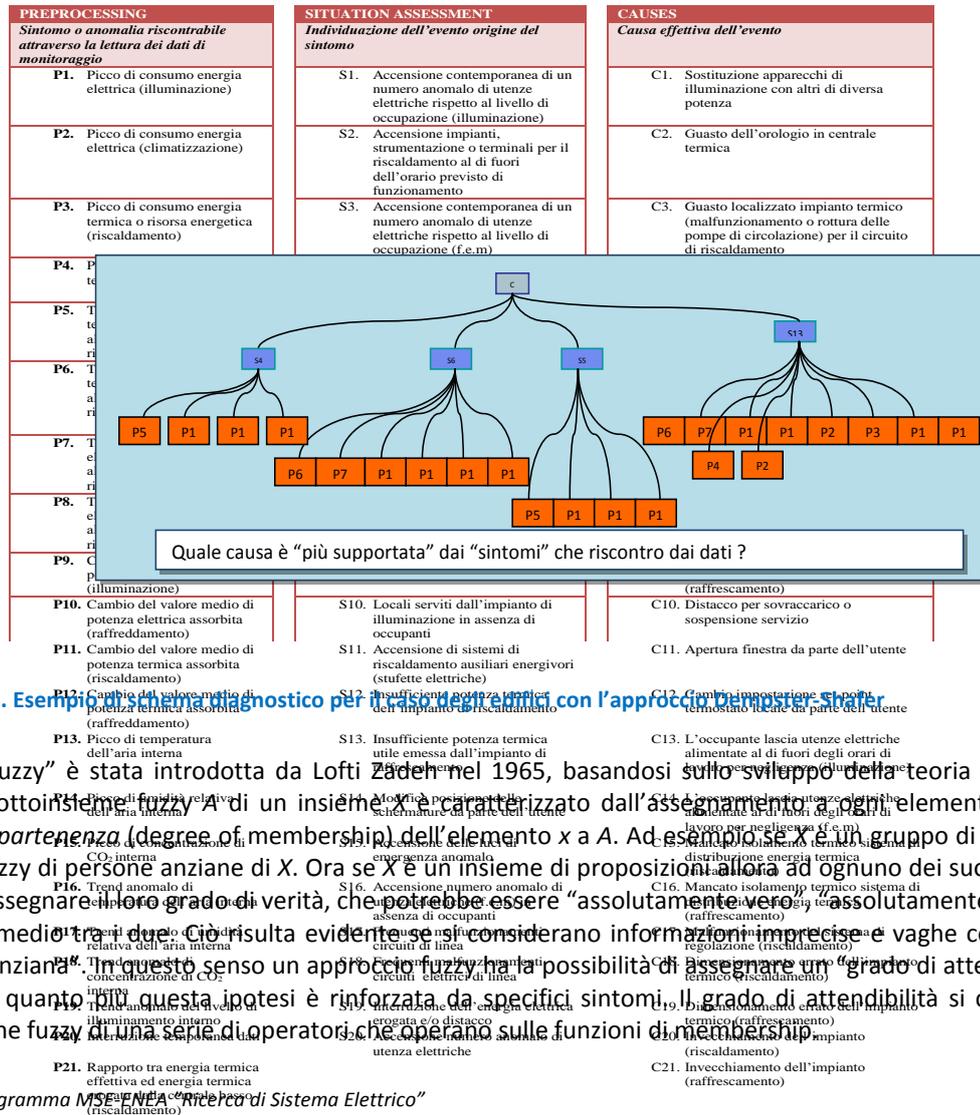


Figura 43. Esempio di sistema diagnostico per il caso reale fornito con l'approccio diagnostico fuzzy

La "logica fuzzy" è stata introdotta da Lofti Zaden nel 1965, basandosi sullo sviluppo della teoria degli insiemi fuzzy. Un sottoinsieme fuzzy A di un insieme X è caratterizzato dall'assegnamento a ogni elemento $x \in X$ del grado di appartenenza (degree of membership) dell'elemento x a A . Ad esempio, se A è un gruppo di persone, A è l'insieme fuzzy di persone anziane di X . Ora se x è un insieme di proposizioni allora ad ognuno dei suoi elementi si dovrebbe assegnare il loro grado di verità, che potrebbe essere "assolutamente vero", "assolutamente falso", o un grado intermedio tra i due. Ciò risulta evidente se si considerano informazioni imprecise e vaghe come "questa persona è anziana". In questo senso un approccio fuzzy ha la possibilità di assegnare un "grado di attendibilità" ad una ipotesi quanto a questa ipotesi è rinforzata da specifici sintomi. Il grado di attendibilità si calcola come composizione fuzzy di una serie di operatori che operano sulle funzioni di membership.

▪ *Interfacce con le applicazioni verticali*

Per ognuno dei moduli applicativi è stato creato un modulo specifico di interfacciamento ed una specifica organizzazione del database.

In particolare è stato implementato un modulo “Lighting” per l’interconnessione con la base di dati riguardanti il sistema dell’illuminazione pubblica. Tale modulo acquisisce dati da database che si interfacciano con i sensori dedicati all’analisi ambientale e del traffico (veicolare e pedonale) (in particolare telecamere e sensori ambientali) e misure di consumo elettrico. Il modulo è orientato alla gestione dell’illuminazione pubblica urbana ed immagazzina i dati nel livello data storage.

E’ stato implementato un modulo “Building” per la interconnessione con la base di dati riguardanti le reti di edifici. Tale modulo acquisisce dati da database che si interfacciano con i sensori dedicati all’acquisizione dei dati sui consumi energetici degli edifici e li immagazzina nel server.

E’ stato implementato un modulo “Mobility” per la interconnessione con la base di dati riguardanti il sistema di monitoraggio del traffico e supporto della mobilità elettrica. Tale modulo acquisisce dati da database che si interfacciano direttamente con i sensori dedicati all’analisi del traffico orientata alla mobilità.

La piattaforma sviluppata costituirà l’ossatura ICT di riferimento dello “Smart Village” in fase di realizzazione presso il CR Casaccia il cui sviluppo è in corso nel Piano Annuale di Realizzazione 2011. Verrà implementata una realizzazione e sperimentata in condizioni reali per una successiva implementazione presso una realtà urbana.

B. Sviluppo della intelligenza per la Smart Lighting e sviluppo del sistema sensoriale

La ricerca condotta da ENEA si è concentrata su una delle applicazioni verticali previste ed in particolare sullo sviluppo di un modello per la *smart lighting* in grado di adattare il flusso luminoso alla domanda dell’utenza, sullo studio di alcune soluzioni e componenti per applicazioni specifiche e su una dimostrazione pilota su scala reale.

B.1 Sviluppo di un modello di illuminazione adattiva

L’obiettivo della ricerca è consistito nello sviluppo di una metodologia di regolazione adattiva ed automatica del flusso luminoso al fine di massimizzare i risparmi energetici e la sicurezza. Il concetto di base è quello di “*energy on demand*”, ovvero di regolare la potenza del flusso luminoso in funzione della domanda (misure di flusso di traffico veicolare e pedonale urbano). Il punto critico di questo approccio è quello di avere degli strumenti che riescano a modellare la domanda in maniera più accurata possibile. In tal modo è possibile risparmiare grandi quantità di energia e migliorare sensibilmente la sicurezza delle strade fornendo più illuminazione quando è necessaria e meno quando non serve (Figura 44).

Le attività di sviluppo del sistema intelligente per la regolazione adattiva punto-punto dell’illuminazione pubblica si sono articolate su due task: definizione delle metodologie e analisi sperimentale.

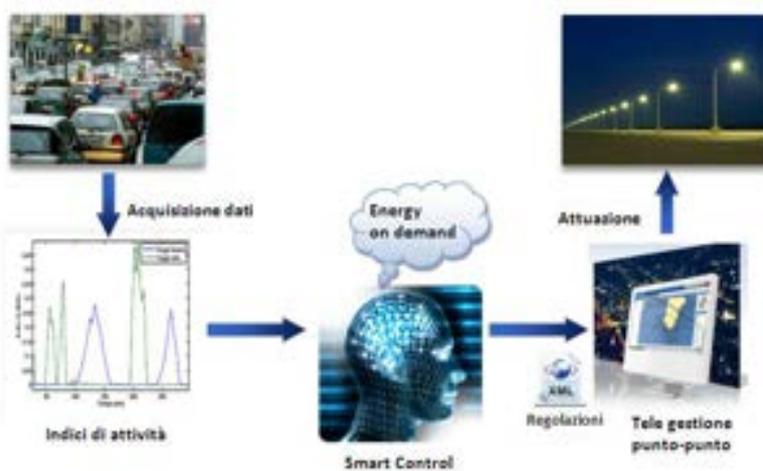


Figura 44. Architettura logica del controllo adattivo della illuminazione pubblica

Definizione delle metodologie

Le metodologie messe a punto si riferiscono ai seguenti argomenti:

- l’implementazione di modelli predittivi a breve di flussi di traffico veicolare urbano;
- la diagnostica di situazioni anomale;
- le strategie di controllo del lampione.

o Modelli predittivi della domanda

In questo settore applicativo uno dei modelli più semplici è quello del profilo orario medio settimanale. Ovvero, dai dati a disposizione si calcola per i diversi giorni della settimana il valor medio del flusso ora per ora, ottenendo così un profilo medio di $24 \times 7 = 168$ punti. Tale approccio ha validità statistica ma presenta degli errori significativi in occasioni di eventi in cui il flusso temporaneo si discosta da quello statistico o in generale in presenza di cambiamenti nel tempo della circolazione o dell'uso delle strade per effetto stagionale o di nuove utenze urbane o nuova organizzazione della circolazione.

Un approccio più articolato si basa invece su un sistema predittivo in cui vengono dati in input al modello i dati riferiti alle ultime ore e questo è in grado di predire cosa succederà nelle ore successive. Tali sistemi necessitano di un periodo di apprendimento (tipicamente di alcuni mesi) per imparare a predire con precisione. Uno degli approcci più interessanti in questa direzione sono le reti neurali artificiali (RNA). Le RNA sono modelli di calcolo che si ispirano al funzionamento di sistemi nervosi biologici per risolvere problemi di classificazione, modellazione e predizione di elevata complessità, ovvero dipendenti da un elevato numero di variabili ed altamente non lineari, e pertanto non risolvibili attraverso metodi algoritmici. Il meccanismo di determinazione dei parametri interni del modello viene comunemente indicato come "addestramento". Tale procedura è a tutti gli effetti un problema di ottimizzazione in cui si richiede di minimizzare l'errore tra il dato reale e quello stimato, ovvero si adotta un meccanismo di "apprendimento tramite esempi" avendo a disposizione un set di dati del fenomeno che si vuole modellare.

Nel presente lavoro tali modelli sono stati implementati per realizzare modelli predittivi a breve termine (1 ora) di flussi di traffico veicolare urbano (numero veicoli/ora).

o Diagnostica di condizioni anomale

Una condizione anomala è stata definita come situazione fuori dall'ordinario, ovvero una condizione in cui il profilo medio orario (modello statistico) si discosta oltre una certa soglia dal flusso misurato. In tali condizioni il modello statistico risulta inefficace mentre invece il modello basato su RNA offre un'affidabilità superiore.

Su questa base è stato sviluppato un modello ibrido che combina le RNA ed il modello statistico ed è stato confrontato con i risultati dei singoli modelli di partenza. Il criterio di tale approccio è:

"Se mi trovo in condizioni anomale allora uso il modello neurale, altrimenti quello statistico o una fusione graduata tra i due metodi" (modello ibrido, Figura 45)

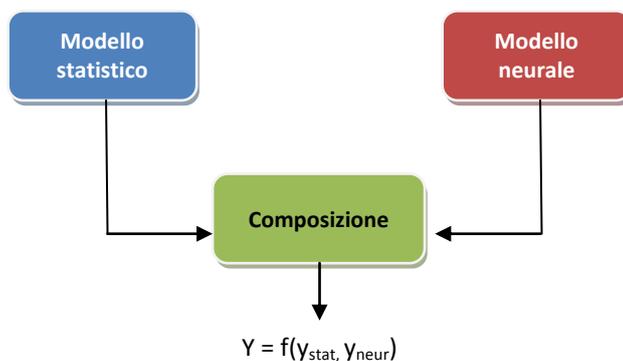


Figura 45. Analisi delle anomalie e fusione ibrida

Da questo risulta importante il vantaggio e le possibili ricadute di una diagnostica efficace delle situazioni anomale.

o La determinazione adattiva delle potenze di alimentazione

Per questo punto sono state impostate diverse strategie per il controllo dell'illuminazione con lo scopo di tradurre il flusso di traffico predetto in potenza di alimentazione delle lampade tenendo conto dei vincoli tecnologici e delle normative stradali.

In particolare sono state comparate due strategie di controllo: statica ed adattiva. La prima è molto semplice ed è quella attualmente utilizzata dai sistemi di regolazione del flusso luminoso (sia nel controllo di linea che nella tele gestione punto-punto) o dai sistemi cosiddetti "tuttanotte-mezzanotte" attualmente fuori normativa ma purtroppo ancora molto diffusi. Nel controllo statico, si definiscono due fasce orarie esattamente della stessa durata durante le quali si applicano, in una, il 100% della potenza e, nell'altra, (tipicamente la notte quando si

presume un minor passaggio di veicoli) il 70% della potenza (tipicamente il 50% nei sistemi “tuttanotte-mezzanotte”).

La strategia adattiva invece è più raffinata. Ovvero, basandosi sulle previsioni di attività veicolare è capace di adattare ora per ora il flusso luminoso alla reale domanda del momento ottenendo così un duplice vantaggio sia in termini di risparmio che di sicurezza. Punto critico di quest’approccio è di avere un modello di previsione sufficientemente accurato. Tale strategia è stata sperimentata usando diverse funzioni (lineari ed esponenziali) per adattare il flusso luminoso in funzione del flusso veicolare e ne sono stati valutati i comportamenti sia in termini di risparmio energetico che di sicurezza.

La regolazione adattiva agisce in modo puntuale sui lampioni dotati di sistema di rilevazione dei flussi (es. telecamere), sugli altri lampioni invece bisogna interpolare il flusso luminoso. Per far questo sono state ipotizzate sia interpolazioni lineari che non.

Analisi sperimentale

In questo punto gli algoritmi sviluppati sono stati validati su dati reali provenienti dalla città di Terni sia per quanto riguarda le metodologie predittive che la diagnostica di anomalie e le strategie di controllo adattivo.

La sperimentazione è stata condotta su dati di flusso reali (valori medi orari) provenienti da 3 diverse strade e su questi sono stati applicati i 3 approcci di modellazione descritti (statistico, neurale, ibrido) e le 3 diverse metodologie di controllo (no controllo, statico, adattivo).

Modelli predittivi

In Tabella 2 vengono paragonati gli errori medi commessi dalle diverse tecniche di modellazione. E’ interessante notare come l’approccio ibrido che combina modello statistico e neurale sia quello che fornisce la maggiore accuratezza (comparazione grafica in Figura 46).

Tabella 2. Risultati sperimentali modelli predittivi

	Flusso veicolare medio notturno	Modello statistico	Modello ensembling neurale	Modello ibrido
Strada 1	177	5,90%	3,29%	2,8%
Strada 2	212	7,4%	3,43%	2,65%
Strada 3	495	5,56%	3,02%	3,03%
	Media	6,20%	3,25%	2,82%

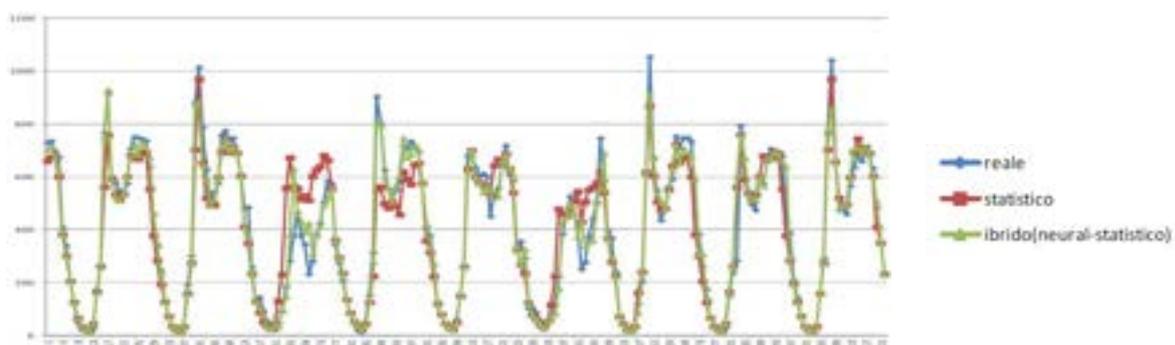


Figura 46. Comparazione modelli predittivi

Diagnostica di condizioni anomale

In Tabella 3 vengono riportati i risultati sulla diagnostica delle condizioni anomale, ovvero la percentuale di casi in cui si verificano situazioni fuori dal caso del profilo medio.

Tabella 3. Frequenza situazioni anomale di attività della strada

Strada 1	31%
Strada 2	43%
Strada 3	60%

E' evidente che per le strade il cui profilo di utilizzo è molto aleatorio come nel caso della strada 3, il modello statistico è poco significativo mentre il modello statico può indurre errori considerevoli (spreco di energia in un senso, carenza di sicurezza nell'altro). L'approccio adattivo è in questi casi molto conveniente.

Controllo adattivo

In Tabella 4 viene riportato il confronto tra il controllo statico e quello adattivo sia in termini di sicurezza che di risparmio energetico. L'indice di sicurezza è stato calcolato come il numero di volte (espresso in percentuale) in cui viene deciso un valore di potenza del flusso luminoso (in base al dato di flusso predetto) inferiore a quello che sarebbe necessario in funzione del flusso di traffico reale. L'indice di risparmio è stato calcolato rispetto al caso senza alcun tipo di controllo, ovvero nella condizione in cui si fornisce il 100% della potenza per tutto il periodo di illuminazione.

Tabella 4. Risultati comparativi sul risparmio energetico e sicurezza

	Indice di sicurezza		Risparmio energetico	
	Controllo statico	Controllo adattivo	Controllo statico	Controllo adattivo
Strada 1	100%	98,5%	15%	39%
Strada 2	100%	98,4%	15%	43%
Strada 3	98.4%	99,1%	15%	28%

Da tali risultati è possibile notare che il controllo adattivo è in grado di fornire un risparmio energetico notevole, specialmente nelle strade con flusso medio-basso, mantenendo un livello di sicurezza molto prossimo al 100%. Un consistente miglioramento dell'indice di sicurezza si ottiene se si fa una comparazione tra controllo adattivo e caso "tuttanotte-mezzanotte" (Tabella 5).

Tabella 5. Comparazione sull'indice di sicurezza tra controllo adattivo e controllo statico del tipo "tuttanotte-mezzanotte"

	Controllo statico tuttanotte-mezzanotte	Controllo adattivo sigmoidale
Strada 1 (flusso=177)	100%	98,5%
Strada 2 (flusso=212)	99%	98,4%
Strada 3 (flusso=495)	91%	99,1%

In particolare nella sperimentazione della strada 3 con flusso di traffico elevato circa il 9% del tempo l'illuminazione è più bassa in media del 12% rispetto a quanto stabilito dalla normativa.

In Figura 47 si riporta un esempio del diverso comportamento tra le due strategie di controllo (controllo statico e controllo adattivo) in cui sono evidenziate le aree in cui viene migliorata la sicurezza (tratteggio giallo) ed in cui si ottiene un risparmio energetico (tratteggio viola).

In conclusione le attività di sviluppo del sistema intelligente per la regolazione adattiva punto-punto dell'illuminazione pubblica si sono articolate sulla definizione della metodologia e sull'analisi sperimentale. Per il primo punto sono state sviluppate tecniche di modellazione predittiva, diagnostica delle anomalie e controllo adattivo. Queste sono state validate e comparate su dati sperimentali di flussi di traffico reali. Per quel che riguarda i modelli predittivi è stata raggiunta un'accuratezza con errore di circa il 2,5% con un approccio ibrido che combina modelli statistici e neurali.

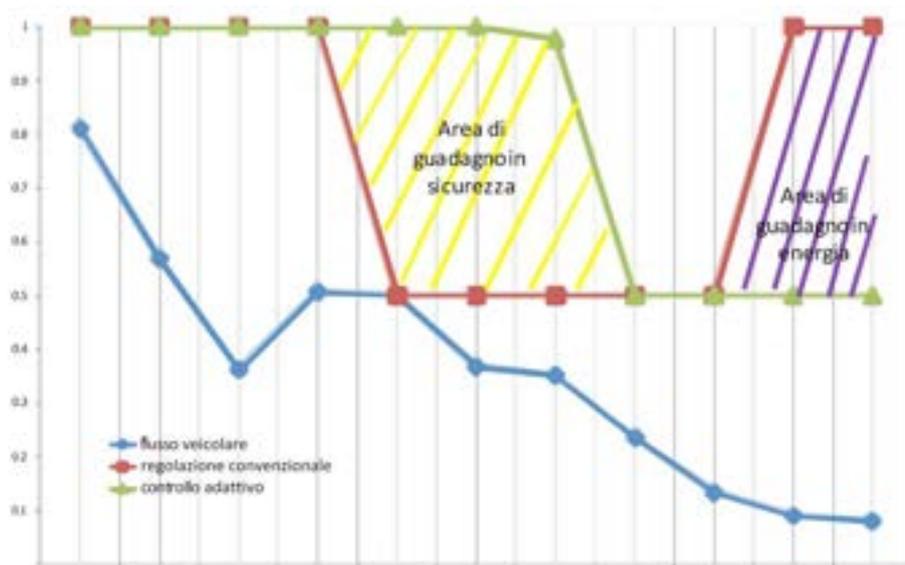


Figura 47. Comparazione tra controllo adattivo e controllo statico del tipo “tutta notte-mezzanotte”

Sono state studiate diverse strategie di controllo adattivo e la migliore ha comportato come risultato che è possibile ottenere dei risparmi energetici considerevoli (fino al 43% rispetto al caso senza controllo) garantendo dei livelli di sicurezza molto prossimi al 100%.

La metodologia sviluppata sarà implementata nello “Smart Village”, in fase di realizzazione presso il Centro Casaccia il cui sviluppo è previsto nel quadro delle attività del PAR 2011 estendendo l’applicazione attualmente effettuata sulle “torri faro” su diversi altri viali led del Centro.

Quanto alle ricadute al di fuori della Ricerca di Sistema Elettrico, si segnala il concreto interesse di diverse aziende che producono ed installano sistemi illuminotecnici, che chiedono ad ENEA di avviare il trasferimento tecnologico della metodologia al fine di sviluppare prodotti di mercato.

B.2 Studio teorico-sperimentale di una struttura multifunzionale da installare nelle rotonde in ambiente urbano in una logica di Smart Cities

La ricerca “Rotonde Smart Cities”, frutto di una collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria dell’Energia e dei Sistemi dell’Università di Pisa ed ENEA, ha avuto la finalità di promuovere lo studio di una struttura multifunzionale energeticamente attiva, da installare nelle rotonde viarie cittadine ed extra urbane, ponendo la massima attenzione alla fase gestionale per costituire l’input della programmazione secondo la logica delle opere che possano contribuire ad avere contesti territoriali ed urbani “smart”.

L’attività di ricerca ha portato alla programmazione e alla progettazione di “SVEMlight”, Struttura Viaria Ecosostenibile Multifunzionale, un dispositivo che nasce allo scopo di esplicare nelle rotonde viarie funzioni primarie principali (necessarie e richieste) e funzioni primarie complementari (non necessarie, ma motivatamente previste per avere ritorni gestionali). Ne è conseguito che la struttura progettata consente di esplicare le seguenti funzioni: illuminare l’intersezione stradale, trasformare l’energia derivante da fonti rinnovabili in energia elettrica, trasmettere dati attraverso dispositivi radio/Wi-Fi, comunicare informazioni di vario tipo (ad esempio: dati meteorologici, traffico stradale, pannelli integrativi alla segnaletica stradale), monitorare il traffico, rilevare e monitorare l’inquinamento atmosferico, raccogliere acqua piovana per l’annaffiamento del verde, mantenere le dotazioni impiantistiche, permettere l’implementazione della struttura con nuove installazioni, costituire un elemento di decoro del paesaggio urbano reversibile e riadattabile (recupero). La molteplicità delle funzioni consente l’impiego di risorse economiche tali da realizzare opere di valore, con materiali innovativi non tradizionali in quanto ne deriva una gestione attiva rispondente a tutte e sette le Classi di Esigenze (UNI 8289:1981).

Il metodo adottato: Analisi del Valore

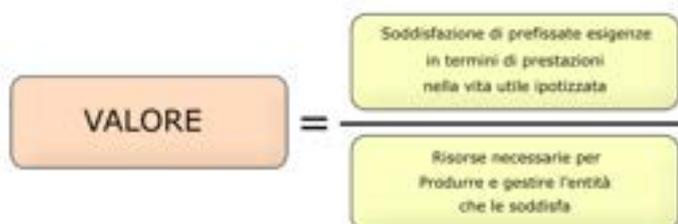
Nelle fasi di programmazione e progettazione di SVEMlight è stato adottato il metodo dell’Analisi del Valore (AV), ideato da Lawrence D. Miles nel 1943, con le attenzioni volte al processo realizzativo e alla gestione. AV è un metodo dotato di una tecnica operativa basata sull’attività di gruppo interdisciplinare, coordinata da parte di un

esperto AV, basata sulla ricerca tra più soluzioni della medesima entità di quella caratterizzata dal maggior rapporto possibile tra Utilità e Costo globale, così come di seguito definiti.

Non si tratta quindi di offrire le prestazioni richieste al minor costo possibile, che rappresenta peraltro un già significativo risultato tipico dello "spending review" o di una attenzione ai costi in rapporto ai benefici economici, ma la ricerca del massimo rapporto tra l'utilità perseguita in risposta a tutte le esigenze e le risorse necessarie per ottenere e mantenere le prestazioni richieste nella vita utile ipotizzata, ovverosia per tutto il periodo di tempo prefissato nella fase programmatica.

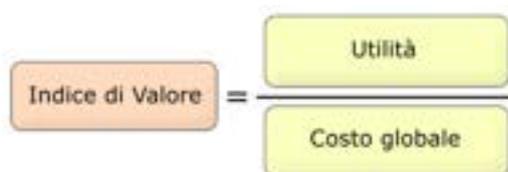
L'Analisi del Valore si basa sull'Analisi Esigenziale e Funzionale (AF) supportate da una completa informazione, al fine di individuare, elencare, definire con un binomio funzionale le funzioni che l'entità presa in considerazione esplica e/o consente di esplicitare, funzioni che vengono classificate in primarie principali (necessarie e richieste), primarie complementari, espresse dal gruppo di lavoro nella fase creativa (non necessarie, ma motivatamente richieste in quanto ritenute, per esempio, utili per la gestione dell'entità e quindi da valutare) e funzioni secondarie (non necessarie e non richieste e pertanto da eliminare almeno che non comportino di far decadere una funzione primaria).

In sintesi, AV consente di mettere a confronto e disporre in ordine di priorità più soluzioni di una medesima entità, non limitandosi a considerare l'efficienza e l'efficacia al momento in cui si comincia a fruirne o ad utilizzarla, ma a mantenere le prestazioni richieste in tutto l'arco di tempo in cui s'intende utilizzarla (vita utile ipotizzata in fase di programmazione).



L'Utilità (U) viene stimata da tutte le componenti il gruppo di lavoro in modo da rendere la stima il più possibile svincolata da fattori soggettivi, esprimendo, in maniera sintetica quanto valga la soluzione analizzata e quanto valgano le soluzioni alternative sottoposte ad analisi già dall'inizio dell'attività o espresse dal gruppo AV stesso. Si tratta quindi di un "apprezzamento", ovverosia di disponibilità a pagare per ottenere le prestazioni attese nella vita utile ipotizzata. Assumendo nella stima dell'Utilità come unità di misura la moneta si ha la stessa dimensione del denominatore (Costo globale) e quindi con il rapporto un numero adimensionale compreso tra zero e uno e quindi un indice, mediante la divisione di tutti i risultati ottenuti per il massimo di essi.

In sintesi: rendendo dimensionalmente omogenei numeratore e denominatore si ottengono parametri riconducibili a indici, numeri puri compresi tra zero e uno.



Mentre l'Utilità viene stimata assumendo a riferimento le sette classi di esigenze di cui alla norma UNI 8289:1981, il Costo globale (Cg) viene preventivato sulla base di banche dati di entità analoghe relative ad analoghe circostanze di luogo e di tempo.

L'applicazione di tale metodo alle rotatorie stradali ha come risultato che l'utilità delle rotatorie risulta notevolmente aumentata perché SVEMlight è stato studiato in modo da offrire numerose risposte funzionali: impianto fotovoltaico, illuminazione a led della sede stradale, raccolta delle acque piovane per alimentare impianti di irrigazione del verde pubblico e dispositivi radio/Wi-Fi, sono una parte del corredo messo a disposizione di questa struttura. In Tabella 6 è riportata la sintesi tabellare dell'Analisi di Valore illustrando le esigenze, le funzionalità e le risposte del progetto SVEMlight, che è infatti provvisto di spazi supplementari per l'inserimento di ulteriori attrezzature (ad esempio stazioni di monitoraggio dell'inquinamento o del traffico, nodi per reti di cloud

computing, pannelli informativi, ecc.), ed è pertanto un organismo flessibile, in grado di adattarsi alle esigenze specifiche di qualsiasi territorio.

Ed è il territorio il destinatario principale cui è stata dedicata gran parte della progettazione: SVEMlight nasce per divenire un elemento qualificante del contesto urbano perché disegnato con rapporti aurei e geometrie classiche, le stesse che portano ancora oggi ad ammirare le grandi architetture del passato. Per questo quanto si propone è in grado di integrarsi anche in contesti di pregio storico-architettonico, di cui è ricco il nostro Paese, o di divenire un elemento caratterizzante nella riqualificazione di aree degradate.

