

**ENEA**

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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

Accordo di Programma MSE/ENEA 2009-11

---

# RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sintesi dei risultati del secondo anno di attività

---



Ottobre 2011

Edito dall'ENEA - Unità Comunicazione  
Revisione testi: Antonino Dattola  
Progettazione e realizzazione grafica: Cristina Lanari  
Stampato presso il Laboratorio Tecnografico ENEA - Frascati  
Finito di stampare nel mese di novembre 2011



## **AREA GOVERNO, GESTIONE E SVILUPPO DEL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE** 33

1. Fissione nucleare - Metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata 7
2. Fusione nucleare - Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER, denominate Broader Approach 11

## **AREA RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA**

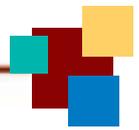
3. Tecnologie smart per l'integrazione della illuminazione pubblica con altre reti di servizi energetici e loro ottimizzazione 17



**AREA**

**GOVERNO, GESTIONE E SVILUPPO DEL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE**





## Fissione nucleare Metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata

### Scenario di riferimento

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 sono state pertanto centrate sulle tematiche che hanno portato a definire tali reattori come innovativi o evolutivi, anche alla luce delle raccomandazioni degli stakeholders 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 dell'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

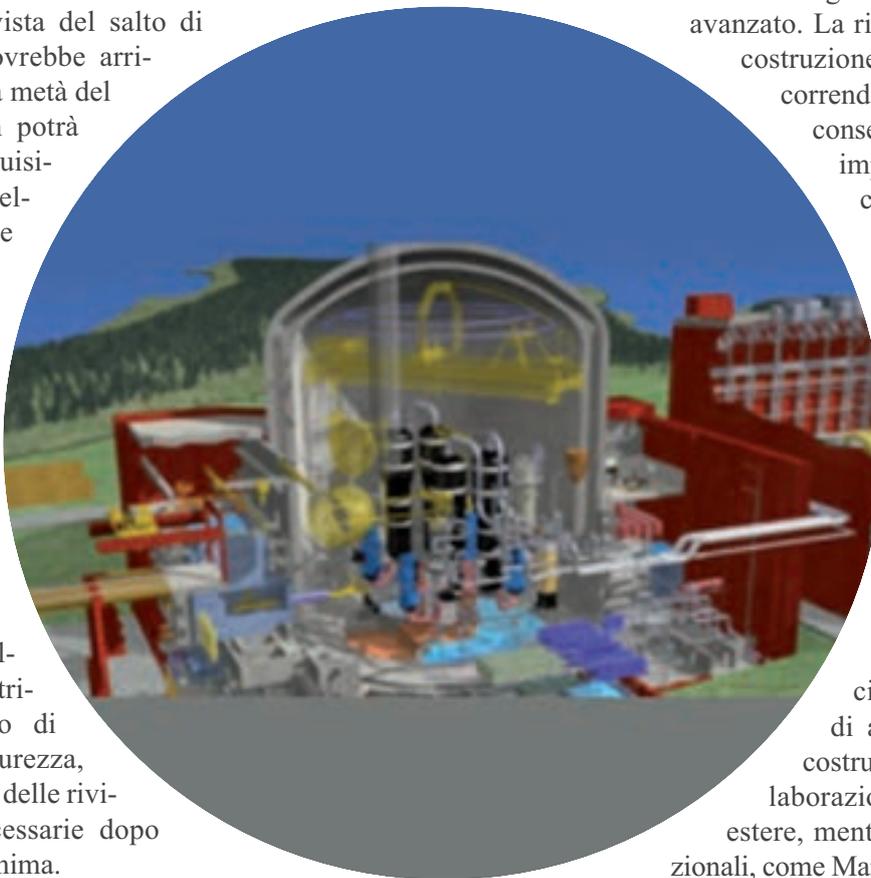
natura interna (p.e. fusione del nocciolo e relativi problemi di dispersione e raffreddamento), sia provenienti dall'esterno dell'impianto (p.e. impatto di agenti esterni sull'edificio di contenimento). Ciò ha portato da un lato a importanti semplificazioni d'impianto, che parallelamente consentono tempi 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.

È importante sottolineare che tali tecnologie vedono spesso coinvolte competenze e industrie manifatturiere italiane; per esempio, Ansaldo Nucleare del gruppo Finmeccanica partecipa alla realizzazione di alcuni PWR oggi in costruzione in Cina in collaborazione con industrie estere, mentre altre industrie nazionali, come Mangiarotti Nuclear, IBF ecc., forniscono componenti importanti e piping di rilevante impegno tecnologico alle installazioni nucleari in corso.

### Obiettivi

L'obiettivo del progetto è quello di accrescere competenze e capacità tecniche sui reattori ad acqua pressurizzata di generazione evolutiva attualmente disponibili nel mercato mondiale, con particolare attenzione agli



aspetti legati alla sicurezza e alla risposta alle specifiche di progetto; lo scopo finale è quello di svolgere un ruolo di supporto alle Istituzioni pubbliche, in particolare MSE e ASN, 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.

Le attività svolte riguardano:

