"Nel porre mano all'album di famiglia sono inevitabili due atteggiamenti tra loro contrastanti. Da una parte la malinconia per i bei tempi che furono, dall'altra il sano orgoglio della rafforzata consapevolezza di avere radici profonde ed una storia da cui si proviene. Una storia fatta di volti, eventi, successi e qualche rimpianto. Nel porre mano a questa nuova monografia della serie RSEview ci siamo imposti di non cedere mai al primo sentimento e di richiamare con forza il secondo..."

(dall'introduzione di Stefano Besseghini,
Amministratore Delegato RSE)

"La pubblicazione di un volume rappresenta sempre un motivo di soddisfazione. Ma nell'editare Alla radice dell'evoluzione energetica, *si aggiunge qualcos'altro che va aldilà dell'averne curato la confezione. Infatti, nello sfogliare queste pagine si coglie il senso profondo di una Storia che non appartiene solo a ricercatori e laboratori ma a tutto il Paese. Un impegno che ha segnato tappe importanti (anche fondamentali) nel favorire sviluppo economico e benessere sociale. Un motivo per sentirsi orgogliosi del passato e, proprio per questo motivo, più fiduciosi del futuro.*

Editrice Alkes

RSE
Ricerca
Sistema
Energetico

RSE SpA - Ricerca sul Sistema Energetico - sviluppa attività di ricerca nel settore elettro-energetico, con particolare riferimento ai progetti strategici nazionali, di interesse pubblico generale, finanziati con il Fondo per la Ricerca di Sistema. Fa parte del Gruppo GSE SpA, interamente a capitale pubblico.

RSE implementa attività congiunte con il sistema della pubblica amministrazione centrale e locale, con il sistema produttivo, nella sua più ampia articolazione, con le associazioni e i raggruppamenti delle piccole e medie imprese e le associazioni dei consumatori.

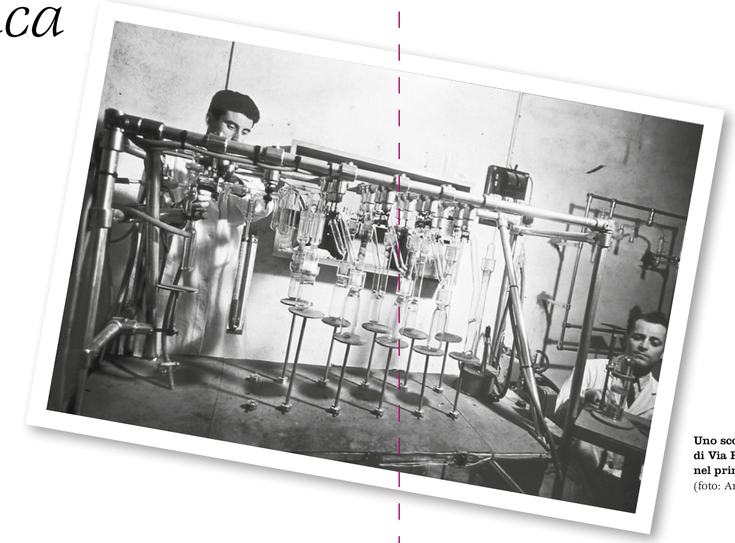
RSE promuove e favorisce lo sviluppo delle professionalità di domani promuovendo tutte le occasioni di supporto allo svolgimento di attività di formazione e divulgazione legate ai temi di ricerca svolti. L'attività di ricerca e sviluppo è realizzata per l´intera filiera elettro-energetica in un´ottica essenzialmente applicativa e sperimentale, assicurando la prosecuzione coerente delle attività di ricerca in corso e lo sviluppo di nuove iniziative, sia per linee interne sia in risposta a sollecitazioni esterne.

RSE dispone di un capitale umano che rappresenta un patrimonio unico di competenze ed esperienze, la cui difesa e sostegno rappresenta una condizione necessaria per consentire lo sviluppo di politiche di innovazione in un settore di enorme rilevanza per il Sistema Paese come quello energetico.

RSEview

RSEview
RIFLESSIONI SULL'ENERGIA

Alla radice dell'evoluzione energetica



Uno scorcio dei laboratori CISE di Via Procaccini a Milano, nel primo Dopoguerra.
(foto: Archivio CISE)

editrice alkes

RSEview

RIFLESSIONI SULL'ENERGIA

Copyright © 2012 **Editrice Alkes**

Autore: Ricerca sul Sistema Energetico - RSE SpA
Impaginazione e editing: Editrice Alkes
Copertina: Fabio Lancini

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta, archiviata, memorizzata o trasmessa in qualsiasi forma o mezzo, se non nei termini previsti dalla legge che tutela i diritti d'autore. L'autorizzazione alla riproduzione dovrà essere richiesta a RSE Via Rubattino 54 - 20134 Milano - Italia

Finito di stampare nel mese di Luglio 2012 presso
Società Cooperativa Sociale Il Melograno Via Raffaello Sanzio 42/44
20021 Cassina Nuova di Bollate (MI)
Prima edizione

ISBN 978-88-907527-0-4

RSEview
RIFLESSIONI SULL'ENERGIA

Alla radice dell'evoluzione energetica

editrice alkes

Credits

COORDINATORE DELLA MONOGRAFIA

Flavio Parozzi. Laureato in Ingegneria Nucleare al Politecnico di Milano nel 1978. La sua esperienza è maturata nelle strutture di ENEL, successivamente di CESI e quindi nelle società pubbliche ERSE e RSE, dove ha sempre svolto ricerche in campo energetico.
La sua attività si è indirizzata in particolare alla progettazione di programmi sperimentali e allo sviluppo di modelli di simulazione per l'analisi delle conseguenze di incidenti gravi, sia negli impianti civili e industriali sia negli impianti nucleari di vario tipo.
Attualmente è responsabile della ricerca di RSE sulla sicurezza delle installazioni energetiche e degli impianti nucleari.

SUPPORTO ALLE RICERCHE DOCUMENTALI

Gianni Pampurini

CONTRIBUTI DI:

Paolo Bonelli, Claudio Bossi, Vittorio Brignoli, Eduardo Caracciolo, Claudio Casale, Silvia Celaschi, Federico Cernuschi, Claudio Cherbaucich, Emanuele Ciapessoni, Giovanni Ciceri, Stefano Concari, Pierangela Cristiani, Letizia De Maria, Michele de Nigris, Giambattista Garbossa, Iva Gianinoni, Walter Grattieri, Antonio Guagliardi, Roberto Guandalini, Salvatore Guastella, Ettore Lembo, Valter Martinotti, Giuseppe Mauri, Guido Mazzà, Luigi Mazzocchi, Massimo Meghella, Roberto Menga, Enrica Micolano, Diana Moneta, Sergio Musazzi, Antonio Negri, Maurizio Notaro, Sergio Pedroni, Giovanni Pirovano, Claudia Rinaldi, Maurizio Riva, Mauro Scagliotti, Gianluca Timò, Giuseppe Torsello, Carmen Valli, Maurizio Verga, Giuliano Vimercati, Claudio Zagano.

RINGRAZIAMENTI

Per la revisione della parte storica viene rivolto un ringraziamento particolare a:

Enrico Cerrai. Tra i primi ricercatori del CISE, di cui è stato direttore e vicepresidente, docente al Politecnico di Milano nel campo delle tecnologie energetiche e nucleari. Ha ricoperto l'incarico di presidente di AEM Milano e oggi presiede la Commissione Energia dell'Ordine degli Ingegneri di Milano e Provincia e l'Associazione culturale CISE2007.

Franco Velonà. Pioniere della produzione di energia nucleare in USA e poi in Italia a partire dalla centrale del Garigliano nel 1962, con l'istituzione dell'ENEL, ha ricoperto posizioni di crescente responsabilità nella Direzione delle Costruzioni, fino alla carica di Vice Direttore Centrale, Vicario del Direttore Centrale. Negli ultimi anni all'Ente è stato Direttore Centrale della Direzione Studi e Ricerche e Presidente del CISE.

Indice

		SOMMARIO	7
		Summary	8
Capitolo	1	**Introduzione**	9
Capitolo	2	Un percorso iniziato nel 1946	11
	2.1	La nascita del CISE	11
	2.2	L'ISMES	15
	2.3	Le origini del CESI	18
	2.4	La ricerca dell'Ente nazionale per l'energia elettrica	21
Capitolo	3	Idraulica e strutture	25
	3.1	Idrologia e idraulica	25
	3.2	Problemi termici nei corpi idrici	28
	3.3	Studi di dam-break	29
	3.4	Sicurezza delle dighe	30
	3.5	Sicurezza degli impianti e delle strutture industriali	31
Capitolo	4	Combustibili fossili	33
	4.1	La simulazione dinamica degli impianti	33
	4.2	Riduzione dell'impatto ambientale	34
	4.3	Cicli combinati	36
	4.4	La cattura della CO_2	37
	4.5	Utilizzo non convenzionale dei combustibili fossili	38
	4.6	Celle a combustibile	40
	4.7	Materiali e corrosione	41
	4.8	La corrosione microbiologica	43
Capitolo	5	Energia nucleare	45
	5.1	Gli anni dell'atomo italiano	45
	5.2	La ricerca per impianti e progetti italiani	46
	5.3	L'evoluzione del nucleare	50
	5.4	Il ruolo di RSE	51

Indice

Capitolo	6	Rinnovabili	55
	6.1	Idroelettrico	55
	6.2	Solare fotovoltaico	57
	6.3	Lo sviluppo del fotovoltaico a concentrazione	60
	6.4	Solare termodinamico	63
	6.5	Eolico	65
	6.6	Biomasse	67
	6.7	Meteorologia per le rinnovabili	70
Capitolo	7	Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica	73
	7.1	La pianificazione delle reti elettriche di trasmissione e distribuzione	73
	7.2	Rete di trasmissione	75
	7.3	Distribuzione in corrente alternata	79
	7.4	Il laboratorio di taratura Accredia	80
	7.5	Microrete di distribuzione in corrente continua	81
	7.6	La superconduttività in RSE	84
Capitolo	8	Strumenti e automazione	89
	8.1	Alla ricerca dell'equilibrio perfetto	89
	8.2	Le smart grid	93
	8.3	Il ruolo delle tecnologie di comunicazione	97
	8.4	Informazioni affidabili: il ruolo della diagnostica	99
Capitolo	9	Tecnologie per l'efficienza energetica	103
	9.1	L'efficienza nei processi produttivi	103
	9.2	La sfida della climatizzazione degli edifici	106
	9.3	La domotica e l'uso razionale dell'energia nelle utenze	107
	9.4	Il settore pubblico: l'illuminazione	109
	9.5	La cogenerazione e i distretti energetici	110
	9.6	Le nuove applicazioni: i veicoli elettrici	111
Capitolo	10	Compatibilità ambientale degli impianti	115
	10.1	Radioecologia e studi ambientali per il comparto delle acque	115
	10.2	Studi ambientali sul comparto atmosfera	119

Sommario

Questo volume non si può definire rigorosamente monografico. In questo significato si intende una trattazione che verte su di un tema specifico, solitamente. Nel nostro caso, i temi trattati sono molteplici, come si vedrà, ma tutti riconducibili ad un'unica matrice richiamata nel titolo di questa opera. Quanto viene elencato nei capitoli ha un'origine lontana, certo, ma che ha saputo alimentare il presente e sicuramente il futuro.

L'attività di RSE, nel Dopoguerra portava un altro nome, non si è mai discostata dall'ambito della ricerca elettro-energetica seguendo con gli anni, ormai oltre mezzo secolo, il corso dell'evoluzione tecnologica e di un'evoluzione storica che ha abbracciato scelte importanti per l'Italia. Senza dimenticare quanto i singoli Stati si siano trovati ad operare in contesti economici e geopolitici sempre più globalizzati e competitivi.

Ecco, quindi, che in queste pagine può essere ripercorsa la storia di un'azienda che ha intrecciato la propria con quella del Paese. Un'azienda che non ha trascurato nessun campo di ricerca e applicazione, anzi coltivandoli senza risparmio di energie culturali, lasciandovi il suo segno.

L'elenco può apparire un po' freddo, come quello della lettura di un indice, ma i contenuti umani e scientifici sono vivi e sintetizzati all'interno di ogni capitolo. Dal nucleare all'idroelettrico, dai combustibili fossili alle rinnovabili. Dalle reti elettriche, con le loro tecnologie più innovative come le smart grid, all'efficienza energetica.

Una ricerca che non si è limitata solo alla messa in opera di conoscenze sperimentate in laboratorio ma si è confrontata sempre di più con una diffusa coscienza della compatibilità ambientale. Pertanto, in ogni capitolo è possibile rintracciare un filo conduttore che spesso collega il passato con le sfide già vinte e da vincere.

Summary

This book cannot be said to be a monograph in the narrow sense. Indeed, a monograph usually revolves around one special topic. This book instead, as you will see, tackles a variety of topics all woven into the same fabric, described in its title. What is from time to time dealt with in its chapters certainly has its roots in a distant past, and yet it bore fruit in the present, and so it will, no doubt, in the future.

The activities of RSE – named differently in the aftermath of war – always remained within the boundaries of research into the fields of electricity and energy, going along, during over 50 years, the evolution of technology and of history alike which provided the background for some very important choices Italy made. Nor should it be forgotten that each Country had to try and fit into increasingly globalized, competitive economic and geopolitical settings.

Hence, these pages retrace the steps of a company whose history is deeply intertwined with that of our country. A company that did not neglect any field of research or application, but devoted, on the contrary, huge cultural efforts to them, leaving its mark.

A list may be seen as something very impersonal, just like reading a table of contents, but chapters will provide a sum of lively human and scientific contents ranging from nuclear energy to hydroelectrics, from fossil fuels to renewables. From cutting edge technologies like smart grids, to energy efficiency.

Such research was not limited to implementing the know how built in the labs, but it was faced more and more frequently with the increasing awareness of environmental compatibility issues. Thus, a *fil rouge* runs through all chapters, linking the past and the challenges that are already won with those that we are still battling to win.