Tabella 6. Analisi di Valore - esigenze, funzionalità e risposte del progetto SVEMlight

Analisi del Valore					
COME?>>>		FAST		<<<PERCHÈ?	
Function Analysis System Technique					
Entità	CE	Esigenze	Requisiti	Funzioni	Risposte funzionali
SVEMlight	S	Garantire sicurezza stradale	DPR 495/92	Introdurre dispositivi informativi di ausilio alla circolazione Introdurre dispositivi di monitoraggio del traffico	Segnaletica supplementare Videocamera/webcam
		Garantire sicurezza strutturale	Eurocodici (EC)	Resistere a condizioni di carico di contesti differenti	Opportuni studi delle azioni strutturali
		Garantire sicurezza sul lavoro	TU Sicurezza (Dlgs 81/2008)	Effettuare operazioni di manutenzione in sicurezza Eseguire assemblaggio e messa in opera in sicurezza	Protezioni/dispositivi anticaduta Messa in opera in officina Messa in opera in loco semplificata
	B	Garantire benessere visivo	UNI EN1320 UNI11248 EN13201	Illuminare rotatoria Permettere visibilità dell'intersezione stradale	Lampade a led Struttura semitrasparente
		Ridurre impatto acustico degli impianti	DPCM1/3/9 L.447/95	Utilizzare dispositivi poco rumorosi	Basso impatto acustico delle installazioni impiantistiche
	F	Consentire accesso per svolgere manutenzione		Interdire accesso ai non addetti Agevolare raggiungimento degli impianti	Accesso ai non addetti interdetto Elementi di collegamento verticale (scale, altro)
		Migliorare accessibilità della rete stradale		Informare sulle condizioni di traffico	Pannelli elettronici informativi
		Aumentare efficienza delle reti di telecomunicazione	Legge 22/2001	Introdurre dispositivi radio/Wi-Fi	Antenne Wi-Fi Boe radio
		Attrezzare con spazi informativi		Informare sulle condizioni meteo Inserire spazi pubblicitari	Pannelli elettronici informativi Pannelli elettronici informativi
	A	Garantire integrazione estetica in contesti differenti	Prestazione attesa	Disegnare con rapporti e geometrie classiche	Modularità del progetto architettonico
	G	Trasportare struttura		Ricollocare in nuovi contesti Evitare trasporti eccezionali	Giunti di collegamento smontabili Dimensionamento opportuno degli elementi
			Consentire manutenzione		Prevedere spazi per agevolare le operazioni di manutenzione Monitorare il funzionamento degli impianti Innaffiare aree verdi
		Consentire integrazione di Dispositivi supplementari e adattamento tecnologico		Prevedere spazi di inserimento per attrezzature supplementari	Spazi per attrezzature supplementari
	SA	Sfruttare fonti di energia alternativa	Prestazione attesa	Utilizzare dispositivi fotovoltaici Utilizzare dispositivi eolici	Film solare Impianto microeolico
				Risparmiare acqua	Raccogliere acqua piovana
		Risparmiare energia	Dlgs 11/2006	Utilizzare dispositivi a basso consumo energetico	Lampade a led
		Monitorare inquinamento	UNI EN 15267-1:2009	Utilizzare dispositivi di monitoraggio	Monitoraggio inquinamento ambientale

Tra i vari aspetti legati al territorio vi è poi la completa reversibilità della struttura. Questo dispositivo può essere smontato e trasportato per essere riproposto in altri luoghi con estrema facilità, senza lasciare alterazioni nell'ambiente. Questo risulta assai importante se consideriamo il territorio come una risorsa fondamentale delle attività umane, il cui uso rispettoso e responsabile deve essere alla base di ogni sua trasformazione, il "modus operandi" più indicato per la gestione di un bene destinato anche alle generazioni future.

L'aumento di utilità che deriva dall'installazione di questa struttura, si traduce in servizi destinati alla collettività, nel miglioramento del nostro vivere quotidiano. L'assenza di emissioni inquinanti, l'utilizzo di apparecchiature a basso consumo energetico, la produzione di energia da fonti rinnovabili, la reversibilità della struttura e la qualità delle dotazioni impiantistiche, sono tutti elementi contemplati nella progettazione di questo dispositivo e sono rivolti a beneficio di tutta la cittadinanza.

SVEMlight è infine un elemento simbolico, costituisce esso stesso un esempio di sviluppo e di benessere sostenibile, la dimostrazione che un altro modo di intendere il progresso e lo sfruttamento delle risorse è, già da oggi, possibile. Il richiamo alla natura riproposto dall'elemento a forma di "calla" posto alla sommità della struttura, ha come obiettivo, non meno importante, di fare cultura, diffondere il messaggio a favore delle tematiche ambientali. L'aumento di utilità che deriva dall'installazione di questa struttura, rapportata ai modesti costi globali da sostenere nel corso della vita utile ipotizzata, fanno quindi di SVEMlight una soluzione di elevato valore complessivo e pertanto questa struttura rappresenta un passo in avanti verso l'integrazione tra territorio, sostenibilità e nuove tecnologie, un contributo importante per la formazione di ambienti urbani intelligenti.

Il progetto

Da una prima idea progettuale, conseguente alla previsione di una struttura multifunzionale da collocare al centro di rotonde viarie, sono scaturite più ipotesi tra le quali è stata selezionata un tipo di struttura costituita da un iperbolicoide ad una falda, con elementi lineari in alluminio, collegata ad un elemento tubolare centrale che porta in sommità un fiore di calla in vetroresina rinforzata con fibre di vetro. In Figura 48 e 49 si riportano rispettivamente funzioni e rendering in un contesto urbano del sistema SVEMlight.

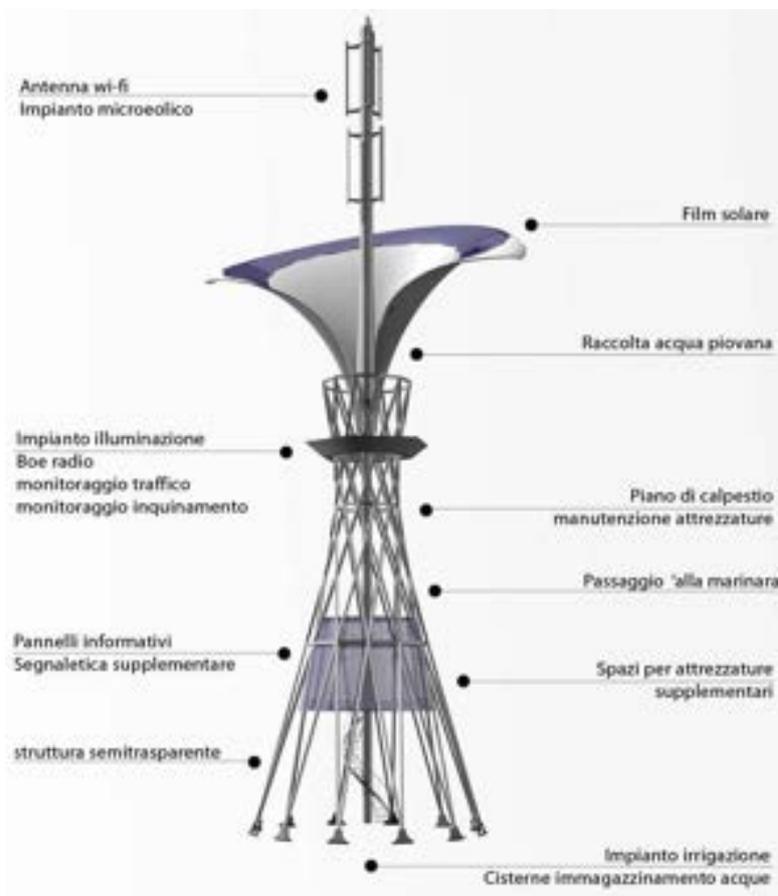


Figura 48. Le funzioni del sistema SVEMlight



Figura 49. Rendering del sistema SVEMlight in un contesto urbano

Al “fiore” sono collegati convertitori di energia solare. Il “pistillo” del fiore va a costituire il supporto di ripetitori telefonici e di un eventuale impianto micro-eolico ad asse verticale. Attorno all’elemento tubolare centrale si avvolge la scala di collegamento tra i vari livelli della struttura, utilizzabile anche per consentire lo svolgimento delle operazioni di manutenzione.

In sommità dell’iperboloide, realizzato in officina a strati trasportabili in sito con elicottero, collegabili in corrispondenza degli elementi di cerchiatura calati attorno all’elemento centrale, sono ubicati i corpi illuminanti a LED e le boe radio di ripetizione segnale per comunicazioni, disposti in circolo e convergenti verso il perimetro della rotonda.

La fondazione è costituita da una struttura in cemento armato nervata con un’intercapedine all’interno della quale è prevista la raccolta d’acqua piovana che viene trattata per essere usata per l’innaffiamento del verde circostante la struttura.

Stima del costo della struttura

Il costo globale è relazionato alle funzioni aggiunte rispetto a quelle primarie principali: dare informazioni, educare e comunicare i significati connessi alle fonti energetiche rinnovabili, contribuendo ad una crescita della cultura dello sviluppo sostenibile.

Ne deriva un Indice di Valore (Utilità/Costo globale) maggiore rispetto ad altre soluzioni equivalenti per quantità di energia erogata in quanto vi è un ritorno sul piano gestionale che coinvolge anche aspetti sociali.

Il costo di produzione torna ed essere funzionale alla definizione di Economia nell'accezione originaria in quanto viene ripagato nel tempo con funzioni che generano cultura, capaci a loro volta di produrre economia. SVEMLight è una struttura reversibile, in quanto può essere smontato e montato in altri luoghi, flessibile, potendo prevedere diverse configurazioni impiantistiche e integrabile con attrezzature supplementari.

Per stimare il costo della struttura si è ipotizzato una prima produzione di 100 pezzi in tre anni e sono stati intervistati possibili costruttori a cui è stato mostrato il progetto. Ciascun intervistato ha quotato la realizzazione della struttura montata a cui poi è stato aggiunto il costo del sistema di illuminamento, del sistema fotovoltaico di quello radio sulla base dell'esperienza sviluppata nel predisporre i dimostratori. La stima risultante è stata di un costo di circa 80.000 € per una produzione di 100 esemplari in tre anni.

Va considerato che la struttura ha una serie di ritorni economici annuali molto interessanti che derivano dalla produzione di energia elettrica da fotovoltaico (3000-4000 euro/anno), dall'affitto per sistemi di trasmissione radio (si stima circa 20000 euro/anno) oltre che servire alle funzioni di illuminazione della rotonda e del monitoraggio del traffico e della sicurezza. Per questo motivo si stima un tempo di ritorno dell'investimento di circa 3-4 anni. Ciò porta ad avere una struttura facilmente bancabile e quindi finanziabile da terzi, con anche un ritorno annuo per le pubbliche amministrazioni con il quale eventualmente finanziare i dispositivi di monitoraggio del traffico, dell'area ecc.

B.3 Studio di fattibilità finalizzato all'analisi e definizione di alcune soluzioni di integrazione di componenti Smart al prototipo a LED PLUS"

La ricerca è frutto di una collaborazione tra ENEA e Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano ed è finalizzata ad immaginare nuove possibili integrazioni delle "ubiquitous technologies" all'interno del sistema di illuminazione pubblica urbana; tali tecnologie senzienti interconnesse hanno lo scopo di informare lo spazio urbano e/o influenzarne il comportamento, attraverso servizi utili per i cittadini.

Se oggi il processo di integrazione di tecnologie e sistemi intelligenti per la realizzazione di una Smart Street si focalizza sulla tecnologia stessa, questo studio si focalizza sui servizi rivolti all'individuo tramite il mezzo strumentale tecnologico. Lo scopo è definire possibili applicazioni intelligenti in termini di funzionalità, sostenibilità e percezione dello spazio attraverso tre passaggi:

- analisi di casi studio;
- definizione di scenari;
- integrazione dell'apparecchio di illuminazione a LED PLUS.

Un sistema Smart Lighting si focalizza su tre fattori chiave: tecnologico, umano ed ambientale (Figura 50):

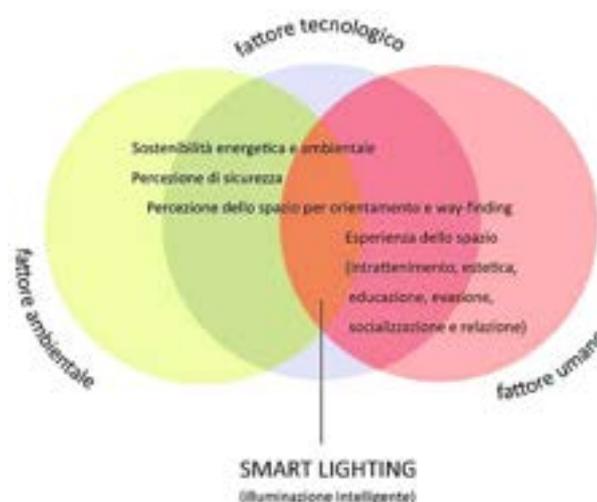


Figura 50. Fattori chiave di un sistema Smart Lighting

- Fattore ambientale - Ragionare in termini ambientali vuol dire assicurare benessere e vivibilità a tutti gli abitanti della città da diversi punti di vista: costi, performance, estetica e risparmio energetico.
- Fattore umano - La luce come mezzo di lettura della città, codice comunicativo e informativo, utile all'orientamento e alla percezione cognitiva dello spazio, sistema focalizzato sugli interessi e le necessità degli individui.
- Fattore tecnologico - Sebbene la tecnologia sia lo strumento infrastrutturale ed attuativo della luce intelligente, è necessario che sia funzionale ad assolvere servizi diversi e complessi.

Analisi dei casi studio

La selezione dei casi studio fa riferimento ad esempi recenti con caratteristiche funzionali ma anche artistiche: progetti pilota sperimentali, installazioni temporanee e prodotti realmente in commercio. I casi studio (Figura 51) sono stati analizzati in relazione alle seguenti macrotematiche:

- sostenibilità energetica e ambientale;
- percezione di sicurezza;
- percezione per orientamento e wayfinding;
- esperienza dello spazio (intrattenimento, esperienza estetica, aspetto educativo, evasione, socializzazione e relazione).

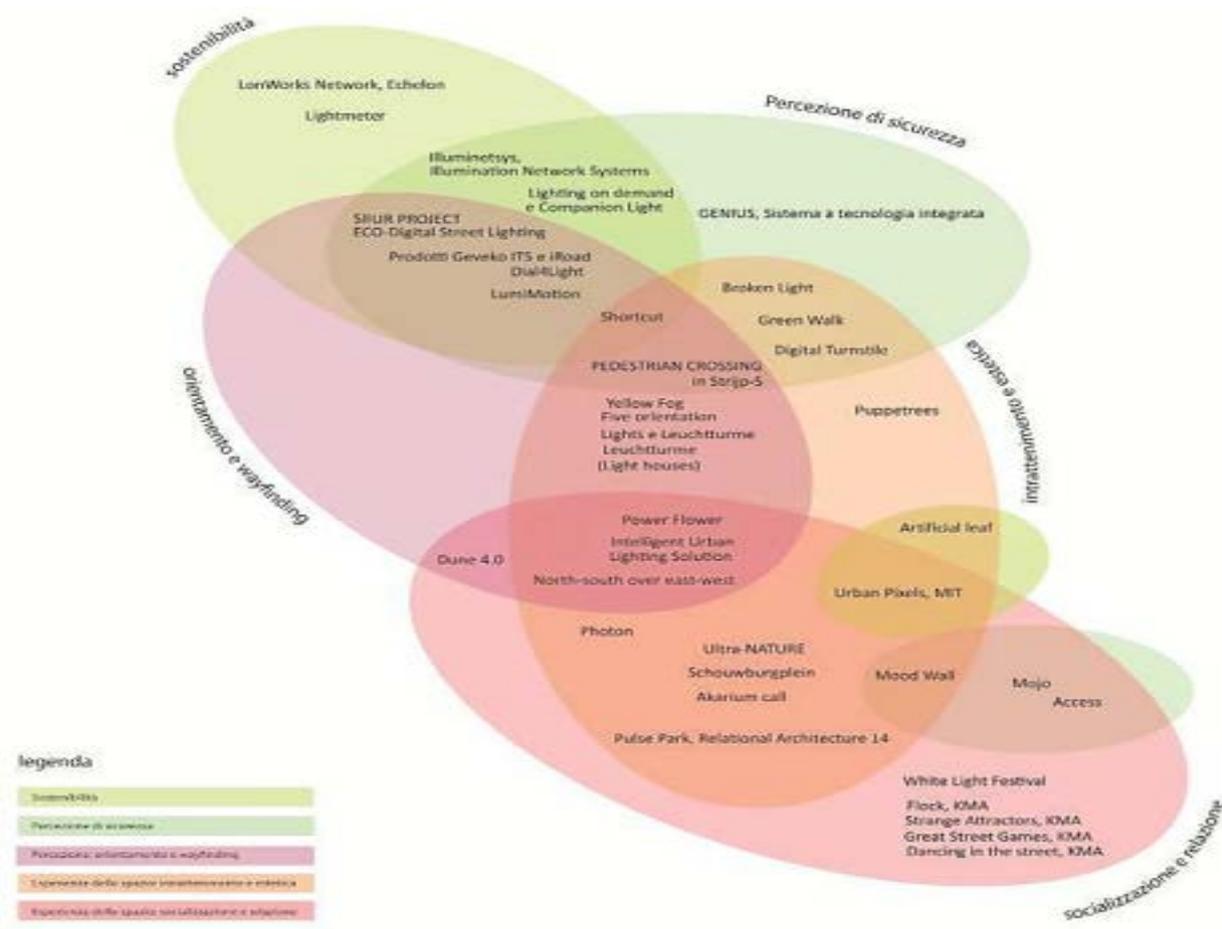


Figura 51. Mappa dei casi in studio

Evidente la netta separazione tra progetti focalizzati sul fattore umano e sul fattore ambientale: non c'è incontro diretto tra un'illuminazione indirizzata alla percezione e all'esperienza dell'utente e la sostenibilità del sistema. Una luce energeticamente efficiente assicura visibilità ed è quindi legata alla percezione dello spazio per l'orientamento in un ambiente percepito come sicuro. Da quest'analisi dunque scaturisce un potenziale nuovo ramo di ricerca che prende in considerazione la realizzazione di progetti volti al miglioramento dell'esperienza della città attraverso una luce sostenibile. I sistemi tecnologici complessi sono utilizzati per servizi di illuminazione

definiti sostenibili. Tali sistemi devono però tener conto dei costi di produzione dei singoli sensori e del consumo dell'intero sistema (per il rilievo, la comunicazione e il processing dei dati) per essere effettivamente considerati efficienti. Una tipologia di rete tecnologica complessa assume più senso quando i servizi forniti sono molteplici.

Dal diagramma riportato in Figura 52 è evidente che progetti di lunga durata sono impiantati se hanno effettive ricadute sul risparmio economico delle amministrazioni. Progetti performativi in cui sia preponderante l'importanza del rapporto tra luce e uomo sono invece spesso temporanei, magari reiterati nel tempo in luoghi diversi.

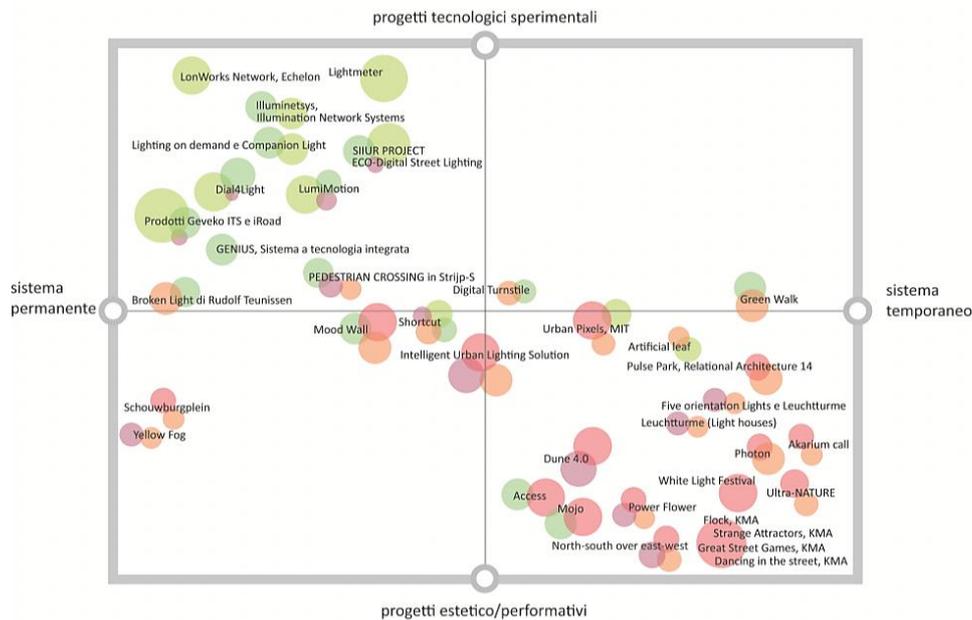


Figura 52. Relazione tra tipologia di progetti e durata nel tempo



Figura 53. Livelli di esperienza forniti

Dal diagramma in Figura 53 risulta evidente che i casi studio focalizzati sul fattore socializzazione ed esperienza estetica richiamano una partecipazione attiva e determinano un'esperienza immersiva nella performance luminosa; casi studio focalizzati sulla sostenibilità sono più legati ad una connessione passiva con l'ambiente e la luce con funzione educativa o di intrattenimento.

Definizione degli scenari

La strada è il contenitore principale di tutte le funzioni cittadine: nessun altro elemento urbano accetta una tale sovrapposizione di funzioni e di conseguenza non raggiunge completamente un grado di efficacia per quanto riguarda la convivenza urbana. La progettazione della Smart Lighting vuole, attraverso un utilizzo intelligente della luce, recuperare la quota zero sia attraverso la risoluzione di situazioni patologiche (crimine, vandalismo) sia rendendone la fruizione coinvolgente, esperienziale. Gli scenari proposti esprimono soluzioni di luce interattiva, dinamica e appropriata al luogo e al momento in cui è necessaria, avendo come principale obiettivo l'uomo e i suoi bisogni.

Ogni scenario è caratterizzato da:

- livello descrittivo: la storia (ruota intorno ad un individuo e i suoi bisogni);
- livello propositivo: l'idea (generazione di concept per rispondere a tali bisogni).

Gli scenari ipotizzati, attraverso schemi e rappresentazioni grafiche, sono i seguenti:

- *Orienting*: un ragazzo in visita ad un amico per la prima volta;
- *Predicting*: una ragazza che torna a casa di notte;
- *Entertaining*: un gruppo di amici che vanno al cinema/teatro;
- *Training*: un atleta sui pattini / una ragazza che fa jogging / un bimbo in bicicletta;
- *Breathing*: una mamma con i bambini che torna a casa dal lavoro;
- *Navigating*: un anziano signore che guida verso casa una notte d'inverno;
- *Tutoring*: una bimba che torna a casa da scuola da sola;
- *Cicero*: una coppia di turisti che visitano il centro della città;
- *Shopping*: una donna fa un giro tra i negozi del centro della città;
- *Performing*: un artista di strada suona lungo la via.

Applicazione PLUS

L'integrazione di sistemi Smart nel modulo di illuminazione PLUS viene definita a partire da alcuni degli scenari precedentemente illustrati:

○ *Scenario Predicting: una ragazza che torna a casa di notte*

Descrizione: situazione urbana notturna. Protagonista una ragazza che percorre una strada. Bisogno di sicurezza e orientamento nella strada.

Output di illuminazione: il sensore di presenza e movimento (PIR) è in grado di percepire pedoni e ciclisti intorno al palo con un'accuratezza molto elevata e regolare il livello massimo di flusso (100%); diversamente il sensore regola il livello minimo di flusso (20%) quando non percepisce alcun movimento.

Output ulteriori servizi: un'ulteriore sistema di videosensori è utile solo se le acquisizioni di dati immagine relative al comportamento dei pedoni sulla strada o sulla piazza siano poi utilizzate per fornire servizi di vigilanza al fine di assicurare la sicurezza delle persone con collegamento ad un centro di gestione e controllo che sia in grado di intervenire in tempo.

○ *Scenario Navigating: un anziano signore che guida verso casa una notte d'inverno*

Descrizione: un anziano alla guida di un'automobile di notte con condizioni di tempo sfavorevoli. Bisogno di visibilità, comfort alla guida e sicurezza su strada.

Sistema di sensori: oltre ai sensori PIR e ai video sensori si rende necessaria l'integrazione di un sistema utile al monitoraggio delle condizioni meteorologiche e alle condizioni della strada.

Output di illuminazione: dimming in relazione alla presenza di autoveicoli e di pedoni in zone di conflitto (attraversamenti pedonali). Dimming in presenza di neve. Regolazione di luce ambra in casi di nebbia.

Output ulteriori servizi: gestione segnaletica dinamica luminosa, attraverso la regolazione semaforica sia tradizionale che innovativa (integrata a terra) in relazione ai bisogni del momento. Gestione segnaletica dinamica informativa. Invio di informazioni su traffico e condizioni atmosferiche direttamente su periferica personale degli automobilisti che percorrono la strada.

○ *Scenario PLUS: evoluzione per l'illuminazione stradale (ME)*

Descrizione: Un modulo di videosensing con camera IP diventa particolarmente utile ed energeticamente sostenibile in situazioni di traffico veicolare di scorrimento veloce in cui i flussi di traffico, le situazioni di conflitto e la pericolosità della strada siano particolarmente importanti. Si tratta delle strade del tipo ME per le quali l'apparecchio di illuminazione modulare a LED PLUS non è stato sviluppato (e per cui potrebbe essere ipotizzata un'evoluzione progettuale).

○ *Scenario Analyzing: rilievo sperimentale del pattern di utilizzo dello spazio pubblico notturno*

L'installazione di una serie di video sensori potrebbe essere un utile strumento di ricerca sul campo per comprendere le specifiche esigenze di illuminazione di un determinato contesto stradale, per capire i pattern di utilizzo dello spazio pubblico urbano notturno da parte di pedoni e di automobilisti e quindi tradurre la fase di rilievo sperimentale in linee guida (in fase di definizione del PRIC) e programmi di illuminazione (con conseguenze sulla fase normativa).

Integrazione modulare: apparecchio PLUS

Sensore PIR + IC + LDR

I sensori di presenza e movimento PIR (Pyroelectric "Passive" infrared sensors), ovvero "infrarossi passivi", "pireoelettrici" sono in grado di captare con estrema accuratezza la presenza di persone ad un costo relativamente contenuto e con consumi energetici relativamente limitati. In Tabella 7 riportiamo le caratteristiche richieste per il sensore PIR.

Tabella 7. Caratteristiche del sensore PIR

Forma	Il sensore deve essere installato rivolto verso il basso.
Angolo di rilievo	360°
Altezza di monitoraggio	4,5 m
Consumo	1 W / 1,5 W
Voltaggio	220-240 V / 50-60 Hz
Flusso richiesto	1 Lux
Temperatura operativa	-30 °C a +30 °C
Protezione	IP- 66 assicurata dall'enclosure in cui è inserito
Sistema di controllo input	1-10 V o DALI
Comunicazione	wireless
Dimensioni- Sensore PIR, LDR, IC:	5 cm x 7,5 cm x 1,2 cm (spessore)

Modulo PreSense

Il modulo PreSense contiene tre sensori (PIR + LDR + IC) e si integra all'apparecchio PLUS nella sua configurazione per percorsi ciclabili e pedonali sia su sentieri, camminamenti e marciapiedi (Modulo T-DW + Modulo T-DN) sia nella sua configurazione adatta alle piazze (4 Moduli T-DW).

PreSense Orizzontale - Si aggancia direttamente ad un Modulo PLUS integrandosi completamente con il design dell'apparecchio sia a livello dimensionale (circa 12x12x3 cm) che per caratteristiche ().

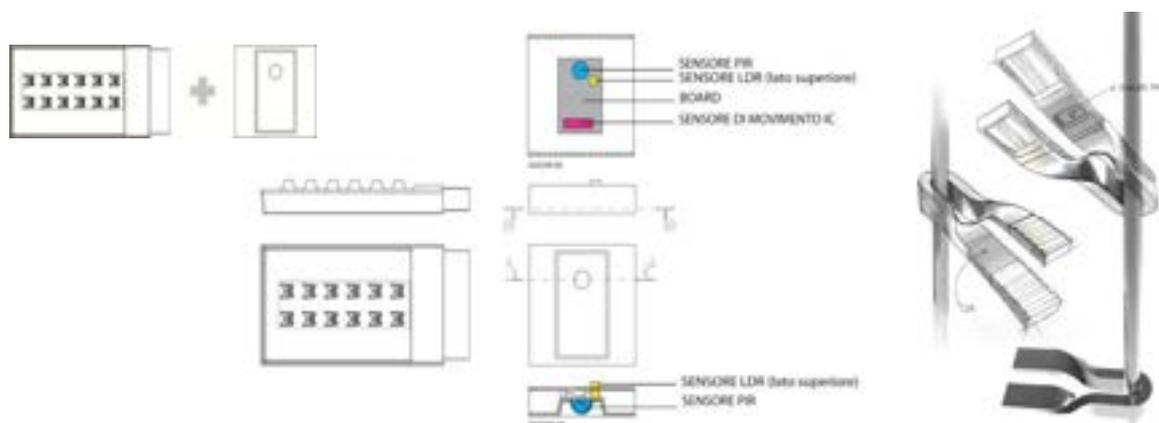


Figura 54. Modulo Pre-Sense orizzontale e sua integrazione nell'apparecchio PLUS

PreSense Verticale - Il modulo si aggancia nella parte retrostante del corpo dell'apparecchio (Figura 49) quando è in configurazione piazza (4 elementi).

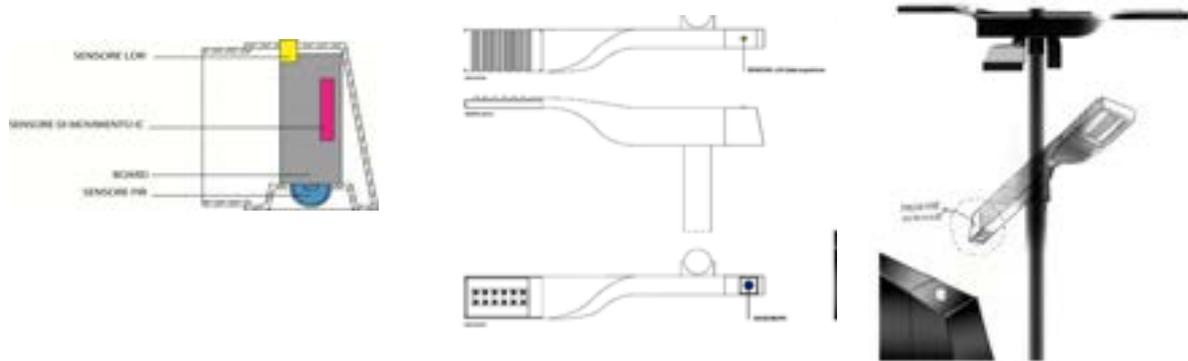


Figura 55. Modulo Pre-Sense verticale e sua integrazione nell'apparecchio PLUS

Video sensore

I video sensori solitamente utilizzati in esterni urbani, soprattutto per il rilievo del traffico e per la vigilanza in alcuni punti della città sono solitamente videocamere IP. In questo studio vengono definite le caratteristiche relative alla forma del dispositivo (dimensionalmente integrabile al modulo PLUS), alle capacità di rilievo del video sensore (apertura del fascio in base alla geometria della strada e altezza di montaggio, risoluzione, velocità di scansione dell'immagine). Le caratteristiche del videosensore sono riportate in Tabella 8.