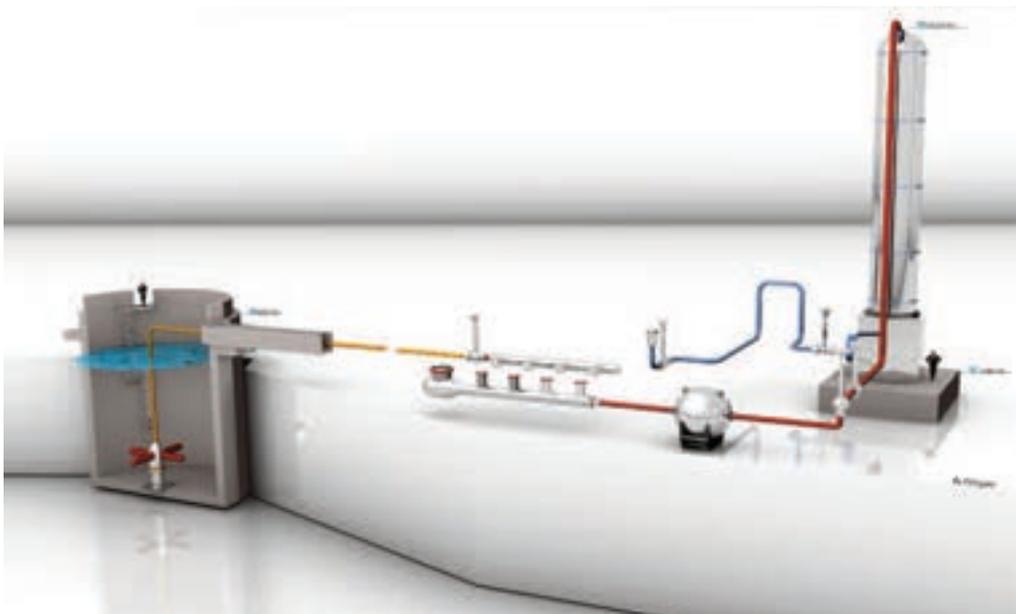
- analisi delle nuove soluzioni impiantistiche relativamente a sistemi attivi e passivi di sicurezza e nuove soluzioni costruttive, tenendo conto della normativa recente in materia di realizzazioni nucleari;
- studio ed analisi di cicli di combustibile (aperti/chiusi) in relazione all'elevato burn-up previsto per i nuovi reattori già commercializzati e alla riduzione dei prodotti di fissione a lunga vita;
- attività di ricerca fondamentale e sperimentazione in laboratorio di tecniche avanzate di rivelazione neutronica;
- analisi della strumentazione di nuova concezione per misure neutroniche fini nel nocciolo e dei sistemi computerizzati per la supervisione, controllo e protezione d'impianto e relativi interfacciamenti tra le suddette funzioni;
- analisi delle tecniche e degli strumenti di calcolo più efficaci per l'analisi di possibili transitori di natura sia operativa che incidentale, per mezzo di indagini multifisica di neutronica, termoidraulica e termomeccanica tra loro accoppiate;
- analisi dei fenomeni osservabili in caso di situazione transitoria dell'impianto estesa oltre i limiti deterministici di progetto, facendo riferimento anche a dati sperimentali disponibili e a valutazioni con l'uso di codici validati a livello internazionale.

Il prodotto finale è costituito principalmente da studi e analisi, supportati da specifiche attività sperimentali.

### **Componenti e sistemi con funzioni di sicurezza e di gestione dell'impianto**

Sono stati studiati e predisposti test su componenti di particolare rilevanza per standard di affidabilità in termini di comportamento in fase di intervento, come valvole di non ritorno e valvole di depressurizzazione comandata e automatica. Sono state inoltre sviluppate analisi del comportamento in esercizio di nuovi componenti integrati. Le attività sono state 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 nei relativi codici di calcolo, quali ASTEC e MELCOR. Inoltre sono stati effettuati studi per lo sviluppo di metodologie di qualificazione dei materiali e dei procedimenti di saldatura per componenti di centrali nucleari armonizzate agli standard internazionali (ASME, ISO) e a codici nucleari specifici (RCC-MX). Per dimostrare la possibilità di estendere la lifetime del vessel rispetto ai limiti attuali (con implicazioni sulle procedure di licensing), sono state effettuate analisi termomeccaniche, mediante il codice CAST3M, con validazione nell'ambito di progetti europei (NESC7), dell'influenza del fenomeno WPS (Warm Pre-Stressing) sui materiali strutturali e sul vessel, che comporta un incremento della resistenza a frattura fragile.

Per quanto riguarda i sistemi di sicurezza attivi e passivi, è stato impostato uno studio esaustivo volto a garantire sia l'integrità del nocciolo sia il raffreddamento e l'integrità del contenimento, con lo scopo di indagare e valutare le caratteristiche di maggior sicurezza intrinseca dei reattori in fase di costruzione. Tali attività si sono avvalse di tecniche di modellazione di sistemi pas-



*Schema di progetto dell'impianto VAPORE (C.R. Casaccia dell'ENEA) impiegabile per prove termomeccaniche e fluidodinamiche su componenti e sistemi di impianti nucleari e convenzionali*

sivi e attivi per il raffreddamento del contenimento e per la rimozione del calore residuo.

**Studi sul combustibile e materiali strutturali**

Sono stati sviluppati metodi di progettazione di combustibili ad alto burn-up per i reattori di terza generazione (UOX alto arricchimento, MOX, Inert Matrix), mirati all’analisi di prestazioni e comportamento termomeccanico in reattore.

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. Particolare attenzione è stata rivolta ai processi che sembrano maggiormente promettenti per sostituire l’originale metodo PUREX. Presso il Centro Ricerche Casaccia dell’ENEA è in corso di allestimento un locale attrezzato per avviare prove di ritrattamento, mentre è stato predisposto il progetto di massima delle utilities e degli interventi infrastrutturali necessari che permettano di lavorare in ambiente ostile (alte dosi e alta attività).

È stata condotta un’attività di ricerca fondamentale con sperimentazione in laboratorio su nuovi processi finalizzati alla trasmutazione degli elementi radioattivi a lunga vita. È stata inoltre studiata la fattibilità per la realizzazione di nuovi rivelatori per sorgenti neutroniche pulsate anisotrope e a spettro variabile. A tal fine, sono in corso esperimenti che mirano a verificare alcuni processi di trasmutazione che potrebbero affiancarsi ai metodi di ritrattamento tradizionali del combustibile esausto. Tali esperimenti sono svolti in collaborazione

tra il Centro Ricerche Casaccia dell’ENEA e l’Università Politecnica delle Marche.

**Studio sulla strumentazione di nocciolo e simulazione**

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

È stata condotta un’analisi della nuova strumentazione in core per la determinazione fine del flusso neutronico all’interno del reattore e sono stati realizzati prototipi, che dovranno essere validati e testati anche con utilizzo di reattori di ricerca come TRIGA e TAPIRO (presenti nel centro di ricerche della Casaccia dell’ENEA). Nuove tipologie di rivelatori di neutroni ad alto flusso per reattori PWR sono stati progettati anche attraverso l’uso di codici avanzati di modellazione di nocciolo.