1 Introduzione

Nel porre mano all'album di famiglia sono inevitabili due atteggiamenti tra loro contrastanti. Da una parte la malinconia per i bei tempi che furono, dall'altra il sano orgoglio della rafforzata consapevolezza di avere radici profonde ed una storia da cui si proviene. Una storia fatta di volti, eventi, successi e qualche rimpianto. Nel porre mano a questa nuova monografia della serie *RSEview* ci siamo imposti di non cedere mai al primo sentimento e di richiamare con forza il secondo.

Nella introduzione al primo numero di *RSEview* scrivevo che queste monografie si sarebbero occupate di argomenti rilevanti per il settore energetico da un punto di vista transdisciplinare e con un'attenzione particolare alle interazioni tra il livello tecnico, economico e quello normativo regolatorio.

Anche questo secondo numero rispetta tale impostazione, poiché ritengo necessario consegnare ad una visione unitaria e sintetica un patrimonio informativo che ripercorre quasi cinquant'anni di ricerca nazionale sullo sviluppo del sistema elettrico.

Certo il contesto è profondamente mutato e alla luce di queste mutazioni si ritiene necessario ribadire con forza la necessità di un presidio dei temi della ricerca e dello sviluppo del sistema energetico nazionale. In un periodo pre-liberalizzazione la figura del monopolista ha permesso di avere un governo unitario e strategico degli sforzi di ricerca. In una logica di mercato questo ruolo non può essere frammentato e parcellizzato tra la pluralità di attori che al mercato concorrono con le giuste logiche dettate dal mercato stesso. Proprio la presenza di una pluralità di attori richiede che ne esca rafforzata la funzione di ricerca a carattere unitario e finalizzata al miglioramento del sistema come un bene in sé, composto dalle singole parti ma al tempo stesso attento ad uno sviluppo armonico e "super partes".

È forse superfluo ricordare che l'attività di ricerca ed i risultati che da questa provengono sono un supporto fondamentale allo sviluppo degli stessi modelli di mercato così come un banco di prova ineludibile a supporto degli sforzi legislativi e regolatori.

Al tempo stesso è necessario che chi si occupa di ricerca del sistema energetico abbia un costante ed ampio dominio delle tecnologie che il sistema stesso concorre a determinare. Questo dominio non può che scaturire dalla stretta interazione con gli operatori del settore energetico. Una collaborazione che non può essere episodica e legata ad un semplice *scouting* tecnologico ma che deve "nutrirsi" di un confronto sistematico, di un forte scambio nel merito dei problemi tecnici e scientifici, in buona sostanza di un rapporto di fiducia tra la struttura di ricerca e l'operatore industriale. Questo rapporto è favorito da un posizionamento chiaro del centro di ricerca che possa venire sempre percepito come un partner e non come un prestatore di servizi pur di alto livello.

1 Introduzione

È un cammino non facile, un sottile crinale che deve essere percorso con la consapevolezza di difendere un valore oggettivo per l'intero sistema. Gli strumenti a disposizione si sono rivelati nel tempo validi, come il fondo della Ricerca di Sistema che è in grado di supportare efficacemente questa impostazione. Ed RSE è un interprete credibile anche grazie alla sua storia.

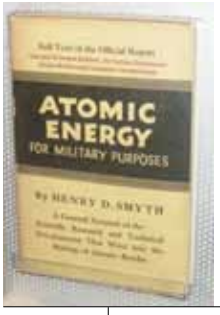
Stefano Besseghini
Amministratore Delegato RSE

2 Un percorso iniziato nel 1946

2.1 LA NASCITA DEL CISE

Nell'agosto del 1945, in un'Italia che stenta a riprendersi dai danni della guerra appena terminata, si apprende dai giornali dell'elevatissima quantità di energia liberata dal nucleo dell'atomo con le bombe che hanno distrutto Hiroshima e Nagasaki.

Lo sforzo scientifico e tecnologico compiuto dagli americani per la realizzazione della bomba non ha precedenti nella storia. Un'enorme curiosità nasce subito in tutto il mondo nei confronti di questa forma di energia, che non è meccanica o chimica ma coinvolge la struttura intima della materia. Appare evidente che l'energia liberabile dai nuclei atomici ha un potenziale impiego industriale, perché da un chilogrammo di uranio naturale si può ottenere un'energia pari ad almeno una decina di tonnellate di carbone o di petrolio.



Il libro diffuso dal Governo degli USA nel 1945, noto come "Rapporto Smyth", è una delle spinte all'avvio delle ricerche nucleari anche in Italia.

Alla fine degli Anni '40, la ricerca italiana, da cui era partito proprio il gruppo diretto da Enrico Fermi, deve però ricominciare da zero. L'Università si trova ancora da sola di fronte all'impresa di dover organizzare i ricercatori con un minimo di materiali e attrezzature di laboratorio. L'industria italiana è uscita dalla guerra ancora più debole e si preoccupa di riattivare la produzione di base, necessaria alla ricostruzione del Paese.

Per avventurarsi in ricerche, il cui obiettivo è ancora gravido di incertezze, servono dei pionieri, attrezzati magari con poco, ma armati di forte preparazione scientifica, grandissima curiosità e spirito di avventura.

Dalle prime pubblicazioni diffuse dagli americani risulta evidente che per scopi pacifici sarebbe possibile una reazione nucleare a catena anche senza ricorrere al processo di arricchimento isotopico dell'uranio. Come? Impiegando sostanze adatte a rallentare opportunamente i neutroni, come il carbonio o l'acqua pesante.

Mario Silvestri agli esordi del CISE.

Il nucleare a scopi pacifici

Siamo ancora nell'autunno 1945. Giuseppe Bolla, docente di Fisica dell'Università di Milano, e i suoi assistenti Giorgio Salvini e Carlo Salvetti si uniscono a Vittorio De Biasi, Guido Molteni e Mario Silvestri della società elettrica milanese Edison per dare ufficialmente vita al primo programma di ricerca italiano dedicato allo sfruttamento dell'energia nucleare per usi pacifici.

Il gruppo di Bolla coinvolge la Cogne e la FIAT, mentre Edison prende contatti con altri produttori di elettricità come Montecatini e la Società Adriatica di Elettricità SADE. Nel novembre 1946, questi

danno vita al Centro Informazioni Studi Esperienze, il CISE, sotto forma di società a responsabilità limitata, senza fini di lucro. A questo centro aderiscono poi anche Montecatini, Pirelli, Falck, Terni e il Comune di Milano.

In pochi mesi sono installati i primi laboratori in un seminterrato nella sede Edison di Via Procaccini a Milano, vengono acquisite le consulenze dei fisici Edoardo Amaldi, Gilberto Bernardini, Enrico Persico e Bruno Ferretti dell'Università di Roma, che avevano lavorato con Fermi, nonché quella del geologo Livio Trevisan. Entrano successivamente al CISE giovani ricercatori, come Ugo Facchini, Emilio Gatti, Elio Germagnoli, Alberto Bracci ed Enrico Cerrai[1 2].

I pionieri di via Procaccini

Le prime ricerche sono focalizzate sugli studi di teoria dei reattori nucleari, sulla metallurgia e la purificazione dell'uranio e sull'estrazione dell'acqua pesante. Un indirizzo di ricerca che consentirebbe la realizzazione di un reattore impiegando l'uranio naturale e senza ricorrere perciò al costosissimo e praticamente inaccessibile processo di arricchimento isotopico messo a punto dagli americani per la realizzazione degli ordigni bellici.

Enrico Cerrai in laboratorio.

I pionieri del CISE devono poi fare i conti con i veti previsti per l'Italia da parte delle nazioni vincitrici della guerra. Si può infatti notare che, al momento della sua costituzione nel 1946, l'acronimo CISE non contiene la parola "nucleare" perché vi è ancora una questione aperta. Secondo la testimonianza del fisico Carlo Salvetti, una prima stesura del Trattato di Pace tra Italia e Paesi Alleati conterrebbe una clausola che vieta all'Italia studi in campo nucleare di qualunque tipo. Nella versione ufficiale del 1947 questa clausola diventa tuttavia più precisa e limita questo divieto alle applicazioni militari, lasciando in tal modo spazio ai ricercatori milanesi. La strada alla ricerca sarà successivamente spianata dai Trattati di Roma del 1957 con i quali è istituita la Comunità Europea dell'Energia Atomica: l'EURATOM.

1 *Autori Vari, "Storia dell'Industria Elettrica in Italia", Editori Laterza & Figli, 1992-1994*
2 *M. Silvestri, "Il costo della menzogna - Italia Nucleare 1945-1968", Einaudi, Torino 1968*

Costruzione dei laboratori del CISE a Segrate all'inizio degli Anni '60.

Al CISE, fin dall'inizio degli Anni '50, pur con risorse neppure lontanamente paragonabili a quelle messe in campo dagli Stati Uniti, sono progettati e costruiti tutti i dispositivi di misura nel campo della fisica nucleare, contatori di ogni tipo, amplificatori e classificatori di impulsi per la determinazione degli spettri di energia.

È indubbiamente da menzionare la misura della sezione d'urto di fissione dell'uranio-235. Dato segreto che i ricercatori del CISE misurano con ottima precisione e pubblicano nel 1950[3].

Fin dagli albori, il centro milanese entra quindi in contatto col mondo scientifico internazionale grazie all'opera di Amaldi che segue con interesse e partecipazione la nascita e i primi passi di quella piccola ma vivace società di ricerca nata a Milano sulle macerie della guerra.

Nel 1955, attraverso la conferenza di Ginevra "Atomi per la Pace", gli americani puntano a favorire le collaborazioni scientifiche in campo nucleare, appoggiando la costituzione dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica, che ha il compito di controllare che i materiali nucleari destinati alla produzione energetica e alle ricerche non siano impiegati per scopi bellici.

Dal 1962, il nucleare per la produzione di energia elettrica, così come il CISE, è acquisito dal neonato ente elettrico di Stato, l'ENEL. Nel giro di un anno e mezzo entrano in esercizio le centrali nucleari di Latina, Garigliano e Trino Vercellese e, con un totale di 600 MW_e, l'Italia è il terzo Paese occidentale per potenza nucleare in esercizio, impiegando tecnologie di origine americana e inglese.

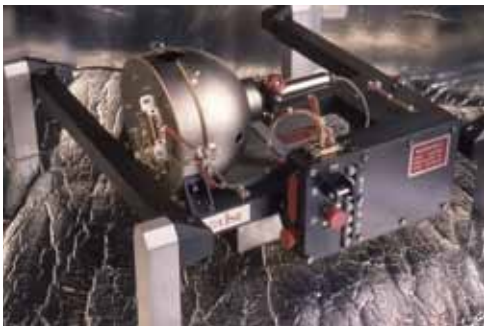
Anche se con la nazionalizzazione del settore elettrico gli obiettivi del CISE vengono maggiormente condizionati dalla politica governativa, le attività del centro milanese funzionali allo sviluppo di capacità industriali autonome continuano con il Progetto CIRENE (CIse REattore a NEbbia), mirante alla costruzione di un reattore completamente italiano, raffreddato con acqua naturale e moderato con acqua pesante. Reattore che sarà concretamente realizzato nei pressi della centrale di Latina, anche se mai avviato a causa della chiusura della produzione nucleare nazionale nel 1987.

3 *U. Facchini, E. Gatti, "Misura della sezione d'urto di fissione dell'Uranio per neutroni termici", Nuovo Cimento vol. 7 n°4, 1950*

Gli anni della nazionalizzazione sono anche gli anni del *boom economico* italiano e i laboratori del CISE, non più relegati nel seminterrato di Via Procaccini a Milano, trovano degna collocazione nella sede di Via Reggio Emilia a Segrate, dove finalmente viene realizzato un ampio centro di ricerca, dotato di officine e laboratori, secondo i modelli delle nazioni più industrializzate.

Le ricadute applicative

Lo sviluppo del sistema elettrico dell'ENEL significa per il CISE un ampliamento delle attività per le centrali nucleari in esercizio o in progetto, e un allargamento anche a tematiche non nucleari. Nel centro di Segrate operano ormai alcune centinaia di persone, di cui oltre la metà sono laureati o diplomati, con una forte presenza di giovani. Le competenze scientifiche sviluppate per il nucleare spaziano nel campo dell'ingegneria energetica, della fisica, della chimica e della strumentazione elettronica, con ricadute applicative molto importanti in campo industriale. La capacità di effettuare innovazione può contare su una struttura in grado sia di creare modelli di calcolo sia di gestire impianti sperimentali e campagne esterne di misura, come menzionato anche nei capitoli specifici di questa pubblicazione.



Camera a Ultra Vuoto realizzata per l'Agenzia Spaziale Europea.

Sono gli anni in cui vengono costruiti grandi impianti termoidraulici sperimentali in supporto ai progetti nucleari in fase di sviluppo in Italia e sono realizzate apparecchiature d'avanguardia come quelle per l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), per l'esperimento UHV Chamber – Camera a Ultra Vuoto per la misurazione in microgravità della forza di adesione tra metalli nella prima missione dello Space Shuttle. Altri esempi, la piramide costruita sull'Himalaya per i test sulle fonti rinnovabili a basso impatto ambientale e il progetto Scattering Thomson dove viene sviluppata una strumentazione con laser di potenza per la misura della temperatura e densità di plasmi prodotti con la macchina FTU (Frascati Tokamak Upgrade) di ENEA, entrata in operazione nel 1989 con l'obiettivo di valutare la possibile applicabilità alla fusione nucleare controllata. Gli studi sulle diverse tecnologie delle celle a combustibile portano alla fine degli Anni '90 alla sperimentazione presso la sede del CISE del primo impianto europeo da 100 kW_e a celle a combustibile a carbonati fusi in collaborazione con Ansaldo.

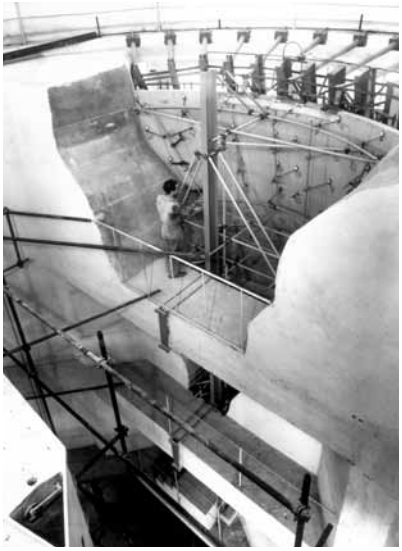
Sul fronte ambientale, alla fine degli Anni '80 è importante ricor-

dare campagne di misura sistematiche come quella, ad esempio, del censimento delle acque superficiali della Provincia di Milano.