Tabella 8. Caratteristiche del video sensore

Sensore:	1/4" – 1,3MP - CMOS Lente: F2,8
Risoluzione video	1280 x 1024 a 10 fps
Sensibilità	0,5 lux con F2.8. con integrazione di un illuminatore a LED IR
Potenza	(5V @ 2,5A) massimo 10 W
Dimensioni	80 mm x 110 mm x 37 mm (in base ad un modello disponibile in commercio)
Temperatura operativa	-30 °C a +70 °C
Protezione	IP66

Modulo EyeSense

Il modulo EyeSense si integra all'apparecchio PLUS nella configurazione per percorsi ciclabili e pedonali, nella configurazione adatta alle piazze (4 Moduli T-DW) e nella configurazione strada a 6,5 metri di altezza, (4 moduli PLUS). Il modulo risulta compatto e la soluzione orizzontale è stata scelta per renderlo integrato nell'estetica modulare dell'apparecchio PLUS. La telecamera è fissata all'interno di un modulo di dimensioni simili al PLUS tramite due perni utili ad orientare la camera (Figura 56).

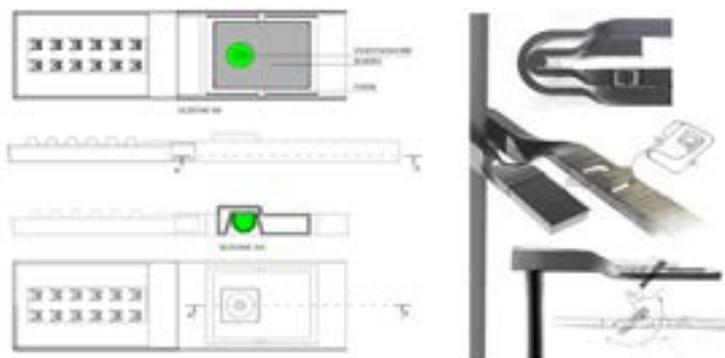


Figura 56. Configurazione del video sensore e integrazione della videocamera nel sistema PLUS

Di seguito a titolo di esempio si descrivono alcune delle possibili modalità di installazione in relazione agli scenari descritti in precedenza.

- Configurazione Scenario Predicting
Situazione marciapiede:
 - Installazione palo a 4,5 m (h)
 - Rilievo a partire da 1 m da terra
 - Orientamento: marciapiede
 - Posizionamento: Inclinazione del video sensore di circa 15° (rispetto alla verticale)
Situazione piazza:
 - Installazione palo a 4,5 m (h)
 - Rilievo a partire da 1 m da terra
 - Orientamento piazza
 - Posizionamento: Inclinazione del video sensore di circa 0° (rispetto alla verticale).

- Configurazione Scenario Navigating
Situazione strada:
 - Installazione palo a 6,5 m (h)
 - Rilievo a partire da 1,5 m da terra
 - Orientamento strada
 - Posizionamento: Inclinazione del video sensore di circa 27° (rispetto alla verticale).

In conclusione la creazione di scenari di utilizzo della strada rende possibile evidenziare i bisogni di luce relativi ad un contesto e ad un'attività di un determinato utente e tradurli a livello tecnologico mediante sistemi di Smart Lighting per assicurare una luce funzionale, esperienziale, estetica e sostenibile.

È evidente che, in alcuni casi basterà utilizzare dei sistemi tecnologici semplici e a basso impatto (in situazioni prevalentemente pedonali o in situazioni veicolari miste non problematiche). Sistemi tecnologici più complessi e più onerosi da un punto di vista economico ed energetico, come ad esempio l'utilizzo di video sensori, devono essere giustificati da un'effettiva utilità e da consistenti vantaggi per la città e la cittadinanza (ad esempio strade di tipo ME).

L'integrazione formale del sistema Smart per l'apparecchio PLUS si basa sul minimalismo e la modularità degli elementi in linea con l'estetica del prodotto di illuminazione. Per la definizione delle specifiche dell'architettura di un sistema di Smart Lighting complessivo si rende necessario il coinvolgimento diretto di partner in grado di fornire tutte le competenze necessarie per uno sviluppo progettuale efficace.

C. Sviluppo di un sistema di monitoraggio e gestione della mobilità veicolare attraverso la rete di illuminazione pubblica

C.1 Sviluppo del sistema di monitoraggio e gestione della mobilità veicolare: Elaborazione delle immagini per l'analisi della scena urbana

Nell'ottica della riduzione dei consumi energetici dovuti all'illuminazione pubblica sono state prese in considerazione diverse metodologie al fine di stabilire in maniera ragionevolmente precisa la quantità di traffico, sia veicolare che pedonale, rilevata nelle strade pubbliche ed erogare di conseguenza una potenza sui lampioni proporzionale alla domanda (principio della illuminazione adattiva).

Le metodologie prese in considerazione richiedono l'utilizzo di una sensoristica variegata:

- Sensori Piezoelettrici;
- Sensori Infrarossi;
- Sensori Ultrasuoni;
- Radar;
- Sistemi basati su GPS installati su veicoli campione;
- Telecamere.

I sensori piezoelettrici sono sensori che rilevano la pressione esercitata su di essi, quindi ponendo tali sensori in maniera opportuna lungo il manto stradale è possibile conteggiare con una buona precisione il numero di veicoli. I sensori a infrarossi si basano sulla radiazione infrarossa per la rilevazione di oggetti in movimento. I sensori a

ultrasuoni si basano sul rilevamento delle onde meccaniche sonore. I sensori radar si basano sulle onde elettromagnetiche.

Le telecamere rispetto ai sensori offrono la possibilità di acquisire informazioni aggiuntive rispetto al solo conteggio dei veicoli quali quelle legate al passaggio delle persone, alle condizioni meteo (pioggia, neve, nebbia), alle condizioni di illuminazione, alle situazioni critiche (incidenti, congestione, folle, incendi). I sensori visivi pertanto, pur non potendo surrogare in termini di accuratezza di misura i sensori sopra descritti garantiscono un'elevata concentrazione di informazioni e potenzialità per il prossimo futuro. Per questo l'investimento sulla analisi di immagini della scena urbana rappresenta un settore molto promettente.

Il lavoro svolto nell'ambito di questo obiettivo si è concentrato sul primo livello di informazioni da estrarre dalle immagini sufficiente ad attivare la metodologia dell'illuminazione adattiva. Tale livello consiste nell'estrazione di "indici di attività" della strada, un'informazione che può essere molto prossima al "flusso di veicoli e persone" (conteggi). Nel seguito si descrive la realizzazione dell'applicativo per l'analisi real time delle immagini finalizzato al rilevamento del flusso di traffico urbano.

Descrizione dell'applicativo per l'elaborazione delle immagini

Al fine di ottenere un servizio di monitoraggio del traffico è stato realizzato un applicativo dedicato all'elaborazione delle immagini ed all'estrazione di indici di flusso di traffico veicolare e di conteggio.

Tale applicativo è stato realizzato in linguaggio C/C++ e si basa sulle librerie OpenCV per quanto riguarda l'elaborazione delle immagini, sulle librerie QT per quanto riguarda l'interfaccia grafica e sulle librerie VLC per la connessione con le telecamere IP (accessibili via web tramite l'indirizzo IP). In particolare le telecamere IP svolgono un ruolo fondamentale ai fini del monitoraggio del traffico in quanto in condizioni di banda sufficientemente larga risulta possibile monitorare diversi scenari urbani in luoghi geograficamente distanziati tramite lo stesso server di elaborazione.

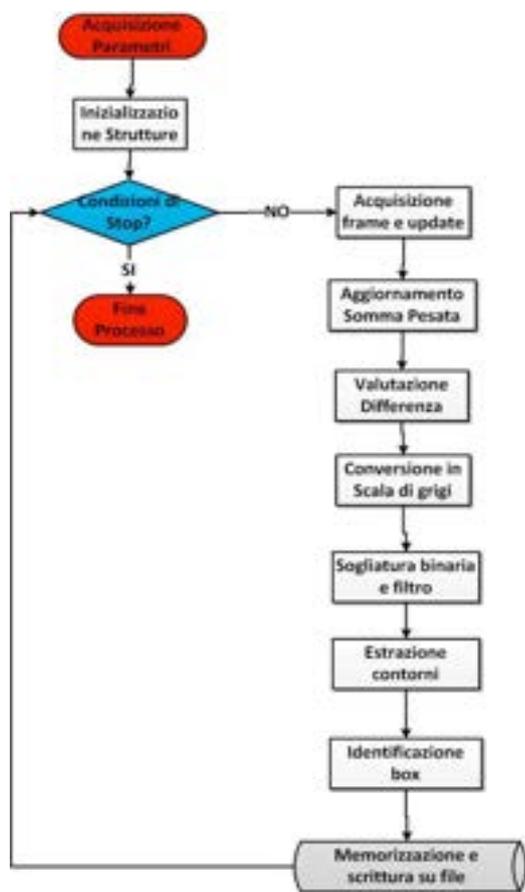


Figura 57. Diagramma di flusso del processo di elaborazione delle immagini

L'applicativo è suddiviso in una serie di routines processate iterativamente ad ogni frame acquisito. La Figura 57 mostra il diagramma di flusso del processo. Nello step iniziale del processo viene acquisito il primo frame, che viene utilizzato per estrarre informazioni (risoluzione, numero di canali, tipi di dato della matrice dell'immagine) per la creazione delle immagini di supporto. Ad ogni ciclo viene acquisito un nuovo frame su cui vengono eseguite diverse procedure. Tali operazioni sono processate in maniera totalmente trasparente sia sul frame intero sia se vengono impostati dei target, ovvero delle aree di interesse dell'immagine. La funzionalità della impostazione di target sull'immagine è stata introdotta per una serie di utili scopi: in primo luogo consente di scartare alcune zone dell'area monitorata. È infatti plausibile ipotizzare che di un'area urbana monitorata ci siano delle zone in cui si esclude a priori che possa verificarsi qualche evento da monitorare (es. palazzi). Inoltre consente di focalizzare l'attenzione solo su determinate aree dell'immagine, facilitando quindi il processo di elaborazione. Infine come vedremo consente una più semplice applicazione dell'algoritmo di conteggio, grazie all'uso di un target come soglia di attraversamento.

L'estrazione del background consiste nel memorizzare le componenti di ogni pixel (generalmente RGB) in un istogramma tridimensionale contenente il numero di occorrenze in cui compare una determinata terna di valori, ad ogni frame acquisito viene aggiornato ogni istogramma di ciascun pixel, il valore massimo dell'istogramma finale rappresenterà la terna di valori che compare più frequentemente per quel determinato pixel. La conversione in scala di grigi e la successiva sogliatura

binaria consentono di risaltare solo le componenti in movimento della fonte video. La conversione è stata implementata seguendo tre metodologie differenti: la media, il valore massimo o la distanza euclidea tra le tre

componenti. Tale conversione viene applicata alla differenza assoluta tra il frame corrente un AND logico tra la somma pesata dei frame precedenti ed il background corrente. La soglia binaria viene effettuata sull'immagine in scala di grigi, se la differenza non supera un certo valore il pixel viene considerato spento, quindi non vi è stato movimento, ed il suo valore viene portato a 0, altrimenti viene acceso ed il suo valore viene portato al valore massimo (255 nella scala di grigi). Per limitare il rumore viene applicato un filtro mediano, in cui il valore di un pixel viene sostituito con il valore della media tra il pixel stesso ed i suoi N×N vicini. All'immagine binaria filtrata viene applicata l'estrazione dei contorni. La distinzione netta tra pixel "spenti" ed "accesi" consente di identificare facilmente i contorni degli oggetti in movimento (è stato utilizzato l'algoritmo di Canny per l'estrazione). I contorni ottenuti vengono racchiusi all'interno di bounding box. Al termine dell'elaborazione ciascun bounding box conterrà un oggetto in movimento identificato.

Le Figura 58 e 60 mostrano un esempio di elaborazione di un frame:

- frame acquisito;
- background corrente;
- frame binarizzato e filtrato;
- estrazione dei contorni e dei rispettivi bounding box.



Figura 58. Frame acquisito (a sinistra) e background corrente (destra)

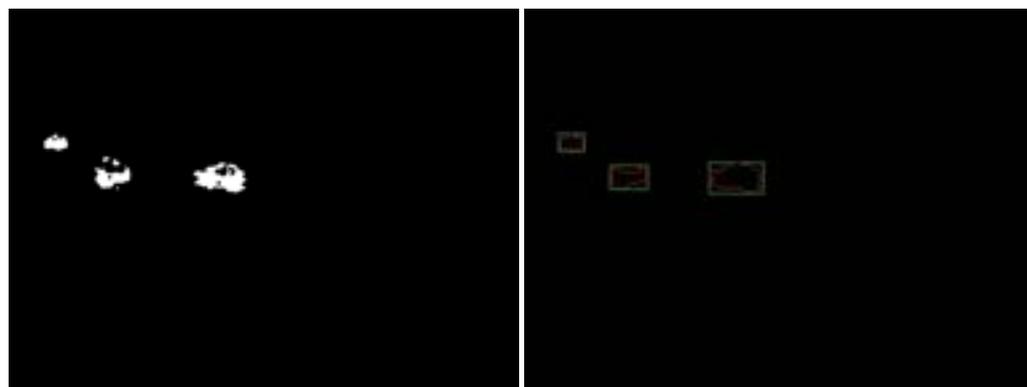


Figura 59. Frame filtrato (sinistra) e frame con contorni e bounding box estratti (destra)

Sviluppo degli indici di attività

Al fine di fornire degli indici qualitativi sulla misura della quantità di traffico rilevata sono stati realizzati degli algoritmi di estrazione di indici di attività in base al risultato dell'elaborazione precedentemente descritta.

- *Index AVG* che fornisce il numero medio di bounding box per frame rilevato nell'intervallo di integrazione specificato.
- *Index Area* che fornisce la media della percentuale di area dell'immagine occupata dai bounding box rispetto all'intero frame nell'intervallo di integrazione specificato.

Tali indici forniscono un andamento qualitativo del traffico ma non forniscono un'indicazione precisa sul numero di veicoli rilevato. Successivamente è stato sviluppato un algoritmo che fornisce il numero di veicoli conteggiati durante il processo di elaborazione (*Index Count*). Tale algoritmo tiene in memoria il numero di bounding box

rilevati per ogni frame, se tale numero risulta incrementato per un certo numero di frame consecutivi l'algoritmo assume che un nuovo veicolo è stato rilevato e quindi incrementa il conteggio. Per evitare che vengano conteggiati più volte gli stessi veicoli è importante impostare opportunamente filtro, ovvero il numero minimo di frame consecutivi in cui si deve rilevare un incremento del numero di bounding box affinché si possa conteggiare un nuovo oggetto in movimento.

Sperimentazione

La sperimentazione dell'applicativo è stata effettuata su una situazione di traffico urbano periferico (Aurelia), di traffico urbano intenso diurno (stazione centrale di Napoli) e di traffico urbano notturno (Roma, zona Torre Vecchia) come mostrato in Figura 60.



Figura 60. Aurelia (sinistra), Napoli (centro), Roma (destra)



Le sperimentazioni effettuate su questi casi studio consistono nella valutazione dell'indice di conteggio degli oggetti in movimento attraverso il superamento di una soglia. Quindi è stato introdotto un target in modo tale da focalizzare l'attenzione su una determinata area di interesse. Tale area di interesse costituisce la soglia di attraversamento per il conteggio dei veicoli. La Figura 61 mostra un esempio di attività di rilevamento di oggetti in movimento con relativo conteggio. Si può notare come l'applicativo rilevi gli oggetti in movimento nell'immagine, circondandoli con un bounding box di colore verde. Se tali bounding box entrano all'interno dell'area di interesse viene rilevato un nuovo oggetto in movimento da conteggiare.

Figura 61. Esempio di soglia di attraversamento

La mostra i risultati ottenuti nei tre casi di studio: l'errore medio ottenuto è molto basso, tenendo in considerazione le difficoltà di rilevamento, soprattutto nei casi di Napoli, in cui il traffico è di tipo intenso e caotico, molto irregolare, e di Roma in cui le condizioni di visibilità sono molto ridotte.

Tabella 9. Risultati del conteggio sui casi di studio

Caso di studio	Conteggio totale elaborato	Conteggio totale reale	% Errore
Aurelia	17	18	5,56%
Napoli	96	109	11,93%
Roma	52	50	4,00%
Errore medio			7,16%

Conclusioni

E' stato sviluppato un applicativo per l'elaborazione delle immagini di sensori installati sui pali intelligenti della rete di illuminazione pubblica orientato al monitoraggio del traffico veicolare e pedonale. Tale applicativo esegue iterativamente una serie di procedure che consentono, a partire da un frame acquisito, di estrarre un'immagine filtrata in cui compaiono solo gli oggetti in movimento e su cui vengono successivamente estratti i contorni.

In base a tale elaborazione sono stati implementati degli algoritmi di calcolo di indici di attività e di conteggio, al fine di fornire una descrizione qualitativa e quantitativa della misura del traffico rilevato.

Le sperimentazioni effettuate su un caso esemplificativo hanno evidenziato dei risultati che riteniamo essere soddisfacenti ai fini dell'estrazione degli indici di attività.

La metodologia sviluppata sarà testata presso lo "Smart Village" in fase di realizzazione presso il Centro Ricerche Casaccia nel quadro del PAR 2011 (sono già state installate telecamere sul sistema delle "torri faro intelligenti").

C.2 Sviluppo del sistema di monitoraggio e gestione della mobilità veicolare tramite integrazione con la rete di illuminazione pubblica: modellistica della ricostruzione dello stato del traffico da misure puntuali

L'obiettivo di quest'attività è lo sviluppo di un sistema prototipale di simulazione e previsione dello stato di traffico della rete di trasporto a partire dai dati rilevati da una rete diffusa di sensori, resa disponibile mediante la rete elettrica di illuminazione pubblica. Elemento innovativo della ricerca è lo sviluppo di modelli e tecniche di previsione specificamente concepiti per una rete di sensori ad elevata densità. La ricerca è frutto della collaborazione tra il Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica dell'Università di Roma "La Sapienza" ed ENEA.

La prima fase della ricerca comprende l'analisi dello stato dell'arte delle tecniche per il monitoraggio e la previsione del traffico sulle reti stradali, nonché la definizione dell'elenco delle funzionalità richieste dal sistema, in funzione degli obiettivi conseguibili con l'applicazione al monitoraggio, alla regolazione del traffico ed all'informazione agli utenti.

Il problema di diagnosi delle condizioni di traffico attuali consiste nella stima delle variabili caratteristiche delle prestazioni del sistema (flussi, velocità, densità veicolare, tempi di percorrenza) su tutti gli elementi della rete (o su un sottoinsieme ampio e significativo) a partire da osservazioni compiute su un ridotto sottoinsieme di elementi dotati di dispositivi di monitoraggio. Il problema di previsione consiste nella stima delle grandezze in un intervallo di tempo futuro a partire dalle osservazioni passate su una parte o su tutta la rete.

Entrambe le funzioni di diagnosi e di previsione possono essere realizzate mediante metodi di analisi dei dati o mediante modelli di simulazione del traffico. I primi hanno il vantaggio di una maggiore semplicità, sono quindi di più facile d'applicazione e, richiedendo tempi di elaborazione molto brevi, possono essere direttamente applicati al controllo in tempo reale; estrapolando la tendenza osservata, non sono in grado di prevedere l'evoluzione di situazioni anomale se non dopo che questa sia la tendenza delle grandezze osservate si sia stabilizzata. I secondi, riproducendo il fenomeno fisico, forniscono stime più attendibili ed accurate in situazioni anomale e consentono inoltre di stimare gli effetti di eventuali azioni di regolazione.

Tra le tecniche di diagnosi o di previsione mediante metodi di analisi dei dati esistono metodi di tipo qualitativo, che forniscono una classificazione dello stato attuale (o futuro) mediante comparazione dei valori delle variabili osservate (algoritmo California e McMaster per il riconoscimento automatico degli incidenti; algoritmi di pattern recognition e di cluster), e metodi di tipo quantitativo, che applicano metodi di analisi statistica di estrapolazione spaziale o temporale dei dati (metodi bayesiani, reti neurali; filtro esponenziale, filtro di Kalman; tecniche di analisi delle serie storiche ARMA o ARIMA o reti neurali).

I metodi di simulazione sono significativamente differenti a seconda che si tratti di un'arteria o di una rete; nel primo caso si possono utilizzare modelli di deflusso macroscopici che applicano le condizioni di continuità del flusso e di condizionamento veicolare (i più noti dei quali sono METANET ed il Cell Transmission Model); nel secondo si devono applicare anche modelli di calcolo e di scelta del percorso, che richiedono una stima dinamica della domanda disaggregata a livello di matrice origine-destinazione e comportano una procedura più complessa di ricerca dell'equilibrio dei tempi di percorso e di simulazione del traffico sulla rete. Negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi modelli di assegnazione-simulazione, i più noti dei quali sono Dynasart, DynaMit, Dynameq e Aimsun.

Per reti di dimensioni medie o grandi, l'operazione di simulazione del funzionamento della rete in un intervallo abbastanza lungo da simularne gli spostamenti richiede tempi di elaborazione incompatibili con applicazioni in tempo reale. Poiché l'avanzamento della simulazione è più rapido di quello del sistema reale, è possibile comunque aggiornare la previsione appena sono disponibili nuovi dati, mantenendo valida la previsione su un intervallo relativamente lungo fino al successivo aggiornamento. Con questo metodo, noto in letteratura come "rolling horizon", è possibile avere una previsione su un periodo relativamente lungo (dell'ordine di un'ora o più) aggiornandola periodicamente con nuove osservazioni ad intervalli relativamente brevi (dell'ordine 5-10 minuti).

Formulazione del modello ed analisi delle modalità di applicazione

Il modello utilizzato nella ricerca, basandosi su una schematizzazione discreta dell'arteria e del tempo, descrive il comportamento di una corrente di traffico in forma aggregata utilizzando la densità veicolare e la velocità media come variabili descrittive dello stato del sistema, essendo i flussi entranti e uscenti le variabili di input.

In Figura 62 è rappresentato un esempio di modello di arteria con l'indicazione dei legami tra le grandezze rilevanti (flusso q , velocità v e densità ρ) per un tronco autostradale che presenta rampe di accesso ed egresso.

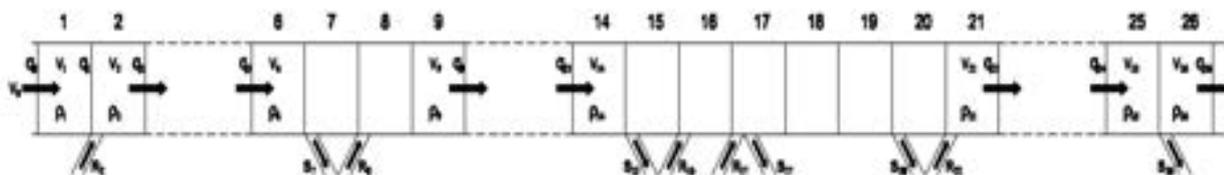


Figura 62. Schematizzazione dell'arteria per il modello di simulazione del deflusso stradale

Il modello sviluppato consente di determinare l'andamento delle grandezze caratteristiche ad ogni intervallo di avanzamento della simulazione e per ogni sezione stradale. Dal punto di vista matematico esso è costituito da:

- l'equazione di continuità, che rappresenta la conservazione del numero di veicoli in un tronco della rete;
- il cosiddetto *diagramma fondamentale* del traffico, che rappresenta il legame tra velocità e densità della corrente allo stato stazionario;
- l'equazione dinamica del condizionamento che, in analogia con la dinamica dei fluidi, esprime l'accelerazione della corrente mediante la somma di tre termini: il fattore di convezione, il rilassamento della velocità rispetto al valore allo stato stazionario e la diffusione (o anticipazione) della densità rispetto all'ascissa spaziale.

Calibrazione delle curve di deflusso

Le funzioni descrittive dello stato stazionario sono state stimate mediante la calibrazione a partire dai dati di posizione e velocità di veicoli dotati di GPS, utilizzati come sonde. In Figura 63 se ne riportano due esempi: il primo, illustrativo della relazione velocità-densità in una situazione di congestione elevata (diagramma di sinistra); il secondo del diagramma fondamentale flusso-densità in una condizione di congestione modesta (diagramma di destra).

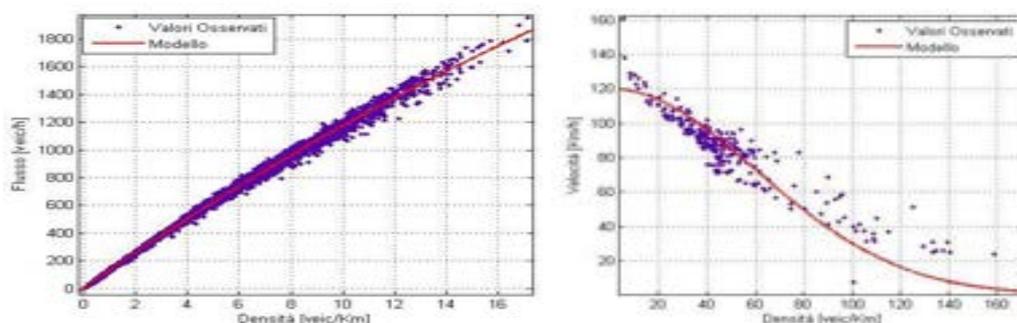


Figura 63. Calibrazione delle curve di deflusso allo stato stazionario

Sviluppo e validazione della procedura di previsione del traffico stradale

Il modello è stato applicato e testato su diversi tronchi autostradali italiani; il caso di studio mostrato in Figura 64 è relativo ad una sezione del Grande Raccordo Anulare di Roma, situata in corrispondenza della Circonvallazione Meridionale tra la Via Appia Nuova e la Via del Mare. Ad esso sono riferiti i risultati mostrati nel seguito.

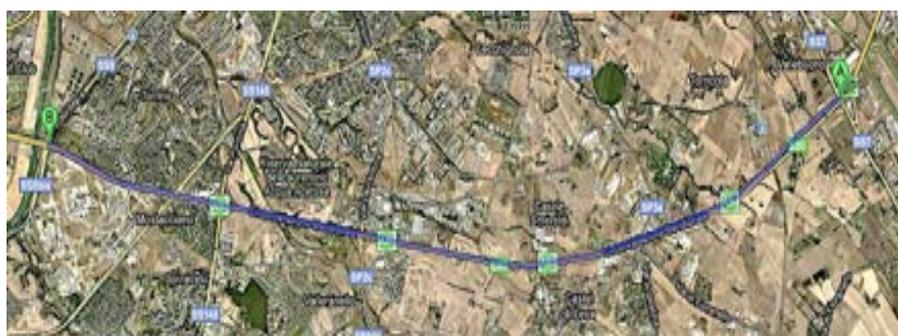


Figura 64. Dettaglio dell'arteria utilizzata come caso di studio

Esemplificazione dei risultati e validazione del modello

La Figura 65 mostra gli output del modello di simulazione su una sezione dell'arteria in una giornata di particolare interesse, in cui si è verificata una condizione di congestione eccezionalmente estesa (tra le ore 9 e le ore 13).

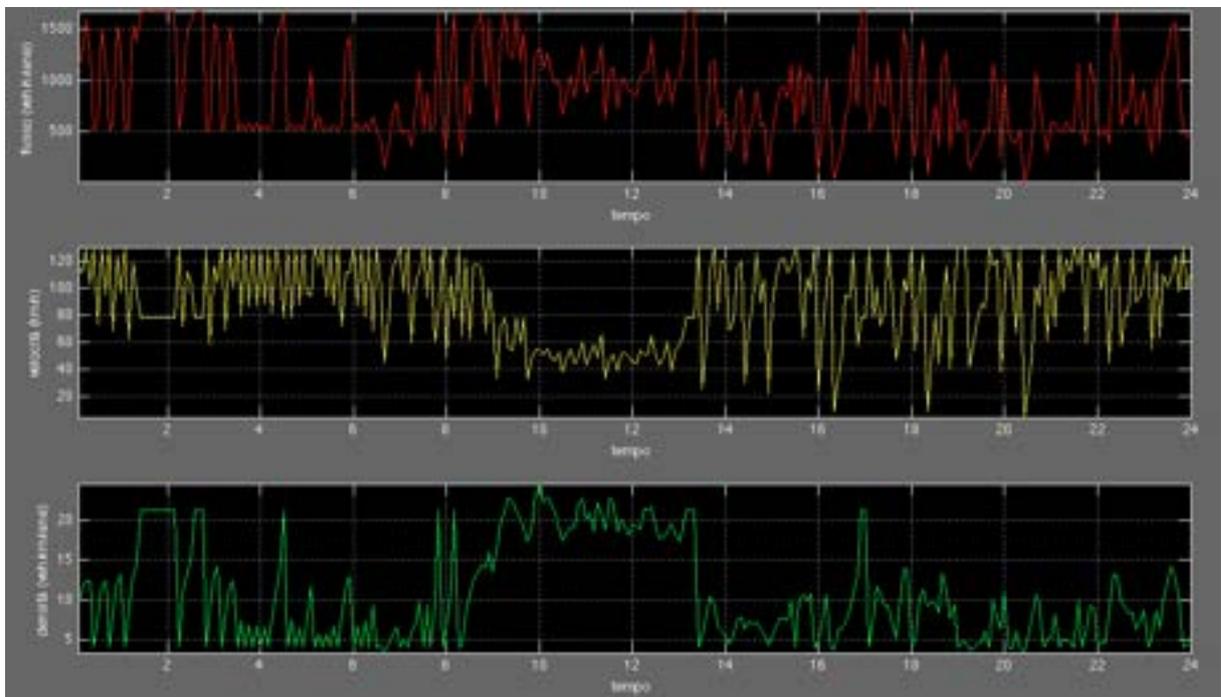


Figura 65. Output del modello

Questa condizione di forte instabilità rappresenta un test critico per valutare la capacità del modello di riprodurre la dinamica del traffico in tutti i campi di variabilità. All'instabilità si deve aggiungere una forte componente di rumore dovuta all'errore statistico introdotto dall'inferenza all'universo del campione di veicoli sonda.