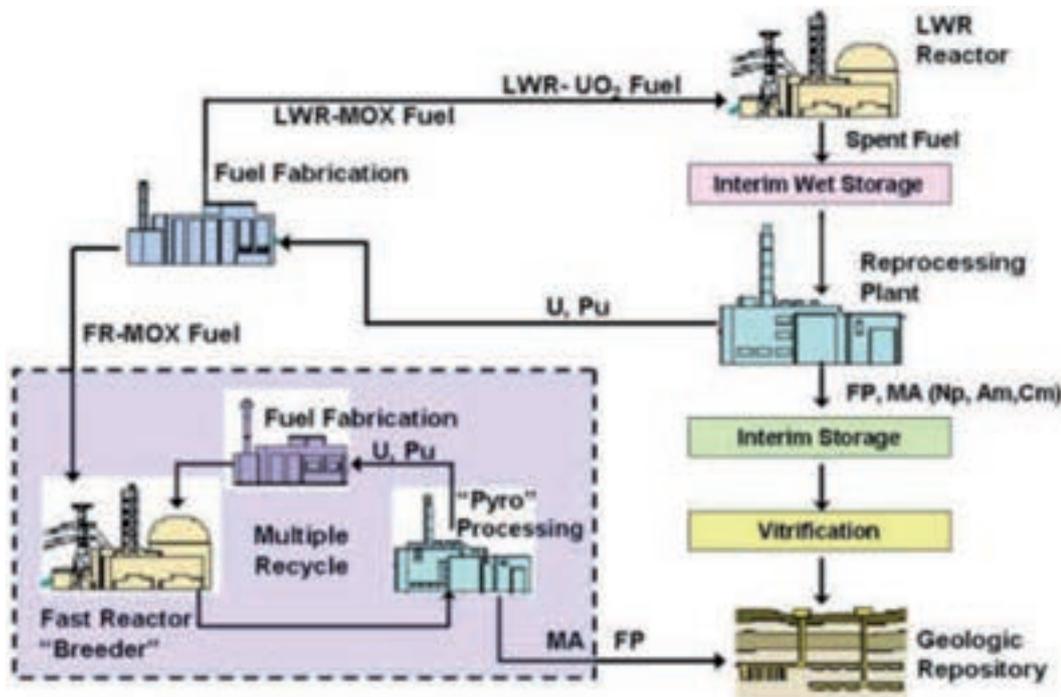
Per quanto riguarda il sistema di comando e controllo dell’impianto, sono state analizzate le prestazioni dei sistemi di supervisione, controllo e protezione di reattori di terza generazione, con particolare riguardo alla loro interconnessione ai fini della garanzia di corretto funzionamento sia in fase di normale esercizio sia in fase di intervento di emergenza.

È stata effettuata una caratterizzazione descrittiva e analitica dei principali sistemi di supervisione, controllo e protezione nei reattori nucleari ad acqua pressurizzata di generazione evolutiva. Tali sistemi di controllo sono stati implementati nel linguaggio di programmazione a blocchi Simulink, tramite il quale sono state condotte delle analisi delle loro prestazioni negli intervalli di normale funzionamento dell’impianto, con particolare attenzione allo studio dei transitori tra differenti punti di

lavoro della fase operativa.

Da un punto di vista applicativo è stata approfondita la logica di regolazione e protezione di pressione e livello del pressurizzatore e dello Steam Dump System. Tale logica è stata codificata in maniera dettagliata in una routine Fortran e parallelamente in versione semplificata tramite logica RELAP5.

Inoltre sono state studiate in modo compa-



*Schema di principio delle varie fasi del ciclo del combustibile per un impianto nucleare ad acqua leggera*

rato differenti soluzioni di controllori esistenti per i sottosistemi di supervisione, controllo e protezione, con particolare enfasi sugli aspetti di robustezza a variazioni parametriche e a guasti.

Infine, è stato effettuato uno studio analitico delle prestazioni dei sistemi di controllo in presenza di guasti e/o incidenti di riferimento, con la determinazione delle azioni necessarie per riconfigurare il controllo in modo da assicurare le specifiche minime di sicurezza.

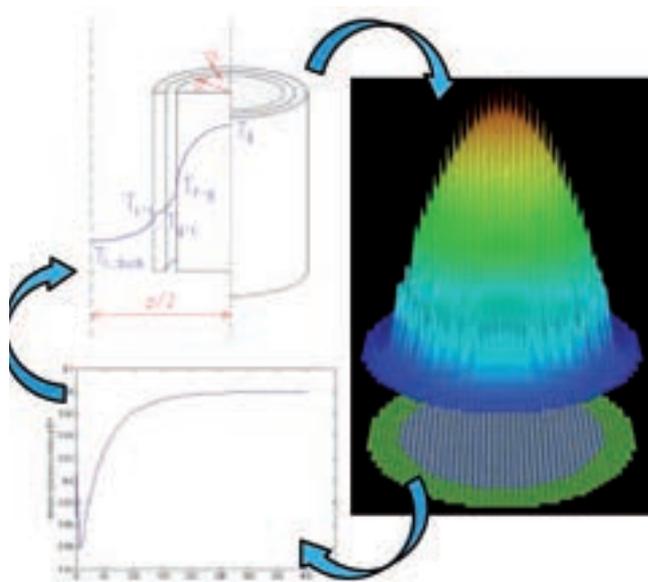
I modelli sviluppati hanno concorso alla realizzazione di un sistema (hardware e software) di simulazione del comportamento dinamico del sistema di controllo di un reattore ad acqua pressurizzata di generazione evolutiva, che servirà come punto di partenza per la realizzazione di un più completo simulatore ingegneristico.

### **Tecniche e strumenti di calcolo per la dinamica di nocciolo di un PWR**

L'attività è consistita nello studio dei modelli di analisi per la dinamica spaziale di nocciolo. In particolare, dopo un'attenta valutazione dello stato dell'arte dei moduli di analisi neutronica, termoidraulica e termomeccanica e del loro accoppiamento, è stato definito un modello di riferimento per l'analisi dinamica spaziale del nocciolo di un reattore ad acqua pressurizzata e ne sono stati studiati i codici esistenti utilizzabili a supporto.

In parallelo, sono state condotte attività di simulazione per la valutazione dell'effetto di un pesante riflettore di acciaio sull'attenuazione del flusso di neutroni che fuoriescono dal vessel in pressione che racchiude il noc-

ciolo di un reattore ad acqua pressurizzata di ultima generazione. Queste analisi hanno permesso di determinare l'intervallo di efficienza dei rivelatori neutronici posti all'esterno del nocciolo - dunque a valle del riflettore - in funzione dell'intensità del flusso neutronico proveniente dal nocciolo. La conoscenza di queste informazioni, insieme alla conoscenza delle caratteristiche degli analoghi rivelatori posti internamente al sistema, consente infatti agli operatori un maggior livello di confidenza ai fini del controllo del reattore anche durante transitori caratterizzati da ampie escursioni di potenza.



*Esempio di simulazione della densità neutronica relativa in funzione del tempo per un nocciolo di reattore ad acqua pressurizzata*

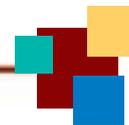


*Sala di controllo di un reattore ad acqua pressurizzata di terza generazione avanzata*

**Area di ricerca:** Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

**Progetto 1.3.2.a:** Fissione nucleare: Metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata

**Referente:** M. Sepielli, massimo.sepielli@enea.it



## Fusione nucleare Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER, denominate Broader Approach

### Scenario di riferimento

La fusione termonucleare controllata è oggi considerata una 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).

Il reattore a fusione ITER dovrà produrre 500 MW di potenza e dimostrare la possibilità di mantenere la reazione per un tempo sufficientemente lungo. L'impianto fornirà gli elementi utili per la progettazione di DEMO.