La vita del CISE come istituzione autonoma ha termine alla fine degli Anni '90 quando, in conseguenza della liberalizzazione del settore elettrico, l'ENEL lo incorpora nella divisione di ricerca che viene successivamente ceduta e da cui discende anche RSE.

2.2 L'ISMES

Ufficialmente la sua nascita è datata 1951, ma le origini sono antecedenti. Infatti, il nucleo della società ISMES viene fondato come "Istituto Sperimentale" nel 1947 dalla Società Adriatica di Elettricità (produttrice e distributrice di energia elettrica), da Italcementi (maggior produttore italiano di cemento) e dalla Torno (grande impresa di costruzioni). Queste tre società sono responsabili della realizzazione della diga del Piave, caratterizzata da un rapporto corda-altezza da primato. Poiché i mezzi di calcolo del tempo non sono idonei ad una verifica esauriente dell'opera, i progettisti ne suggeriscono la verifica su un modello fisico di grande scala (1:40), da sperimentare fino al collasso.



Modello fisico in scala di diga in calcestruzzo a doppio arco.

All'iniziativa dei primi fondatori aderiscono successivamente Edison, l'intero complesso delle aziende italiane produttrici di energia e le maggiori imprese di costruzioni interessate ai grandi progetti idroelettrici. E arriviamo al 1951, quando l'Istituto si costituisce in società per azioni con la denominazione di ISMES (Istituto Sperimentale Modelli E Strutture).

Progetti in tutto il mondo

Vengono assunti ingegneri, periti industriali e un ristretto quadro di tecnici (modellisti, meccanici, muratori, eccetera) che con gli anni raggiungerà un elevato e prezioso grado di specializzazione.

Nel decennio tra il 1951 e il 1961 vengono sperimentate non meno di 60 grandi dighe in calcestruzzo, di cui 24 distribuite nei cinque Continenti. Fra le nazioni che maggiormente si avvalgono delle verifiche all'ISMES delle dighe in progetto si ricordano: Svizzera, Spagna, Jugoslavia, Messico, Australia, Argentina.

Alla fine degli Anni '50 anche la Bulgaria, in un clima di pesan-

te *guerra fredda*, su suggerimento di Mosca ricorre all'ISMES, fra lo stupore e l'incredulità degli organi ministeriali e diplomatici, per risolvere alcuni gravi problemi di dighe in progetto e costruzione. A seguito del crollo della diga del Frejus in Provenza, la stessa Banca Mondiale decide che i progetti di dighe da lei finanziati siano verificati su modello all'ISMES. Gli organi di controllo governativi svizzeri e spagnoli dichiarano che, non potendo disporre di un laboratorio idoneo, si affidano volentieri al know-how dell'ISMES di Bergamo.

Dall'idroelettrico al nucleare

Nel 1963, in seguito alla nazionalizzazione delle imprese elettriche, l'ENEL assorbe tutte le azioni dell'ISMES che precedentemente erano detenute dalle società private produttrici di energia e diventa così azionista di maggioranza. Da quell'anno in poi, i compiti e le attività dell'ISMES si estendono, in rapporto alle esigenze tecniche dell'ENEL e ai relativi progetti di ricerca applicata.

Per un lungo periodo nel corso degli Anni '70, in previsione della costruzione di centrali nucleari, l'ENEL affida a questa società numerose ricerche. Fra queste, è importante ricordare per la loro singolarità le esperienze sui contenitori nucleari. Nelle centrali di potenza il recipiente del reattore è racchiuso di norma in enormi contenitori a tenuta, di forma cilindrica. Tali contenitori devono soddisfare due funzioni fondamentali: una è lo schermaggio del reattore, che si ottiene con un grosso spessore in calcestruzzo nell'ordine di 2,5 metri; l'altra è la tenuta contro eventuali sovrappressioni istantanee nell'ipotesi che il reattore sfugga al controllo. A tal fine, l'interno del contenitore è rivestito da una corazza in acciaio di spessore rilevante. Il tema della ricerca è di verificare se sia possibile utilizzare lo stesso rivestimento in calcestruzzo, applicando al medesimo una robusta precompressione triassiale in sostituzione della costosa corazzatura. Le esperienze eseguite su modello in scala 1:20 portano a risultati del tutto soddisfacenti. In parallelo alle esperienze sul modelli, all'ISMES si effettuano ricerche d'avanguardia per definire le leggi di comportamento del calcestruzzo soggetto a stati di sollecitazione triassiale.

Negli Anni '70, la progettazione di grandi scavi sotterranei per impianti di pompaggio dà notevole impulso alla crescita della dotazione in attrezzature avanzate per prove su materiali in laboratorio e in sito, nonché allo sviluppo di modellazioni numeriche ad elementi finiti. La Divisione Modelli Matematici, costituita appunto all'inizio degli Anni '70, si misura subito con problematiche avanzate (modellazione tridimensionale delle dighe, non linearità dei materiali, eccetera), che esigono non solo esperienze ingegneristiche, ma anche

Tavola vibrante per analisi sismiche.

capacità tecnologico-informatiche per la realizzazione di simulazioni complesse e di sistemi software per la gestione dati.

Impatto ambientale e protezione civile

La divisione Geofisica – sorta principalmente per la sorveglianza microsismica di campi geotermici e siti dighe – e le divisioni Geotecniche avviano anch'esse l'attività negli Anni '70, ma accrescono notevolmente la loro capacità e il personale negli Anni '80, quando l'Istituto di Bergamo comincia a ricoprire un ruolo di leader nella caratterizzazione dei siti per gli impianti industriali. La vasta esperienza nella ricerca e nelle applicazioni delle scienze terrestri si rivela poi fondamentale per il crescente impegno della società negli studi di impatto ambientale e per la protezione civile dalle calamità naturali.

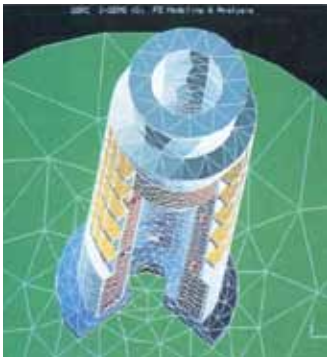
Un'analoga espansione del ruolo e delle attività si verifica nel settore della meccanica strutturale. Le attrezzature sviluppate per la sperimentazione sismica dei modelli di dighe trovano immediata applicazione alla qualificazione dinamica di apparecchiature meccaniche ed elettroniche.

Le prove sui materiali da costruzione, eseguite in un primo momento a supporto di specifici progetti di ricerca o per studi di modellazione, divengono un servizio per i clienti e dal 1977 è riconosciuta all'ISMES da parte del Ministero dei Lavori Pubblici la veste di Laboratorio Autorizzato per queste prove. Negli Anni '80, l'ISMES inizia a fornire laboratori in sito per prove materiali e attrezzature per prove non distruttive presso i cantieri di costruzione dei principali impianti italiani per la produzione di energia. A complemento e sostegno di queste attività e di altre connesse al *siting* degli impianti e alla progettazione di centrali elettronucleari, è istituito ed applicato operativamente dal 1982 un sistema di Garanzia della Qualità.

A partire dal 1980, l'ISMES fornisce servizi e mostra una provata esperienza in quasi tutti i campi dell'ingegneria civile (e non solo di essa). Una percentuale significativa del fatturato dell'ISMES è dovuta a servizi integrati, coordinati per mezzo di un'attività di progetto e consulenza in rapida espansione, con importanti risultati nell'ingegneria civile, offshore e ambientale.

Il presidente Nervi

Le competenze acquisite hanno trovato applicazione in diversi ambiti dell'ingegneria; a partire dagli Anni '90 l'ISMES ha svolto studi



Modello ad elementi finiti della Torre di Pisa.

a supporto della conservazione del patrimonio monumentale internazionale sia in campo modellistico numerico, sia sperimentale (monitoraggio delle opere e caratterizzazione dei materiali).

Tra i presidenti che hanno guidato l'ISMES va ricordato Pier Luigi Nervi (1891-1979), un costruttore per vocazione e un combattente nato. Nervi si avvicina all'ISMES per la prima volta nel corso delle esperienze su modello nella progettazione del grattacielo Pirelli e da allora molti sono i progetti di Nervi sottoposti a verifica in tutto o in parte su modello nei laboratori ISMES. Ad esempio, il Palazzo dello Sport di Norfolk (Virginia), simile al ben noto palazzetto dello sport all'EUR, ma di diametro doppio, il Terminal per autobus dell'aeroporto di Newark (New Jersey), il grattacielo della Borsa dei Valori a Montreal.

Nervi si affida ai procedimenti di calcolo più avanzati, ma quando lo slancio innovatore delle sue intuizioni sfugge ai controlli numerici egli pone fiducia nella verifica su modello fisico, come nel caso della Cattedrale di St. Mary a San Francisco.

2.3 LE ORIGINI DEL CESI

Il secondo conflitto mondiale è concluso e l'Italia affronta i gravi problemi della ricostruzione. In quel periodo, l'energia elettrica si rivela un bene prezioso e molto scarso: a Milano manca spesso la corrente, si devono fermare le fabbriche, tram e filobus sono costretti a soste frequenti. Questa situazione è legata, oltre all'insufficienza dei mezzi di produzione, prevalentemente idroelettrica, spesso danneggiati nel corso della guerra, anche alla fortissima parcellizzazione del sistema elettrico. Il Paese è infatti diviso in numerose isole energetiche indipendenti caratterizzate da frequenze di funzionamento diverse (50 Hz, $16^{2/3}$ Hz, eccetera) e dai livelli di tensione più disparati. Ogni regione ha le proprie aziende di generazione, trasmissione, distribuzione di energia elettrica: a Milano opera Edison, in Piemonte la SIP, in Emilia la SEE e così via. Ognuna isolata nelle proprie regole, ma soprattutto schiava delle proprie debolezze e senza alcuna possibilità di aiutarsi in caso di bisogno.

Per gestire la ricostruzione del sistema energetico, nel Nord Italia è formato un Commissariato all'Energia Elettrica presieduto dall'ingegner Ercole Bottani, professore di elettrotecnica generale al Po-

litecnico di Milano ed eminente scienziato del settore. Sotto la sua guida l'intero sistema si riorganizza e prospera, preparandosi per il miracolo industriale ed economico italiano degli Anni '50.

"Signori, cosa manca?"

A capo del "Gruppo di Studio per il Parallelo Italiano", incaricato di studiare le modalità di collegamento tra le isole energetiche e l'unificazione delle frequenze, Bottani intuisce la necessità di un centro di aggregazione italiano per l'intero settore elettrico. Convocando i responsabili delle più importanti imprese elettriche e dei maggiori costruttori elettromeccanici si rivolge a loro con queste parole: "Signori, cosa manca a molti costruttori elettromeccanici e soprattutto alle aziende elettriche? Fare prove sperimentali e studi di rete. Prima o poi vi si dovrà provvedere". Di qui nasce l'idea fondante del Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano, il CESI.

Lavori di bonifica del terreno e costruzione dei laboratori del CESI alla periferia di Milano.

Certo, i costruttori di componenti elettrici dispongono di piccoli laboratori integrati negli stabilimenti di produzione. Come Magrini, ad esempio, che costruisce interruttori, e ha perfino un generatore di corto circuito acquistato in Olanda. A tutti è chiaro, però, che questi impianti si riveleranno presto insufficienti al crescere dei livelli di tensione e delle correnti di cortocircuito in un sistema in rapida espansione. Per questo motivo, i rappresentanti delle 28 aziende che firmano l'atto costitutivo del CESI il 26 marzo 1956 sanno di essere chiamati ad operare con una mentalità molto diversa rispetto al passato, convincendosi dell'opportunità di investire in una struttura capace di operare per tutti, nel rispetto di un ferreo principio di riservatezza, evitando di duplicare sforzi, strutture e competenze specialistiche.

Sotto la guida di Bottani, e con il coinvolgimento di giovani ingegneri dallo spiccato spirito pionieristico come Giorgio Catenacci e Gianguido Carrara, il CESI inizia ad operare partendo dall'analizzatore analogico di rete, conferitogli da Edison, e con quello strumento comincia a disegnare il sistema elettrico italiano che accompagnerà il "boom economico". Appena un anno dopo la fondazione dell'azienda entra in servizio il laboratorio di grande potenza, ispirato al modello che la francese EdF

aveva realizzato a Fontenay aux Roses, vicino a Parigi. In questo primo impianto della sede di Lambrate si realizzano i collaudi degli interruttori e dei trasformatori di potenza ai massimi livelli per l'epoca.

Laboratori ad Alta tensione

Nel 1959 viene aperto il salone di alta tensione, ancora oggi elemento distintivo dei laboratori di RSE. Con una lungimiranza senza precedenti, il capannone è progettato con dimensioni più che doppie rispetto ai requisiti dell'epoca ed è il più grande al mondo, con i suoi 40x45 metri in pianta e i 35 metri di altezza. Ancora oggi è uno dei laboratori indipendenti al coperto più performanti dell'Occidente, dato che consente il collaudo di apparecchiature per i sistemi elettrici 800 kV e, per alcune prove, per i sistemi 1.000 kV. Le strutture e le competenze che si sviluppano in CESI accompagnano la nascita dell'ENEL (1962) che, raccogliendo gli impegni delle diverse aziende elettriche che lo hanno fondato, ne diventa azionista di riferimento e principale committente.

Gli Anni '70 e '80 vedono l'allargamento progressivo delle attività dei laboratori, con la partecipazione attiva al "progetto 1.000 kV" di ENEL e la realizzazione di un apposito laboratorio dielettrico a Suvereto, in Toscana. E ancora: la messa in servizio del laboratorio di grande potenza sintetico (1983) e del laboratorio di compatibilità elettromagnetica (1987), il laboratorio di illuminotecnica (1988), quello di accumulo elettrico per uso veicolare (1989) e la rapida espansione delle attività di consulenza e certificazione all'estero.