Nel grafico di Figura 66 è riportato il confronto tra valori osservati e valori stimati della velocità nella sezione in esame. Nonostante le difficoltà dovute alla presenza del forte rumore e alle condizioni di instabilità, che producono una notevole dispersione dei dati nel campo di elevate densità, il modello mostra una buona capacità di riprodurre i valori osservati ($R^2=0,84$).

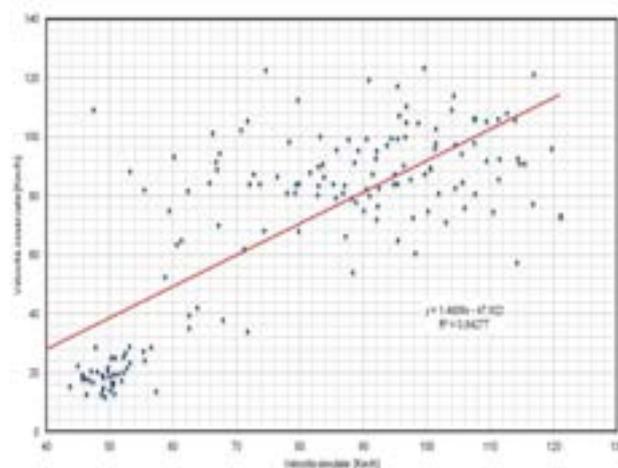


Figura 66. Validazione del modello

C.3 Sviluppo del sistema di monitoraggio e gestione della mobilità veicolare tramite integrazione con la rete di illuminazione pubblica: l'architettura di supporto alle flotte di veicoli elettrici

Il contesto in cui si svolge l'attività riguarda la possibilità di utilizzare la rete di illuminazione pubblica strutturata con pali intelligenti, come sistema di supporto per il colloquio e gestione di flotte di mezzi elettrici anch'essi equipaggiati con sistemi di monitoraggio dei dati di bordo e sistemi per la comunicazione *real time* con i pali intelligenti. Tale obiettivo è di fondamentale importanza per le flotte di mezzi elettrici che richiedono, a causa della scarsa autonomia o per l'applicazione del principio di "*mobility on demand*", un supporto molto più elevato da un'infrastruttura di rete (controllare lo stato di carica delle batterie, ottenere informazioni sulle previsioni di traffico, sulle richieste di passeggeri, e sulla disponibilità dei punti di ricarica).

In particolare è stata sviluppata la prima fase della ricerca che consiste appunto nella comunicazione tra veicolo elettrico e rete di illuminazione, la realizzazione di un mezzo prototipale e la sperimentazione presso il centro ENEA della Casaccia. La ricerca è frutto della collaborazione tra il Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica (CTL) dell'Università di Roma "La Sapienza" ed ENEA.

I principali obiettivi di questa ricerca sono stati:

- progettare e realizzare un prototipo per un sistema di bordo di un veicolo elettrico per consentirgli di monitorare veicoli di ultima generazione (rilevando i dati caratteristici del veicolo elettrico tramite CAN bus) e di generazioni precedenti (integrando canali analogici e digitali); realizzare due sistemi di bordo completi di hardware e software ed il software per i server di terra per ricevere ed immagazzinare i dati raccolti a bordo;
- progettare e realizzare un prototipo per integrare, oltre alla trasmissione Wi-Fi e UMTS/GPRS anche quella ZigBee rivista dai pali intelligenti;
- installare su una navetta elettrica per il trasporto interno ENEA Casaccia le strumentazioni di bordo e un sistema di terra le risorse dedicate alla raccolta dati; predisporre un'esperienza di concreta applicazione del sistema sviluppato per un periodo di tempo adeguato a fare gli opportuni test di affidabilità;
- dimostrare la funzionalità del sistema e la capacità di trasmettere informazioni sintetiche al palo intelligente;
- adattare gli strumenti della gestione ottimizzata delle flotte già sviluppati ai veicoli elettrici ed alla loro complessità, inclusa la revisione dei concetti di eco-driving per applicarli ai veicoli elettrici.

Architettura generale

L'architettura sviluppata è composta da un software web-based con funzione di centro servizi, diversi terminali client rappresentati dai veicoli monitorati e una serie di applicazioni per elaborazioni statistiche e produzione di report. La piattaforma del CTL è fruibile attraverso Internet mediante protocolli sicuri e la GUI (interfaccia utente) web-based non richiede installazione locale (Figura 67).

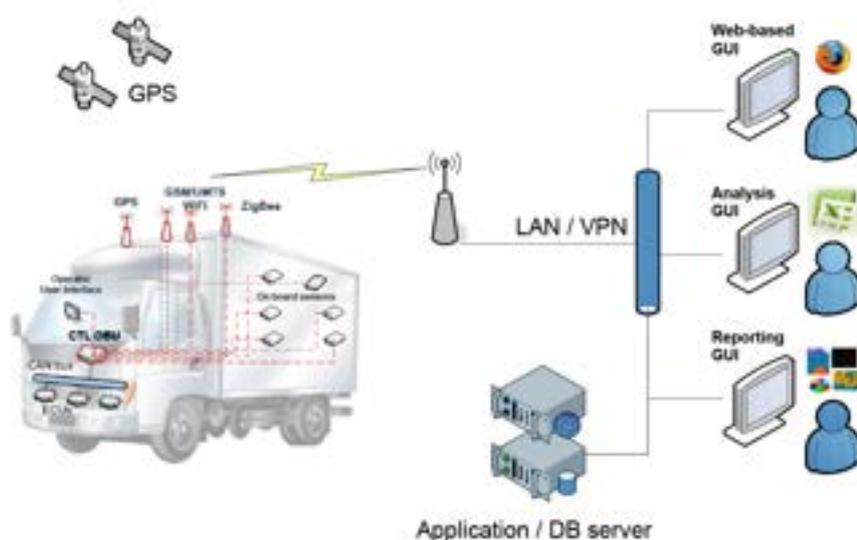


Figura 67. Architettura generale

L'infrastruttura ICT provvede a:

- gestire i diversi moduli per leggere i dati da GPS, CAN e/o canali analogici/digitali speciali;
- immagazzinare i relativi dati in un DB di bordo;
- rendere disponibili questi dati al software di elaborazione;
- aprire, secondo modalità da definire, un canale di comunicazione verso il palo intelligente o verso il sistema centrale e realizzare l'invio di pacchetti di dati sintetici;
- sincronizzare il DB di bordo con quello a terra tramite connessione dati su Wi-Fi o UMTS secondo le esigenze e con modalità da definire.

Realizzazione e sperimentazione del prototipo

Ai fini sperimentali è stata utilizzata una navetta del servizio interno del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA (Figura 68). Il sistema di bordo (Figura 69) è stato installato su tale navetta e fatto operare per due mesi circa, dimostrando la sua capacità di realizzare le specifiche progettuali, che si sono mosse lungo due direzioni principali: aspetti di acquisizione dati a bordo ed aspetti di comunicazione con il mondo esterno.



Figura 68. Navetta Gulliver Tecnobus utilizzata per la sperimentazione

Per quanto riguarda gli aspetti di bordo, sono state definite e realizzate le interfacce verso il veicolo (per l'acquisizione delle grandezze fisiche peculiari, ad esempio tensione delle batterie, ecc.), i canali analogici/digitali speciali e/o particolari da utilizzare, la capacità di disporre di un sistema di posizionamento (GPS).

Per gli aspetti di comunicazione, è stato definito uno sviluppo su due direttrici diverse per sopperire alle necessità di collegamento locale (verso il palo intelligente) e centrale (verso la piattaforma integrata e/o verso il sistema di gestione della mobilità on-demand).



Figura 69. Particolare del sistema di bordo del veicolo elettrico

La prima direttrice ha previsto la comunicazione con la linea di illuminazione tramite hardware e protocollo prescelto (in particolare lo ZigBee per comunicazioni wireless a breve distanza). La seconda è la comunicazione diretta con la piattaforma integrata o con il sistema di gestione della mobilità on-demand: si è realizzato in questo caso un protocollo GSM/GPRS verso un server di terra, in modo da poter effettuare una comunicazione sicura ed a basso costo. E' stata messa in campo anche un'interfaccia verso il guidatore con semplici messaggi di servizio o di warning (ad esempio per capacità residua della batteria al di sotto di certi valori),

Sono stati effettuati test di funzionalità del sistema di bordo e della sua capacità di trasmissione al palo intelligente (tramite lo standard ZigBee) ed al server di terra (tramite lo standard GPRS/UMTS), consistenti nell'effettuazione di un buon numero di passaggi in prossimità di un palo e di un numero di trasmissioni abbastanza continue da/verso server di terra, verificando una percentuale di successo superiore al 96% dei casi.

Il palo intelligente è stato simulato da un PC dotato di ricevitore ZigBee, messo lungo il percorso della navetta; la portata di trasmissione ZigBee tra navetta e palo simulato si è attestata in campo aperto sui 200 metri, ma sono state provate anche soluzioni di ripetitori intermedi ZigBee che estendono il range di trasmissione fino al raddoppio, garantendo così una copertura completa su piccola area. Nella trasmissione ZigBee sono stati lanciati dalla navetta messaggi semplici verso il PC/palo, con registrazione su disco e successiva verifica dell'integrità e completezza dei messaggi.

La qualità dei risultati ottenuti può essere valutata analizzando le figure seguenti. La Figura 70 presenta su mappa gli spostamenti rilevati dal sistema di bordo della navetta e comunicati via GSM/GPRS al server di terra in tempo reale; sono contrassegnati e commentati alcuni posizionamenti particolari del minibus.



20 items found, displaying all items.

Id	Tipo	Veicolo	Data-ora	Dist. tot.	Velocità	Liv. serb.	Temp. refr.	RPM	Pedale Acc.
9344	Spegnimento	2001	2011-11-02 14:07:26.0						
9343	Info stato veicolo	2001	2011-11-02 14:05:53.0						
9342	Info stato veicolo	2001	2011-11-02 14:03:36.0						
9341	Info stato veicolo	2001	2011-11-02 14:01:15.0		18.6				
9340	Info stato veicolo	2001	2011-11-02 13:59:14.0		21.5				
9339	Accensione	2001	2011-11-02 13:58:46.0		0.0				
9338	Spegnimento	2001	2011-11-02 13:56:57.0						
9327	Info stato veicolo	2001	2011-11-02 13:56:52.0						
9326	Info stato veicolo	2001	2011-11-02 13:54:34.0						
9335	Info stato veicolo	2001	2011-11-02 13:52:22.0		0.0				
9334	Info stato veicolo	2001	2011-11-02 13:49:56.0		11.6				
9333	Info stato veicolo	2001	2011-11-02 13:47:24.0		7.8				
9332	Accensione	2001	2011-11-02 13:45:25.0		0.0				

Figura 70. Mappa gli spostamenti rilevati dal sistema di bordo

Le Figura 71 e 72 riportano le registrazioni delle grandezze caratteristiche del veicolo elettrico (tensione in marcia, capacità residua della batteria, velocità e corrente elettrica erogata) e dimostrano la capacità del sistema di fare un monitoraggio continuo e reale del veicolo, con possibili interventi di segnalazione al guidatore ed al centro di controllo di incipienti malfunzionamenti (il sistema di bordo è stato collegato al sistema diagnostico del veicolo).

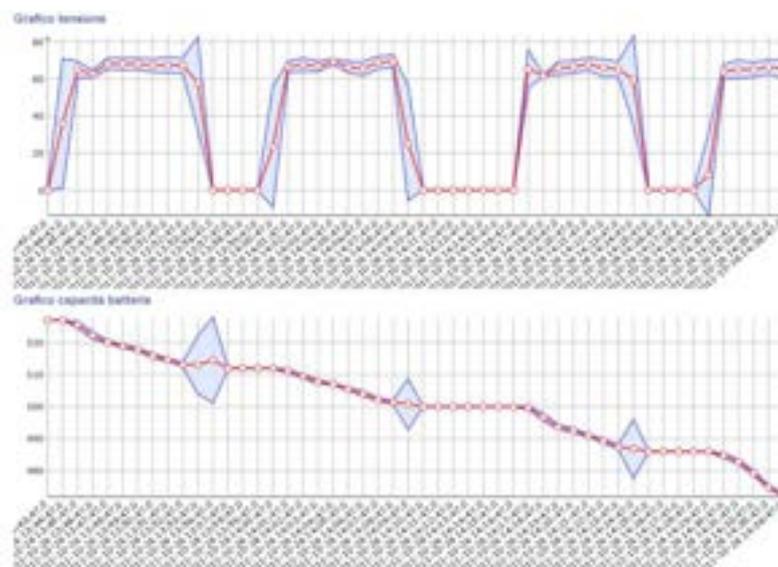


Figura 71. Registrazioni delle grandezze caratteristiche del veicolo elettrico (tensione in marcia, capacità residua della batteria)

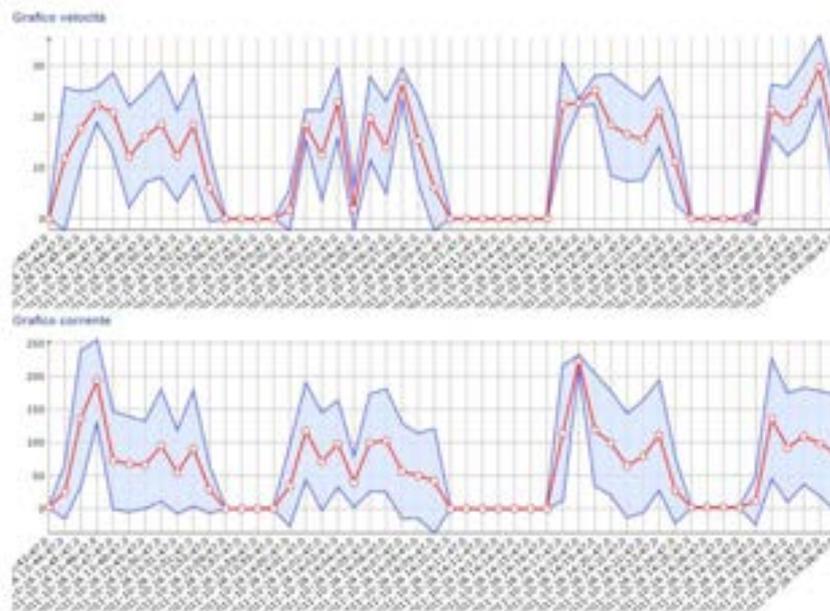


Figura 72, RegISTRAZIONI delle grandezze caratteristiche del veicolo elettrico (velocità e corrente elettrica erogata)

La Figura 73 infine mostra un sinottico riassuntivo di 3 ore circa di marcia del veicolo con un profilo qualitativo del percorso effettuato nello stesso giorno all'interno del Centro ENEA, in area Casaccia/Capanna.

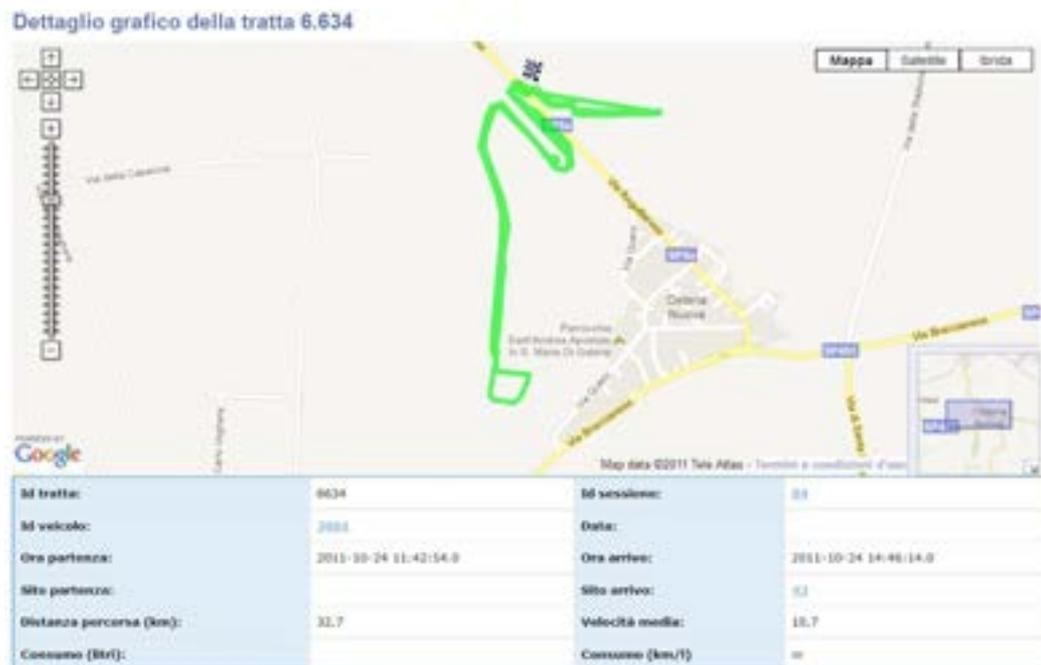


Figura 73. Sinottico riassuntivo di 3 ore circa di marcia del veicolo

In definitiva il sistema prototipale ha dimostrato la sua piena capacità di monitoraggio continuo dello stato del veicolo e di trasmissione dati, che sono i presupposti fondamentali per la costruzione di servizi avanzati sia di manutenzione che di trasporto (ad esempio a domanda), che di infomobilità che infine di integrazione con altri sistemi presenti sul territorio per la costruzione di una effettiva "smart city".

I costi del sistema hardware di bordo sono da ritenersi abbastanza contenuti: essi si collocano, per un singolo prototipo tutto compreso, a meno di 2000 euro, con un peso prevalente dell'interfaccia grafica piuttosto che dell'hardware di acquisizione/trasmissione.

La fornitura proviene da industria con standard di qualità riconosciuta, collocata in un'area di produzione che può assicurare anche grandi numeri con replicabilità perfetta. Quindi c'è da attendersi un abbassamento di costo su realizzazioni eventualmente effettuate con numeri diversi oltre ad una tendenza naturale alla riduzione per effetto dell'evoluzione tecnologica, il tutto con garanzia totale di sfruttamento e trasportabilità del software sviluppato da un esemplare ad un altro.

La metodologia sviluppata sarà estesa sull'intera area dello "Smart Village" in fase di realizzazione presso il CR ENEA Casaccia il cui sviluppo è previsto nel PAR 2011 creando un collegamento diretto real time tra la piattaforma ICT sulla mobilità e la piattaforma ICT che integra le varie applicazioni verticali.

D. Sviluppo del sistema di predizione ed interazione della rete di edifici

D.1 Metodologia per la diagnostica di reti di edifici non residenziali

La finalità della ricerca è lo sviluppo di un modello tecnologico per un sistema di supervisione di una rete di edifici integrato nella rete dell'illuminazione pubblica, in grado di monitorare, diagnosticare e predire i consumi energetici.

Attualmente ogni anno gli edifici di nuova costruzione ad elevate prestazioni energetiche e quelli esistenti riqualificati energeticamente rappresentano una quota pari al 2,5% del patrimonio immobiliare totale, mentre sulla restante parte degli edifici non viene effettuato alcun tipo di intervento di riqualificazione. Agire sugli edifici esistenti, sviluppando una innovativa soluzione per renderli più efficienti, è l'obiettivo di questa attività.

La costituzione della rete di edifici potrebbe fornire una risposta efficace alla domanda su quali edifici sono più efficienti dal punto di vista di energetico e quali lo sono meno, tramite un confronto tra informazioni storiche riferite al singolo edificio o attraverso il confronto con altri immobili simili per caratteristiche strutturali e climatiche attraverso degli indici di prestazione o "indice di qualità di gestione".

Il singolo edificio è un nodo di un sistema più complesso ed essendo parte integrante della rete stessa, indipendentemente dalle sue caratteristiche, può in modo più o meno efficace raggiungere i suoi obiettivi, quali l'efficienza energetica, attraverso la connessione con gli altri elementi; essa si basa sulla progettazione di una rete capillare di sensori su ogni singolo edificio che permette di remotizzare in tempo reale le informazioni acquisite (Figura 74).

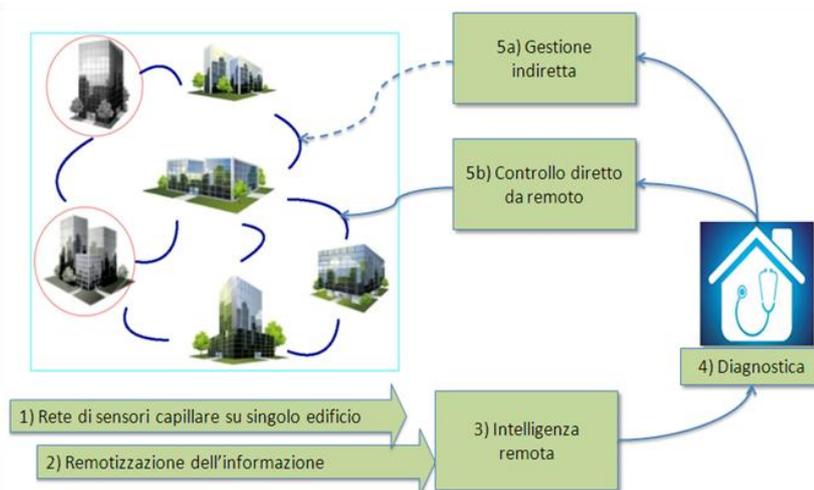


Figura 74. Ipotesi di gestione energetica di una rete di edifici

La grande quantità di dati provenienti dal singolo edificio viene poi elaborata da una intelligenza remota, eventualmente costituita da un cloud computing e da esperti del settore, che ha la capacità di:

- rendere più semplice e tempestiva l'individuazione delle inefficienze e delle criticità dovute ad una cattiva gestione delle tecnologie impiantistiche installate all'interno dell'edificio;
- agire immediatamente sulla problematica riscontrata o tramite un controllo diretto da remoto interagendo con i BEMS locali o attraverso una comunicazione diretta al gestore del singolo immobile.

Questo approccio si fonda su un sistema di controllo centralizzato del parco edilizio distribuito che potrebbe portare a notevoli risparmi energetici ed economici con costi di investimento contenuti essendo fondati principalmente su automazione ed intelligenza.

Nell'ambito dell'obiettivo è stata sviluppata e qualificata sperimentalmente una metodologia di modellazione dei consumi energetici finalizzata alla gestione di edifici nel settore terziario (tipicamente edifici esistenti). In particolare le attività hanno permesso di sviluppare un modello predittivo dinamico dei consumi energetici di ogni singolo edificio per ricavarne un "imprinting energetico" sulla base dei dati storici raccolti durante un primo periodo di monitoraggio. Tale modello permette di fare una predizione dei consumi attesi data l'ora del giorno e della settimana, la temperatura e la radiazione luminosa ambientale e data l'affluenza di utenti.

Tale consumo atteso viene poi confrontato con la misura effettiva e sulla base dello scostamento viene fatta la diagnosi dei vari "sintomi" (es. comportamenti errati, guasti, carenze dei sistemi di controllo degli impianti). I sintomi vengono infine elaborati con modelli diagnostici che hanno lo scopo di emettere la "diagnosi".

Nello sviluppo futuro delle attività, tale passo verrà ripetuto per ogni edificio della rete e segnalati all'operatore della rete soltanto i casi critici, con le relative diagnosi. Infine un sistema di comparazione di indicatori adimensionali permetteranno di confrontare tra loro le prestazioni di tutti gli edifici della rete per segnalare eventuali carenze strutturali degli edifici. Tutta la rete di monitoraggio e successiva attuazione poggia su una rete intelligente di illuminazione pubblica.

Il monitoraggio e la diagnostica

Il monitoraggio remoto costituisce il primo passo per lo sviluppo di una rete di edifici; conoscere l'intensità, il profilo e le criticità del consumo sono gli elementi fondamentali per pianificare una strategia di intervento competitiva su grandi reti di edifici. A questo scopo sono state individuate le informazioni necessarie che permettono di ottenere strategie di diagnosi efficaci, determinare i costi da affrontare in relazione alla vetustà e ai vincoli dell'edificio e quantificare il risparmio energetico/ambientale ottenibile dall'impiego di differenti strategie.

La modellistica è stata messa a punto e qualificata su un edificio del Centro Casaccia (C59); la disponibilità di un database di un monitoraggio durato un anno ha permesso di identificare criticità e mal funzionamenti dell'edificio. L'edificio in esame, costruito negli anni '80, destinato ad uso ufficio, è caratterizzato dall'appartenenza ad una classe energetica bassa per il quale sarebbe necessario predisporre un'efficace manutenzione ordinaria, in modo da individuare per tempo guasti e malfunzionamenti.

Tale esperienza ha permesso di confermare l'esigenza secondo la quale un qualsiasi edificio debba essere fornito di un adeguato sistema di monitoraggio: in questo modo attraverso l'acquisizione dei dati in tempo reale è possibile individuare immediatamente le eventuali criticità ed intervenire tempestivamente con conseguente notevole risparmio energetico.

Modellazione dell'edificio

Per la modellazione dell'edificio (quanto consuma in relazione alle variabili climatiche e dell'utenza?) abbiamo applicato i concetti di Reti Neurali Artificiali ed Ensembling ai fini di ricavare "l'imprinting energetico" del sistema edificio-impianti-automazione-persone.

Le RNA, che come detto in precedenza, sono modelli di calcolo che s'ispirano al funzionamento del cervello per risolvere problemi di classificazione, modellazione e predizione di elevata complessità, ovvero dipendenti da un elevato numero di variabili ed altamente non lineari, pertanto non risolvibili attraverso metodi algoritmici. L'unità di calcolo elementare di una RNA è il neurone (o nodo). L'elemento che caratterizza i diversi tipi di RNA è la topologia delle connessioni dei neuroni. L'architettura più comunemente utilizzata è quella del tipo "feed-forward". In tale modello i neuroni sono organizzati a livelli: il primo è detto input layer perché riceve i vettori d'ingresso; poi vi sono uno o più strati nascosti (hidden layer) e uno di uscita (output layer). Una RNA funziona attraverso un meccanismo di "apprendimento tramite esempi". Ovvero dato un insieme di dati che mappa alcune grandezze di input in altre di output, la RNA è in grado di trovare le relazioni che correlano l'input e l'output attraverso un algoritmo di ottimizzazione dei parametri interni del modello al fine di minimizzare l'errore tra il dato stimato dal modello e quello reale.

Il concetto generale di "ensembling" è quello di combinare tra loro n modelli in modo tale da ottenere un meta-modello caratterizzato da un'accuratezza superiore rispetto ai singoli modelli.

In questa fase abbiamo combinato queste due tecniche ed è stata effettuata un'attenta analisi sulle variabili di input necessarie per configurare i modelli nel miglior modo possibile. Inoltre, è stato fatto un confronto con metodi di modellazione tradizionali.

La sperimentazione ha riguardato la modellazione di consumi elettrici per illuminazione, condizionamento e forza elettromotrice. In Tabella 10 vengono riportati come risultati sintetici della sperimentazione gli errori medi assoluti a confronto ed il relativo guadagno di accuratezza rispetto a metodi più tradizionali (di tipo statistico).

Tabella 10. Accuratezza modelli (errori medi assoluti in kW)

	Metodo statistico	Ensembling neurale	Guadagno relativo
Illuminazione	0,97	0,95	2%
f.e.m.	1,38	0,68	51%
condizionamento	3,78	2,95	22%
media	2,04	1,53	25%

Il guadagno relativo medio del 25% mostra che la modellazione innovativa dell'ensabling permette di ottenere accuratezze notevolmente migliori di quelle ottenibili con le tecniche statistiche. Il raggiungimento di tale traguardo di accuratezza permette di affermare che almeno nel caso dell'illuminazione e della forza elettromotrice si è raggiunto il livello di accuratezza necessario ai fini della rilevazione delle anomalie. Nel caso del condizionamento invece il miglioramento ottenuto non è ancora sufficiente a causa di fenomeni non rappresentati nei dati. A tal fine è necessario disporre di altre variabili di misura (esempio temperature all'interno delle stanze dell'edificio) e di modelli più articolati (esempio modelli dinamici che tengano conto dell'inerzia delle strutture). Nel proseguimento delle attività (PAR 2011) questa dovrà essere la direzione di lavoro principale.

Modelli diagnostici

In questa sezione vengono presentati i criteri sviluppati per la diagnostica dei consumi anomali. Per consumo anomalo intendiamo un consumo che si discosta sia dal caso medio statistico sia dal modello che ne fornisce una stima nelle condizioni che vengono misurate (es. per una certa occupazione o con particolari condizioni climatiche).

Il sistema diagnostico è stato organizzato come un sistema di regole basate su logica fuzzy. La logica fuzzy (o logica sfumata o logica sfocata) è una logica in cui si può attribuire a ciascuna proposizione un grado di verità compreso tra 0 e 1. È una logica polivalente, e pertanto un'estensione della logica booleana ed è fortemente legata alla teoria degli insiemi sfocati (fuzzy set). Con grado di verità o valore di appartenenza si intende quanto è vera una proprietà: questa può essere, oltre che vera (= a valore 1) o falsa (= a valore 0) come nella logica classica, anche pari a valori intermedi. Questo approccio ha il vantaggio di non dover impostare dei meccanismi a soglie (soggetti ad errori anche macroscopici) e fornisce un risultato con un certo grado di verità (o plausibilità).

Nel caso particolare sono stati definiti i seguenti criteri di warning:

- W1 = se lo scostamento tra la stima RNA e la misura è ALTO Allora WARNING;
- W2 = se lo scostamento tra il valore statistico e la misura è ALTO Allora WARNING;
- A = se W1 E W2 Allora ALLARME.

I criteri W1, W2 sono stati modellati attraverso opportuni fuzzy set che identificano in modo sfumato il grado di scostamento i quali sono stati composti per ottenere il valore di allarme finale, ovvero il grado di plausibilità di un consumo anomalo.

Tale criterio generale è stato applicato per i consumi elettrici definendo i fuzzy set per l'illuminazione, il condizionamento e la forza elettromotrice ottenendo quindi 3 tipi di allarmi: A_{ill} , A_{con} , A_{fem} i quali generano un allarme generico se uno dei 3 si attiva. Ovvero:

$$A = \text{Se } A_{ill} \text{ o } A_{con} \text{ o } A_{fem} \text{ Allora ALLARME}$$

Ad esempio, come si nota dalla Figura 75, nel caso dell'illuminazione nella zona 1 si otterrebbe un allarme con grado circa 0,5 (consumo abbastanza anomalo), nella zona 2 si otterrebbe un allarme con grado circa 0,8 (consumo fortemente anomalo), mentre nella zona 3 si otterrebbe un allarme con grado circa 0,1 (consumo normale) in quanto in linea con i consumi attesi dal modello neurale (BEM).