Per sfruttare al meglio la sperimentazione di ITER è necessario prevedere delle attività complementari di fisica e tecnologia ed in quest'ottica l'Europa e il Giappone, in occasione delle negoziazioni per la scelta del sito di ITER, hanno deciso di avviare in parallelo un programma denominato Broader Approach (BA) da affiancare ad ITER.

In particolare le attività del BA includono la costruzione di una macchina Tokamak superconduttrice JT-60SA, la realizzazione di una facility IFMIF per lo studio del danneggiamento dei materiali sottoposti ad un flusso di neutroni di alta energia e la creazione dell'International Fusion Energy Research Center (IFERC) che include un centro di supercalcolo e lo sviluppo di materiali avanzati come il SiC/SiC.

### Costruzione Magnete Tokamak JT-60SA

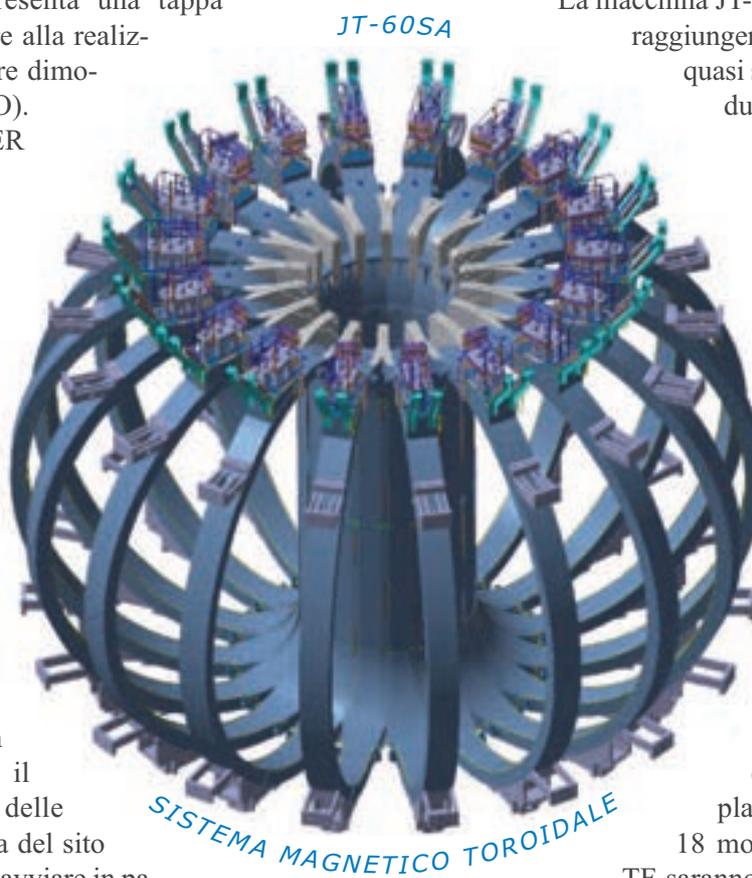
JT-60SA è un Tokamak superconduttore di raggio maggiore di circa 3 m, in grado di confinare plasma di deuterio con una corrente massima di 5,5 MA, con singolo o doppio nullo. Il Tokamak JT-60SA sarà installato a Naka nella Torus Hall che attualmente ospita il Tokamak JT-60U.

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

Il sistema magnetico di JT-60SA è costituito da tre sotto sistemi: i 18 magneti superconduttori (NbTi) di campo toroidale (TF); i 4 moduli che costituiscono il solenoide centrale (CS) in Nb<sub>3</sub>Sn necessario per indurre la corrente nel plasma, i 6 magneti in NbTi che generano il campo poloidale necessario per stabilizzare il plasma (EF). In particolare, i

18 moduli di magnete toroidale TF saranno di forma a D avvolti con

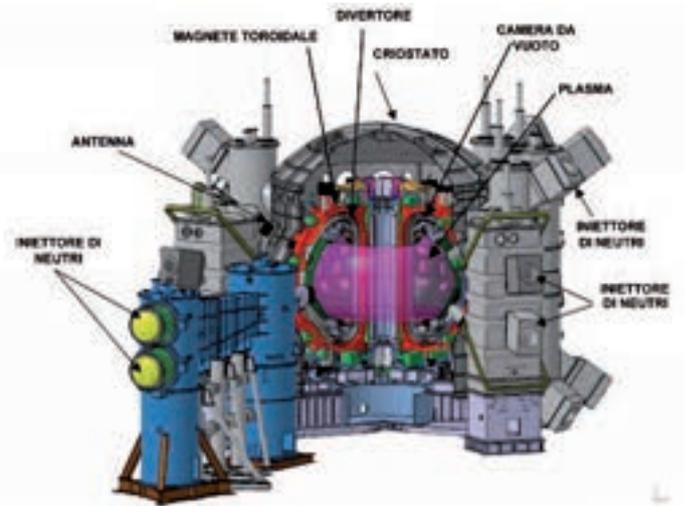
un cavo in NbTi, raffreddato da un flusso forzato di elio supercritico alla temperatura di 4,4 gradi Kelvin. Dei 18 moduli TF che costituiscono il magnete, 9 saranno realizzati dall'ENEA e 9 dal CEA Francese. Ciascun avvolgimento della bobina è formato da 6 doppi pancake collegati in serie da giunti 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. 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 toroidale forniranno il supporto meccanico per tutto il sistema magnetico di JT-60SA.



Vista della macchina tokamak JT-60SA

Parametri operativi di JT60SA

Corrente di plasma	5,5 MA/3,5MA
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 <sup>2</sup>

Caratteristiche bobina toroidale

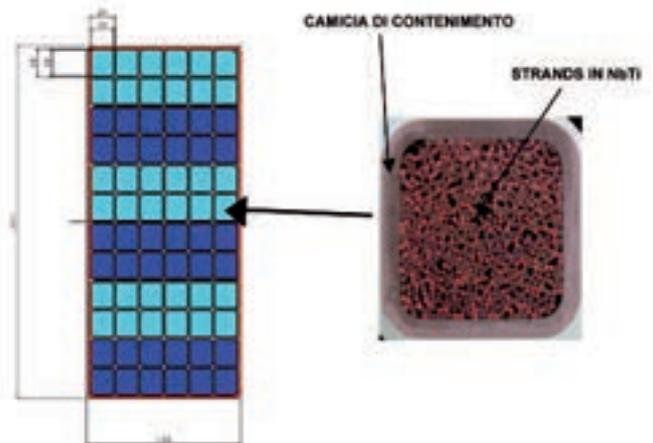
Massimo campo sul conduttore della bobina	5,65 T
Corrente nel conduttore	25,7 kA
Numero bobine toroidali	18
Peso totale bobine toroidali	~370 t
Numero di spire bobina	72
Numero di strati	6
Portata totale dell'elio di raffreddamento	48 g/s
Temperatura elio	4,4 K