Prove di fulminazione dell'elicottero Agusta A129 svolte al CESI

L'accorpamento con la Struttura di Ricerca di ENEL avviene nel 2000. In questo periodo, anche l'assorbimento dell'ISMES consente di ampliare gli orizzonti di attività, affrontando molti settori fino a quel momento solamente sfiorati, come le tecnologie per la generazione di energia elettrica, le applicazioni per gli usi finali e l'efficienza energetica, gli aspetti ambientali e i risvolti economici del mercato dell'energia.

Per cinque anni, dal 2000 al 2005, CESI raccoglie le competenze dei quattro centri che in esso sono confluiti (CESI, CISE, ENEL-Ricerca e ISMES) amalgamandone gli approcci e i metodi di lavoro e costruendo nuovi servizi, frutto della sinergia di competenze e attrezzature.

Nel 2006, una parte significativa di queste competenze confluisce nella nuova struttura

nata dalla divisione di CESI e denominata CESI RICERCA, poi ERSE e infine RSE, dove sono impegnate in progetti di ricerca riconosciuti a livello italiano ed europeo.

2.4 LA RICERCA DELL'ENTE NAZIONALE PER L'ENERGIA ELETTRICA

La nazionalizzazione dell'energia elettrica nel 1962 esercita un'influenza decisiva sulla ricerca italiana del settore energetico. Le grandi dimensioni di ENEL fanno sì che la ricerca diventi un'attività istituzionale, con una funzione determinante nello sviluppo del nuovo Ente e perciò dotata di una propria direzione centrale e di propri reparti operativi.

Nei decenni del monopolio di Stato, la ricerca ENEL costituisce infatti un naturale punto di riferimento per l'intero settore elettroenergetico, con effetti sia sull'attività scientifica universitaria sia sulla ricerca condotta dai costruttori coinvolti nello sviluppo del sistema elettrico nazionale.

Ecco i primi passi. Ispirandosi al modello organizzativo della francese EdF, è prevista una Direzione Studi e Ricerche (DSR), articolata in centri dedicati alle attività attinenti le varie tipologie di impianti.

Al momento della sua nascita, i campi specialistici di ENEL/DSR sono naturalmente i sistemi e gli impianti elettrici, gli impianti idraulici, termici e nucleari. Vengono mantenute in funzione le preesistenti società di ricerca CISE, CESI ed ISMES, nei cui consigli di amministrazione entra a far parte lo stesso ente di Stato.

Con queste premesse, all'inizio degli Anni '60 prendono vita diversi centri di ricerca, attingendo inizialmente a risorse interne provenienti dalle ex società elettriche.

Sinergie e internazionalità

Utilizzando strutture e parte del personale della ex Edisonvolta, sono allestiti a Milano i primi reparti per la ricerca elettrica e per quella idraulica e strutturale. Il gruppo di tecnici della società ex Larderello è invece coinvolto nelle problematiche della geotermia. Poiché nell'ambito delle ex-società elettriche mancano competenze in campo informatico ed elettronico, sono trasferiti all'ENEL degli esperti della società CEA-Perego, che formano il primo nucleo del Centro di Ricerca di Automatica.

La struttura della DSR viene delineata nel 1966, ponendo l'attenzione sulla necessità di avere non solamente collegamenti efficienti e sinergie con CISE, CESI, ISMES e Università, ma anche con la ricer-

Campagna di misura ambientale sul Po.

ca internazionale. Nel periodo che va dal 1975 alla fine degli Anni '90, questa Direzione investe significativamente sui propri centri di ricerca, arrivando ad una consistenza del personale che supera le 1.100 unità, contro le circa 1.800 unità dei centri di ricerca esterni all'Ente.

Il Centro Ricerca Elettrica (CREL), con sede a Milano e poi a Cologno Monzese, viene focalizzato su reti, macchinario e apparecchiature, prove e misure. È in questo centro che sono sviluppate le tematiche relative alle altissime tensioni, ai veicoli elettrici e alle fonti rinnovabili eolica e solare fotovoltaica.

Il Centro Idraulico e Strutturale (CRIS), indirizzato all'idrologia e alle ricerche idrauliche e strutturali, inizia le proprie attività basandosi sul personale e sui mezzi del Laboratorio Modelli Idraulici di Milano-Niguarda e su alcuni specialisti provenienti dalla Direzione Costruzioni Idroelettriche della ex Edisonvolta, comprendendo anche un reparto dislocato a Venezia-Mestre con personale e mezzi del Laboratorio idrologico della ex Società Adriatica di Elettricità.

Il Centro di Ricerca di Automatica (CRA), con sede prima a Milano e successivamente a Cologno Monzese, è dedicato all'analisi dinamica e al controllo dei processi di produzione di energia, alle tecnologie elettroniche e informatiche nel campo dell'automazione degli impianti, alla diagnostica e relativa strumentazione, all'affidabilità degli apparati e sistemi elettronici, alle tecnologie per la conduzione di processo e alle tecnologie dell'informazione.

Il Centro di ricerca per la valorizzazione e il trattamento dei residui di Brindisi, denominato in un primo tempo CRC e poi CRR, viene destinato a svolgere attività nei campi della valorizzazione energetica dei residui: dallo sviluppo di nuovi materiali agli impieghi geo-ambientali.

Il Centro di Ricerca Termica e Nucleare (CRTN) prende vita in origine basandosi su due nuclei, a Milano e a Pisa e su altre realtà locali come i laboratori di ricerca ambientale di Trino Vercellese e di Sessa Aurunca. Il centro ha il compito di svolgere attività di ricerca prevalentemente nel campo delle problematiche ambientali, dei nuovi materiali, nonché dei fenomeni termoidraulici delle centrali sia termiche sia nucleari, comprendendo le problematiche della fi-

sica del reattore e dei rifiuti radioattivi. Da questo centro si stacca successivamente la sede pisana, per dar vita al Centro di Ricerca Termica (CRT), dedicato ai problemi della combustione.

La struttura così realizzata, se si tiene conto anche dei centri esterni collegati, ha dimensioni ragguardevoli, simili a quelle dell'attuale ENEA (circa 3.000 unità con svariati laboratori sperimentali). È per la maggior parte ubicata nell'area più industrializzata del Paese e, fatto di notevole importanza, è in diretto collegamento con le strutture operative dell'industria elettrica.

Il primato di Suvereto

Tra le esperienze più rappresentative della ricerca ENEL va sicuramente ricordato il "Progetto 1.000 kV", avviato con lo scopo di studiare materiali, apparati, macchinari e strutture di rete adatti per l'impiego industriale delle altissime tensioni, come allora richiesto dalla necessità di trasmettere a lunga distanza notevoli quantità di energia.

Tra la fine degli Anni '70 e i primi Anni '90, sono condotti numerosi studi per verificare la fattibilità di una rete di trasmissione a 1.000 kV, che culminano alla fine del 1996 con il completamento nell'area sperimentale di Suvereto (LI) della prima linea pilota lunga 3 chilometri a 1.050 kV. Anche se, come è noto, l'altissima tensione non ha trovato applicazione in Italia, nondimeno il lavoro di ricerca svolto promuove lo sviluppo di nuove conoscenze, i cui riflessi positivi sulla progettazione e costruzione delle apparecchiature, anche per tensioni relativamente più basse, sono ancora oggi evidenti, unitamente alla qualificazione che ne deriva per l'industria elettromeccanica italiana.

Relativamente al periodo Anni '70-'80, meritano di essere citati i lavori sull'automazione delle centrali e gli studi sui fenomeni idraulici mediante modellazione in scala.

Negli Anni '80, accanto alle ricerche legate all'esercizio delle centrali termoelettriche e nucleari, prendono il via quelle dedicate al risparmio energetico, alle fonti rinnovabili legate allo sfruttamento del sole e del vento, mentre cresce la sensibilità verso l'impatto degli impianti energetici sull'ambiente. È in questo contesto che partono i primi studi sulle tematiche meteorologiche e di inquinamento atmosferico, nasce il centro di previsioni meteorologiche METOPE orientato all'applicazione della meteorologia nei settori della produzione idroelettrica, della previsione del fabbisogno e degli eventi estremi per le linee di trasmissione elettrica.

Nei primi Anni '90 i programmi di ricerca dell'ENEL, pur nella continuità con i programmi precedenti, vengono posti più in sinto-

nia con i nuovi scenari energetico-ambientali determinati dalle crisi petrolifere. Pertanto le attività si concentrano sui reattori nucleari di nuova concezione, sullo sviluppo delle fonti rinnovabili (solare, eolica, biomasse) e, ovviamente, sull'approfondimento degli aspetti ambientali (deposizioni acide, effetto serra, smaltimento dei rifiuti delle centrali a combustibili fossili).

In quest'ultimo decennio del ventesimo secolo, ENEL vuole incentivare l'uso razionale dell'energia elettrica e il contenimento dei consumi, proponendosi di sfruttare il calore residuo delle centrali termiche in idrocoltura e agricoltura. Per ciò che concerne le tecnologie elettriche e dell'automazione, in vista di un aumento della generazione da parte degli autoproduttori, viene data priorità agli studi dedicati al potenziamento della capacità di trasporto delle reti di trasmissione e all'affidabilità e qualità della fornitura agli utenti.

Nel 1994, il CRTN cambia denominazione e diventa CRAM (Centro di Ricerca Ambiente e Materiali), mantenendo la sede a Milano e orientando le ricerche in modo più specifico sulle problematiche connesse con l'impatto della produzione elettrica sull'ambiente e sugli studi sui materiali. Di conseguenza, il gruppo dei ricercatori nucleari milanesi si ricollega per alcuni anni alle strutture nucleari di ENEL per dedicarsi allo studio dei progetti di impianti innovativi condotti dalle americane General Electric e Westinghouse, nonché a programmi di ricerca teorici e sperimentali coordinati dall'Unione Europea e dall'EPRI. Questo gruppo riconfluisce nel 1997 nei reparti della ricerca, quando l'ENEL, ormai trasformata in società per azioni, riunisce in un'unica struttura la quasi totalità del personale e delle strutture della ex-DSR e dei centri esterni.

Negli Anni 2000, dopo vari passaggi di ristrutturazione, molti dei ricercatori che hanno animato questa storia lunga oltre mezzo secolo sono ancora sul campo, più anziani ed esperti, e proseguono le loro attività al fianco di colleghi più giovani ai quali consegnano il testimone della ricerca energetica. Che continua in RSE.

Simulatore degli armadi di regolazione di un gruppo di centrale termoelettrica.

3 Idraulica e strutture

Nel periodo della nazionalizzazione dell'energia elettrica, le attività di ricerca e di ingegneria nei settori dell'idraulica e delle strutture trovano la loro sede naturale nell'ISMES e nel CRIS (il Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale di ENEL). Si tratta di società costituite con lo scopo di fornire alle realtà operative delle società elettriche un supporto sull'impiego di innovative tecnologie e metodologie di studio e indagine per la progettazione dei nuovi impianti industriali di settore. Non solo. La loro attività è finalizzata al mantenimento della sicurezza delle grandi opere esistenti e per la loro gestione sostenibile nel contesto ambientale.

L'enorme patrimonio infrastrutturale di ENEL costituisce il riferimento principale a partire dai primi Anni '60, anche se non va dimenticata la notevole attività di modellazione fisica in scala e di indagini di laboratorio svolta dall'ISMES sin dalla sua costituzione, soprattutto per la realizzazione di grandi infrastrutture idrauliche a supporto delle società elettriche private operanti prima della nazionalizzazione.

Le competenze maturate, le metodologie di indagine e di analisi, le *facility* sperimentali messe a punto in queste due realtà – alle quali si aggiunge in tempi più recenti e su specifiche tematiche anche il CISE – consentono di migliorare in modo significativo gli aspetti della progettazione delle opere, della loro realizzazione e dell'esercizio degli impianti.

Tra le principali attività vanno messe in evidenza quelle relative allo sviluppo di modelli matematici sia in campo idraulico sia in campo strutturale spesso integrati dall'impiego complementare di modelli fisici in scala. Entrambe le tipologie di modelli vengono integrate grazie allo sviluppo di tecnologie innovative per la caratterizzazione dei materiali, per il monitoraggio delle opere e dell'ambiente, nonché per la diagnostica del comportamento dei manufatti e degli impianti.

3.1 IDROLOGIA E IDRAULICA

Le dighe di sbarramento nel nostro Paese hanno raggiunto livelli di sicurezza molto elevati grazie al costante progresso delle conoscenze e degli strumenti tecnici impiegati nella fase di progettazione, costruzione ed esercizio. L'importanza dell'idrologia risulta evidente dall'analisi

dei casi storici di incidenti. Infatti, le rotture avvenute per tracimazione di dighe superano il 30 per cento del totale. Per ciò che riguarda la previsione di afflussi-deflussi, le procedure utilizzate per la gestione delle risorse idriche si basano – nel medio termine – su ipotesi dell'idraulicità annuale e – nel breve periodo – sulla previsione degli apporti fatta in base al consuntivo del giorno precedente. I modelli numerici utilizzati sono in grado di simulare l'evoluzione del manto nevoso e la sua fusione (aspetto particolarmente importante per la gestione dei serbatoi alpini) o di trasformare in tempo reale l'intensità di pioggia in deflussi al serbatoio, stimando in anticipo le portate in arrivo.

Con riferimento agli impianti idroelettrici, integrando i dati di apporto con la previsione media è possibile migliorare il grado di sicurezza garantendo la stima delle portate di piena in alveo con un significativo preavviso, consentendo una gestione più oculata grazie alla conoscenza anticipata delle portate in arrivo con livelli di probabilità assegnati. In tal modo, è possibile ridurre o evitare gli sfiori intervenendo preventivamente sul livello idrico del serbatoio.

A partire dagli Anni '80 si mettono a punto metodologie e procedure per la valutazione delle portate di piena in alveo con l'impiego di tecniche basate sull'informazione idro-meteorologica disponibile dell'area di indagine che consentono di pervenire a stime più attendibili per tutti i bacini. Inoltre, l'analisi di serie di dati storici, più estese nello spazio e nel tempo, riduce l'incertezza nella valutazione della piena per gli eventi estremi e consente di estrapolare a tempi di ritorno molto elevati la stima della portata con conseguente miglioramento della sicurezza nella gestione degli impianti.