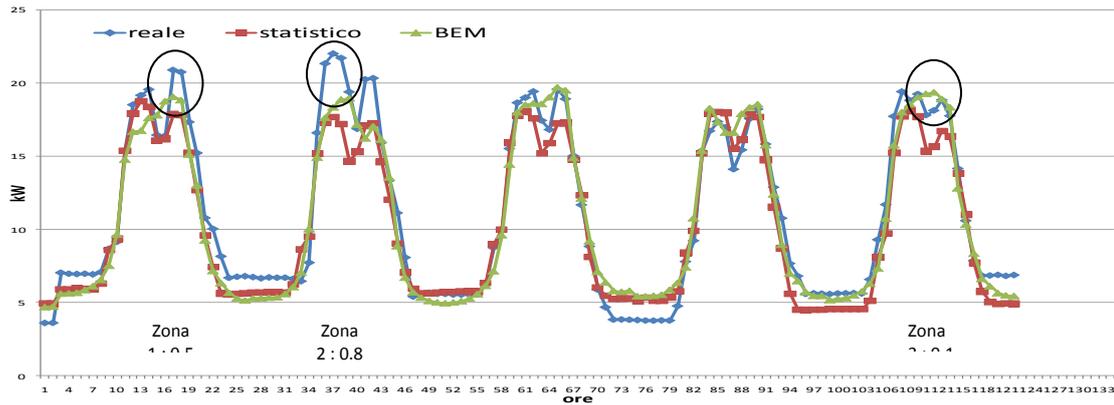


Figura 75. Diagnostica consumi di illuminazione

Sistema analisi accesso al centro

Una delle informazioni più rilevanti per i modelli di stima dei consumi è l'affluenza, ovvero il numero delle persone presumibilmente presenti nell'edificio.

In particolare il sistema che si occupa del controllo degli edifici richiede di conoscere, ad intervalli periodici una serie di informazioni relative ad un certo numero di stanze preselezionate da un energy manager.

Tali informazioni sono:

1. rilevazione accessi al centro e relativa elaborazione dati al fine di ricostruire la presenza media (teorica) di persone in ogni stanza selezionata dedotta dai dati dei cartellini di accesso;
2. dati provenienti dagli utenti (votazioni di comfort, preferenze di settaggio della climatizzazione, segnalazioni discomfort, commenti di varia natura).

Queste informazioni sono inserite all'interno di un database pubblico ad accesso remoto (DPS - Database Presenze di Stanza).

Sono state quindi sviluppate alcune componenti software in grado di:

- interrogare il sistema di rilevazione accessi ed inserire le informazioni nel database DPS;
- raccogliere e gestire tramite interfacce grafiche dati di comfort ambientale proveniente dagli utenti.

Presso il centro ENEA Casaccia è presente il sistema di controllo accessi GEPAVV che registra l'accesso di tutti i dipendenti ai tornelli d'ingresso e che presenta i dati di accesso secondo la logica:

- MATRICOLA – Data/ora Entrata;
- MATRICOLA – Data/ora Uscita;
- MATRICOLA – Data/ora Mensa.

Il sistema controllo accessi utilizza un Database SqlServer 2003 su cui memorizza tutte le informazioni.

Per la raccolta dei dati provenienti dai diversi sistemi, è stato sviluppato un database pubblico ad accesso remoto (Database Presenze di Stanza - DPS) sviluppato con tecnologia MySQL nel quale confluiranno anche i dati di accesso. In una prima fase sperimentale sono monitorati solamente gli accessi dei dipendenti allocati nell'edificio F40 (Figura 76).

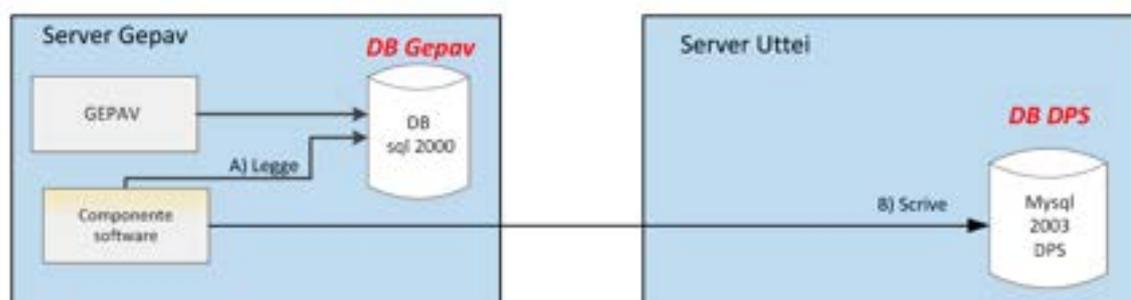


Figura 76. Architettura funzionale di acquisizione accessi

Nel DPS sono presenti anche le associazioni matricola-edificio-piano-stanza al fine di permettere ai sistemi di monitoraggio e controllo di operare correttamente.

Infine, è stato sviluppato il modulo software che elabora i dati di accesso in modo tale da fornire un'informazione di alto livello del tipo "numero medio di persone dall'ora x all'ora y nella stanza z" da cui si può ricavare il numero medio di persone nel piano e nell'edificio.

Conclusione

In questo studio è stato sviluppato un approccio per la modellazione dei consumi elettrici (illuminazione, climatizzazione, forza elettromotrice) in modo tale da correlarli con dati misurati (es. occupazione e dati climatici) con il fine di effettuare una diagnostica dei consumi più accurata.

In particolare l'approccio proposto si basa sull'ensembling di reti neurali e questo è stato comparato con gli approcci comunemente usati nel settore. La sperimentazione ha riguardato la modellazione dei consumi dovuti all'illuminazione di un edificio complesso del settore terziario (l'edificio C59 del Centro Ricerche ENEA Casaccia) e i risultati hanno mostrato come l'approccio proposto sia più preciso rispetto a metodi tradizionalmente utilizzati.

Infine, è stato sviluppato ed implementato il sistema software per l'acquisizione e l'elaborazione degli accessi al centro, elemento fondamentale per poter effettuare una modellazione accurata dei consumi energetici.

La metodologia sviluppata sarà implementata nello "Smart Village" in fase di realizzazione presso il Centro Casaccia (PAR 2011) estendendo l'applicazione ad altri due edifici e costituendo un primo embrione di rete di smart buildings. Sarà valutata la possibilità di estendere il sistema dell'analisi del controllo accessi per avere informazioni sull'utenza di tutti gli edifici del centro e sulla mobilità (per fini di mobilità on-demand ed illuminazione pubblica adattiva).

D.2 Sviluppo del sistema di predizione ed interazione della rete di edifici: Metodologia per la diagnostica di reti di edifici residenziali

I temi sviluppati in quest'ambito riguardano la possibilità di sfruttare il sistema dell'illuminazione pubblica come linea digitale capillare per la raccolta dati e l'invio di informazioni verso una vasta rete di edifici residenziali. L'obiettivo è la costruzione di una "interactive building network", ossia dello sviluppo di una capacità "urbana", di orientare i cittadini in modo attivo verso il conseguimento di elevati risparmi energetici ed economici nella gestione delle reti energetiche delle proprie abitazioni. La attività è il frutto di una collaborazione tra Università Politecnica delle Marche ed ENEA.

Rispetto allo studio sviluppato nell'ambito dell'attività B.1 questa ricerca si focalizza maggiormente sulle tecnologie necessarie ad un'architettura urbana e sul tipo di supporto operabile verso la cittadinanza.

Progettazione della architettura della Interactive Building Network per il settore residenziale

Il sistema è basato su una sensor network domestica wireless (o PLC) con lo scopo di interfacciare tutte le risorse ed utenze dell'abitazione/edificio tra cui:

- a. quantificare eventuali sorgenti di energia rinnovabili;
- b. raccogliere i dati di consumo elettrico e termico;
- c. dialogare con elettrodomestici e utenze di tipo smart (*smart appliances*);
- d. predisporre una pre-analisi locale dei dati da inviare al server per la diagnostica remota o al sistema per la profilazione del quartiere nella ipotesi di distretti a generazione distribuita.

Tale piattaforma sarà caratterizzata da un costo (in prospettiva di piani industriali) molto basso.

Piattaforma domotica di raccolta dati e possibile comunicazione verso l'utente

Lo studio della piattaforma domotica di raccolta dati ha avuto come principali linee guida:

- l'individuazione dei principali parametri energetici da monitorare, tenuto conto sia di quelle che sono le principali "best practices" a livello di efficienza e risparmio energetico sia di quelli che sono i principali errori comportamentali di chi abita nell'appartamento;
- i protocolli di trasmissione, tenendo come direttrice la minor intrusività e la maggior facilità di installazione dei sensori inseriti;
- l'individuazione delle funzionalità/potenzialità che un gateway deve poter avere: i) ricevere le informazioni dai sensori installati, ii) effettuare un minimo di elaborazione per una diagnostica di primo livello, iii) inviare informazioni di feed-back all'utente, iv) inviare informazioni ad una logica di secondo livello per

elaborazioni più approfondite ("smart");

- i costi di ciascun sensore al fine di definire/stimare il costo della piattaforma e, soprattutto, per valutare il rapporto costi/benefici tra "costo dell'informazione" associata al sensore e "risparmio energetico/economico" ottenibile attraverso la correzione di un evento/ comportamento prontamente diagnosticato.

Tabella 11. Principali sensori/attuatori implementabili nella piattaforma domotica

#	Sensore/attuatore	Costo	Protocollo di invio del segnale
1	Temperatura	In definizione	In definizione
2	Analizzatore di rete appartamento	In definizione	In definizione
3	Misuratore portata gas	In definizione	In definizione
4	Sensore presenza	In definizione	In definizione
5	Sensori di contatto porte e finestre	In definizione	In definizione
6	Sensore luminosità	In definizione	In definizione
7	Wattmetro per utenze elettriche	In definizione	In definizione
8	Termostato	In definizione	In definizione
9	Cronotermostato per termosifoni	In definizione	In definizione

La piattaforma domotica progettata potrebbe implementare alcune logiche semplici già a livello di appartamento, provvedendo all'utente un feed-back di "warning". Alcune tra le principali logiche di diagnostica sono elencate in Tabella 12.

Tabella 12. Principali logiche di diagnostica

# evento	Sensori/attuatori associati (cfr. Tabella 11)	Tipologia intervento correttivo
1	1 AND/OR 5	warning
2	1 AND/OR 5	warning
3	1 AND 8	warning
4	1 AND 8 AND 9	warning
5	1 AND 8	warning
6	8 AND (4 OR 5)	warning
7	(7 OR 2) AND (4 OR 5)	warning
8	6 OR 2(su linea luce) AND (ora giorno OR irraggiamento OR 4 OR 5)	warning
9	[2 (possibilmente su linea motrice) OR 7] AND ora del giorno	warning

E' anche possibile pensare ad un'implementazione di ulteriori logiche non solo di diagnostica, ma anche di ottimizzazione di controllo; un esempio potrebbe essere l'ottimizzazione dei set-point nelle stanze una volta diagnosticati possibili apporti termici dovuti alla presenza di persone o di utenze elettriche.

Un sistema di trasmissione del dato verso un server remoto

I dati raccolti a livello di singola unità abitativa possono essere inviati al server remoto attraverso diverse modalità, la principale delle quali potrebbe essere la rete internet. Tuttavia riveste particolare interesse la possibilità di studiare l'utilizzo di una rete di illuminazione pubblica avanzata che possa essere utilizzata come infrastruttura di appoggio. I vantaggi di quest'ultima soluzione sono:

- capillarità della rete di illuminazione sul territorio e quindi pressoché totale copertura geografica, anche in zone non coperte da reti internet veloci;
- possibilità di partecipazione al network anche per quegli utenti, in particolare le persone anziane, non interessati ad avere una linea internet;
- per chi ha una rete internet, non viene occupata la banda di upload;
- possono rimanere sempre connesse anche tutte quelle utenze che non hanno un contratto flat.

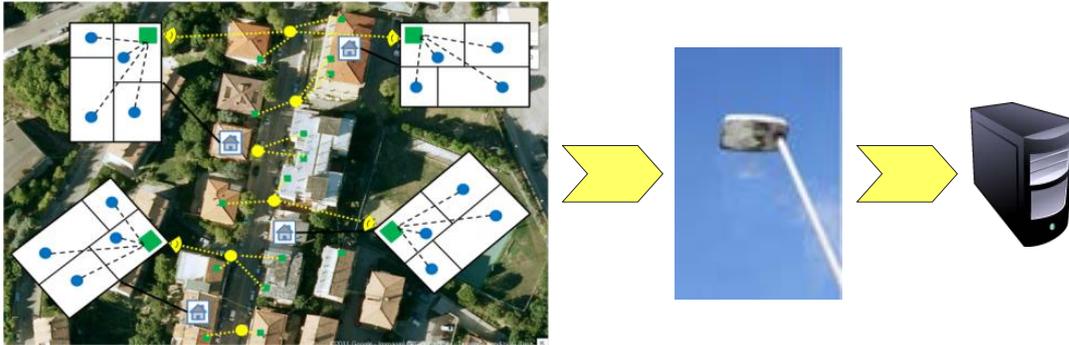


Figura 77. Schema di una “interactive building network” applicata ad una smart street dotata di una rete di illuminazione pubblica avanzata (in giallo i “lampioni smart”) connessa ad un server remoto

Sviluppo prototipale delle metodologie per i sistemi intelligenti e la comunicazione

Il server remoto provvede all’analisi dei dati raccolti e all’effettuazione di una diagnostica sia della gestione che del comportamento delle persone. E’ pensato per essere poggiato su un sistema di *cloud computing* in modo da poter operare su vaste reti urbane di edifici. Come già anticipato, la diagnostica viene effettuata sia a livello di singola unità abitativa (o di edificio) sviluppando la capacità di profilare l’utenza ed identificare le motivazioni diagnostiche (guasti, edificio obsoleto, rete energetica inefficiente, gestione inefficiente, comportamenti potenzialmente errati) e sia a livello di *benchmarking* di comparazione tra tutte le abitazioni della rete urbana per ottenerne indicazioni a livello cittadino. Il compito del server remoto, è quello di ricevere i dati e rielaborarli, con algoritmi di diagnostica, predittivi, di ottimizzazione, attraverso una capacità di calcolo molto maggiore e a costi molto più contenuti rispetto a quello che si sarebbero dovuti sostenere se si fossero volute implementare le stesse logiche a livello di ogni singola unità abitativa.

Il sistema di diagnostica remoto e la comunicazione con l’utente finale

Non essendo ancora disponibili dati su installazioni reali, il sistema di diagnostica remoto è stato testato su dati generati da un software, HAMBASE, sviluppato in ambiente MATLAB/SIMULINK (Figura 78); esso simula la dinamica di un edificio durante il periodo di uno o più anni solari. Il software è stato utilizzato per generare i carichi, sia elettrici che termici, su una abitazione. Sul profilo “ottimale” sono stati poi inseriti, via software, degli errori (sia comportamentali che di malfunzionamento di sensori ed attuatori). Tutti i dati generati, sono quindi rielaborati offline con tecniche ed algoritmi di diagnostica in modo da capire se l’errore inserito venisse individuato e con che tempistica.

La Tabella 13 elenca i principali eventi da diagnosticare studiati.

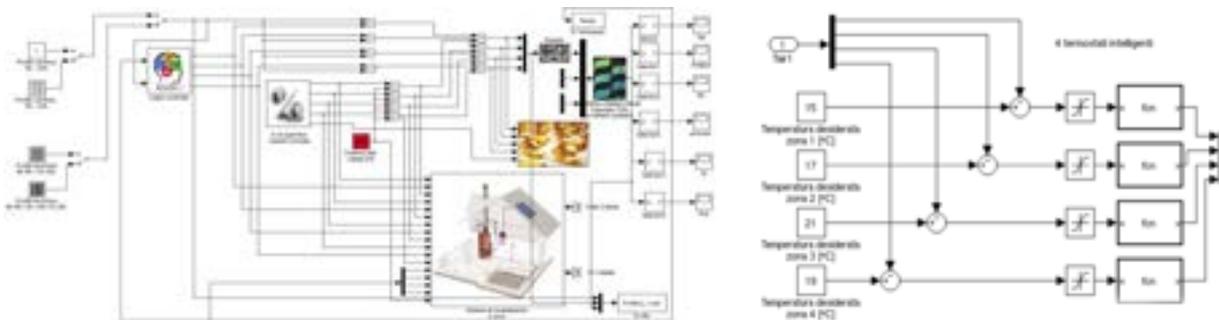


Figura 78. Schema SIMULINK del sistema di generazione dati ed errori implementato (a sinistra) e particolare del sistema di controllo di temperatura in ogni stanza dell’unità abitativa

Tabella 13. Principali eventi da diagnosticare

#	Evento da diagnosticare	Casistica	Sensore installabile	INFO
1	Porte, finestre esterne aperte	Sempre	Sensore di contatto su porte e finestre o sensore di temperatura	Rapida variazione nel tempo AND/OR Temperatura più vicina all'ambiente adiacente che al set point
2	Porte, finestre interne aperte (Predisposti ma non simulato)	Solo con controllo di temperatura in ogni ambiente	Sensore di contatto su porte o sensore di temperatura	Rapida variazione nel tempo AND/OR Temperatura più vicina all'ambiente comunicante che al set point
3	Rottura termostato (rimane bloccato o tutto aperto o tutto chiuso)	Solo con controllo di temperatura in un solo ambiente	Sensore di temperatura	Temperatura ambiente diversa dal set-point
3 bis	Rottura termostato (isteresi per usura)			
4	Rottura termovalvola (rimane bloccata o tutta aperta o tutta chiusa)	Solo con controllo di temperatura in ogni ambiente	Sensore di temperatura	Temperatura ambiente diversa dal set-point AND mancata presenza degli eventi 1-2 (per esempio la variazione di temperatura non è rapida e la temperatura è comunque lontana da quella degli ambienti adiacenti)
5	Cambio set-point da parte dell'utente (Predisposti ma non simulato)		Sensore di temperatura	Verificare se la temperatura è molto (quanto?) diversa dal set-point è diverso
6	Rientro ritardato da parte dell'utente rispetto all'accensione programmata del termostato (OTTIMIZZAZIONE)	Con controllo di temperatura almeno in un ambiente	Sensore di temperatura	Verificare perché il riscaldamento ha programmato una accensione ed ancora non c'è nessuno in casa.
7	UtENZE elettriche rimaste accese (Predisposti ma non simulato)	Sempre	Analizzatore di rete + sensore di presenza	Verificare perché il carico elettrico è diverso da quello base mentre non c'è nessuno in casa
8	Lampade rimaste accese (Predisposti ma non simulato)	Sempre	Sensore luminosità analizzatore di rete + sensore di presenza	Capire che le luci sono accese e incrociare il dato con irraggiamento o ora del giorno
9	Funzionamento elettrodomestici in orario non ottimale (Predisposti ma non simulato)	Sempre	Installazione wattmetri sui principali elettrodomestici programmabili	Verificare che gli elettrodomestici siano in funzione in fascia F1 o F2, in assenza di autoproduzione di energia, o che siano in funzione fascia F1 o F2 con autoproduzione

I dati elaborati dal server remoto dovranno essere inviati all'utente sotto forma di feed-back, che hanno il compito principale di migliorare i comportamenti energetici del consumatore finale anche mediante un aumento della sua consapevolezza.

Analisi tecnico-economica su un caso di riferimento

Una volta definita la configurazione della "interactive building network", occorre valutare, attraverso un'analisi tecnico-economica, la sua possibile implementazione su larga scala.

Il costo della piattaforma domotica è funzione del numero di sensori ed attuatori che si desidera implementare; l'analisi tecnico economica ha avuto come principali obiettivi:

1. valutare il beneficio economico (oltreché energetico) marginale ottenibile dall'inserimento di ciascun sensore/attuatore e quindi una stima del possibile PBP;
2. valutare, in via parametrica, il beneficio economico (oltreché energetico) marginale ottenibile dalla diagnostica di malfunzionamenti o comportamenti.



Per fare questo, le simulazioni svolte, corrispondenti a diversi livelli di ottimizzazione e diagnostica, forniscono come output il risparmio in termini di kWh elettrici e m³ di metano e di conseguenza il risparmio in termini monetari.

La maggior parte del risparmio si ottiene dalla diagnostica ed ottimizzazione della gestione dell'energia termica per riscaldamento d'ambiente. In particolare, sono stati simulati 3 profili di utenza applicati a due tipologie di abitazioni con classe di efficienza differenti.

Consumi medi edificio per riscaldamento	Risparmio in bolletta (solo costo variabile del metano)	Risparmio percentuale in bolletta (comprensiva dei costi fissi)	Risparmio percentuale sui costi variabili
105 kWh/m ² /anno	~ 250 €	67%	55%
75 kWh/m ² /anno	~ 190 €	66%	55%

La tabella precedente mette in luce chiaramente cosa si intende per beneficio "marginale"; a parità di piattaforma domotica, infatti il risparmio economico ottenibile è differente e chiaramente inferiore per chi parte da una situazione più efficiente. Tuttavia, l'indicazione del costo potenziale di una piattaforma domotica è chiaro. Supponendo un tempo di ritorno economico di circa 3 anni il suo costo dovrebbe restare all'interno di un range compreso tra i 600 ed i 750 €. A questo costo andrebbe poi aggiunto il costo della rete di trasmissione dati verso il server remoto, cioè quello del trasmettitore Zigbee del dato dall'unità abitativa al primo palo di illuminazione intelligente.

Nel costo della *interactive building network*, va conteggiato anche il costo di gestione della rete stessa. Occorre quindi capire chi potrebbe essere il potenziale gestore della rete locale. A questo livello di studio si può tracciare solo un identikit delle caratteristiche che dovrebbe avere il gestore di questa IBN, tra le quali sicuramente spicca l'assenza di conflitto di interessi. Un possibile soggetto gestore potrebbe essere gli "sportelli energia" che stanno nascendo in varie città.

E. Partecipazione ai network europei ed identificazione di un modello di smart town competitivo per applicazioni a breve termine

E.1 Partecipazione ai ai Network Europei e la creazione di di un Network Italiano

Una parte delle attività dell'obiettivo E si concentra sulla partecipazione ai network europei ed in particolare verso le iniziative "EERA (European Energy Research Alliance) Smart Cities", "Smart City European Industrial Initiative" e su Urban Europe, iniziative avviate nell'ambito del SET Plan.

In molti di questi contesti ritorna il tema della rete dell'illuminazione pubblica come una delle infrastrutture più interessanti per la realizzazione della Smart City.

Si evidenzia in particolare il ruolo dell'ENEA come delegato nazionale italiano di EERA Smart City e coordinatore di una delle relative 4 sotto aree a livello europeo. La partecipazione ad EERA si è concretizzata altresì con la creazione di un network italiano sulle *smart cities* che comprende molte università e alcune importanti aziende particolarmente attive nella ricerca in tale settore.

La Commissione Europea identifica nella keyword "*Smart Cities*" una delle misure prioritarie per affrontare la problematica energetico-ambientale espressa nello SET Plan, il piano che definisce le principali direzioni di sviluppo strategico dell'Europa in tema di Energia [COM(2009) 519]. A tale priorità è stato assegnato un finanziamento ingente [11 miliardi di euro per le Iniziative Industriali Europee (EII) e circa 500 milioni di euro per EERA, l'area della ricerca] per il periodo 2013-2020.

Le tematiche energetiche e funzionali sono uno degli aspetti del problema ma la vera forza della tematica "smart cities" sta nella capacità dell'approccio olistico di mettere insieme gli elementi energetico-ambientali e gli elementi di carattere sociale come la partecipazione e coesione sociale e la qualità della vita, quindi una sostenibilità intesa a 360°. La perdita di relazione con l'ambiente e la sfumatura delle identità locali in un indefinito "format culturale globalizzato" ha creato una forte richiesta di rivalorizzazione del territorio e del capitale umano sia in senso ambientale che sociale. A causa di questa domanda incrociata, proprio l'equazione "sostenibilità-connettività" rappresenterà il terreno di sfida high-tech per le aziende nei prossimi anni. Si tratta di un cluster di tecnologie e di applicazioni per aumentare la interconnessione tra reti attraverso lo sviluppo di "servizi innovativi multifunzionali" che vanno dalla gestione ottimale dei consumi energetici e della rete locale, al controllo degli impatti ambientali, dagli aspetti legati alla mobilità, all'accesso ai beni culturali ed al turismo culturale, dalla crescita educativa alla partecipazione sociale in termini di inclusione, integrazione, sviluppo della creatività, partecipazione alla governance efficiente.

Il riferimento ideale che potrebbe ispirare tali trasformazioni è quello dell'ecosistema urbano. Molto più che nel passato, la città si presenta oggi come un addensamento geografico di reti di relazioni strutturali (frazioni, quartieri, strade), materiali (scambi di merci, mobilità, rete idrica ed energetica) ed immateriali (comunicazione, servizi) spostando il modello di rappresentazione verso una struttura a reti urbane interconnesse. La interconnessione tra reti è pertanto la nuova materia tecnologica su cui possono essere fatti grandi passi in avanti. L'interconnessione può essere in molti casi strutturale (es. la rete di trasporto della energia elettrica può coincidere con la rete di trasporto della informazione) o funzionale (più funzioni vengono svolte dagli stessi oggetti urbani) o sensoriali (le stesse informazioni sulla attività urbana possono essere utilizzati per diverse finalità).

EERA – Joint Programme Smart Cities

Nel 2010, sotto la spinta del Set Plan, si è formato il consorzio European Energy Research Alliance (EERA, www.eera-set.eu) che ha lo scopo di accelerare lo sviluppo delle nuove tecnologie per l'energia attraverso la creazione e l'implementazione di Joint Research Programmes allo scopo di rafforzare, espandere ed ottimizzare le capacità di ricerca sui temi dell'energia. Il consorzio EERA, fondato inizialmente da dieci istituzioni nazionali, ha via via raccolto la rappresentanza di tutti i Paesi dell'Unione Europea. Il consorzio si è articolato in un certo numero di gruppi di lavoro tematici di cui uno è riferito alle Smart Cities.

Il programma Smart Cities, avviato nel 2010, è organizzato con delle rappresentanze nazionali ognuna delle quali coordina un team di istituzioni che intendono partecipare ai lavori del programma. L'ENEA è coordinatore nazionale del programma Smart Cities. L'obiettivo è quello di mappare la ricerca europea sulle smart cities e proporre un Joint Programme coordinato.

Gli aspetti della sostenibilità energetico-ambientale e sociale devono essere occasioni di moltiplicazione delle risorse produttive ed insieme mirare ad uno sviluppo economico sostenibile. Il Joint Programme è articolato in quattro "sub-programmes":

- *Energy in Cities* (Coordinato da AIT, Austria);
- *Urban Energy Networks* (Coordinato da ENEA, Italia);

- *Interactive Buildings* (Coordinato da SINTEF, Norvegia);
- *Urban City Related Supply Technologies* (Coordinato da TNO, Olanda).

Il sottoprogramma “Energy in Cities” sviluppa un approccio modellistico sulla scala dell’intera città. L’obiettivo è quello di organizzare sistemi di monitoraggio dei dati e sviluppare una serie di tool che hanno lo scopo di modellare la città per supportare piani di sviluppo, decisioni e ripianificazioni della città stessa.

Il sottoprogramma “Urban Energy Networks” ha l’obiettivo di sviluppare l’integrazione tra diverse reti urbane sia a livello di “Energy District” ossia distretti ecosostenibili in cui vengono affrontate a 360 gradi le problematiche della sostenibilità, e sia a livello di interazione tra due o più reti (tra cui l’illuminazione pubblica) o tra rete e cittadino sulla scala urbana.

Il sottoprogramma “Interactive Building” mira allo sviluppo di un design e management ottimale dell’edificio per l’abbattimento dei consumi e alla interazione tra edificio e utente e tra edificio e rete.

Il sottoprogramma “Urban City Related Supply Technologies” si occupa dell’integrazione nel tessuto urbano delle diverse fonti rinnovabili (solare, biomasse, geotermico, valorizzazione rifiuti, eolico, ibrido).

ENEA coordina il sottoprogramma *Urban Energy Networks* che è quello che raccoglie la più intensa convergenza delle istituzioni di ricerca e grandi player industriali italiani. Il sottoprogramma è stato articolato in tre aree: *Smart Energy Districts*, *Urban space network integration*, *Human factor: the citizen-city interaction*.

○ *Smart Energy Districts*

Quest’area affronta la problematica della definizione di modelli per un insediamento di utenze omogeneo (quale potrebbe essere un centro commerciale, un quartiere residenziale, un complesso scolastico o ospedaliero, ecc...), con due modelli diversi. Il primo considera tutte le reti e tecnologie potenziali che potrebbero essere coinvolte nel distretto perseguendo lo scopo di generare in loco tutta l’energia che serve e quanto più possibile in forma rinnovabile. Per far questo occorre non soltanto definire in modo ottimale le tecnologie di generazione dell’energia (caldo, freddo, elettricità) ma anche tutte le tecnologie più avanzate per abbattere i consumi (edifici, illuminazione pubblica, mobilità, acqua, rifiuti) ed in primis le tecnologie ICT per il monitoraggio, la diagnostica, il controllo ottimale del distretto nel suo insieme e l’interazione con la rete elettrica (smart grid).

Il secondo modello, si focalizza su un’ipotesi di un distretto di tipo aperto, come potrebbe essere una strada urbana, in cui il distretto si forma come successiva aggregazione di elementi (utenze, edifici). Quest’approccio si fonda piuttosto che su un sistema di controllo centralizzato del distretto, su un sistema distribuito in cui si immagina che gli edifici possano essere connessi tra di loro in forma flessibile e monitorabile (connessione termica, elettrica, sistemi di smart metering e billing reciproco sui flussi energetici). In questo caso l’attenzione è quindi concentrata sulla interazione (espandibile) tra due edifici.