Vista della bobina toroidale di JT-60SA



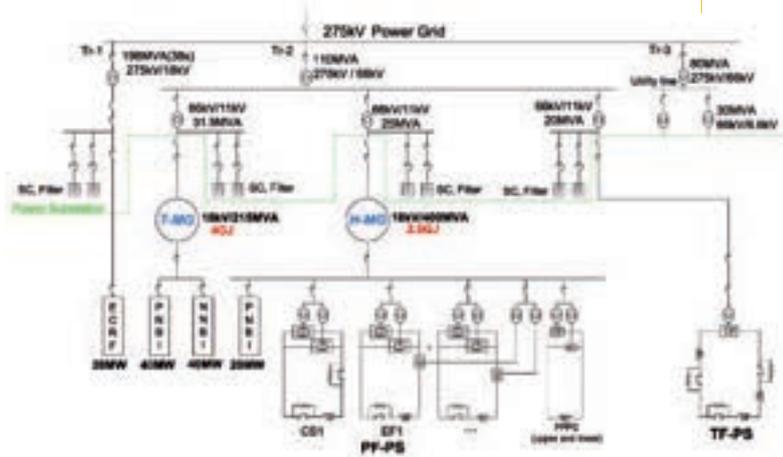
Modello del sistema magnetico in 3D per analisi strutturali



Sezione dell'avvolgimento della bobina toroidale di JT-60SA

## Alimentazione elettrica della macchina JT-60SA

Le alimentazioni elettriche di tutto il sistema magnetico di JT-60SA, per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente con relativi interruttori più quattro trasformatori, quattro sistemi di interruzione della corrente continua (SNU - Switching Network Unit) con inserzione di un sistema variabile di resistenza. Tali sistemi richiedono una progettazione specifica e sono di dimensioni e caratteristiche tali da suscitare 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.



### Sistema di alimentazione AC/DC per JT-60SA

#### IFMIF e IFERC

La fusione termonucleare richiede resistenza ad alte temperature (fino ad 800 °C) ed ad alti flussi di neutroni da 14 MeV con danneggiamenti quantificabili in 50 dpa. La facility IFMIF è costituita da 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) di litio fuso in circolazione forzata ad alta velocità.

Le attività di ricerca e sviluppo nell'ambito dei programmi IFMIF-EVEDA e IFERC richiedono lo sviluppo di competenze e di applicazioni innovative nel campo dei metalli liquidi, in particolare per gli aspetti legati alla purificazione e alla corrosione/erosione del litio liquido, della manutenzione remota, dello sviluppo e caratterizzazione di materiali compositi ceramici in matrice e fibra di silicio (SiC/SiC). In particolare le attività relative ai metalli liquidi e alla manutenzione remota potranno usufruire degli impianti presenti presso il Centro ENEA del Brasimone.

Una componente essenziale della progettazione è l'analisi delle sollecitazioni termomeccaniche conseguenti all'esposizione neutronica. Nel campo dei compositi ce-

ramici, grazie anche alla collaborazione in atto con la società partecipata FN Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, si hanno dotazioni impiantistiche di grande rilievo come il sistema di CVI (Chemical Vacuum Infiltration) per la realizzazione di componenti di carburo di silicio composito (SiC/SiC).

## Obiettivi

Scopo dell'attività è di ottemperare agli obblighi assunti dal nostro Paese in ambito Europeo, con un impegno nel settore della fusione termonucleare e in particolare nelle attività del "Broader Approach". L'Italia si è impegnata a contribuire allo sviluppo del Programma Broader Approach, affidando ad ENEA la costruzione, in collaborazione col suo omologo francese CEA, del magnete superconduttore di JT-60SA con incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche.

L'ENEA inoltre collabora alla implementazione dell'impianto EVEDA Loop in costruzione ad Oarai (Giappone) finalizzando la campagna sperimentale per testare e validare il comportamento termo fluido dinamico del Target per IFMIF, verificare i fenomeni di corrosione da litio, qualificare i sistemi di purificazione per la rimozione delle principali impurità del litio (idrogeno, ossigeno, carbonio e azoto) e qualificare i sistemi di misura delle concentrazioni delle impurità su indicate.

## Risultati

### Macchina JT-60SA

La macchina JT-60SA sarà il più grande tokamak superconduttore ad essere costruito prima della macchina ITER. La sua progettazione ha richiesto sofisticate competenze specialistiche.

L'analisi di riscaldamento nucleare, flusso neutronico e dosi all'isolante è stata condotta dall'ENEA utilizzando un codice Monte Carlo MCNP-5 con libreria FENDL-2. È stato usato un modello in 3D di un settore di 20° della macchina. I calcoli sono stati effettuati considerando una sorgente di plasma estesa con un'emissione di neutroni prodotti dalla reazione D-D ( $E=2,45$  MeV) di  $1,5 \times 10^{17}$  n/s.

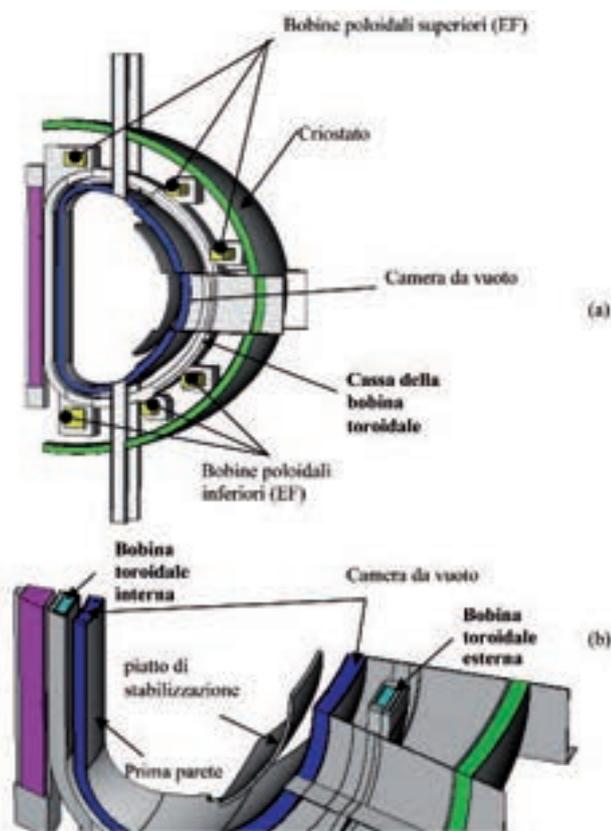
I profili radiali si riferiscono ai settori sul piano equatoriale. I valori calcolati sono stati utilizzati per effettuare le analisi termo-idrauliche e il dimensionamento dell'impianto criogenico.