A partire dagli studi avviati dal CRIS si sviluppano metodologie sempre più raffinate con la realizzazione di strumenti software che hanno trovato applicazione nel mondo dei concessionari. In particolare, per gli invasi esistenti è stato sviluppato da RSE il programma HALTFLOOD per la previsione degli idrogrammi di piena, con l'im-

Studio di problemi di erosione a valle di una traversa idraulica: confronto dei risultati ottenuti con modello fisico in scala (a sinistra e centro) e modello numerico (a destra).

plementazione di uno specifico modello afflussi-deflussi che integra le previsioni meteo (dati radar e pluviometrici delle precipitazioni) e le informazioni idraulico-idrologiche.

La funzionalità del software è valutata sulla base di sperimentazioni condotte sull'invaso di Santa Giustina (TN). È inoltre estesa l'applicazione di HALTFLOOD alla previsione e propagazione di piene in aste fluviali con impianti ad acqua fluente, con riferimento al caso del fiume Aniene (Roma).

L'attività sui temi dello sviluppo della produzione idroelettrica e la gestione ambientalmente sostenibile della risorsa idrica riguardano da un lato la gestione ottimale degli invasi esistenti ("grande idroelettrico"), dall'altro studi a supporto della diffusione degli impianti "mini-idro".

La stessa tipologia di modelli risulta fondamentale anche a supporto del funzionamento in sicurezza degli impianti termoelettrici. La disponibilità continua di sufficienti quantitativi di acqua per il raffreddamento dei gruppi generatori è elemento di fondamentale importanza per il funzionamento delle centrali termiche. Accurati studi statistico-probabilistici, condotti su lunghi periodi di tempo, sono eseguiti sul regime idrologico del corso d'acqua di interesse al fine di conoscere sia i valori delle portate di magra sia la loro persistenza. La conoscenza delle vicende passate non è tuttavia sufficiente; è necessario monitorare continuamente i deflussi, mediante reti di stazioni idrometriche, per segnalare eventuali tendenze in atto e poter fare ragionevoli previsioni a scadenza più o meno lunga. Anche su queste tematiche, il supporto fornito dalle istituzioni da cui proviene RSE è stato particolarmente importante per il settore della generazione elettrica.

Per lo studio dei fenomeni di trasporto solido e di erosione nei corsi d'acqua, l'importanza della dinamica fluviale deriva dal fatto che molti impianti di produzione sono situati lungo i corsi d'acqua. Gli studi riguardano sia la modellazione dei fenomeni di trasporto solido – in quanto l'accumulo del materiale trasportato riduce la capacità utile di regolazione e di invaso dei serbatoi degli impianti idroelettrici – sia i processi di erosione e di sovralluvionamento degli alvei che possono mettere in crisi la funzionalità delle opere di presa e di scarico delle acque di raffreddamento delle centrali termoelettriche o delle opere civili costruite lungo gli argini.

In merito ai problemi di erosione, l'impiego combinato dei modelli fisici a fondo mobile e dei modelli matematici ha consentito di definire modalità innovative per la progettazione di nuove opere e per interventi su opere esistenti al fine di migliorare le condizioni di sicurezza.

La ricerca dell'influenza che le caratteristiche idrologiche, geologiche e morfologiche dei bacini idrografici hanno sulla producibilità

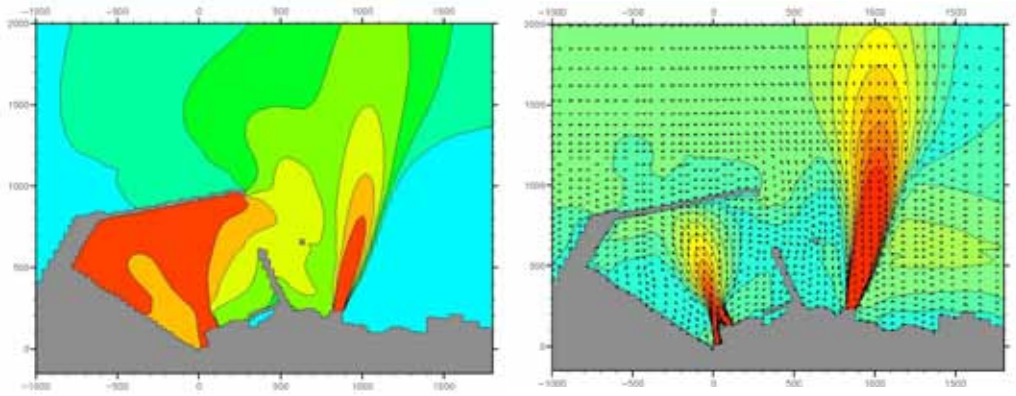
di sedimento prevede la raccolta e l'elaborazione dei dati di trasporto solido disponibili che comprendono sia misure eseguite durante i periodici interventi di manutenzione degli impianti idroelettrici sia misure dirette di trasporto solido.

Queste informazioni, integrate con le caratteristiche dei bacini idrografici sono utilizzate per determinare le relazioni funzionali tra le variabili idrologiche, quelle geomorfologiche e la produzione di sedimento. Nell'ambito delle attività di ricerca svolte da RSE per la mitigazione dell'interrimento è stato sviluppato il software ITERS che, a partire dall'analisi di dati territoriali, consente l'effettuazione di simulazioni matematiche previsionali per l'invaso, il bacino imbrifero di monte e l'asta fluviale di valle. La validazione della metodologia è stata effettuata sulla base dei risultati di specifiche campagne di misura nell'invaso di Mignano (PC), finalizzate alla creazione di una base di dati sperimentali.

Più recentemente, viene sviluppato il software SPHERA per lo studio tridimensionale dell'idrodinamica e del trasporto di sedimenti basato sul metodo SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics), particolarmente idoneo per lo studio di transitori rapidi.

3.2 PROBLEMI TERMICI NEI CORPI IDRICI

Lo smaltimento del calore dell'acqua di raffreddamento, in mare o in fiume, per le centrali termoelettriche riveste una notevole importanza ai fini del progetto e dell'esercizio degli impianti. Vanno



presi in considerazione due aspetti importanti: il primo, di carattere ecologico, connesso con l'alterazione termica, indotta nel corpo d'acqua ricevente, che può produrre modifiche dell'equilibrio idrobiologico. Il secondo, puramente tecnico, in cui il ricircolo dell'acqua di raffreddamento tra lo scarico e la presa può avere conseguenze negative sul rendimento del ciclo termico.

L'impiego di modelli matematici e fisici, utilizzati separatamente o in modo integrato nei casi più complessi viene completato dalle informazioni ottenute mediante accurate campagne di misura con raccolta di dati idrodinamici, fisici, chimici e biologici. Questa tipologia di modelli costituisce uno strumento particolarmente efficace per la determinazione del campo termico nel corpo idrico la cui conoscenza accurata rappresenta l'informazione fondamentale per i progettisti e per i responsabili dell'esercizio della centrale. In particolare, già in ambito CRIS e successivamente in ambito RSE, sono sviluppati codici numerici basati su tali modelli, sia a partire dai codici alle differenze finite della famiglia TRIMDI, sia sviluppando il simulatore 3D ad elementi finiti HYPER3D, la cui applicazione è stata estesa anche allo studio della produzione di energia rinnovabile da correnti marine e per il supporto alla progettazione degli elettrodi marini HVDC.

3.3 STUDI DI DAM-BREAK

Negli ultimi cinquanta anni il numero di incidenti delle dighe si è sensibilmente ridotto grazie al miglioramento delle conoscenze e agli insegnamenti tratti dall'analisi degli eventi negativi. Molti di tali insegnamenti hanno prodotto significative evoluzioni dei criteri di sicurezza adottati da progettisti, costruttori e gestori di dighe, nonché la revisione di normative nazionali e di raccomandazioni internazionali.

La tracimazione rimane una delle più frequenti cause di rotture di dighe, in particolare di quelle di materiali sciolti. La modesta prestazione di molte dighe nei riguardi della tracimazione è spesso determinata dalla non affidabile previsione delle portate di piena, con conseguente sottodimensionamento delle opere di scarico.

Alla fine degli Anni '80 i tecnici RSE hanno fornito il loro contributo per definire i criteri da adottare per lo studio dei potenziali fenomeni associati al dam-break e per valutare, per larga parte delle dighe italiane, le aree inondabili a seguito della potenziale rottura di uno sbarramento. Tali studi costituiscono il riferimento per le attività di protezione civile.

Occorre infine rilevare che alcune zone montane a causa delle loro caratteristiche idro-geologiche possono dar luogo alla formazione

Impiego del codice TRIMDI per la verifica 3D di scarichi termici: campo di temperatura (a sinistra) e campo di moto (a destra).

di dighe naturali che, sbarrando la valle, determinano la formazione di bacini che costituiscono un rischio potenziale per la sicurezza a valle. È questo il caso ben noto della frana della Val Pola che si verifica in Valtellina nell'estate del 1987.

In questo caso, lo sbarramento di circa 30 milioni di m^3 blocca il fiume Adda, determinando la formazione di un lago. Presso i laboratori del CRIS sono svolte indagini per la caratterizzazione dei materiali geotecnici costituenti la frana ed è messo a punto un modello idraulico in scala, oltre a modelli matematici per analisi di sensitività. Grazie anche a questi studi, la tracimazione dello sbarramento avviene in modo controllato senza creare gli effetti devastanti verificatisi in molte altre circostanze analoghe.

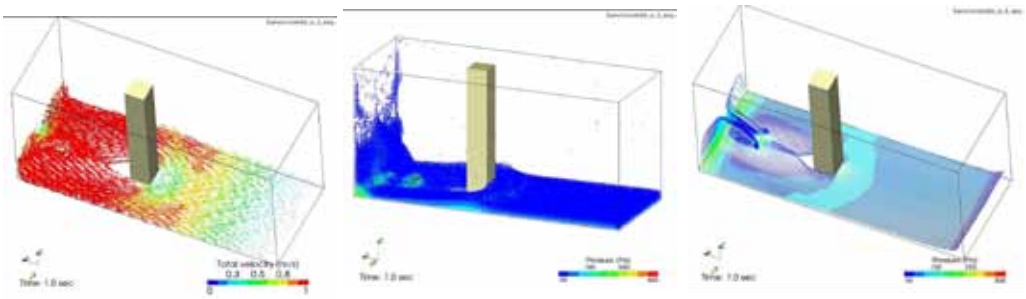
Le problematiche di dam-break sono studiate in RSE anche per gli aspetti di interazione fluido-struttura, mediante il codice SPHERA basato sulla tecnica SPH.

3.4 SICUREZZA DELLE DIGHE

I ricercatori di RSE hanno maturato una vasta esperienza nello studio del comportamento strutturale delle dighe mediante la messa a punto di metodologie di indagine in sito, in particolare di campagne di caratterizzazione dinamica mediante vibrazioni forzate e vibrazioni naturali (indotte da particolari condizioni ambientali) e in laboratorio, nonché di programmi di calcolo basati sull'impiego delle tecniche di modellazione numerica ad elementi finiti più avanzate. I modelli matematici hanno lo scopo di simulare numericamente il comportamento delle dighe soggette – oltre che ai normali carichi di esercizio – a carichi estremi ed eccezionali, in particolare quelli sismici.

Un aspetto fondamentale dell'attività di modellazione riguarda

SPHERA: studi di dam-break. Analisi di impatto su una struttura a pilastro.



l'identificazione strutturale, ovvero l'individuazione dei parametri fisico-meccanici che caratterizzano il comportamento di una struttura esistente, aspetto particolarmente rilevante considerando l'età media delle dighe italiane ormai superiore ai sessanta anni.

Il processo d'identificazione comprende non solo le analisi numeriche ma anche il contributo delle indagini sperimentali, del monitoraggio e delle indagini sui materiali (in laboratorio e in sito).

RSE, a partire dai codici di calcolo e dalle metodologie sviluppate negli Anni '90 (codici INDIA per l'analisi modale a EF delle strutture e la procedura AIDA per la minimizzazione della discrepanza tra parametri misurati e calcolati) ha sviluppato la procedura innovativa MIDA impiegata per lo studio di diverse dighe italiane.

Nel corso degli ultimi trenta anni sono stati svolti studi per oltre 50 grandi dighe di varie tipologie, adottando sia codici commerciali sia programmi di calcolo sviluppati *in-house*. Ciò ha consentito di consolidare la posizione di riferimento di RSE per i più importanti concessionari idroelettrici italiani per quanto riguarda le tematiche di sicurezza delle infrastrutture idroelettriche.

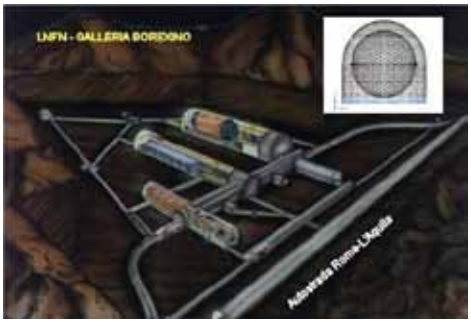
Più recentemente RSE ha sviluppato per il sistema elettrico italiano una metodologia probabilistica di analisi, valutazione e gestione del rischio, in linea con gli approcci internazionali più evoluti per l'analisi della sicurezza dei grandi sistemi infrastrutturali come i grandi impianti idroelettrici.

Il processo di analisi e valutazione, essendo fortemente caratterizzato dall'incertezza intrinseca nei parametri necessari per quantificare gli effetti di un incidente, richiede un approccio multidisciplinare per tenere conto di molteplici fattori di carattere tecnico, socio-economico e ambientale, nonché il coinvolgimento di figure e competenze professionali provenienti da ambiti culturali molto diversi in un contesto di trasparenza e condivisione delle informazioni.

Si presuppone, pertanto, un cambio fondamentale di paradigma tecnico-culturale nel concetto di valutazione e gestione della sicurezza. Allo scopo RSE applica tale metodologia a casi campione rappresentativi della realtà nazionale per facilitarne la promozione e la diffusione.