○ *Urban space network integration*

E’ il programma più avanzato rispetto all’intera area e si rivolge alla costruzione di un’integrazione molto più spinta tra le varie reti urbane proprio attraverso lo sviluppo della infrastruttura sensoristica e digitale della città. Diverse sono le reti prese in considerazione. La rete dell’illuminazione pubblica è considerata strategica in quanto per la sua capillarità si candida a diventare rete di pali sensistivi intelligenti per coprire l’ultimo miglio dello spazio urbano e quindi l’ossatura della rete digitale tramite tecnologie PLC (*Power Line Communication*) a banda larga per portare contenuti digitali sulle linee elettriche e tecnologie *ZigBee* e *Wi-Fi* per la comunicazione wireless. La rete elettrica flessibile per cui l’accento è sulla capacità di permettere la gestione di reti attive locali basate su fonti rinnovabili (*smart grids*). La rete della mobilità dove l’attenzione è rivolta sia verso il monitoraggio integrato dei flussi e sia verso la mobilità elettrica, non tanto nello sviluppo di nuovi mezzi elettrici, quanto nella definizione e sperimentazione del modello del sistema in cui i mezzi elettrici trovano integrazione in modo da rendere possibile e competitivo il sistema nel suo insieme. La rete degli edifici, intesi non più come singoli elementi ma inseriti in concetti di reti organizzate con funzioni di telediagnostica e telecontrollo per cui la possibilità di disporre di dati remotizzati in real time aprono la strada a notevoli risparmi energetici ed economici con costi di investimento contenuti essendo fondati principalmente su automazione ed intelligenza. Infine vengono considerate altre reti significative come quella dei rifiuti. Gli obiettivi sono quelli di un minore consumo energetico, maggiore funzionalità, minore costo di gestione grazie ad ICT ed intelligenza.

○ *Human factor: the citizen-city interaction*

L’area si articola in due direzioni. La prima si riferisce all’interazione tra cittadino e le strutture della città all’interno del paesaggio urbano, dagli aspetti della informazione (energia, ambiente, mobilità, evoluzione delle

strutture energetiche del quartiere, ecc.) alla interazione con le reti (illuminazione pubblica, mobilità) al fine di implementare a fondo il concetto di "Energy on demand" ed evitare sprechi energetici o carenza di comfort a livello urbano.

La seconda direzione si focalizza sull'interazione tra cittadino e rete nel contesto della sua abitazione. In questa direzione il programma si propone di estendere il concetto dello smart metering verso una tecnologia intelligente (agente intelligente) capace di dialogare con il cittadino, aiutarlo nella consapevolezza sui temi energetico-ambientali e nella gestione della rete energetica domestica, permettere un dialogo con la rete per orientare i servizi verso le sue esigenze.

La costruzione del network italiano delle smart cities

EERA Smart Cities è organizzato con delle rappresentanze nazionali ognuna delle quali coordina un team di istituzioni nazionali che intendono partecipare ai lavori del programma. ENEA, in qualità di delegato italiano, si è adoperata per la costruzione di un network italiano, composto da molte università e da alcune importanti aziende molto attive sul fronte della ricerca e sviluppo sulla smart city e che contribuiscono con le proprie risorse all'attuazione dei vari sub-programme in cui è articolato il programma. L'attività sull'illuminazione pubblica è svolta in particolare nell'ambito del Work Package 2 dove vengono espressamente trattate le "Urban Networks".



Smart Cities European Industrial Initiative

Le iniziative che prenderanno forma in tale ambito sosterranno città e regioni nel prendere di misure ambiziose e pionieristiche in merito alla possibilità di raggiungere entro il 2020 la riduzione del 40% delle emissioni di gas-serra attraverso un uso ed una produzione sostenibile dell'energia.

Ciò richiede un approccio sistemico, un'innovazione organizzativa, efficienza energetica, tecnologie a basse emissioni e una gestione intelligente della domanda e dell'offerta. L'oggetto delle iniziative saranno misure sugli edifici, sulle reti energetiche locali e sul trasporto, al fine di supportare le attuali politiche europee e nazionali attraverso programmi, come CIVITAS, CONCERTO e Intelligent Energy Europe.

Nell'ambito della European Industrial Initiative il tema Smart Cities si focalizza su quattro temi; le iniziative dovranno coinvolgere un adeguato numero di stati europei e dovranno essere strettamente interconnesse con il Patto dei Sindaci.

o Tema 1: Edifici

Il focus sarà sull'integrazione in fase progettuale delle diverse tecnologie onde definire le soluzioni più convenienti, nonchè sul monitoraggio delle prestazioni in condizioni di uso reale.

o Tema 2: Reti di energia

Dimostrativi per la distribuzione a grande scala in ambito urbano con almeno il 50% della produzione caldo/freddo da fonti rinnovabili.

o Tema 3: Elettricità

Programmi di sviluppo e distribuzione dell'elettricità centrati sull'illuminazione a elevata efficienza energetica e sullo smart metering, attraverso la preparazione di dimostrativi per lo sviluppo della distribuzione delle reti intelligenti nelle città, l'accesso prioritario alla generazione di elettricità da fonti rinnovabili e locali, i contatori intelligenti e l'archiviazione dei dati di risposta alla domanda.

o Tema 4: Trasporto

Programmi per la realizzazione di grandi veicoli a carburante alternativo, per il trasporto pubblico e per le flotte comunali, per le autovetture private e programmi sulla mobilità sostenibile, inclusa la gestione intelligente del trasporto pubblico e la gestione intelligente del traffico.

ENEA ha partecipato e supportato diverse città italiane nella stesura di proposte europee sulle smart cities tra cui Bari, L'Aquila, Milano, Firenze, Genova, Torino. ENEA è inoltre presente come partner nella proposta della città dell'Aquila e in quella di Torino.

Urban Europe

Il network europeo Urban Europe, al quale partecipano Stati Membri ed associati, converge su iniziative di ricerca volte a ripensare e a ricomprendere l'elemento urbano in una visione olistica in grado di sfruttare le sinergie economiche, sociali ed ambientali idonee a rafforzare la posizione globale dell'Europa.

L'obiettivo è quello di una ricerca coordinata che, con iniziative innovative di lungo respiro, sia in grado di contribuire allo sviluppo della forma urbana in tempi di cambiamento globale.

L'approccio - integrativo ed interdisciplinare - è di tipo orizzontale sui temi (*4 pillar*) dell'economia, della società, dei trasporti e dell'ecologia in modo da consentire la ricucitura dei temi attinenti alla città in una visione che promuova le interazioni tra ricercatori, *policy-makers*, imprese e società civile determinando un approccio innovativo e *impact-oriented*.

Urban Europe pone come prioritaria l'esplorazione dei *4 pillars* dello sviluppo urbano in un orizzonte temporale di ampio respiro (2020-2050), delineando un Joint Investment Programme (JIP) il cui intento è quello di produrre risultati di ricerca in grado di sostenere la creazione di aree urbane europee dove l'elevata qualità degli standard rendano gradevoli i luoghi in cui vivere e lavorare al fine di consentire all'Europa di diventare una guida per lo sviluppo urbano.

Analizzando i contenuti del Concept per la Pilot Phase 2012-2013 si è proposto che le attività di ricerca condotte da ENEA - preferenze e priorità nazionali - riferite ai foresight contenuti nel concept, trovino le seguenti convergenze:

o *Topic 1 – urban megatrends indicator*

Tecnopolo di Bologna: il progetto di recupero funzionale dell'area ex Manifattura Tabacchi (BAT) destinata all'insediamento del Tecnopolo di Bologna rappresenta un'occasione unica per la città di Bologna e per il sistema dei tecnopoli della regione Emilia Romagna.

ENEA, che partecipa al progetto POR FESR 2007-2013 con quattro Laboratori di Ricerca Industriale che saranno collocati presso il Tecnopolo di Bologna, sarà anche uno degli Enti che ha concordato con la Regione Emilia-Romagna di trasferire il proprio centro di ricerca di Bologna all'interno del citato Tecnopolo.

Per questi motivi, ENEA ha voluto partecipare concretamente - già dalle prime fasi ideative - allo sviluppo del documento preliminare alla progettazione al fine di promuovere l'attuazione di una "progettazione responsabile" ed una gestione sostenibile" dell'intera area individuando soluzioni tecnologiche innovative che scaturiscono dal confronto costante con i programmi di ricerca internazionale in ambito "Smart Cities" e "Urban Europe" a cui ENEA partecipa.

L'intervento di ENEA ha visto il coinvolgimento di competenze presenti nell'Agenzia in ambito sia locale, sia nazionale sulle tematiche di efficienza energetica, gestione energeticamente sostenibile, sicurezza sismica e uso delle acque. Pur attuando un approccio complesso che ha consentito di considerare ed analizzare le problematiche derivanti dall'integrazione tra le esigenze operative e le potenzialità tecnologiche disponibili, per ogni tematica è stato elaborato un repertorio di soluzioni innovative che è stato recepito, nella forma di Allegato Tecnico al Bando del Concorso di Progettazione per la riqualificazione ed il recupero funzionale dell'Ex Manifattura Tabacchi per la realizzazione del Tecnopolo di Bologna predisposto dalla società FBM (Finanziaria Bologna Metropolitana).

Terminata questa prima fase della ricerca ENEA ha dato avvio ad una seconda fase finalizzata alla redazione di "linee guida" ed all'individuazione di metodologie e strumenti che, consentiranno di effettuare concretamente delle scelte progettuali "ambientalmente ed economicamente sostenibili" sotto il profilo ideativo, realizzativo e gestionale dell'intera area in un'ottica sinergica integrata alla città.

Una terza fase della ricerca sarà volta ad individuare l'esportabilità agli altri Tecnopoli Regionali del modello Tecnopolo, inteso come hub per la "smart city".

o *Topic 2 – urban connectivity*

In quest'ambito può confluire tutta l'esperienza e la rete di partner messi in campo per le attività per Smart Cities – Urban Energy Network.

In estrema sintesi le attività di ricerca si concentrano prevalentemente su:

- sviluppo di modelli idonei per una gestione ottimale di basso impatto (Smart Energy district) di un insediamento di edifici residenziali pubblici e privati; soluzioni per un abbinamento intelligente di energia (sia elettrica che termica) di produzione e consumo; mobilità a livello distrettuale;
 - sviluppo di opportunità legate alla realizzazione di sistemi di acquisizione dati a livello urbano (multi-information sensors networks), collegato alla trasmissione dei dati, conservazione, elaborazione ed analisi; piattaforma integrata polifunzionale ICT per l'integrazione di rete; sistema integrato di gestione per ottimizzare l'equilibrio tra offerta e domanda di energia, tenendo anche conto delle aspettative degli utenti finali e il comportamento;
 - studio dei fattori umani (citizen-city interaction), che mira ad approfondire la conoscenza sui fattori che influenzano l'utilizzo di energia e a sviluppare le cosiddette human oriented technologies;
 - sviluppo di un modello di "smart public lighting" che permette di rendere adattiva l'illuminazione in relazione alla reale richiesta del passaggio di veicoli e persone e di integrare, tramite un sistema di pali intelligenti sensorizzati, funzionalità di monitoraggio del traffico, del supporto di comunicazione ad una flotta di veicoli elettrici ed infine funzioni di sicurezza. Un prototipo di "smart lighting" è stato realizzato presso il Centro Ricerche Casaccia.
- *Topic 3 – integrated urban management*
- Il progetto City 2.0 mira a creare una sperimentazione in un luogo urbano della integrazione di servizi smart come la "interactive building network", la "smart lighting", l'integrazione con una flotta di bus elettrici a ricarica rapida, lo sviluppo di sistema per la comunicazione diretta tra Pubblica Amministrazione e cittadino. L'applicazione si farà a L'Aquila dove è in fase di progettazione uno "smart ring" di circa 4 km che lambisce la città storica. Attualmente è in fase di progettazione e la sua realizzazione inizierà nel 2012 per terminare nel 2013.

Analizzando invece i contenuti del Concept per la Pilot Phase 2012-2013 relativamente ai topic R&D si ritiene che potrebbe esserci interesse a promuovere presso il management ed il government board un approfondimento dei temi genericamente legati alla progettazione integrata, segnatamente:

- *Topic 1 - Urban innovation drivers*
- In una prospettiva concreta di città interconnesse sarà possibile ottenere una grande mole di dati "lavorabili" (ICT, sensor networks and urban data). Diventerà prioritario un set di strumenti progettuali innovativi che siano in grado di integrare i dati reali derivanti dai consumi e dai recuperi (electricity, fuel, waste, water) in una logica complessiva di progettazione/costruzione/gestione sostenibile.
- *Topic 2 - European networks of cities*
- Tra le "core questions" indicate potrebbe essere inserita quella di comprendere quali ripercussioni avranno le forme di linkages tra le networks delle città sulla forma fisica (building and infrastructure).
- Sarà decisivo indagare se forme fisiche della città di tipo innovativo possano favorire l'interazione cittadino-città (hub urbani) e, conseguentemente, l'interazione cittadini-networks di città in un'ottica di promozione dei tecnopoli e delle reti di tecnopoli come urban innovation drivers facilitatori di networks di città.

E.2 Modelli Smart Town: studio per la provincia di Monza e Brianza

La razionalizzazione e il risparmio di energia elettrica in ambito illuminotecnico costituiscono un'attività articolata che richiede di valutare molteplici soluzioni alle quali si vanno ad aggiungere, sempre più numerose, le opportunità offerte dalle cosiddette tecnologie smart, a partire da quelle per l'integrazione con altre reti energetiche. Nel contesto dell'illuminazione pubblica ed ancor più per la tematica delle smart city, il problema si arricchisce di un'ulteriore dimensione, quella economico-organizzativa, che nel caso del decisore pubblico è di per sé una significativa fonte di complessità. I singoli comuni, infatti, si trovano a dover affrontare sia la laboriosità del processo decisionale, che legittimamente vede coinvolti una pluralità di organismi tecnici e politici, sia i vincoli di problemi di bilancio posti dal Patto di Stabilità che limita (se non impedisce del tutto in diversi casi) la capacità di predisporre, valutare ed effettuare investimenti ancorché destinati a produrre significativi risparmi economici.

In estrema sintesi, difficoltà tecniche (i comuni minori raramente dispongono di adeguate competenze interne sullo specifico tema), vincoli di bilancio e complessità del processo decisionale obbligano a considerare ulteriori analisi/studi in aggiunta a quelli più prettamente di natura ingegneristica.

In questo ordine di idee si colloca lo studio di fattibilità tecnico-economica, sullo specifico contesto territoriale di Monza e Brianza (55 Comuni), realizzato nell'ambito della collaborazione CRIET-ENEA. Il fine è di delineare una procedura inter-organizzativa che partendo dalla riqualificazione energetica degli impianti d'illuminazione

pubblica dei Comuni della Provincia conduca all'integrazione di tecnologie smart e alla realizzazione di smart street.

Il progetto è stato chiamato *Illumina* proprio per sottolineare che si tratta di un progetto pilota nel senso che l'unità di riferimento non è il singolo comune, ma una provincia.

Più in dettaglio lo studio si è articolato in tre distinte aree di attività, sviluppate in parallelo:

- A. raccolta e analisi dei dati sugli impianti per la realizzazione di uno studio di fattibilità;
- B. procedura inter-organizzativa per l'implementazione di una smart street quale primo passo per la smart town;
- C. creazione del network dei comuni della provincia.

Raccolta e analisi dei dati sugli impianti per la realizzazione di uno studio di fattibilità

L'obiettivo di questa macro area è stato di sviluppare un modello di analisi tecnico-economica utile per simulare diverse soluzioni di efficientamento illuminotecnico e smart-town a livello sia di singolo comune, sia di aggregazioni di comuni della Provincia di Monza e Brianza.

Per raccogliere i dati relativi agli impianti d'illuminazione pubblica è stata somministrata la *Scheda illuminazione pubblica base* predisposta da ENEA nell'ambito del progetto Lumière. Si sono così raccolte informazioni dettagliate su 15 comuni brianzoli su di un totale di 54 comuni oggetto di analisi (per la sua dimensione si è escluso dallo studio il comune di Monza), ottenendo così un data set sufficientemente ampio per la realizzazione del modello di analisi anche perché alla ricerca mediante questionario si sono affiancate una serie di interviste in profondità con gli operatori (sindaci e tecnici comunali).

Si sono quindi rilevate le principali funzioni richieste dal territorio in relazione alle funzionalità integrabili nel modello Smart Town. In particolare le principali esigenze emerse sono di realizzare:

- una diffusa messa a norma degli impianti;
- un risparmio energetico in modo da abbattere i costi di gestione;
- una richiesta di controllo del territorio anche mediante tecnologie smart (videosorveglianza).

Sulla base quindi di questionari, interviste e anche di stime ove necessario, si è predisposto un articolato modello di simulazione tecnico-economica.

Il modello realizzato distingue i comuni in quattro classi dimensionali e prevede le seguenti distinte aree di valutazione:

- ✓ fase di acquisizione degli impianti (tramite esproprio ove necessario) e di pianificazione degli interventi di efficientamento attraverso la redazione del piano regolatore dell'illuminazione comunale o redazione del solo PRIC per quei comuni già proprietari degli impianti di illuminazione presenti sul proprio territorio;
- ✓ fase di riqualificazione degli impianti, comprendente entrambe le operazioni di messa a norma elettrica e messa a norma elettrotecnica. In particolare questa seconda operazione è stata valutata per tre diversi scenari di riqualificazione degli impianti di illuminazione e cioè mediante installazione di:
 - un regolatore di flusso luminoso centralizzato e tele controllato;
 - un regolatore di flusso luminoso "punto a punto" tele controllato;
 - un dispositivo per l'illuminazione adattiva.

Sulla base delle due suindicate valutazioni si è proceduto ad analizzare - per tutte e tre diverse ipotesi formulate e per ogni singolo comune dei 15 della provincia che ha aderito al progetto Lumière - l'investimento complessivo, i costi energetici e manutentivi odierni e quelli post-intervento, i risparmi economici e di CO₂ attesi e, inoltre, a determinare il TIR (Tasso interno di rendimento), il valore attuale netto e il periodo di recupero.

L'analisi è stata condotta anche per tutti i 54 comuni della provincia di Monza e Brianza, come illustrato nei prospetti di sintesi di riportati nelle Tabelle 14-16.

Tabella 14. Provincia di Monza e Brianza nel suo complesso. Riqualificazione degli impianti di illuminazione comprendente l'installazione di un regolatore di flusso luminoso centralizzato e telecomandato

(tutti gli importi sono espressi in migliaia di euro)

Classi di abitanti	numero di Comuni	risultati economici fondamentali					
		spese attuali totali per energia elettrica e manutenzione degli impianti	costo relativo alla pianificazione e acquisizione degli impianti (*)	costo relativo messo a norma elettrica (**)	costo relativo alla riqualificazione illuminotecnica (***)	totale degli investimenti	risparmi annuali previsti per energia e manutentivi
<5000	11	536,70	258,30	818,40	1.647,25	2.723,95	304,88
5001-15000	24	3.376,54	1.165,85	4907,19	9.509,28	15.582,32	1.933,67
15001-50000	19	7.853,08	1.975,47	10443,81	29.970,26	32.389,54	4.600,00
50001-100000	0	-	-	0,00	-	-	-
Totali		11.766,31	3.399,62	16.169,40	31.126,78	50.695,81	6.838,55

Classi di abitanti	numero di Comuni	indicatori di convenienza economica		
		payback period	tir (20 anni)	VAN (20anni)
<5000	11	9	9%	1.024,30
5001-15000	24	8	11%	8.110,01
15001-50000	19	7	13%	23.749,21
50001-100000	0	0	0%	-
Totali				32.883,52

indicatori relativi alle emissioni di CO2		
CO2 immessa in atm attuale (in migliaia di t)	risparmio CO2 (in migliaia di t)	% CO2 risparmiata
1.365,56	756,79	55%
8.898,91	5.080,28	57%
22.778,54	13.842,06	61%
-	-	0%
33.043,01	19.679,14	

* - la voce comprende i costi di: redazione PRIC, perizia degli impianti, azione legale contro ENEL, riscatto degli impianti e redazione bando gara
 ** - la voce comprende i costi di: sostituzione dei sostegni armatori e/o obsoleti, rifacimento delle linee elettriche e scavi e/o asfaltature relative
 *** - la voce comprende i costi di: sostituzione dei corpi illuminanti e installazione regolatore flusso luminoso

Tabella 15. Provincia di Monza e Brianza nel suo complesso. Riqualificazione degli impianti di illuminazione comprendente l'installazione di un regolatore di flusso luminoso "punto a punto" telecomandato

(tutti gli importi sono espressi in migliaia di euro)

Classi di abitanti	numero di Comuni	risultati economici fondamentali					
		spese attuali totali per energia elettrica e manutenzione degli impianti	costo relativo alla pianificazione e acquisizione degli impianti (*)	costo relativo messo a norma elettrica (**)	costo relativo alla riqualificazione illuminotecnica (***)	totale degli investimenti	risparmi annuali previsti per energia e manutentivi
<5000	11	536,70	258,30	818,40	2.161,50	3.238,20	319,00
5001-15000	24	3.376,54	1.165,85	4907,19	12.617,43	18.690,47	2.057,93
15001-50000	19	7.853,08	1.975,47	10443,81	25.824,25	38.243,53	4.908,32
50001-100000	0	-	-	0,00	-	-	-
Totali		11.766,31	3.399,62	16.169,40	40.603,18	60.172,20	7.285,25

Classi di abitanti	numero di Comuni	indicatori di convenienza economica		
		payback period	tir (20 anni)	VAN (20anni)
<5000	11	10	8%	702,08
5001-15000	24	9	9%	6.624,66
15001-50000	19	8	11%	21.833,34
50001-100000	0	0	0%	-
Totali				29.160,09

indicatori relativi alle emissioni di CO2		
CO2 immessa in atm attuale (in migliaia di t)	risparmio CO2 (in migliaia di t)	% CO2 risparmiata
1.365,56	813,00	60%
8.898,91	5.575,03	63%
22.778,54	15.127,87	66%
-	-	0%
33.043,01	21.515,90	

* - la voce comprende i costi di: redazione PRIC, perizia degli impianti, azione legale contro ENEL, riscatto degli impianti e redazione bando gara
 ** - la voce comprende i costi di: sostituzione dei sostegni armatori e/o obsoleti, rifacimento delle linee elettriche e scavi e/o asfaltature relative
 *** - la voce comprende i costi di: sostituzione dei corpi illuminanti e installazione regolatore flusso luminoso

Tabella 16. Provincia di Monza e Brianza nel suo complesso. Riqualficazione degli impianti di illuminazione comprendente l'installazione di un dispositivo per l'illuminazione adattiva

(tutti gli importi sono espressi in migliaia di euro)

Classi di abitanti	numero di Comuni	risultati economici fondamentali					
		spese attuali totali per energia elettrica e manutenzione degli impianti	costo relativo alla panificazione e acquisizione degli impianti (*)	costo relativo messo a norma elettrica (**)	costo relativo alla riqualficazione illuminotecnica (***)	totale degli investimenti	risparmi annuali previsti per energia e manutentivi
<5000	11	536,70	258,30	818,40	2.370,50	3.447,20	334,26
5001-15000	24	3.376,54	1.165,85	4907,19	13.927,90	20.000,94	2.151,13
15001-50000	19	7.853,08	1.975,47	10443,81	28.862,39	41.281,68	5.118,15
50001-100000	0	-	-	0,00	-	-	-
Totali		11.766,31	3.399,62	16.169,40	45.160,79	64.729,81	7.603,54

Classi di abitanti	numero di Comuni	indicatori di convenienza economica		
		payback period	tir (20 anni)	VAN (20 anni)
<5000	11	10	7%	684,26
5001-15000	24	9	9%	6.482,70
15001-50000	19	8	11%	21.430,27
50001-100000	0	0	0%	-
Totali				28.597,23

indicatori relativi alle emissioni di CO2		
CO2 immessa in atm attuale (in migliaia di t)	risparmio CO2 (in migliaia di t)	% CO2 risparmiata
1.365,56	873,79	64%
8.896,91	5.946,09	67%
22.778,54	16.002,93	70%
-	-	0%
33.043,01	22.822,81	

* - la voce comprende i costi di: redazione PRIC, perizia degli impianti, azione legale contro ENEL, riscatto degli impianti e redazione bando gara

** - la voce comprende i costi di: sostituzione dei sostegni ammalorati e/o obsoleti, rifordimento delle linee elettriche e scavi e/o asfaltature relative

*** - la voce comprende i costi di: sostituzione dei corpi illuminanti e installazione regolatore flusso luminoso

Procedura inter-organizzativa per l'implementazione di una Smart Street quale primo passo per la Smart Town

Al fine di sviluppare un progetto pilota, potenzialmente replicabile, di dimostrativo territoriale di una procedura inter-organizzativa standard per l'implementazione di una Smart Street quale primo passo verso la Smart Town è stato presentato il progetto Lumière nella sua declinazione Illumina alle Istituzioni locali (Presidente dell'Assemblea dei Sindaci della provincia di Monza e Brianza, Presidente della Provincia stessa e tutti i sindaci; l'interesse riscosso ha permesso di svolgere una serie di riunioni dei sindaci non più plenarie, ma divise secondo le tre aree della provincia (sindaci della Brianza est, centrale e ovest). I sindaci coinvolti nel progetto Illumina hanno dimostrato un interesse davvero elevato a superare un approccio limitato a implementare singole smart street. Di conseguenza il progetto si è sviluppato lungo la direttrice di unioni di comuni (sempre distinte secondo le suindicate tre aree geografiche) in grado di avviare sia i progetti di riscatto impianti, ove necessario, sia le attività di efficientamento illuminotecnico.

Su questa strada, con il supporto della Provincia nella persona dell'assessore delegato al tema in questione, si è proceduto a delineare un progetto pilota con i sindaci di Misinto, Desio e Limbiate. Con loro si è proceduto a selezionare le funzionalità più significative da implementare sulla base del quale si è sviluppato un progetto di massima non limitato alla realizzazione di una singola smart street, ma rivolto a creare un'unione di comuni che abbia come obiettivo quello di procedere con un innovativo bando per la realizzazione del progetto complessivo.

Creazione del network

In parallelo alla definizione della precedente procedura inter-organizzativa, si è proceduto a realizzare un network con il coinvolgimento sia della Provincia di Monza e Brianza e dei suoi Comuni sia dei soggetti che a vario titolo si possono configurare quali fornitori e/o finanziatori degli specifici progetti di riqualficazione verso lo sviluppo di smart town.

Quindici comuni hanno aderito al progetto Lumière, ma è molto probabile che il numero dei comuni possa crescere ulteriormente. Sono stati quindi analizzati gli stakeholder territoriali tra cui è da sottolineare il Distretto Green & High Tech che comprende 80 imprese, molte delle quali direttamente interessate a tecnologie illuminotecniche e smart.

Al fine di consolidare il network è stato predisposto un sito ad hoc (www.illumina.criet.unimib.it) ed organizzato il convegno "Illumina: efficienza energetica nell'illuminazione pubblica. Da Lumière alla Smart City".

E.3 Modelli Smart Town: progetto per Smart Street presso il CR Casaccia dell'ENEA e il raccordo anulare urbano de L'Aquila

È stato eseguito uno studio di fattibilità per la realizzazione di un anello di gestione intelligente e l'integrazione della mobilità e dell'illuminazione urbana per due realtà differenti, con obiettivi e finalità differenti:

- studio di fattibilità per la realizzazione di un anello di gestione e integrazione dell'illuminazione esterna con altri servizi energetici all'interno del Centro ENEA Casaccia - sono state individuate le tecnologie ed i sistemi che potrebbero essere impiegati all'interno del centro, e sono in fase di definizione le vie da considerare nella fase di pre-progettazione per il completamento dello studio di fattibilità e l'analisi approssimativa dei costi e dei consumi;
- studio di fattibilità per la realizzazione di un anello di gestione e integrazione dell'illuminazione esterna con altri servizi energetici della lunghezza di circa 4,0 km presso la città de L'Aquila - è stato definito il percorso oggetto di studio, sono state individuate le tecnologie ed i sistemi da impiegare in alcune delle vie costituenti lo smart ring, sono state redatte delle specifiche pre-progettuali e ipotizzate una bozza progettuale e delle stime di costo dei componenti costituenti il sistema.

Per la realizzazione degli studi di fattibilità, sviluppati nel contesto di una collaborazione tra ENEA ed Università di Roma "La Sapienza", si è proceduto ad un'analisi dei "programmi di ricerca e sviluppo orientati a raccogliere dati sul lungo periodo riguardo il funzionamento e l'affidabilità.

A fronte delle tante esperienze che si stanno promuovendo ed effettuando in diverse parti del Mondo e dei tanti tentativi di valutazione degli effettivi vantaggi dell'eventuale introduzione della tecnologia a LED su scala urbana, si è qui deciso di fare riferimento ad alcune situazioni che sembrano ad oggi in una fase più avanzata", e che contemplano la possibilità di integrazione di "smart services". L'analisi sembra confermare la predisposizione di tali sistemi, in particolare se associati a sistemi di regolazione evoluti, per l'illuminazione urbana, per gli aspetti legati al risparmio energetico e alla sicurezza dell'illuminazione.

Progetto per l'aspetto illuminotecnico dello "Smart Village" presso il CR Casaccia

In particolare, per quanto riguarda il Centro ENEA Casaccia, si è evidenziato come l'opportunità di studiare un progetto "Smart" applicato ad un ambito di minori dimensioni permette di analizzare e sperimentare le innovazioni tecnologiche avendo la completa disponibilità di dati e informazioni più precise rispetto ad una città. Il percorso considerato nello studio di fattibilità, sulla base delle informazioni disponibili, è rappresentato dall'anello esterno del centro (Figura 79).