Considerando un margine di sicurezza di 1,5, la potenza totale che deve essere asportata dall'elio è 7,98 kW di cui 3,01 kW sulla bobina, 4,7 kW sulla struttura di acciaio e 0,27 kW sull'isolante.

La dose prevista sull'isolante a fine vita della macchina (10 anni di operazioni) è talmente bassa (<20 kGy assumendo un margine di sicurezza di 1,8) da escludere la sostituzione del componente per danno indotto dalle radiazioni.

L'analisi termoidraulica della bobina TF ha permesso di verificare l'esistenza di un margine di temperatura di 1,2 gradi Kelvin. L'analisi è stata condotta utilizzando un codice ad elementi finiti unidimensionale (Gandalf 2.2) in grado di simulare contemporaneamente i fenomeni idraulici, termici ed elettrici. I canali di raffreddamento derivati da questa progettazione sono impiegati nelle sole fasi di raffreddamento iniziale o nei fenomeni di instabilità della bobina denominati quench.

L'ENEA ha inoltre condotto delle analisi per valutare il comportamento delle bobine nei transitori rapidi (quench) indotti durante i test a freddo.



*Modello 3-D MCNP di JT-60SA: (a) modello globale, (b) vista del settore equatoriale*

Un passo importante nella definizione del conduttore da usare per gli avvolgimenti TF è stata la realizzazione di due campioni che sono stati testati in condizioni operative presso SULTAN.

**Area di ricerca:** Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

**Progetto 1.3.2.a:** Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER, denominate Broader Approach

**Referente:** A. Pizzuto, [aldo.pizzuto@enea.it](mailto:aldo.pizzuto@enea.it); A. Cucchiari, [antonio.cucchiari@enea.it](mailto:antonio.cucchiari@enea.it);

G. Coccoluto, [Giovanni.Coccoluto@enea.it](mailto:Giovanni.Coccoluto@enea.it); P. Agostini, [Pietro.agostini@enea.it](mailto:Pietro.agostini@enea.it);

S. Tosti, [Silvano.tosti@enea.it](mailto:Silvano.tosti@enea.it)



*Preparazione di campioni prima della spedizione a SULTAN. In primo piano il cosiddetto "hair-pin joint" sviluppato da ENEA per questi test*

L'analisi strutturale è stata eseguita con il codice di calcolo ANSYS su un modello di bobina toroidale in 3D sollecitata da carichi elettromagnetici prodotti durante lo scenario di riferimento. Nell'isolamento di spira si raggiunge un valore di taglio di 18 MPa; la sollecitazione di taglio sull'isolamento verso massa mostra un picco di 10 MPa. Entrambi i valori di taglio sono accettabili. La distribuzione delle sollecitazioni nella parte strutturale della bobina raggiunge un picco di circa 400 MPa nella gamba interna; valore accettabile nel caso di AISI 316. La deformazione della bobina assume una forma ad S e raggiunge un massimo di circa 20 mm nella parte esterna, vicino ai port della camera da vuoto.

#### IFERC

Nell'ambito del progetto IFERC sono state realizzate misure di conducibilità termica su campioni di SiC/SiC in configurazione 2D e 3D.

È in via di realizzazione un apparato sperimentale in per prove di erosione-corrosione di di SiC/SiC in litio-piombo.

**AREA**

**RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA**





## Tecnologie "smart" per l'integrazione della illuminazione pubblica con altre reti di servizi energetici e loro ottimizzazione

### Scenario di riferimento

Uno dei riferimenti più significativi è il SET PLAN europeo (documento SEC(2009) 1295 della Commissione Europea) secondo il quale "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 e 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 otto 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 fondamentali che fanno parte del percorso di attuazione del SET PLAN, la "Smart City European Industrial Initiative" ed il Joint Program su "Smart City" della EERA (European Energy Research Alliance) che vedranno lo sviluppo delle loro attività nel prossimo anno coinvolgendo 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 (Urban Energy Networks) in cui sono organizzate le attività europee. A fronte della notevole e crescente attenzione internazionale, stanno iniziando a svilupparsi progetti pilota di varia natura.



In Italia esistono esperienze separate nei vari settori citati (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.

### Obiettivi

L'obiettivo finale della attività consiste nello sviluppo di una serie di tecnologie ICT 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. L'integrazione di informazioni provenienti da sensori di varia natura in una 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. Questo rende l'innovazione molto più appetibile (minori consumi a costi di investimento più bassi) per la costruzione delle cosiddette "Smart Cities". 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, mobilità elettrica e la mobilità pubblica) e la gestione energetica di edifici.

Gli obiettivi intermedi, utili a definire l'intero sistema integrato, prevedono:

- la progettazione della architettura funzionale per una piattaforma integrata per la Smart City e la realizzazione di un frame-work software prototipale;
- lo sviluppo della intelligenza per la Smart Lighting e del sistema sensoriale;
- lo sviluppo del sistema di monitoraggio e gestione della mobilità veicolare;
- lo sviluppo del sistema di predizione ed interazione della rete di edifici;
- la partecipazione ai network europei e l'identificazione di un modello di Smart Town competitivo per applicazioni a breve termine.

A tale scopo vengono sviluppati metodi di rilevazione e modellizzazione della utenza e modelli per l'ottimizzazione della fornitura energetica commisurata dinamicamente alla richiesta (energy on demand: fornire energia solo quando e nella misura in cui serve) che richiede lo sviluppo di una struttura di sensori che possa "misurare" la richiesta di energia in tempo reale, una rete di trasporto dei dati e di sistemi intelligenti che siano in grado di ottimizzare la fornitura, colloquiare con i sistemi di regolazione ed interagire con gli utenti.

## Risultati

La struttura della *Smart Street* con i relativi smart sensor sviluppati (basati su telecamere) sono impiegati per diverse applicazioni che costituiscono gli smart service urbani tra cui il monitoraggio del traffico, la mobilità elettrica, la regolazione della illuminazione e la gestione energetica di reti di edifici.

1. È stata progettata e realizzata in forma prototipale, una **piattaforma ICT multifunzionale per la Smart Town** 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 operano. Tale piattaforma integrata include le funzionalità di raccolta dati dai sensori tramite il sistema della illuminazione pubblica e reti LAN, il trasporto fino ad un server dati e le applicazioni di elaborazione, diagnostica e gestione ottimale adattiva, in riferimento alla gestione della illuminazione pubblica, del monitoraggio della

mobilità, della gestione di una flotta di veicoli elettrici ed ad una rete di edifici.