3.5 SICUREZZA DEGLI IMPIANTI E DELLE STRUTTURE INDUSTRIALI

I problemi dell'ingegneria civile riguardano frequentemente sistemi complessi, di fronte ai quali i metodi tradizionali di analisi si rivelano spesso insufficienti. Si ricorre quindi a modelli di analisi nu-



Schema del laboratorio del Gran Sasso (a sinistra) e modello numerico del laboratorio Borexino (a destra).

merica con diversi livelli di complessità differenziati tra loro in base alle problematiche strutturali più ricorrenti negli impianti.

Tra i problemi tipici vi è il comportamento statico e dinamico di grandi strutture con particolare attenzione agli aspetti sismici. Un esempio particolarmente rilevante riguarda le verifiche sismiche svolte dai tecnici RSE per il laboratorio Borexino, che fa parte dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Si tratta di un programma sperimentale condotto nell'ambito di una collaborazione internazionale orientata allo studio della fisica dei neutrini solari a bassa energia.

Un altro esempio particolarmente significativo riguarda la valutazione della sicurezza a fronte di eventi incidentali come esplosioni e incendi. A tal riguardo, RSE ha sviluppato attività sperimentali di laboratorio, dispone di software riconosciuto internazionalmente e sviluppa modelli per l'analisi di scenari incidentali, fenomeni di esplosioni e incendio in grandi installazioni, quali gli impianti idroelettrici situati in caverna, i depositi di carburante, i gasdotti, eccetera.

Dispositivo sperimentale SOFFIA sviluppato da RSE per lo studio del rischio di formazione di nubi esplosive di polverino di carbone nelle centrali termoelettriche.

È interessante ricordare, infine, l'applicazione che le competenze di RSE hanno trovato in ambiti diversi da quelli per cui sono state sviluppate. Un esempio particolarmente rilevante riguarda l'impiego della modellistica numerica e delle indagini sperimentali in campo e in laboratorio a supporto della conservazione del patrimonio monumentale italiano

4 Combustibili fossili

Scorcio di un impianto termoelettrico.

La produzione di elettricità da combustibili fossili diventa, a partire dagli Anni '60, la tecnologia protagonista nel nostro Paese. Lo è tuttora anche a causa del mancato decollo del nucleare e nonostante l'attuale forte sviluppo delle rinnovabili.

È considerata una tecnologia sostanzialmente matura e poco dinamica; infatti, dalla metà degli Anni '60 fino agli Anni '80 il gruppo unificato da 320 MWe ha rappresentato in Italia un progetto replicato in numerosi esemplari con pochissime varianti. Ma è altrettanto vero che una serie di fattori ha spinto il sistema verso l'innovazione: la volontà di contenere le emissioni, l'opportunità di utilizzare il gas raggiungendo elevatissimi rendimenti, la necessità di maggiore flessibilità a fronte della quota crescente di rinnovabili non programmabili, l'impegno internazionale a ridurre le emissioni di gas serra. Ciò ha determinato una forte evoluzione delle tecnologie termoelettriche, nelle quali la ricerca per il settore elettrico, impersonata da RSE e dalle società che l'hanno preceduta e che sono in essa confluite, ha giocato un ruolo assai significativo, perseguendo obiettivi di affidabilità, economicità, sicurezza, diversificazione, flessibilità operativa, minori emissioni.

4.1 LA SIMULAZIONE DINAMICA DEGLI IMPIANTI

Nel 1963, ENEL vara un ambizioso programma di rinnovamento del sistema elettrico con nuovi impianti termoelettrici e linee elettriche e già nel 1966 si verifica il sorpasso della produzione termoelettrica sulla idroelettrica. Tra le altre iniziative di supporto all'esercizio degli impianti esistenti e sviluppo di nuovi impianti, viene creata una rilevante struttura di ricerca con la fondazione di centri di ricerca specializzati in varie discipline. Tra questi, il Centro Ricerca di Automatica (CRA) di Milano, istituito nel 1964 e diventato un centro di eccellenza nel campo del controllo di processo e dell'automazione degli impianti di produzione di energia e in generale di tutti gli apparati che costituiscono il sistema elettrico.

I sistemi di simulazione e controllo ivi sviluppati permettono infatti di intervenire in modo preventivo, anticipando problemi che potrebbero emergere solo successivamente durante la messa in ser-

vizio, il normale esercizio o il verificarsi di eventi critici degli impianti. Vengono così inizialmente studiati i modelli relativi a Centrali Termo-Elettriche (CTE) con caldaia a corpo cilindrico e in seguito con caldaia ad attraversamento forzato. Con questa tecnica, nei primi Anni '70 si sviluppa il modello semplificato ma completo di un impianto termonucleare ad acqua pressurizzata PWR.

L'aumento delle capacità di calcolo delle macchine consente la realizzazione di simulatori di impianto funzionanti in tempo reale. E così, negli Anni '80 e '90, vengono sviluppati simulatori per la prova del sistema di controllo dell'impianto (DCS), presso il costruttore del DCS, prima di essere installato nella CTE. Oltre alla dinamica di caldaia-turbina, sono studiati i processi legati al sistema di alimentazione del combustibile per impianti a carbone e aria comburente, letti fluidi bollenti e ricircolanti, controllo inquinanti NOx e CO con tecniche primarie in camera di combustione e iniezione di NH_3.

Sono realizzati i simulatori del primo impianto a ciclo combinato ENEL di Trino Vercellese, degli impianti ripotenziati con turbogas e il simulatore dell'impianto a ciclo combinato cogenerativo Serene e l'impianto IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) di Puertollano.

Nell'ultimo decennio continua lo sviluppo di applicazioni modellistiche per il controllo di processo con il modello delle celle a combustibile, il simulatore del ciclo combinato A2A di Cassano D'Adda, le micro turbine a gas, i processi di gassificazione da *tar* e gli impianti di cattura della CO_2.

4.2 RIDUZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE

A metà degli Anni '80, in previsione dell'inasprimento delle normative di legge in materia di emissioni, ENEL pianifica l'ambientalizzazione delle proprie centrali termoelettriche attraverso l'adozione di tecniche di controllo degli inquinanti gassosi da applicare a valle della combustione.

Le tecnologie adottate sono, per quanto riguarda l'abbattimento della SO_2, i processi a umido ("Wet FGD") di tipo "calcare-gesso", mentre per l'abbattimento degli NOx il processo di Riduzione Catalitica Selettiva (SCR) con ammoniaca (NH_3), in grado di effettuare una riduzione spinta e selettiva degli ossidi di azoto restituendo azoto e acqua come unici prodotti. In essa il ruolo chiave è svolto dal catalizzatore, un materiale ceramico a base di ossidi di titanio, vanadio e tungsteno in forma di monoliti o di piastre rivestite, dalla cui corretta scelta ed esercizio dipende la capacità di operare entro i limiti di emissione previsti, con costi di gestione contenuti.

Tenuta in considerazione l'assoluta novità a livello nazionale della tecnologia SCR-DeNOx, al fine di supportare adeguatamente l'introduzione e l'esercizio degli impianti e dei materiali catalitici, ENEL crea competenze specialistiche dedicate alla catalisi SCR all'interno della sua struttura di ricerca. In tale ambito RSE (al tempo CISE di cui ENEL era azionista maggioritario) svolge un ruolo rilevante per la comprensione del meccanismo di reazione, lo studio dei fenomeni di avvelenamento e lo sviluppo di tecniche di rigenerazione dei catalizzatori esausti attualmente impiegate negli impianti termoelettrici.

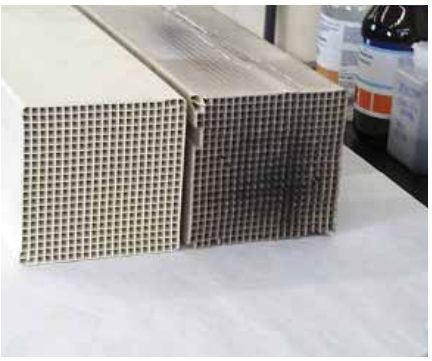
Negli anni più recenti, è studiata la possibilità di abbattere i microcontaminanti (diossine e vapori di mercurio presenti rispettivamente nei fumi degli inceneritori e nelle centrali a carbone) da effluenti gassosi simultaneamente alla reazione di denitrificazione.

Ulteriore possibilità indagata è l'integrazione del processo DeNOx-SCR all'interno di altri elementi impiantistici delle centrali termoelettriche, soluzione che consente di impiegare la tecnologia di denitrificazione in una configurazione più compatta, oltre ad offrire il vantaggio di una riduzione dei costi d'investimento e di una più facile installazione in retrofit a centrali esistenti.

In tale ottica è attualmente in fase di sperimentazione l'accorpamento del processo SCR con la depolverazione fumi mediante il collocamento del catalizzatore SCR-DeNOx in forma di pellet all'interno di maniche filtranti in fibra ceramica, di recente commercializzazione e in grado di operare ad alta temperatura.

Ai fini di individuare soluzioni tecniche che possono migliorare sensibilmente le prestazioni, in RSE sono effettuati studi di modellazione e simulazione termo fluidodinamica degli impianti di trattamento dei fumi, come nel caso dell'assorbitore degli ossidi di zolfo

Nella foto a sinistra in basso, la postazione di prova presso la centrale ENEL di La Spezia per la misura dell'efficienza di rimozione del mercurio da parte di monoliti con composizione opportunamente modificata (nella foto a destra il monolito prima e dopo la variazione della fase attiva).



(SOx) e del preriscaldatore dell'aria comburente di una centrale a carbone. In quest'ultimo caso, è individuata una modifica al condotto di passaggio dell'aria comburente che, sulla base dei risultati delle simulazioni, dovrebbe ridurre del 30 per cento i trafilamenti d'aria alle tenute che in alcuni casi possono diminuire il rendimento delle grandi caldaie del 3 per cento.

4.3 CICLI COMBINATI

Dopo l'abbandono dell'energia nucleare seguito all'incidente di Chernobyl, e anche sulla spinta di una crescente sensibilità ai temi dell'efficienza energetica e dell'impatto ambientale, negli Anni '80 l'Italia è tra i primi Paesi al mondo ad avviare la realizzazione di impianti a ciclo combinato a gas, che grazie ad uno slancio mondiale nell'innovazione delle turbine a gas e all'abbinamento con un ciclo di "bottoming" a vapore consentono un innalzamento dei rendimenti termoelettrici, da tempo fermi ad una sorta di barriera psicologica del 40-42 per cento netto.

Anche in questo ambito la ricerca di RSE, allora operante nella società CISE e nei centri di ricerca interni all'ENEL, ha un ruolo da protagonista, affiancando fin da subito le strutture di progettazione nell'effettuare studi sulle configurazioni di ciclo ottimali in termini di costo dell'energia prodotta, nello sviluppare l'automazione di un impianto decisamente più complesso di quelli a vapore, nell'indagare i problemi di consumo di vita e le tecniche di riparazione delle "parti calde" dei turbogas, macchine di prestazioni sempre più elevate e di conseguenza di tecnologia sofisticata, atta ad operare con temperature massime di 1.300 °C e oltre.

Manica filtrante e catalizzatore in pellet da collocare al suo interno.

Il primo impianto italiano di questo tipo è quello di Trino Vercellese, caratterizzato da un rendimento del 48 per cento: valore oggi decisamente modesto, ma che a fine Anni '80 rappresentava un successo dell'ingegneria energetica.

L'impianto di Trino, che vide un forte coinvolgimento dei ricercatori oggi confluiti in RSE, rappresentò il capostipite della numerosa serie di cicli combinati realizzati in Italia nei 20 anni successivi, sia come impianti "green field" nati in nuovi siti, sia mediante trasformazioni di impianti a vapore preesistenti ("repowering") dei quali oltre alle infrastrutture fu spesso recuperata, adattandola, la turbina a vapore. Anche

in questa fase di rapida penetrazione del ciclo combinato la ricerca, oggi in RSE, fu di forte supporto sia all'ENEL che alle altre aziende elettriche nate dalla liberalizzazione della produzione elettrica: innumerevoli furono gli studi tecnico-economici e di impatto ambientale che portarono a realizzare molti degli impianti che oggi formano l'ossatura del parco termoelettrico nazionale.

4.4 LA CATTURA DELLA CO_2

A partire dal 2006 RSE è anche attiva nello sviluppo di tecnologie innovative di cattura pre e post combustione del biossido di carbonio (CO_2). La CO_2 non è un inquinante ma è uno dei principali gas serra di origine antropica. È opinione accreditata che l'incremento in atto dal secolo scorso della concentrazione di CO_2 in atmosfera sia responsabile delle alterazioni climatiche del pianeta. Il massiccio utilizzo dei combustibili fossili (petrolio, gas naturale e soprattutto carbone) per la produzione di energia è tra le cause principali dell'emissione e dell'aumento di concentrazione di CO_2 in atmosfera.

Per contrastare questo fenomeno, i principali Paesi industrializzati hanno assunto impegni e stanno adottando strategie comuni di riduzione delle emissioni di CO_2 in atmosfera che includono, come intervento essenziale, l'adozione della cosiddetta CCS (Carbon Capture and Storage/Sequestration) da associare al proseguimento dell'utilizzo dei combustibili fossili.

La CCS rappresenta un insieme di tecnologie mediante le quali l'anidride carbonica è separata solitamente dai fumi prodotti dalla combustione (cattura), trasportata mediante gasdotti per essere poi iniettata e stabilmente confinata nel sottosuolo in formazioni geologiche idonee. Una concreta possibilità d'intervento a breve termine per la cattura, o meglio la separazione, della CO_2 dai fumi generati dalla combustione è rappresentata da un processo da tempo utilizzato nell'industria petrolchimica, in cui un solvente costituito da ammina disciolta in acqua assorbe la CO_2 dai fumi a bassa temperatura e la rilascia successivamente per riscaldamento, generando una corrente di CO_2 pressoché pura. Il principale ostacolo all'introduzione di questa tecnologia negli impianti termoelettrici è rappresentato dal suo elevato costo d'esercizio, imputabile per la massima parte all'ingente quantità di calore da fornire nella rigenerazione del solvente. In termini numerici il processo di cattura della CO_2 con l'ammina in soluzione acquosa richiede circa un terzo dell'energia elettrica complessivamente prodotta dalla centrale.