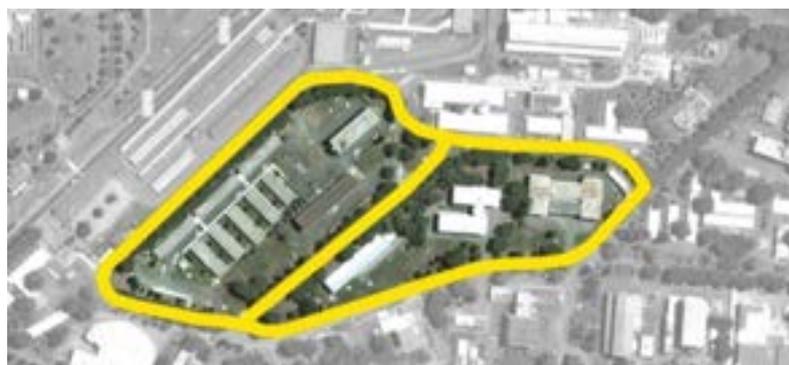


Figura 79. Il percorso oggetto di studio all'interno del CR ENEA Casaccia

Il sistema che potrebbe essere realizzato dovrebbe consentire lo sviluppo di attività di ricerca sia sull'illuminazione innovativa (LED), dal punto di vista prestazionale, energetico, di sicurezza e di sostenibilità ambientale, sia sul sistema integrato che contempli gli aspetti di regolazione (eventualmente) associata a mobilità, misura di parametri ambientali, ecc.. Si è verificata l'applicabilità di sistemi commerciali a LED. Dalle simulazioni effettuate emerge che esistono sistemi in grado di soddisfare questa richiesta, con la possibilità peraltro di integrare sistemi di regolazione e di comunicazione di differente complessità. Le sorgenti considerate come applicazione definitiva sono sorgenti LED bianco neutro con temperature di colore di circa 4000 K, e potenza pari a circa 70 W. Per la valutazione energetica e di costo, si è operato sotto opportune ipotesi cautelative, ottenendo comunque risultati confortanti: con la sola sostituzione delle sorgenti, si può arrivare ad ottenere un risparmio approssimativamente pari al 20%, che può essere migliorato con un sistema di stabilizzazione (risparmio cautelativo nell'ordine del 30%) ed eventualmente un sistema di regolazione complesso, con un ulteriore abbassamento dei consumi (dal 40 al

60%, nel caso di controllo adattivo). L'aspetto più rilevante è la possibilità che un'installazione di questo tipo ed in questo particolare ambiente consentirebbe in termini di studi e attività di ricerca.

Dal punto economico, un singolo elemento costituito da apparecchio illuminante con LED e autoregolazione, palo di sostegno, interfaccia per regolazione punto-punto, ha un costo approssimativo dell'ordine di 1700-2700 €, a seconda delle soluzioni che offre il mercato, cui si deve aggiungere il costo (unico, in questo caso) del sistema di tele gestione e software, che complessivamente hanno un costo dell'ordine di 20000-25000 €. A questo, bisogna aggiungere come considerazione conclusiva, che essendo un progetto sperimentale, tali costi potrebbero subire delle alterazioni anche importanti, dovute alla convenienza di potenziali partner ad essere inseriti nel progetto.

Lo Smart Ring de L'Aquila

Lo studio di fattibilità per il caso della città di L'Aquila deve invece partire da lontano, dal sisma del 2009 che ha distrutto e reso quasi disabitata la città. Dopo più di due anni dal terremoto, la ricostruzione della città è lontana. Il centro storico è ancora disabitato. I servizi ai cittadini sono pochi, il Comune e l'Università sono stati spostati in fabbricati industriali delocalizzati, e quindi di difficile raggiungimento. Nonostante le difficoltà, però, si nota la volontà da parte dei cittadini di non abbandonare la città. L'importanza di un intervento del tipo "Smart Ring" ha un ruolo in questo caso strategico di rilancio, della vita della città da una parte, dell'immagine della città, e in un certo senso dell'Italia intera, dall'altro.

Per questo, diventa di fondamentale importanza la definizione del percorso, che si è deciso di articolare lungo l'anello che racchiude il centro storico della città. La realizzazione dell'anello ha lo scopo di innescare un processo di ricostruzione sostenibile della città, degli edifici, del tessuto dei servizi al cittadino, del recupero di una coesione sociale e del rilancio verso un futuro produttivo compatibile con l'idea dello sviluppo sostenibile (Figura 80).



Figura 80. Il progetto dello Smart Ring a L'Aquila

Lungo tutto l'anello sono state condotte misure in campo per la verifica delle condizioni dell'illuminazione attualmente presente. Ipotesi cautelative hanno portato ad immaginare un'illuminazione che non si discosti, come disposizione e se possibile come numero di elementi in campo, dall'attuale. Alcune strade risultano non o troppo poco illuminate, con soluzioni che in fase di riprogettazione potrebbero comunque essere anche profondamente rivisitate.

Sono state definite delle specifiche che consentissero di individuare delle linee guida che una futura progettazione potrebbe seguire, sia per la scelta del sistema di illuminazione, sia per il sistema di regolazione. In particolare, in fase progettuale in termini di sistema di illuminazione sarà necessario prevedere l'utilizzo di lampade ad alta efficienza luminosa, l'adeguamento delle sorgenti di luce altamente inquinanti, l'utilizzo di apparecchi di illuminazione cut-off, il contenimento dell'intensità luminosa nell'emisfero superiore, mentre in termini di sistema di regolazione l'utilizzo di un sistema di telecontrollo con dimmerazione punto-punto del flusso luminoso per garantire risparmi energetici significativi, ridurre l'inquinamento atmosferico e luminoso, garantire un buon livello di comfort e permettere l'integrazione successiva di smart services che richiedono la presenza del dato digitale a livello del singolo palo. Il sistema di telecontrollo dovrà pertanto implementare strategie di riduzione del flusso luminoso di ogni punto luce e l'on/off ottimizzato degli impianti sulla base delle classificazioni delle strade e dei relativi flussi di utenza (veicoli, pedoni). Ogni accorgimento teso a migliorare le prestazioni ambientali/energetiche dovrà poi essere considerato premiante.

Sulla base di questi principi, si è verificata attraverso simulazioni su alcune strade tipo l'applicabilità di sistemi commerciali a LED. Le sorgenti considerate come applicazione definitiva sono sorgenti LED bianco neutro con temperature di colore di circa 4000 K e potenze comprese tra 115 W e 70 W.

Centro corsia	Min	Max	Med (A)	Min/max	Min/med
Luminanza (cd/m ²)	0,76	0,82	0,79	92,1	95,4
Parcheggio	Min	Max	Med (A)	Min/max	Min/med
Illuminamento (lux)	4,9	8,3	6,4	59,4	76,8



In totale assenza di informazioni utili sull'impianto attuale, la valutazione energetica e la stima dei consumi attuali e futuri, nel caso di installazione di un sistema di illuminazione LED del tipo previsto, è basata su ipotesi cautelative. Con la sola sostituzione delle sorgenti, si ritiene che un risparmio pari a circa il 23% possa essere raggiungibile, nel rispetto dei valori richiesti da normativa. In fase progettuale e successivamente realizzativa, senza particolari sovra costi si può pensare di prevedere un sistema di stabilizzazione, con un risparmio complessivo che può essere quantificato dell'ordine del 30%. L'introduzione di un rigoroso controllo del flusso luminoso in emissione, che può essere ridotto fino al 50% nelle ore di minor utilizzo delle strade, può portare ad un abbassamento dei consumi, che può arrivare ad essere quantificato pari a circa il 43%. Analisi di casi studio mostrano come sia possibile arrivare ad ottenere risparmi fino almeno al 50% ed oltre (fino al 60%), attraverso l'introduzione di un sistema adattivo combinato con l'introduzione dei LED. L'aumento di complessità del sistema comporta inevitabili sovra costi che però introducono risparmi sia di tipo energetico che di tipo economico-gestionale, legati alla manutenzione e alla sicurezza dell'impianto, fornendo contestualmente un servizio migliore ed innovativo alla cittadinanza. La banda larga su cui viaggiano le informazioni permette un ulteriore abbassamento dei costi di manutenzione, agevolando la programmazione degli interventi. Dal punto di vista dei conti economici, la spesa totale orientativa per il sistema intero ed integrato (di circa 230 elementi) è dell'ordine di 400.000-620.000 €, a seconda delle scelte fatte sui sistemi, a cui possono aggiungersi spese complementari, come l'installazione e il posizionamento di telecamere (27.000 €).

Essendo un progetto sperimentale di grandi dimensioni, tali costi potrebbero subire delle alterazioni anche sostanziali, dovute alla convenienza di potenziali partner ad essere inseriti nel progetto.

Nella continuazione delle attività, previste nel PAR 2011 si procederà alla realizzazione del progetto per lo Smart Village previsto presso il Centro ENEA Casaccia integrando l'aspetto illuminotecnico con gli altri servizi smart legati alla mobilità di mezzi elettrici e reti di smart buildings. Per quanto riguarda l'intervento dimostrativo su L'Aquila, si ritiene che esuli dalle finalità dirette della Ricerca di Sistema Elettrico pur costituendone un'importante ricaduta; pertanto, in accordo con il Comune di L'Aquila si stanno avviando progetti alternativi per finanziare la ricerca applicativa e l'intervento stesso (fondi del Patto dei Sindaci, fondi MIUR) e si stanno mettendo a punto proposte nazionali ed europee.

E.4 Modelli Smart Town: progetto per il Power Park presso il quartiere San Paolo di Bari

E' stato preso in esame il quartiere San Paolo di Bari per uno studio che consideri tutti i componenti urbani integrati tra loro al fine di consentire un'ottimizzazione dei servizi e dei benefici da offrire al cittadino. In quest'ottica, è stato ipotizzato che anche la pubblica illuminazione funga da parte integrante del sistema e sia in grado di interagire con le utenze e di restituire informazioni utili per il cittadino e per l'ente pubblico gestore dei dati energetici (comune, distributore locale, ecc), ad esempio relativamente ai consumi di energia elettrica, caldo e freddo. La ricerca è frutto di una collaborazione tra Politecnico di Bari ed ENEA.

Nel seguito si presenta l'architettura di una rete di comunicazione dati progettata per integrarsi con parte dell'infrastruttura esistente a servizio della pubblica illuminazione.

La rete di comunicazione proposta è completamente scalabile e permette la fornitura di diversi servizi:

- monitoraggio e trasmissione a distanza dei consumi di acqua, frigoriferi, calorie e gas delle utenze situate nelle zone servite dal sistema di pubblica illuminazione;
- rilievo e monitoraggio del traffico stradale e modulazione del flusso luminoso dei lampioni rispetto alla densità di traffico attuale e/o prevista;
- controllo automatico dell'intensità luminosa dei lampioni al fine di ottenere il rispetto delle normative vigenti con il minimo dispendio di energia.

Il sistema di rete proposto assume come nodo principale il quadro elettrico del sistema di pubblica illuminazione equipaggiato da un server e come nodi secondari concentratori Zig-bee posti sui sostegni degli organi illuminanti. Ogni quadro elettrico individua una rete indipendente. Ad ogni quadro è associata una rete a copertura di tutte le zone servite dai lampioni collegati al quadro stesso anche tramite diverse linee elettriche.

Ogni rete di quadro elettrico, comunica con un centro di controllo tramite un collegamento GPRS. Il collegamento con il centro di controllo ha il solo compito di rendere disponibili i dati in un unico punto in modo da poterli agevolmente archiviare. Il Centro di Controllo non svolge funzioni di rete per le varie reti di comunicazioni di quadro servite (Figura 81).



Figura 81. Architettura sistema di rete

Nel seguito ci si riferirà sempre alla rete di comunicazione su base quadro elettrico.

La rete di comunicazione di quadro proposta è una rete bidirezionale e permette lo scambio in *real time* ed in maniera affidabile e sicura di dati tra tutti i dispositivi di rete. Esistono diverse alternative che permettono di realizzare una rete dati sfruttando gli impianti di pubblica illuminazione. Questa proposta prevede di estendere le funzionalità del singolo lampione che da semplice punto luce integrerà anche la funzione di nodo di una rete. La rete di quadro proposta è costituita da tanti nodi di rete (lampioni) che comunicano tra di loro e che a loro volta comunicano con il loro territorio di pertinenza.

In particolare, nella rete di quadro è possibile individuare la dorsale di rete che realizza i collegamenti tra i diversi nodi di rete ed una parte periferica che permette ai nodi di rete di collegarsi con tutti i dispositivi terminali. Tra le diverse possibilità si è individuata una soluzione ZigBee come la più efficiente nell'implementazione del sistema considerato, quindi sia per la dorsale che per la parte periferica di rete si adotteranno dispositivi di trasmissione aderenti allo standard IEEE 802.15.4.

La tecnologia wireless ZigBee permette il semplice collegamento dei nodi di rete in modo semplice e affidabile ed è la tecnologia ideale quando si desidera realizzare una rete di dispositivi embedded caratterizzata da un basso

transfer rate e bassi consumi energetici (possibilità di alimentare gli smart meter a batteria). Il protocollo Zigbee è robusto alle interferenze esterne e permette di ottenere una buona qualità di trasmissione anche in presenza di altre reti a 2,4 GHz (per esempio reti WiFi). La ZigBee Alliance ha esaminato tale questione in passato, affermando che anche in presenza di una grande quantità di interferenze, i dispositivi ZigBee continuano a comunicare in modo efficace con un lieve calo delle prestazioni.

In una rete ZigBee, un lampione non comunica solo con i due lampioni adiacenti "elettricamente" come in una rete PLC (Power Line Communication), ma comunica con tutti i lampioni che può raggiungere con il suo segnale radio. Sulla dorsale si configura una rete con topologia mesh, piuttosto che lineare come nel caso PLC. L'utilizzo di una rete magliata, a fronte di una maggiore complessità nella gestione di rete, garantisce una maggiore tolleranza ai guasti (Figura 82). Un messaggio per giungere a destinazione può seguire infatti diversi percorsi, la scelta del path da seguire è fatta in maniera automatica dal sistema in modo da ottimizzare il funzionamento della rete stessa.



Figura 82. Dorsale rete di lampioni parzialmente magliata

Una rete così fatta è poco soggetta a congestionamenti, infatti utilizzando i multipath si possono implementare tecniche di *load balance*, inoltre è poco soggetta a guasti sui singoli nodi o disturbi sulle singole tratte in quanto si può in genere sempre scegliere un percorso diverso per far giungere il messaggio a destinazione. Diversamente in una rete PLC un guasto sul singolo nodo di rete potrebbe pregiudicare le trasmissioni su tutta la rete.

Il lampione sarà quindi dotato di un router ZigBee e la rete così costituita attorno al lampione in un raggio indicativo di 30 metri può supportare diversi servizi tra cui anche il servizio di metering per i contatori di acqua, gas e teleriscaldamento. In questa prospettiva si può implementare un AMI (Advanced Metering Infrastructure) sfruttando il supporto per DLMS/COSEM fornito dallo standard ZigBee. In questo modo l'infrastruttura ZigBee sarebbe utilizzata in maniera ottimale per quanto riguarda i servizi di metering e, comunque, potrebbe supportare in maniera agevole altri servizi accessori quali, ad esempio, la modulazione dei flussi luminosi, il monitoraggio dei gruppi luminosi, la stima delle densità di traffico, etc.

Il Protocollo DLMS (Device Language Message Specification) è utilizzato nell'ambito dei contatori ed in particolare per la telelettura dei consumi e la telegestione. Lo standard di riferimento è IEC 62056. Esso si basa su dei servizi che consentono di leggere e scrivere degli oggetti, definiti OBIS. Il protocollo è universale ed è indipendente dal costruttore del contatore, dal tipo di contatore, dal mezzo di comunicazione.

Tramite l'utilizzo di DLMS over ZigBee si può implementare un AMI molto completo e avanzato che sfrutta anche appieno le caratteristiche di sicurezza del protocollo ZigBee (Figura 83).

La trasmissione dei dati relativi al metering può utilizzare meccanismi di cifratura standard quali la crittografia a 128 bit AES; ZigBee pone un forte accento sui meccanismi di sicurezza wireless per impedire manomissioni e intercettazioni e per garantire alta affidabilità e disponibilità. ZigBee prevede quattro servizi di base di sicurezza: l'autenticazione, l'integrità del messaggio, la riservatezza del messaggio e la protezione replay.



Figura 83. Periferiche del Smart Lampion

Lo standard ZigBee prevede l'utilizzo di tre differenti tipi di dispositivi: ZigBee Coordinator (ZC), ZigBee Router (ZR) e ZigBee Device (ZED). Nel quadro elettrico sarà installato un ZigBee Coordinator che avrà sia funzioni di rete per la gestione della rete ZigBee ed anche funzione di gateway in quanto avrà anche il compito di raccogliere i dati a riguardo del metering ed inviarli tramite collegamento GPRS ad un centro unico di raccolta. Lo ZC costituisce la radice della rete.

Lo ZR agisce come un router intermedio passando dati da e verso altri dispositivi. Lo ZR sarà installato a palo, in media serve una zona di 30 metri di raggio. Per garantire la più completa copertura radio anche in caso di forte urbanizzazione si prevede di equipaggiare comunque tutti i pali con dispositivi ZR. Lo ZR di un palo collocherà con lo ZC se è nella sua copertura radio, con gli ZR dei pali limitrofi, con i dispositivi ZED posizionati sia sugli stessi pali che nei pressi delle abitazioni private al fine di permettere la telelettura/telegestione dei contatori.

I dispositivi ZED saranno di diverse tipologie.

- dispositivi ZED di interfaccia con le smartcamera; sono posizionati a palo e trasmettono le informazioni provenienti dalle smartcamera che permettono la stima della densità di traffico nella zona controllata e del flusso luminoso al fine di verificare le condizioni minime di illuminamento fissate dalle normative coniugando così condizioni di sicurezza stradale e risparmio energetico;
- dispositivi ZED integrati negli SmartMeter, posizionati a ridosso delle abitazioni in grado di effettuare la telelettura e la telegestione dei contatori.

Considerando una singola rete associata ad un quadro elettrico, il traffico stimato da e verso il concentratore è molto esiguo rispetto alla capacità di rete stessa. Lo stesso tempo necessario ad interrogare tutti gli smart meter presenti nella rete è esiguo rispetto al vincolo di una misura ogni 12 ore. Il sovradimensionamento della rete può, peraltro, essere utilizzato per rendere ancora più tollerante la rete ai disturbi esterni adottando politiche di controllo e correzione degli errori molto onerose in termini di banda.

Esaminiamo la tolleranza ai guasti ipotizzando il caso peggiore in cui i nodi di rete sono disposti lungo una linea; in questo caso le uniche maglie che si vengono a creare sono dovute al fatto che la portata di ogni nodo è superiore al doppio della distanza media tra i pali.

Considerando una distanza massima tra i pali di 30 metri come in Figura 84 e una topologia lineare, in caso di singolo guasto la distanza massima tra due nodi funzionanti è di 60 metri.

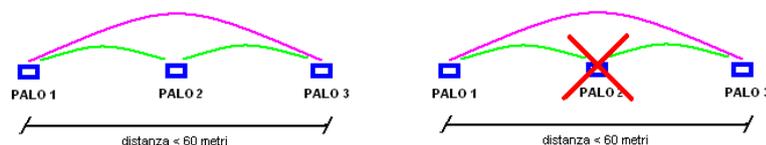


Figura 84. Fault tolerance

Considerando che in questo scenario (lampioni in linea) la trasmissione avviene nello spazio libero e che, in questo ambiente, la portata di 60 metri è sicuramente garantita, è possibile garantire grazie alla struttura magliata della rete ed alla decisione di posizionare un router per ogni palo la tolleranza al singolo guasto.

Studio di fattibilità

È stato ipotizzato che il distretto energetico San Paolo di Bari venga alimentato da una centrale di trigenerazione con rete di teleriscaldamento/teleraffrescamento per la produzione di energia elettrica, caldo e freddo, tale da rendere energeticamente autonoma l'area considerata. Quindi, mediante un'architettura di rete opportunamente progettata e dimensionata, si è considerato che l'impianto di pubblica illuminazione sia in grado di interrogare la singola utenza e restituire i dati relativamente ai consumi di energia elettrica, calore e freddo. È stato ipotizzato inoltre che tale impianto di illuminazione sia in grado di rispondere alla variazione del traffico regolando dinamicamente il flusso luminoso, ottenendo in tal modo dei risparmi sull'energia consumata.

L'intero impianto di illuminazione pubblica del quartiere San Paolo è alimentato da un totale di 34 quadri elettrici di cui 21 dotati di controllore di flusso potenza; essi gestiscono una potenza di circa 320 kW pari al 65% della totale potenza installata. Lo stato dell'arte nel controllo dinamico dell'illuminazione prevede una regolazione del flusso luminoso in rapporto alla densità di traffico. Dai dati ottenuti dal comune di Bari riguardo il traffico in ingresso ed in uscita dal quartiere è stato possibile stabilire degli intervalli temporali in cui declassare la strada, relativamente alla variazione di categoria illuminotecnica, in base alla portata oraria dei veicoli transitanti in un'ora. Sono stati così individuati tre intervalli temporali come riportato in Tabella 17.

Tabella 17. Fasce orarie individuate

FASCIA ORARIA	DA	A	RIDUZIONE FLUSSO	ORE/ANNO
T1	accensione	21:30 ÷ 22:30	0%	1250
T2	T1	00:00 ÷ 00:30	25%	770
T3	T2	01:55 ÷ 02:55	50%	836
T4	T3	spegnimento	50%	1316

Attualmente la rete è esercita in maniera tale da ridurre il flusso al 50% nella fascia T4 (per i quadri dotati di controllore), per le altre ore di lavoro essa è alimentata alla tensione nominale. Nell'analisi condotta quindi, si sono determinate le fasce di regolazione del flusso luminoso in base alle densità di traffico transitante nel quartiere e gli orari di accensione e spegnimento individuati per ciascuna fascia oraria nei vari periodi dell'anno.

Applicando la riduzione di flusso e relativa durata delle fasce orarie identificate è stato possibile quantificare il risparmio energetico in bolletta definito dalla seguente formula in cui il primo addendo definisce il contributo al risparmio per i consumi di elettricità ed il secondo per i costi di manutenzione.

$$R_o = (P_o \times t_r \times R_{e\%} \times C_e) + \left[N_L \times \left(\frac{C_f + C_m}{t_2} - \frac{C_f + C_m}{t_1} \right) \times t_f \right]$$

dove

- R_o risparmio annuo complessivo;
- P_o potenza totale installata dell'impianto;
- t_r numero di ore/anno di funzionamento a regime ridotto;
- $R_{e\%}$ percentuale di riduzione della potenza;
- C_e costo del kWh;
- N_L numero di lampade;
- C_f costo medio di acquisto di una lampada;
- C_m costo medio della manodopera per la sostituzione di una lampada;
- t_2 durata media delle lampade senza regolatore (circa 8000 h/anno);
- t_1 durata media delle lampade con regolatore (circa 17000 h/anno);
- t_f numero di ore/anno di funzionamento (circa 4000 h/anno).

Il controllo dell'illuminamento fornito dalle lampade viene monitorato dalla smartcam tramite idoneo software di misura.

Nelle Tabella 18 e 19 sono riportati rispettivamente i valori per il calcolo del risparmio di energia elettrica annuo (primo termine della formula) e il risparmio per costi di manutenzione per diverse tipologie di lampade.

Tabella 18. Risparmio di energia elettrica

Fasce di riduzione [h]	Pa [kW]	Ore a regime ridotto [h]	Riduzione di potenza [%]	Risparmio annuo [€]
T1	487,9	1.250	0	0,00
T2	487,9	770	20	10.519,27
T3	487,9	836	40	22.841,83
T4	81,3	1.316	40	5.993,33
Totale				39.354,43

Tabella 19. Risparmio costi di manutenzione per lampade di diversa tipologia

	Mercurio	Vapori di sodio ad alta pressione	Alogenuri metallici	Incandescenza
NL	39	485	61	1
Cl+Cm	37	350	250	0
t2	8.000	10.000	6.000	8.000
t1	20.000	24.000	12.000	17.000
tf (T2+T3)	1.606	1.606	1.606	1.606
tf (T4)	1.316	1.316	1.316	1.316
R [€]	254,15	23.372,14	2.726,38	0,00
Risparmio totale [€]	26352,67			

La potenza delle lampade generalmente può subire ulteriori variazioni in quanto in fase di dimensionamento iniziale dell'impianto, si tiene conto di un fattore di mantenimento (MF) che considera la riduzione del flusso luminoso causato dalla mancata pulizia dei corpi illuminanti nel tempo. In questa analisi è stato considerato un risparmio energetico del 20% per il primo anno e del 10% per il secondo, nella sola fascia T1. Tale condizione di sovradimensionamento degli impianti è stata effettivamente verificata nel quartiere San Paolo ed i valori di sovradimensionamento su indicati appaiono conservativi.

Riassumendo, l'architettura di rete proposta è costituita da:

- n.1 router ZigBee per ogni punto luce, per il traffico bidirezionale di contatori e smartcam;
- n.2 smartcam per ogni quadro, alloggiata a bordo palo, per il controllo del traffico e la misura illuminamento reale;
- n.1 scheda i/o a servizio di ciascuna smartcam;
- n.1 server per la gestione traffico dati contatori e smartcam per ciascun quadro;
- componentistica hardware e software per Centro di Raccolta Dati;
- quadri di regolazione, controllo e stabilizzazione in sostituzione dei quadri di alimentazione ordinari tuttora presenti in parti di impianto.

Poiché 13 quadri sui 34 complessivi sono sprovvisti di controllore di potenza, nell'analisi condotta sono state considerate due categorie di quadri: con controllore e senza controllore. Quindi l'investimento è stato scorporato e, oltre a voci di costo in comune (architettura di rete), si sono considerati i costi di fornitura e posa in opera di 13 controllori di potenza, con le quantità riportate in Tabella 20.

Tabella 20. Costi di investimento iniziale

Voce	Costo Unitario (€)	Quantità	Importo (€)
Router Zig Bee	152	1.879	285.608
Smart cam	2.000	68	136.000
Scheda i/o ZigBee RS485	100	68	6.800
Server Quadro alimentazione	1.500	34	51.000
Centro Raccolta Dati HD + SW	20.000	1	20.000
Quadro Comando, variazione e stabilizzazione 3,3 kW	3.200	1	3.200
Quadro Comando, variazione e stabilizzazione 4,7 kW	4.000	3	12.000
Quadro Comando, variazione e stabilizzazione 7,7 kW	4.500	4	18.000
Quadro Comando, variazione e stabilizzazione 11 kW	5.200	3	15.600
Quadro Comando, variazione e stabilizzazione 19 kW	6.200	2	12.400
Totale			€ 560.608

Si sono ipotizzati due scenari:

1. unico gestore che effettua la telelettura solo dei consumi del gas o equivalentemente unica lettura per i tre servizi gestiti (gas, caldo/freddo, acqua);
2. diversi gestori che effettuano la telelettura di caldo/freddo, gas e acqua.

Scenario 1

Si è ipotizzato di effettuare la telelettura solo dei consumi di gas di 12000 punti di riconsegna del quartiere. Tra i costi variabili si è considerato quello per O&M assunto pari al 5% dell'investimento iniziale. Per l'analisi dell'investimento è stato considerato un orizzonte temporale di 15 anni e un interesse di calcolo del 4% (dato da un costo del capitale del 7% al netto della inflazione del 2% e della deriva dell'inflazione del settore energetico pari al 1%). Si sono considerati i dati riportati in Tabella 21.

Tabella 21. Risparmi e ricavi da interventi proposti

Voce	Quantità
Potenza installata, kW	487,9
Energia annua assorbita, kWh/anno	1.994,5
Risparmio da telelettura contatori ¹ , €/anno	14.400,0
Vendita T.E.E. (tipo 1), €/anno	6.141,4
Risparmio da controllo traffico, €/anno	39.516,3
Risparmio di emissioni (CO ₂), t/anno	136,0

¹ Stima Anigas per costo telelettura contatori domestici

Inoltre, si sono assunti i seguenti costi dell'energia:

Costo unitario per l'energia, €/kWh	0,14
Costo annuo per unità di potenza impegnata, €/kW anno	36,00

Il Discounted Pay Back Period è pari a 14 anni con un VAN a fine periodo di 51.467 € (Figura 85).

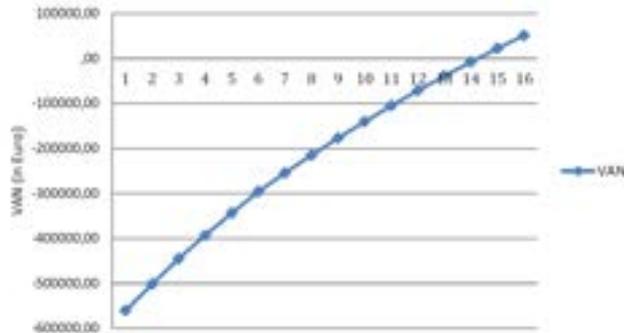


Figura 85. Andamento del VAN nell'investimento

Per quanto riguarda il costo della telelettura, nell'analisi effettuata è stato considerato il valore stimato da associazioni di categoria, ovvero pari a 1,2 €/anno per ciascun PDR (Punto Di Riconsegna). Nel caso in esame si sono quantificate 12000 utenze del quartiere San Paolo di Bari da monitorare. Poiché tale valore è risultato ancora in fase di validazione, è stata fatta un'analisi di sensitività per verificare in che modo l'investimento in esame risponde a tale variazione. Quindi, si sono considerate delle variazioni percentuali rispetto al valore considerato e si è valutato l'andamento del VAN in ciascun caso (Figura 86). Inoltre è stato opportuno valutare l'investimento considerando il costo attuale con letturista (Figura 87). Chiaramente, all'aumentare del costo risparmiato per telelettura diminuisce il periodo di ritorno dell'investimento.

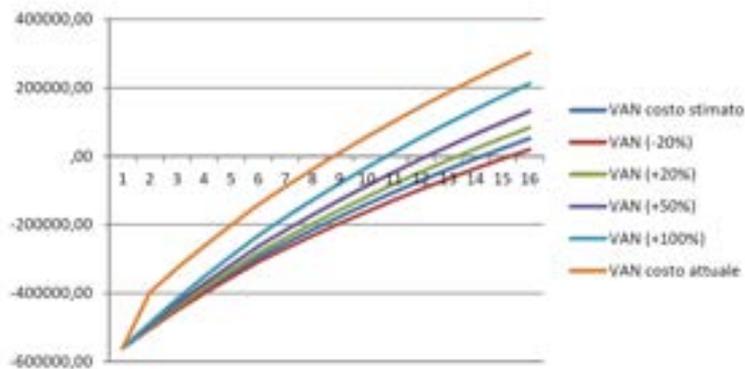


Figura 86. Andamento del VAN nell'investimento - Scenario 1

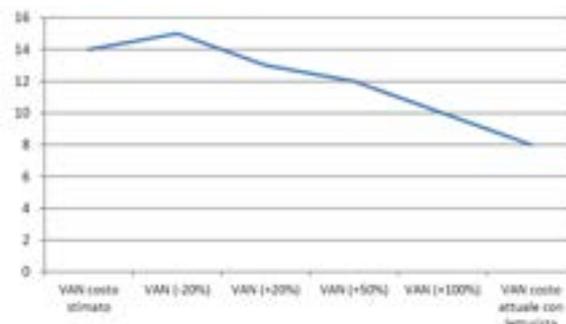


Figura 87. Andamento del Periodo di ritorno dell'investimento nei casi analizzati - Scenario 1

Scenario 2

Le ipotesi alla base dell'analisi dell'investimento sono le medesime dello scenario 1. Si sono modificati solo i parametri ritenuti incerti, ovvero il costo della telelettura e il numero di gestori che operano nel distretto. Nello

specifico, si è ipotizzato che all'interno del distretto operino diversi gestori, uno per ciascun servizio erogato. I servizi di cui effettuare la telelettura sono: acqua, caldo/freddo e gas.