2. È stata sviluppata una metodologia di **Smart Lighting** comprendente una serie di modelli per l'elaborazione dei dati provenienti dai sistemi sensoriali posizionati sui pali intelligenti, alcune soluzioni e componenti per applicazioni specifiche ed una dimostrazione pilota su scala reale.

In particolare sono stati ottenuti i seguenti risultati:

### Metodologia per lo Smart Lighting

- elaborazione di modelli settimanali (statistici) e orari (predizioni neurali) 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, eventi incidentali o condizioni critiche;
- analisi di correlazione dei punti di rilievo e stima dei profili di utenza sulle porzioni di arco stradale non monitorato;
- determinazione delle potenze di regolazione tramite sistemi di ottimizzazione;
- attuazione delle regolazioni tramite colloquio con il sistema di regolazione dei flussi luminosi.

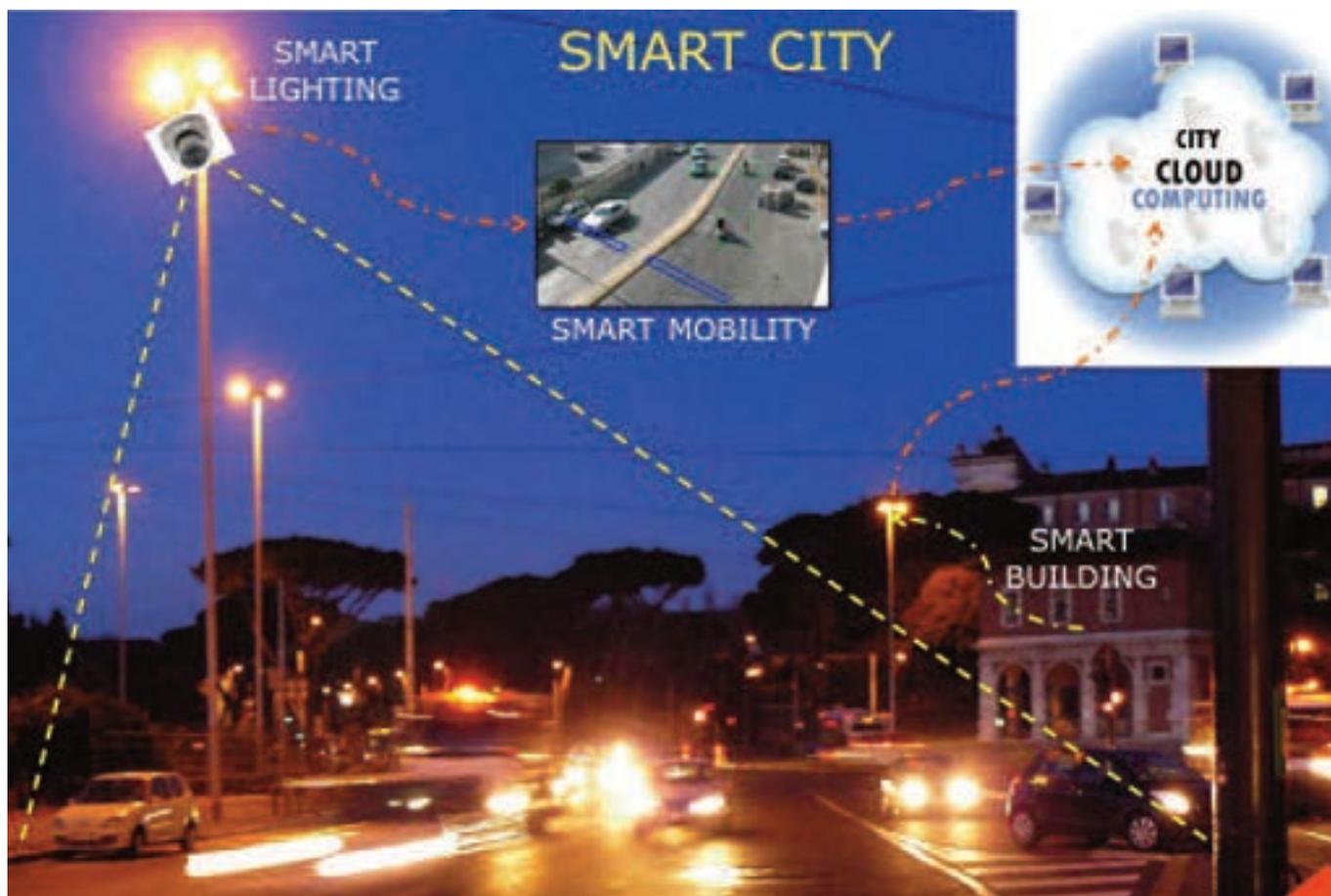
### Lampioni e rotonde intelligenti

- design e progettazione preliminare di un lampione intelligente che integra moduli di illuminazione led, moduli sensoristici e moduli per la trasmissione dati;
- design, progetto e realizzazione prototipale di un sistema per una rotonda intelligente che integra funzionalità di illuminazione led, auto-produzione energetica da fonte solare, sistemi di visione, sistemi di trasmissione dati.

### Dimostrazioni pilota

- realizzazione di un impianto dimostrativo di illuminazione adattiva sulle torri faro del parcheggio del Centro di Ricerca ENEA della Casaccia (25 kW). La potenza luminosa è regolata in base alla analisi dei flussi di veicoli e persone nel parcheggio e sulla strada pubblica adiacente il Centro stesso.
- studio di fattibilità per la realizzazione di uno smart ring di gestione e integrazione dell'illuminazione esterna con altri servizi energetici della lunghezza di circa 1,5 km all'interno del C.R. Casaccia.

3. È stato integrato sulla rete IP un **sistema di monitoraggio e gestione ottimale della mobilità**, con particolare riferimento a flotte di bus elettrici (gestione



*Modello di Smart Street*

percorsi, gestione veicoli e batterie, gestione sistemi di ricarica rapida, mobility on demand, detezione e trattamento delle criticità di traffico).

In particolare sono stati conseguiti i seguenti risultati:

*Sistema di comunicazione veicolo-rete*

- realizzazione prototipale di un sistema di bordo veicolo per la comunicazione verso un sistema di gestione di veicoli elettrici; il sistema trasmette su due direttrici diverse: verso il palo intelligente (livello locale) e verso la piattaforma integrata dove è allocato il sistema di gestione della mobilità on-demand (livello centrale);

*Sistema monitoraggio e modellistica del traffico*

- sviluppo di un software per il rilevamento dei flussi veicolari da telecamere installate sui pali intelligenti.
- studio e sviluppo di un sistema prototipale di simulazione e previsione a breve termine dello stato del traffico veicolare sulle arterie stradali urbane in grado di operare in tempo reale a partire dai dati rilevati da una rete diffusa di sensori di traffico posizionati sui pali per l'illuminazione stradale e/o degli impianti semaforici.