Nei laboratori RSE sono sviluppati sorbenti solidi innovativi basati sull'ancoraggio dell'ammina su materiali granulari ad elevata porosità. Tali sorbenti hanno un'elevata efficienza di adsorbimento per la CO_2 e una completa rigenerabilità, a fronte di una richiesta energetica, nello stadio di rigenerazione inferiore del 30 per cento rispetto alle ammine in soluzione acquosa. In aggiunta, il loro impiego offre anche il vantaggio di evitare tutti quegli inconvenienti tipici del processo in fase acquosa come l'insorgere di corrosione, la formazione di schiuma e la degradazione dell'ammina.

Per questo progetto di ricerca ENDESA (società per l'energia elettrica spagnola) ha conferito ad RSE il premio per l'innovazione tecnologica "*NOVARE Prize* 2007" nella categoria di concorso *Tecnologie di Combustione pulita*.

Per la verifica in campo delle potenzialità e dell'effettiva competitività industriale della tecnologia di cattura "con sorbenti solidi", è realizzato un impianto pilota in grado di trattare 100 Nm^3/h di fumi di combustione attualmente in fase di sperimentazione presso la Centrale ENEL di Brindisi.

4.5 UTILIZZO NON CONVENZIONALE DEI COMBUSTIBILI FOSSILI

RSE è impegnata da diversi anni in attività di sviluppo di tecnologie di produzione di energia che non utilizzano in modo diretto i combustibili fossili. Si tratta di processi per la combustione, la gassificazione, il "reforming" e le ossidazioni parziali di combustibili di diversa natura basate su sistemi catalitici.

In particolare sono allo studio sistemi a membrana per la separazione di H_2 da utilizzare in reattori di Water Gas Shift (pre-combustione) in impianti IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle), con l'obiettivo di ridurre il costo di produzione delle membrane con barriera ossidativa e migliorare le prestazioni, in termini di selettività e flusso d'idrogeno permeato. Si tratta di membrane composite al Pd (Palladio) con barriera ceramica, che consentirebbero di ridurre lo spessore di palladio e, contemporaneamente, di aumentare la temperatura di lavoro (dai 400 °C delle membrane con barriera ossidativa fino a 550 °C).

RSE ha sviluppato, a partire dal 2004, tecniche di sintesi delle membrane basate su un processo di deposizione chimica in soluzione ("electroless plating") che ha ormai raggiunto prestazioni allineate con il migliore stato dell'arte della ricerca internazionale. Quest'ultima tecnologia potrà anche essere utilizzata per la realizzazione di

Impianto pilota di cattura CO_2 con sorbenti solidi presso la centrale termoelettrica a carbone di Brindisi (ENEL). A fianco, unità di assorbimento CO_2 con sorbente solido all'interno.

un processo prototipale di steam reforming del gas naturale, migliorativo dello stato dell'arte, in cui la reazione di reforming, quella di shift e la separazione dell'idrogeno avvengono in un singolo reattore.

Si eseguono valutazioni tecnico-economiche dell'impiego di membrane in impianti in cui la separazione fra l'idrogeno e la CO_2 del *syngas* è ottenuta mediante un reattore a membrana (WGS basato su membrana di Pd a barriera ossidativa). Si analizzano le diverse possibili configurazioni impiantistiche, come il recupero energetico mediante un combustore catalitico dell'H_2 non separato dalla membrana, o il recupero diretto come combustibile di H_2 tramite successiva separazione criogenica basata sulla condensazione della CO_2 da inviare al confinamento. In quest'ultimo caso l'H_2 recuperato viene inviato anch'esso al turbogas mentre la CO_2 può essere inviata a confinamento senza i consumi elettrici per la sua compressione in quanto è sufficiente l'impiego di una pompa.

Si sviluppano e caratterizzano membrane per la separazione dell'ossigeno e dell'idrogeno basate su ossidi conduttori misti, preparate utilizzando una nuova tecnica di deposizione di plasma spray a bassa pressione (LPPS-TF), in combinazione con l'applicazione di strati catalitici nano-porosi. Tali membrane potrebbero essere impiegate per il reforming del gas naturale con reattore a membrana, ad alta temperatura (800 °C). È stato progettato, realizzato e messo in servizio un impianto pilota di laboratorio per prove con membrane di separazione idrogeno (conduttori misti) in grado di operare fino a 1.000 °C e 2 MPa.

Un obiettivo dell'attività è anche la valutazione sperimentale delle proprietà chimico-fisiche e separative di membrane per la separazione dell'ossigeno dall'aria. L'attività è propedeutica allo sviluppo di una tecnologia utilizzabile in diversi processi quali la gassificazione del carbone in un ciclo combinato (IGCC), l'ossicombustione (Oxy-

combustion) e il reforming del gas naturale, e in prospettiva potrebbe trovare ampia applicazione in competizione con i tradizionali processi di frazionamento criogenico dell'aria.

4.6 CELLE A COMBUSTIBILE

RSE è da tempo impegnata nello sviluppo di processi di generazione a celle a combustibile. Le prime esperienze, condotte negli Anni '80 presso i laboratori del CISE, hanno visto i ricercatori confrontarsi dapprima con l'attività sperimentale di caratterizzazione di una cella a combustibile da 2,5 kWe ad acido fosforico (PAFC) acquistata dalla statunitense Energy Research Corp. (ERC, ora Fuel Cell Energy – FCE) e successivamente con lo studio dei materiali per elettrodi ed elettroliti di celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC). All'inizio degli Anni '90 inizia la collaborazione, di durata ventennale, con Ansaldo Ricerche (poi diventata Ansaldo Fuel Cells), sulla tecnologia delle celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC).

Questa attività ha portato alla messa a punto di postazioni di prova adatte alla gestione automatica delle operazioni di condizionamento e caratterizzazione di celle e stack di taglia compresa tra poche decine di We a 1 kWe ed è culminata nella realizzazione di un impianto dimostrativo per il condizionamento e l'esercizio di uno stack MCFC da 125 kWe, accoppiato ad una microturbina a gas.

Membrane al palladio di diametro: 10 mm (sopra) e di 25 mm (sotto).

L'impianto, alimentato con gas naturale riformato, realizzato nell'ambito del progetto Europeo MOCAMI, ha consentito di completare il condizionamento dello stack e di operare a carico costante per circa due mesi in modalità ibrida, dimostrando la fattibilità dell'accoppiamento cella a combustibile MCFC con la microturbina.

Più recentemente sono state condotte esperienze sulle tecnologie di cella basate su membrane a scambio protonico sia a bassa (PEM) sia ad alta temperatura (HTPEM) di esercizio. Di particolare rilievo è stato lo studio di un sistema di potenza PEM da 3 kWe, idoneo per applicazioni di back up, alimentato con l'idrogeno immagazzinato in un sistema da 6 m^3 a base di lantanio e nichel. Questo studio ha dimostrato su scala prototipale, la possibilità di impiegare il calore generato dalle celle a combustibile in esercizio per il desorbimento dell'idrogeno dagli idruri.

L'attività sulle celle a combustibile continua ora con la sperimentazione in campo di HTPEM alimentate con biogas da digestione

anaerobica, purificato con metodi biologici, nell'ottica di un utilizzo efficiente e pulito dei rifiuti organici.

Nell'ambito delle applicazioni biologiche di questa tecnologia, RSE sta studiando la straordinaria potenzialità del metabolismo microbico riguardante la capacità dei batteri di trasferire gli elettroni derivanti dai processi ossidativi della sostanza organica ad elettrodi metallici anziché all'ossigeno, in una sorta di "cortocircuito" tra metallo e componente biologica. Lo studio recente di alcuni nuovi meccanismi alla base di questo fenomeno, ha suggerito la possibilità di sfruttare i microrganismi per la produzione di energia elettrica in pile a combustibile, definite "microbiche".

Prototipo da laboratorio di una cella a combustibile microbica alimentata con refluo primario di depuratore. La potenza elettrica generata dalla cella stessa può accendere un led.

La nuova tecnologia delle celle a combustibile MFC (dall'inglese Microbial Fuel Cells) richiama oggi uno speciale interesse da parte della comunità scientifica poiché, in linea di principio, è in grado di rendere possibile lo sfruttamento della biomassa marginale contenuta in qualsiasi forma di rifiuto biodegradabile producendo energia elettrica rinnovabile. Il sistema funziona a bassa temperatura, è di semplice realizzazione e dal costo relativamente contenuto; può ridurre i problemi dello smaltimento dei rifiuti e reflui organici (civili ed industriali), anche tossici, e quelli dell'accumulo di scarti agroalimentari.

L'attività di RSE si inserisce a pieno titolo nelle sempre più numerose sperimentazioni in corso nel mondo, forte di un'esperienza e del know-how all'avanguardia maturato in oltre vent'anni di studi sulla corrosione microbiologica dei metalli e sui metodi per il controllo della crescita dei biofilm nei circuiti di raffreddamento degli impianti industriali. Nella promettente tecnologia delle MFC gli stessi meccanismi che inducono effetti deleteri sulla funzionalità dei materiali, producendo la dissoluzione dei metalli, possono essere sfruttati produttivamente in campo energetico.

4.7 MATERIALI E CORROSIONE

Nel periodo della nazionalizzazione, parallelamente alla realizzazione degli impianti termoelettrici, ENEL, appoggiandosi alle proprie strutture di ricerca, studia il comportamento, le proprietà e il degrado nel corso dell'esercizio dei materiali utilizzati o candidati per la realizzazione dei componenti. Per quanto riguarda la caratterizzazione delle

proprietà meccaniche in RSE sono eseguite prove convenzionali di determinazione della resistenza a trazione e compressione, misure delle proprietà di tenacità e di resistenza allo scorrimento viscoso (creep), nonché di resistenza alle sollecitazioni cicliche (fatica) su nuovi acciai e leghe a base di nichel.

Lo scopo delle prove è in generale quello di identificare i nuovi materiali che possono operare in condizioni più gravose (temperatura, pressione e anche ambienti aggressivi) legate ad impianti con maggiore rendimento energetico e minore impatto ambientale. Correlando in genere la caratterizzazione meccanica a quella microstrutturale svolta con esami in microscopia ottica ed elettronica, si è cercato negli ultimi anni di individuare la composizione ottimale di acciai ferritico-martensitici per impieghi in generatori a vapore di tipo ultra supercritico (USC), leghe di nichel monocristalline per impieghi in impianti turbogas operanti in condizioni di temperatura e ambienti più aggressivi, acciai rafforzati con ossidi dispersi (ODS) che dovrebbero trovare impieghi nei futuri impianti nucleari di IV generazione o negli impianti nucleari a fusione. Oltre alle prove convenzionali particolare attenzione è dedicata allo sviluppo di nuove tecniche di prova per caratterizzazione meccanica operando su due linee principali di attività: da una parte interessandosi alle prove su campioni miniaturizzati o di dimensione comunque ridotta rispetto ai provini standard, dall'altra sviluppando nuovi *rig* dedicati all'esecuzione di prove meccaniche in ambienti controllati.

Un impianto ibrido MCFC/microturbina.

Altri temi su cui RSE opera da tempo nei suoi laboratori sono:

- la caratterizzazione termofisica di materiali e rivestimenti utilizzati in campo energetico mediante misure di diffusività/conducibilità termica, calore specifico e coefficiente di dilatazione termica. Attraverso queste misure è anche possibile ottenere indicazioni sul livello d'alterazione delle caratteristiche iniziali di materiali massivi e/o rivestimenti, in funzione dell'esposizione alle alte temperature o ad altri agenti potenzialmente in grado di promuoverne il degrado.
- La valutazione della resistenza ad erosione da particolato solido e da gocce in condizioni rappresentative dell'impianto. A supporto di questi ed altri studi è disponibile un profilometro a stilo in grado di effettuare mappe morfologiche bidimensionali di superfici.

In particolare, si ricorda che fenomeni erosivi da particolato solido sono presenti in tutte le principali tipologie d'impianto per la produzione di energia elettrica. L'erosione da gocce oltre che nelle turbine a vapore può essere presente anche nel primo stadio del compressore delle turbine a gas, in funzione delle modalità d'esercizio.

- A seguito dell'impiego di combustibili non convenzionali, molti componenti degli impianti per la produzione di energia elettrica nei quali si utilizza un combustibile diverso dal gas naturale sono sottoposti a condizioni operative più severe. La problematica è molto attuale come mostra la partecipazione di RSE a diversi progetti europei sul tema. Utilizzando un impianto di generazione continua di gas caldi contenenti contaminanti ed erosivi e forni per prove di ossidazione ciclica, in RSE si studiano da anni la resistenza all'ossidazione e corrosione/erosione ad alta temperatura di materiali e rivestimenti utilizzabili per la realizzazione di componenti d'impianto. L'analisi distruttiva dei campioni esposti consente di ottenere informazioni sui principali meccanismi di degrado che hanno luogo nelle condizioni rappresentative dell'esercizio. I campioni da esporre ad alta temperatura sono sostanzialmente di due tipologie differenti, a seconda che le prove siano effettuate in regime adiabatico o in regime di scambio termico. Le prove di esposizione in regime adiabatico sono condotte esponendo i campioni non raffreddati del materiale da qualificare in un flusso di gas, ad alta temperatura e velocità, per un tempo prefissato, al termine del quale viene quantificato il danneggiamento. Nel caso delle prove di esposizione in regime di scambio termico i campioni dei materiali da qualificare sono posti all'estremità di sonde raffreddate, immerse nel flusso di fumi prodotti. Per applicazioni in campo sono messe a punto diverse tipologie di sonda in grado di monitorare la corrosione direttamente su impianto.
- Sono sviluppati codici di previsione di vita residua per materiali massivi e rivestimenti utilizzati per la realizzazione di componenti che tra i dati d'ingresso utilizzano i risultati sperimentali ottenuti presso i propri laboratori.