Quindi, nell'analisi dell'investimento, il costo va considerato per ciascuna telelettura e i costi considerati variano tra il valore stimato dalle associazioni di categoria e il costo attuale con letturista.

Tabella 22. Scenario 2 - Risparmio per tre telelettture

Scenario 2	€/telelettura	€/anno
Costo stimato associazioni di categoria	3,6	43.200
Costo attuale con letturista	10,2	122.400

Il periodo di ritorno dell'investimento si è notevolmente ridotto, infatti nel primo caso il periodo di ritorno dell'investimento è di 8 anni e nel secondo di 4 anni (Figura 88).

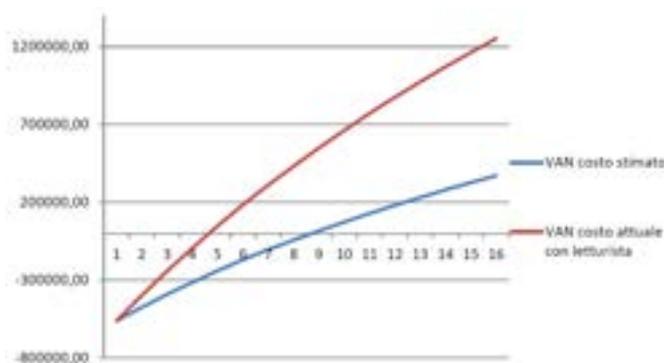


Figura 88. Andamento del VAN nell'investimento - Scenario 2

Il Comune di Bari si è dimostrato interessato al progetto che però richiede rilevanti investimenti e, come già visto nel caso de L'Aquila, si ritiene che l'intervento dimostrativo esuli dalle finalità dirette della Ricerca di Sistema Elettrico pur costituendone un'importante ricaduta; perciò, si stanno avviando progetti alternativi per finanziare la ricerca applicativa e l'intervento stesso.

Qualora il Comune di Bari riuscisse a realizzare l'intervento, all'interno del PAR 2011 potranno trovare posto, come già previsto, le attività ENEA di follow della realizzazione come "paese pilota".

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Per lo sviluppo di ciascuna delle linee di attività, l'ENEA ha ritenuto opportuno coinvolgere diversi soggetti esterni il cui contributo tecnico-scientifico è stato di fondamentale importanza. Di seguito si riporta una breve descrizione delle attività svolte dai singoli partner.

Università degli Studi Roma Tre - Dipartimento di Informatica e Automazione (Obiettivo A)

Accordo di Collaborazione per la "Realizzazione di una piattaforma integrata per il data fusion di segnali provenienti da sistemi sensoriali per applicazioni di smart city integrate nella rete della pubblica illuminazione"; il sistema integrato include le funzionalità di raccolta dati dai sensori tramite un sistema ad onde convogliate installato sulla rete della illuminazione pubblica, il trasporto dei dati ad un server remoto, l'organizzazione dei dati, l'elaborazione dei dati in ognuno dei moduli per gli applicativi specifici riferentesi alla gestione della illuminazione pubblica, del monitoraggio della mobilità, della gestione di una flotta di veicoli elettrici ed infine di una rete di edifici.

Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia e dei Sistemi (Obiettivo B)

Accordo di Collaborazione per uno "Studio teorico-sperimentale di una struttura multifunzionale da installare nelle rotonde in ambiente urbano in una logica di smart cities", per il controllo delle rotonde come nodi fondamentali del sistema smart city ("rotonda intelligente"). La struttura propone una soluzione ottimale per illuminazione

pubblica della rotonda stessa ma vi integra un'ampia serie di funzionalità smart, oltre ad essere energeticamente attiva.

Politecnico di Milano - Dipartimento INDACO (Obiettivo B)

Accordo di Collaborazione per una attività di ricerca sulla "Integrazione di Tecnologie SMART nel Lighting Design" che riguarda l'innovazione nel LED Lighting Design nell'Illuminazione pubblica. Nello specifico l'attività è rivolta allo sviluppo di un prototipo per un sistema sensoriale integrato in un lampione in modo da renderlo "intelligente" e permettere la comunicazione dei dati al server tramite la linea elettrica. La "testa sensoriale" è stata sperimentata in laboratorio su un modello sperimentale.

Lo studio è focalizzato sulla definizione delle nuove possibili funzioni del modulo PLUS, progettato in una precedente ricerca, affinché l'illuminazione pubblica risulti più intelligente, migliore da un punto di vista del comfort assicurato al cittadino ed energeticamente sostenibile.

Università di Roma La Sapienza - Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica (Obiettivo C)

Accordo di Collaborazione per un'attività di ricerca sulla "Gestione della mobilità veicolare tramite integrazione con la rete di illuminazione pubblica", con lo scopo di sviluppare strumenti per la raccolta ed elaborazione automatica di dati e informazioni sullo stato corrente del traffico veicolare e pedonale, basati su sistemi sensoriali posizionati sui pali intelligenti e su veicolo per integrare diverse funzionalità. In particolare lo studio ha previsto lo sviluppo di un sistema per la gestione di veicoli elettrici secondo la logica della mobilità on-demand mediante comunicazione con la linea di illuminazione e con la piattaforma integrata e lo sviluppo di un sistema prototipale di simulazione e previsione a breve termine dello stato del traffico veicolare sulle arterie stradali urbane.

Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Energetica (Obiettivo D)

Accordo di Collaborazione per un "Progetto per l'integrazione in una rete di illuminazione pubblica avanzata di un sistema per la supervisione remota di una rete di edifici residenziali equipaggiati con una piattaforma di domotica energetica"; l'attività riguarda la possibilità di sfruttare il sistema dell'illuminazione pubblica come linea digitale capillare per la raccolta dati e l'invio di informazioni verso una vasta rete di edifici residenziali. L'obiettivo è la costruzione di una "interactive building network", ossia dello sviluppo di una capacità "urbana", di orientare i cittadini in modo attivo verso il conseguimento di elevati risparmi energetici ed economici nella gestione delle reti energetiche delle proprie abitazioni.

CRIET – Centro di Ricerca Interuniversitario in Economia del Territorio (Obiettivo E)

Accordo di Collaborazione per uno "Studio di fattibilità per la integrazione tra pubblica illuminazione e servizi smart: analisi di un caso pilota"; tale studio di fattibilità tecnico-economica sullo specifico contesto territoriale della provincia di Monza e Brianza (53 Comuni) ha avuto il fine di delineare una procedura inter-organizzativa che partendo dalla riqualificazione energetica degli impianti d'illuminazione pubblica dei Comuni conduca all'integrazione di tecnologie smart ed alla realizzazione di smart street.

Università di Roma La Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (Obiettivo E)

Accordo di Collaborazione per una "Analisi per uno studio di fattibilità orientato alla realizzazione di smart streets per la gestione intelligente e l'integrazione della mobilità e dell'illuminazione urbana all'interno di reti di servizi energetici"; l'analisi è stata svolta su due realtà differenti, la prima ha riguardato la realizzazione di un anello (smart ring) della lunghezza di circa 1,5 km all'interno del Centro ENEA Casaccia, la seconda un anello della lunghezza di circa 4,0 km presso la città de L'Aquila, che comprende un tratto con traffico veicolare, un tratto con traffico pedonale e centro storico.

Politecnico di Bari, Dipartimento di Elettrotecnica ed Elettronica (Obiettivo E)

Accordo di Collaborazione per uno "Studio di fattibilità per la integrazione di un modello di pubblica illuminazione ad alta efficienza in un power park urbano (quartiere eco-sostenibile): analisi di un caso pilota"; lo studio di fattibilità tecnico-economica sul quartiere San Paolo di Bari ha avuto come obiettivo la progettazione di un modello illuminotecnico che diminuisca quanto più possibile il consumo di energia elettrica dovuta alla illuminazione ed al tempo stesso l'impianto illuminotecnico costituisca l'ossatura principale per scambiare le informazioni digitali ai fini del controllo dell'intero distretto.

Progetto 1.3.2a

Fissione nucleare: metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata

- P.C. Incalcaterra, R. Calvigioni, G. Tiranti, O. Aronica, G. Abbate, G. Possenti, M. Serra, M. D'Apice, C. Parisi, "Rapporto su programma di test di componenti e sistemi con funzioni di sicurezza e di gestione d'impianto", (ENEA, CIRTEN)
- F. Mascari, C. Grima, G. Vella, "Analisi di sistemi passivi, utilizzati in impianti ad acqua pressurizzata di tipo avanzato. Identificazione di componenti di piccolo diametro" (CIRTEN)
- F. Mascari, C. Grima, G. Vella, "Identificazione di componenti di piccolo taglia in sistemi di tipo passivo e possibili attività sperimentali per la loro caratterizzazione" (CIRTEN)
- A. Naviglio, M. Cumo, L. Ferroni, F. Giannetti, D. Vitale Di Maio, "Rapporto di progetto del circuito di prova e relativi componenti"(CIRTEN)
- M. Cumo, L. Gramiccia, F. Giannetti, D. Vitale Di Maio, "Approvvigionamento dei componenti necessari per la realizzazione del circuito"
- O. Aronica, "Rapporto su analisi di impianti dotati di sistemi di sicurezza passivi"(ENEA), in allegato i rapporti:
 - S. Yameng, M. Ricotti, "Generation III+ Reactor response to Fukushima-like scenario" (CIRTEN)
 - F. D'Errico, R. Ciolini, "Analisi di affidabilità dei misuratori di flusso neutronico in-core" (CIRTEN)
- G. Forasassi, R. Lo Frano, "Analysis of the external events effects in relation to the stress-tests requirements" (CIRTEN)
- F. De Rosa, M. Sangiorgi, K. Voukelatou, M. Sumini, F. Teodori, "Rilascio di radionuclidi dal nocciolo al sistema di contenimento nei reattori nucleari ad acqua leggera in condizioni incidentali: stato dell'arte e metodi di valutazione" (ENEA, CIRTEN)
- M. Sumini, F. Teodori, "Studio dei fenomeni osservabili a seguito di transitori di impianto estesi oltre i limiti di progetto" (CIRTEN)
- G. Abbate, "Combustibili ad alto burn-up per reattori di III Generazione" (ENEA)
- G. De Angelis, "Riprocessamento del combustibile nucleare mediante pirometallurgia" (ENEA)
- L. Luzzi, P. Botazzoli, G. Pastore, "Modellazione del comportamento di elio in combustibili MOX ad alto burn-up ai fini dell'estensione degli strumenti di simulazione e di supporto alla progettazione delle barrette di combustibile per i reattori di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata" (CIRTEN)
- F. Cantini, M. Adorni, F. D'Auria, "Comportamento del combustibile nucleare durante rampe di potenza: Analisi di esperimenti con codici di calcolo di comportamento del combustibile, in particolare in condizioni di alto burn-up" (CIRTEN)
- M. Capone, N. Cherubini, A. Compagno, A. Dodaro, "Rapporto sui processi di ritrattamento utilizzabili e progetto di massima di un impianto pilota" (ENEA)
- G. Albertini, "Studio di fattibilità finalizzato alla minimizzazione di radionuclidi a lunga vita" (Dipartimento di Fisica e Ingegneria dei Materiali e del Territorio dell'Università Politecnica delle Marche)
- A. Borio, D. Alloni, J. Bruni, M. Cagnazzo, M. Coniglio, G. Margotti, S. Manera, F. Panza, M. Prata, A. Salvini "Validazione di una metodologia di analisi per lo studio dell'evoluzione temporale della composizione del combustibile nucleare" (Laboratorio Energia Nucleare Applicata dell'Università di Pavia)
- A. Borio, D. Alloni, J. Bruni, M. Cagnazzo, M. Coniglio, G. Margotti, S. Manera, F. Panza, M. Prata, A. Salvini, "Validazione di una metodologia di analisi per la valutazione dell'efficienza di trasmutazione dei prodotti di fissione a lunga emivita e degli attinidi minori in campi neutronici misti (termici e veloci)" (Laboratorio Energia Nucleare Applicata dell'Università di Pavia)
- F. Pisacane, "Proposte di strumenti innovativi per la misura di flussi in-core" (ENEA); in allegato i rapporti:
 - R. Turatti, M. Frullini, D. Vitale Di Maio, M. Nobili, M. Lezziero, Report RdS/ "Criteri per la progettazione di strumentazione in-core in EPR ed AP1000: un confronto tra due approcci alla sicurezza" (CIRTEN)
 - A. Gandini, A. Naviglio, M. Cumo, M. Lezziero, F. Giannetti "Stima del punto di massima potenza lineare in un nocciolo ad acqua: una valutazione numerica basata su tecniche "perturbative generalizzate" (CIRTEN)
- C. Parisi, M. Cappelli, "Rapporto di analisi delle prestazioni dei sistemi computerizzati di supervisione, controllo e protezione" (ENEA)
- M. Lanfredini, M. Bambara, N. Muellner, F. D'Auria, "Implementazione della logica di regolazione e protezione della pressione e livello del pressurizzatore e dello Steam Dump system per un reattore PWR" (CIRTEN)
- M. Cappelli, C. Parisi, "Rapporto sull'integrazione dei sistemi di impianto" (ENEA)
- S. Di Gennaro, B. Castillo, "Analysis of the dynamics of supervision, control and protection systems in pressurized water reactors of evolutive generation" (Centro di Eccellenza DEWS dell'Università de L'Aquila)
- S. Di Gennaro, B. Castillo, "Comparative study of controllers for the supervision, control and protection systems in pressurized water reactors of evolutive generation" (Centro di Eccellenza DEWS dell'Università de L'Aquila)

- S. Di Gennaro, B. Castillo, "Performance study of the control systems in the presence of faults and/or reference accidents in pressurized water reactors of evolutive generation" (Centro di Eccellenza DEWS dell'Università de L'Aquila)
- G. Grasso, M. Adorni, W. Ambrosini, D. Araneo, M. Aufiero, S. Bortot, A. Cammi, M. Cherubini, P. Console Camprini, E. Coscarelli, F. D'Auria, S. Dulla, S. Lorenzi, D. Mattioli, E. Molfese, D. Mostacci, R. Ponciroli, P. Ravetto, M.E. Ricotti, M. Sumini, F. Teodori, F. Terzuoli, "Studio di fattibilità per lo sviluppo di un modello multi-fisica (neutronica, termoidraulica e termomeccanica) di dinamica spaziale di nocciolo: rapporto di analisi della codicistica esistente a supporto dello sviluppo di uno strumento di dinamica spaziale di nocciolo" (ENEA, CIRTEEN)
- M. Aufiero, S. Bortot, A. Cammi, S. Lorenzi, R. Ponciroli, M.E. Ricotti, "Definizione delle caratteristiche richieste ad un modulo di termomeccanica in un codice di multifisica di dinamica tridimensionale per reattori termici" (CIRTEEN)
- S. Dulla, P. Ravetto, "Confronto tra le tecniche di soluzione dell'equazione del trasporto per reattori termici" (CIRTEEN)
- M. Adorni, W. Ambrosini, D. Araneo, M. Cherubini, E. Coscarelli, F. D'Auria, E. Molfese, F. Terzuoli "Valutazione delle caratteristiche di codici di termoidraulica di nocciolo ai fini delle analisi di sicurezza: stato dell'arte dei codici di termoidraulica di nocciolo" (CIRTEEN)
- P. Console Camprini, D. Mostacci, M. Sumini, F. Teodori, "Studio dei codici stato dell'arte di neutronica per reattori termici" (CIRTEEN)
- K.W. Burn "Analysis of the impact of heavy reflector of a typical large size GEN III+ reactor Design on the Ex-core detector signals with Monte Carlo Techniques (employing MCNP-5)" (ENEA)
- M. Di Giulio, G. Grasso, F. Rocchi "Conseguenze del terremoto Tohoku-Taiheiyu-Oki sugli impianti nucleari giapponesi. Ipotesi di ricostruzione della sequenza incidentale" (ENEA)

Progetto 1.3.2b

Fusione nucleare: attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER, denominate Broader Approach

- A. Cucchiario, P. Rossi, G. M. Polli, L. Reccia, G. Brolatti, "Disegni costruttivi della bobina di JT-60SA completi di tutti i particolari quali: doppi pancake della bobina, ingresso di elio di refrigerazione, giunti elettrici intermedi e terminazione riempitivi necessari all'avvolgimento della bobina" (ENEA)
- A. Cucchiario, L. Di Pace, P. Rossi, G.M. Polli, L. Reccia, "Specifica tecnica per la realizzazione dell'avvolgimento della bobina di JT-60SA" (ENEA)
- G.M. Polli, P. Rossi, L. Di Pace, A. Cucchiario, "Attrezzature ed impianti necessari per la realizzazione delle sequenze costruttive della Bobina JT-60SA e ordini emessi da ASG" (ENEA)
- A. Cucchiario, G.M. Polli, L. Di Pace, "Linea di Avvolgimento del Doppio Pancake della Bobina Toroidale JT-60SA" (ENEA)
- A. Cucchiario, P. Rossi, G. Brolatti, "Disegni costruttivi della cassa di contenimento della bobina di JT-60SA" (ENEA)
- A. Cucchiario, P. Rossi, L. Di Pace, L.Reccia, G. Brolatti, "Specifica tecnica per la realizzazzione della cassa di contenimento della bobina di JT-60SA" (ENEA)
- A. Lampasi, "Specifiche tecniche per la realizzazione degli switching network unit dei solenoidi centrali del tokamak JT-60SA" (ENEA)
- R. Coletti, F. Starace, "Specifiche tecniche per la realizzazione degli alimentatori AC/DC e dei trasformatori del sistema poloidale della macchina tokamak JT-60SA" (ENEA)
- D. Bernardi, G. Miccichè, A. Tincani, "Rapporto sulla progettazione del prototipo del target per l'EVEDA loop" (ENEA)
- P. Favuzza, A. Ciampichetti, G. Miccichè, A. Tincani, E. Rappezzi, G. Fasano, "Sistemi di monitoraggio di fenomeni di cavitazione e di impurezze non metalliche nel circuito litio liquido" (ENEA)
- A. Aiello, A. Tincani, M. Muzzarelli, G. Fasano, F.S. Nitti, L. Sansone, "Progettazione dell'impianto sperimentale a litio fluente LIFUS 6" (ENEA)
- A. Gessi, P. Favuzza, "Rapporto sulla messa a punto del sistema di purificazione associato all'impianto LIFUS 3 e sugli esiti delle prove funzionali in diverse condizioni" (ENEA)
- G. Miccichè, L. Lorenzelli, "Rapporto sulla progettazione del sistema di manipolazione remota" (ENEA)
- G. Miccichè, D. Bernardi, R. Giammusso, M. Agostini, "Rapporto sulle verifiche tecnologiche per il Target Assembly di IFMIF" (ENEA)
- G. Miccichè, L. Lorenzelli, "Rapporto sull'adeguamento dell'area sperimentale destinata alle sperimentazioni full scale in condizioni rappresentative del target IFMIF" (ENEA)
- D. Bernardi, G. Micciche', M. Frisoni, F.S. Nitti, M. Serra, "Rapporto di avanzamento del progetto del target di IFMIF comprensivo di disegni e di analisi numeriche" (ENEA)
- A. Moriani, L. Verdini, "Rapporto sui risultati delle misure della conducibilità termica sul composito ceramico SiC/SiC" (ENEA) in allegato il rapporto:
 - E. Ferrari, E. Ghisolfi, "Messa a punto del processo per la realizzazione di pannelli in SiC-SiC per caratterizzazioni fisico meccaniche ed in litio liquido" (FN)
- A. Moriani, L. Bettinali, "Rapporto sui risultati del codice di modellazione dei materiali compositi e dei risultati delle prove meccaniche sul composito ceramico SiC/SiC" (ENEA)

- A. Moriani, S. Tosti, F. Marini, L. Bettinali, R. Borelli, "Rapporto sui risultati delle prove di erosione-corrosione sul composito ceramico SiC/SiC" (ENEA)
- U. Besi-Vetrella, B. Lacroix, G.M. Polli, L. Zani, "TF System Quench analyses in operation condition" (ENEA F4E, CEA)
- G. M. Polli, U. Besi-Vetrella, A. Cucchiario, L. Muzzi, "Maximum pressure calculation at quench during cold test" (ENEA)
- S. Roccella, G. M. Polli, A. Cucchiario "Heat transfer calculation on casing cooling pipes options" (ENEA)

Progetto 3.2.1

Tecnologie "smart" per l'integrazione della illuminazione pubblica con altre reti di servizi energetici e loro ottimizzazione

- L. Sciavicco, S. Panzieri, G. Ulivi, F. Pascucci, C. Foglietta, F. Moretti, P. Cicolin, S. Pizzuti, "Realizzazione di una piattaforma integrata per il data fusion di segnali provenienti da sistemi sensoriali per applicazioni di smart city integrate nella rete della pubblica illuminazione" (Dipartimento di Informatica e Automazione dell'Università di Roma Tre, ENEA)
- S. Pizzuti, M. Annunziato, F. Bucci, F. Moretti, "Illuminazione pubblica adattiva: modellistica dei sistemi intelligenti" (ENEA, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica dell'Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Informatica e Automazione dell'Università di Roma Tre)
- R. Giglioli, P.L. Maffei, S. Bottura, A. Chisena, S. Giordano, G. De Michele, S.S. Ligarò, A. Paita, "Studio teorico-sperimentale di una struttura multifunzionale da installare nelle rotonde in ambiente urbano in una logica di Smart Cities. SVEMlight Struttura viaria ecosostenibile multifunzionale" (Dipartimento di Ingegneria dell'Energia e dei Sistemi dell'Università di Pisa)
- D. Casciani, F. Musante, M. Rossi, A. Siniscalco "Integrazione di Tecnologie SMART nel Lighting Design" (Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano)
- M. Annunziato, C. Meloni, F. Moretti, S. Pizzuti, F. Bucci, "Analisi immagini di scene urbane per applicazioni di smart lighting e smart city" (ENEA, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica dell'Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Informatica e Automazione dell'Università di Roma Tre)
- M.G. Messina, G. Valenti, F. Carapellucci, G. Fusco, C. Colombaroni, A. Gemma, G. Ciccarelli, S. Lo Sardo, "Sistema di monitoraggio e previsione della mobilità veicolare per l'integrazione tra la rete della illuminazione pubblica e la rete della mobilità" (ENEA, CTL Università di Roma la Sapienza)
- A. Alessandrini, N. M. Buccino, C. Castaldi, A. Cattivera, C. Galli, F. Ortenzi, R. Ragona, A. Palleschi, F. Sarracco, "Gestione di veicoli elettrici per la mobilità on-demand" (CTL Università di Roma La Sapienza, ENEA)
- G. Comodi, A. Giantomassi, S. Longhi, F. Polonara, "Progetto per l'integrazione in una rete di illuminazione pubblica avanzata di un sistema per la supervisione remota di una rete di edifici residenziali equipaggiati con una piattaforma di domotica energetica" (Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche e Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università Politecnica delle Marche)
- M. Annunziato, C. Meloni, S. Pizzuti, F. Lauro, "Monitoraggio e modellazione innovativa di consumi elettrici in smart building" (ENEA, Università degli Studi della Calabria)
- M. Annunziato, P. Clerici, C. Meloni, S. Pizzuti, "Partecipazione ai network europei sulla smart city e creazione di un network italiano" (ENEA)
- A. Di Gregorio, N. Gozo, N. Barone, D. Bonata, "Studio di fattibilità per la integrazione tra pubblica illuminazione e servizi smart: analisi di un caso pilota (ENEA. Centro di Ricerca Interuniversitario in Economia del Territorio-CRIET)
- F. Bisegna, F. Gugliermetti, "Analisi per uno studio di fattibilità orientato alla realizzazione di anelli (smart rings) per la gestione intelligente e l'integrazione della mobilità e dell'illuminazione urbana all'interno di reti di servizi energetici" (Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica dell'Università di Roma La Sapienza)
- S. Bruno, M. D'Aloia, M. De Benedictis, S. Lamonaca, M. La Scala, G. Rotondo, U. Stecchi, "Studio di fattibilità per la integrazione di un modello di pubblica illuminazione ad alta efficienza in un power park urbano (quartiere eco-sostenibile): analisi di un caso pilota" (Dipartimento di Elettrotecnica ed Elettronica del Politecnico di Bari)

Tutti i documenti in elenco sono disponibili sul sito ENEA all'indirizzo:

http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ricerca-di-sistema-elettrico



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



- Ricerca & Sviluppo
- Servizi
- Laboratori & Impianti
- Attività internazionali
- Produzione scientifica
- Lavoro & Salute
- Enea Informa



Tu sei qui: Home > Ricerca & Sviluppo > Ricerca di Sistema Elettrico

Ricerca di Sistema Elettrico

La "Ricerca di sistema elettrico" è un programma che prevede un insieme di attività di ricerca e sviluppo finalizzate a ridurre il costo dell'energia elettrica per gli utenti finali, migliorare l'affidabilità del sistema e la qualità del servizio, ridurre l'impatto del sistema elettrico sull'ambiente e sulla salute e consentire l'utilizzo razionale delle risorse energetiche ed assicurare al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Le attività della "Ricerca di Sistema elettrico" sono finanziate dai "contributi per ricerca e sviluppo" che i consumatori finali versano con la componente A5 della bolletta elettrica. L'ammontare di questa componente viene fissato dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG).

Le priorità delle attività di ricerca e sviluppo, gli obiettivi e gli stanziamenti economici sono definiti attraverso Piani triennali predisposti dal Comitato di Esperti di Ricerca per il Settore Elettrico che acquisisce il parere dell'AEEG (dal giugno 2007 le funzioni del Comitato sono attribuite in via transitoria all'AEEG) e, per gli aspetti di competenza, del Ministero dell'Istruzione dell'Università e della Ricerca, del Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare e della Cassa Conguaglio per il Settore Elettrico (CCSE).

Per l'attuazione dei progetti di ricerca definiti nei Piani triennali, e nei Piani Operativi Annuali che ne fanno parte integrante, il Ministero dello Sviluppo Economico stipula Accordi di Programma (AP) con ENEA, CNR e RSE S.p.A.

Per ciascuna attività vengono presentati piani annuali di realizzazione (PAR).

Attualmente l'ENEA ha in corso i progetti dell'Accordo di Programma 2009-2011.

In queste pagine sono disponibili i risultati degli studi effettuati dal 2006 e tutti i documenti finora prodotti.

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

- Accumulo di energia elettrica
- Biomasse
- Celle a combustibile
- Combustibili fossili e CCS
- Correnti marine
- Risparmio energia elettrica
- Fotovoltaico
- Nucleare da fissione
- Nucleare da fusione
- Eventi
- Pubblicazioni
- Partner
- Link utili

Abbreviazioni ed acronimi

AIT	Austrian Institute of Technology
AMI	Advanced Metering Infrastructure
ASN	Agenzia sulla Sicurezza Nucleare
AV	Analisi del Valore
AF	Analisi Esigenziale e Funzionale
BA	Broader Approach
BEMS	Building Energy Management System
BP	Blackplate
BPS	Bypass Switch
BWR	Boiling Water Reactor
CAN	Controller Area Network
CIRTEN	Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare
CS	Central Solenoid
CTL	Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica
CRIET	Centro di Ricerca Interuniversitario in Economia del Territorio
DALI	Digital Addressable Lighting Interface
DB	DataBase
DBMS	DataBase Management System
DEWS	Centro di Eccellenza Design Methodologies for Embedded controllers, Wireless interconnect and System-on-chip
DIAMEX	DIAMide EXtraction
DLMS	Device Language Message Specification
DP	Doppio Pancake
dpa	Displacement per atom
DPS	Database Presenze di Stanza
EERA	European Energy Research Alliance
EII	European Industrial Initiative
ENSREG	European Nuclear Safety REgulatory Group
EPR	European Pressurized Reactor
EURATOM	European Atomic Energy Community
EVEDA	Engineering Validation and Engineering Design Activities
F4E	Agenzia Europea Fusion for Energy
FEM	Finite Element Method
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (D)
GPS	Global Positioning System
GPRS	General Packet Radio Service
GPT	Generalized Perturbation Methods
GS	Grounding Switch
GSM	Global System for Mobile communications
GUI	Graphical user interface
IBN	Interactive Building Network
ICT	information and Communication Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
I&C	Instrumentation and Control systems
IFERC	International Fusion Energy Research Center
IFMIF	International Fusion Materials Irradiation Facility
IFPE	International Fuel Performance Experiments
IFR	Integral Fast Reactor
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor
IP	Piattaforma Integrata
IRIS	International Reactor Innovative an Secure
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (F)
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JET	Joint European Torus
JT-60SA	JAEA Tokamak 60 Super Advanced
LED	Light Emitting Diode
LENA	Laboratorio Energia Nucleare Applicata
LIFUS	Lithium FUSion

LOCA	Loss of Coolant Accident
MASLWR	Multi-Application, Small, Light Water Reactor
MOX	Combustibile a ossidi misti
MS	Making Switch
NISA	Nuclear and Industrial Safety Agency (J)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PA	Pubblica Amministrazione
PAR	Piano Annuale di Realizzazione
PIR	Passive Infrared sensor
PLC	Power Line Communication
PRIC	Piano Regolatore dell'Illuminazione Comunale
PSA	Probabilistic Safety Assessment
PUREX	Plutonium Uranium Extraction
PWR	Pressurized Water Reactors
QDS	Quick Disconnecting System
RIA	Reactivity Initiated Accident
RNA	Reti Neurali Artificiali
SANEX	Selective ActiNide EXtraction
SARNET	Severe Accident Research NETWORK of Excellence
SCADA	Supervisor Control and Data Acquisition
SCB	Static Circuit Breaker
SET Plan	Strategic Energy Technology Plan
SMR	Small Medium Reactor
SPND	Self Powered Neutron Detectors
SNU	Switching Network Unit
SS	Fast SNU Switch
SVEM	Struttura Viaria Ecosostenibile Multifunzionale
TA	Target Assembly
TF	Toroidal Field
TIR	Tasso interno di rendimento
TRUEX	TRans Uranium EXtraction
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
UNEX	UNiversal EXtraction
UREX	URanium EXtraction
USNRC	United States Nuclear Regulatory Commission
VAN	Valore Attuale Netto

Edito dall'ENEA
Unità Comunicazione
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
www.enea.it

Copertina: Bruno Giovannetti

Aprile 2012