*Dimostrazione sperimentale*

- realizzazione dimostrativa pilota presso il C.R. Casaccia con cicli di percorso di minibus elettrici; sperimentazione del sistema di dialogo tra mezzo e infrastruttura; sperimentazione del sistema di analisi immagini.

4. È stata sviluppata una metodologia per la **supervisione remota di una rete di edifici residenziali equipaggiati con una piattaforma di domotica energetica** in grado di sfruttare la rete IP come linea digitale capillare per la raccolta dati e l'invio di informazioni verso una vasta rete di edifici residenziali, con l'obiettivo di orientare i cittadini in modo attivo verso il conseguimento di elevati risparmi energetici ed economici nella gestione delle reti energetiche delle proprie abitazioni.

*Metodologia per la diagnostica di reti di edifici residenziali*

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.

In tale ambito sono stati sviluppati i seguenti elementi:

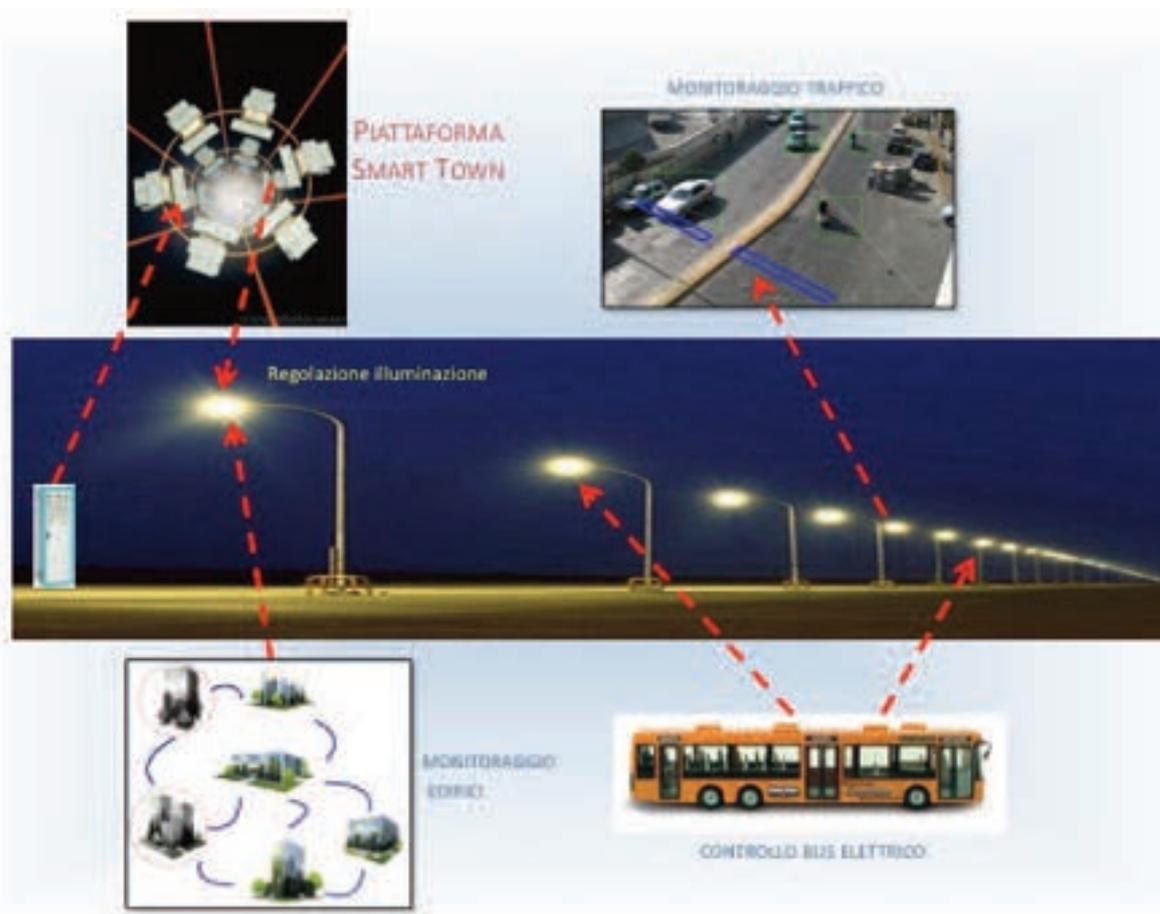
- definizione della piattaforma tecnologica che include la sensoristica, la rete domestica, la trasmissione dati verso il server remoto, il ritorno verso l'utente;
- sviluppo della metodologia di diagnostica e qualificazione su un sistema di simulazione dinamica di eventi critici;
- analisi tecnico-economica di una installazione presso un caso reale.

5. **La partecipazione a network europei** dedicati alla ricerca e alla competitività delle industrie ed in particolare alla costruzione del Joint Program Smart City di EERA ed alla Smart City European Industrial Initiative ha avuto come esito il ruolo di coordinamento dell'ENEA delle attività, a livello nazionale, di EERA Smart City oltre a quello di coordinare una delle quattro aree tematiche (Urban Energy Networks) in cui sono organizzate le attività europee.

**Nell'ambito della identificazione di un modello di smart town da applicare sul territorio** sono state prese in considerazione tre realtà urbane.

I risultati conseguiti sono i seguenti:

- studio di fattibilità tecnico-economica sullo specifico contesto territoriale della provincia di Monza e Brianza (53 Comuni) al fine di delineare una procedura inter-organizzativa che partendo dalla riqualificazione energetica degli impianti IP conduca all'integrazione di tecnologie smart ed alla realizzazione di Smart Street.
- studio di fattibilità tecnico-economica su un'area del quartiere San Paolo di Bari comprensivo della raccolta dati e analisi delle utenze illuminotecniche, del progetto per una architettura di Smart Lighting e per l'integrazione con il Power Park ivi previsto.
- studio di fattibilità per la realizzazione di uno smart ring di gestione e integrazione dell'illuminazione esterna con altri servizi energetici, della lunghezza di circa 4,0 km presso la città di L'Aquila.



*Schema della Smart Street con i servizi smart integrati nel sistema della illuminazione pubblica*

**Area di ricerca:** Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

**Progetto 3.2.1:** Tecnologie "smart" per l'integrazione della illuminazione pubblica con altre reti di servizi energetici e loro ottimizzazione

**Referente:** M. Annunziato, mauro.annunziato@enea.it