4.8 LA CORROSIONE MICROBIOLOGICA

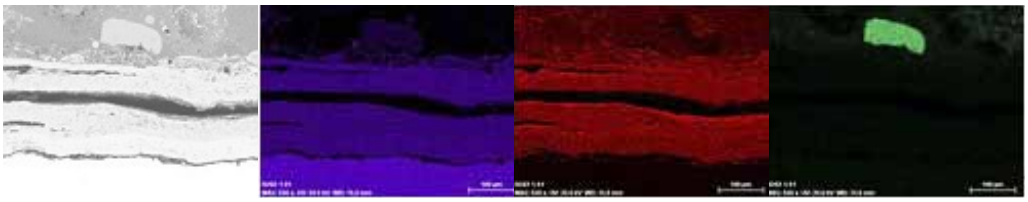
Tutte le superfici immerse in ambienti naturali acquatici e in quelli umidi come il suolo, nell'arco di poche ore sono colonizzate da comunità di batteri, funghi e alghe che si accrescono e sviluppano un

Camera speciale progettata in RSE per l'esecuzione di prove di fatica oligociclica ponendo il materiale a contatto con flusso di gas corrosivo.

ricco micro-ecosistema, aggressivo dal punto di vista della corrosione e difficile da rimuovere. Questo processo riguarda anche i metalli, inclusi quelli tossici come il rame, poiché i microrganismi sono in grado di secernere sostanze protettive che ne consentono l'insediamento anche sui substrati più inospitali.

I batteri, primi colonizzatori, possono promuovere fenomeni di "corrosione microbiologica" così severi da portare a fine vita gli impianti industriali e le strutture anche in pochi anni dall'inizio dell'esercizio. I condensatori di vapore soffrono in modo particolare dei problemi di corrosione microbiologica e gli impianti termoelettrici devono adottare contromisure, scegliendo i materiali più resistenti alla corrosione e, dove questo non è possibile, adottando opportuni trattamenti dell'acqua, i più comuni dei quali sono basati sul dosaggio saltuario di cloro o sali ferrosi.

Sulla base di ricerche condotte nel corso di più di quindici anni presso impianti termoelettrici e circuiti di raffreddamento, i ricercatori RSE hanno sviluppato innovative strategie anticorrosive e sistemi di monitoraggio della crescita dei biofilm (sistema BIOX) per il controllo del rischio di corrosione microbiologica negli impianti industriali. Le competenze di RSE nel campo della corrosione microbiologica sono valorizzate in comitati nazionali (Associazione Italiana di Metallurgia), a livello internazionale (Federazione Europea di Corrosione) e in corsi specialistici finanziati dall'Unione Europea (Summer schools e dottorati per giovani ricercatori).



Fe **O** **Ti**

Mappe SEM-EDS della superficie di una sonda di corrosione per la caratterizzazione della distribuzione di alcuni elementi chimici nei prodotti di corrosione.

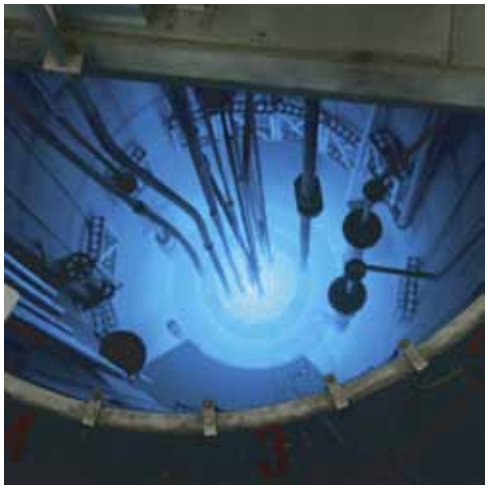
5 Energia nucleare

5.1 GLI ANNI DELL'ATOMO ITALIANO

La ricerca del nostro Paese nel campo elettronucleare ha avuto un'evoluzione non facile, che ha attraversato tre fasi temporali, intimamente legate agli avvenimenti storico-politici che hanno influenzato la situazione energetica degli ultimi 60-70 anni.

In una prima fase, che va dalla fine del secondo conflitto mondiale all'inizio degli Anni '60, la ricerca nucleare italiana prende il via dal CISE e si estende poi al CNEN (Comitato Nazionale Energia Nucleare). È ancora di carattere pionieristico e si prodiga per affacciarsi sullo scenario internazionale e per orientare le scelte industriali del Paese nel settore elettroenergetico, peraltro in forte crescita.

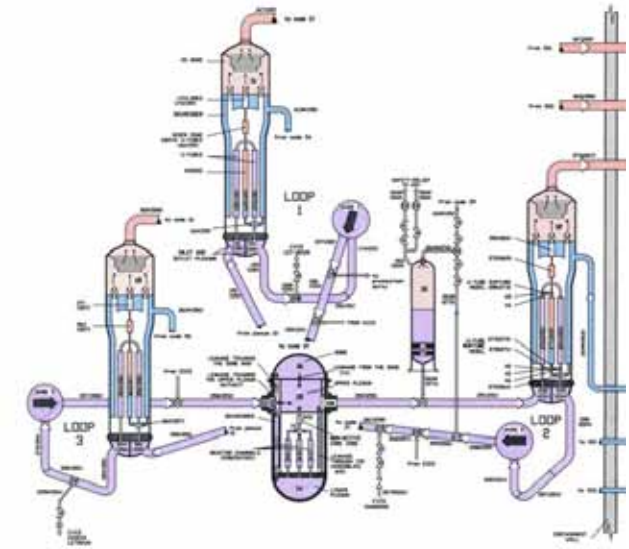
In una seconda fase, conseguente alla nazionalizzazione del settore elettrico, si assiste ad un distacco da questa strategia pionieristica e ad una separazione di ruoli e obiettivi della utility di Stato da quelli del CNEN. Al momento della sua costituzione, infatti, ENEL eredita le centrali di Latina, Trino Vercellese e Garigliano e la ricerca italiana in campo elettronucleare nazionale diventa funzionale alle esigenze degli impianti già realizzati e alle nuove scelte progettuali ormai orientate verso le tipologie di impianti statunitensi già provate. Sempre in questa fase, la crescita della produzione di energia elettrica in Italia è sostenuta da una crescita nel consumo di idrocarburi, lasciando pochi margini per uno sviluppo della fonte nucleare a differenza di quanto avviene nelle altre nazioni europee industrializzate.



Effetto Cerenkov in un reattore nucleare da ricerca.

La terza fase storica è collocabile a valle dell'incidente di Chernobyl del 1986 e del referendum dell'anno seguente che, di fatto, segna la fine della produzione nucleare sul suolo italiano. Dalla fine degli Anni '80 in poi si assiste ad un alternarsi di riaperture e di chiusure nei confronti dell'atomo.

La trasformazione di ENEL in società per azioni, nel 1992, spinge gli interessi nucleari italiani verso l'estero. Oltre alla presenza dei costruttori nazionali come Ansaldo sui cantieri europei e asiatici, sono rilevanti da parte di ENEL l'acquisizione del controllo di compagnie elettriche impegnate sul nucleare in Spagna e Slovacchia e la partecipazione alla realizzazione del reattore francese EPR.



Analisi di transitori operazionali di un impianto elettronucleare ad acqua in pressione (a fianco) con simulazione dinamica con il codice LEGO-PST sviluppato da RSE.

Su questa strada, negli Anni 2000 sembra possibile una ripresa del nucleare anche in Italia. L'incidente giapponese di Fukushima e il nuovo referendum del 2011, tuttavia, spostano ancora una volta in avanti l'orizzonte temporale per questo settore.

5.2 LA RICERCA PER IMPIANTI E PROGETTI ITALIANI

Negli anni in cui le centrali nucleari italiane sono operative, tra il 1962 e il 1986, la ricerca di ENEL e dei suoi centri collegati è concentrata su tematiche legate all'esercizio e alla sicurezza delle centrali esistenti e dei nuovi impianti in progetto.

Ci si confronta, in particolare, con i problemi che emergono dall'esercizio dell'impianto ad acqua bollente di Caorso, collegato per la prima volta alla rete nel 1978, e con quelli relativi alla centrale in costruzione a Montalto di Castro. Ad esempio, per il trattamento e la stabilizzazione dei rifiuti a bassa radioattività specifica scaricati da questo tipo di centrali, la collaborazione tra il Centro di Ricerca Termica e Nucleare (CRTN) e quello di Ricerca Idraulica e Strutturale (CRIS) permette di verificare i limiti della tecnica di cementazione delle resine a scambio ionico.

Sempre dal CRTN, in collaborazione con il Politecnico di Milano e con il Centro Euratom di Ispra, vengono sperimentate con successo

delle tecniche innovative di incenerimento delle resine e dei rifiuti a bassa attività specifica mediante uno speciale impianto pilota in scala appositamente costruito. In questi anni, inoltre, il CISE mette a punto un metodo per l'inertizzazione definitiva, mediante cementazione, delle guaine in Magnox degli elementi di combustibile utilizzati nella centrale di Latina.

L'esercizio sicuro ed efficiente delle centrali nucleari richiede conoscenze e strumenti adeguati: il CISE, su mandato di ENEL, conduce indagini sperimentali e sviluppa diversi modelli e metodi di calcolo che consentono la soluzione di svariati problemi connessi con l'impianto e le sue strutture, nonché con la gestione del processo di generazione nucleare. In quest'ambito sono realizzati vari codici di calcolo originali, in grado di studiare il comportamento del nocciolo del reattore.

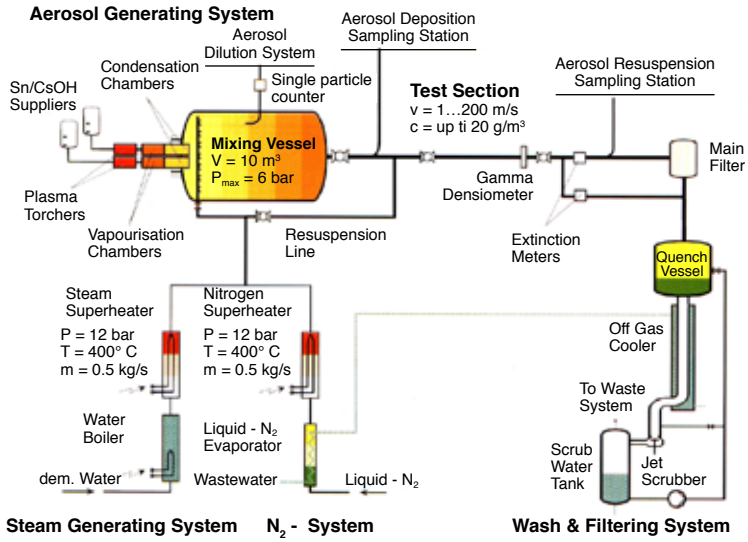
Sulla base delle indicazioni della politica energetica governativa, dalla fine degli Anni '70, ENEL sviluppa un Progetto Unificato Nucleare (PUN) basato sul sistema ad acqua in pressione (PWR). Questo progetto vede impegnate molte organizzazioni, sia interne sia esterne all'Ente, tra le quali ha un ruolo di rilievo la Direzione Studi e Ricerche dello stesso ENEL, con i centri ad esso collegati. In questo contesto sono effettuate verifiche del comportamento termoidraulico in condizioni di esercizio, analisi di transitori di pressione e temperatura nel contenitore in situazioni incidentali, nonché calcoli di tassi di dose di radiazione.

Impianto pilota di incenerimento dei rifiuti radioattivi a bassa radioattività specifica.

I centri di ricerca milanesi avviano inoltre programmi di ricerca sul problema della corrosione cui sono soggetti alcuni componenti critici dell'impianto nucleare, come i generatori di vapore degli impianti PWR dell'ormai avviato Progetto PUN, ed effettuano ricerche sul trattamento chimico delle superfici contaminate, sia ai fini dell'esercizio sia ai fini della messa fuori servizio e dell'eventuale smantellamento.

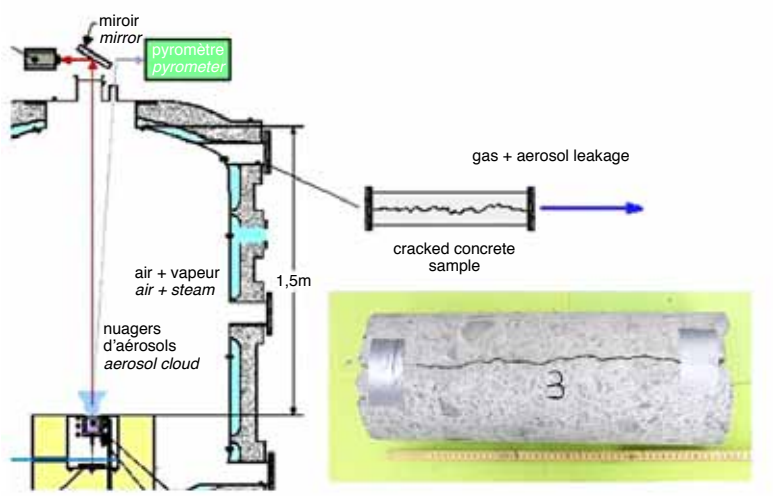
Accanto al simulatore tridimensionale del reattore del PUN, negli Anni '80, dai centri di ricerca ENEL vengono sviluppati modelli di simulazione dei transitori operazionali e incidentali. In questo contesto è attivato un apposito gruppo di lavoro con ENEA/DISP (l'attuale Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), Ansaldo e le Università di Roma e di Pisa per partecipare in modo coordinato ai più importanti progetti di ricerca internazionali dedicati allo studio degli incidenti nucleari gravi e al rischio di rilasci radioattivi. Su questo tema, i ricercatori italiani mettono a punto, ag-

Particolare del mixing vessel e schema del circuito sperimentale STORM (installato al JRC di Ispra), dedicato allo studio dei fenomeni di deposizione e risospensione degli aerosol radioattivi in caso di incidenti nucleari gravi.



giornano e applicano i codici di calcolo riconosciuti negli USA dalla Nuclear Regulatory Commission e dall'EPRI.

Affievolendosi le esigenze impiantistiche nazionali, dalla fine degli Anni '80 prendono sempre più spazio le partecipazioni italiane ai progetti di ricerca statunitensi ed europei che, a valle degli incidenti di Three Mile Island e di Chernobyl, richiamano l'attenzione della ricerca nucleare mondiale sul tema del rischio di incidenti con forte impatto radiologico.



Schema del test COLIMA, realizzato in collaborazione con il centro di ricerca francese CEA di Cadarache, per lo studio della ritenzione degli aerosol radioattivi nelle crepe di un contenitore di calcestruzzo danneggiato.

Allo stesso tempo, la chiusura delle centrali nucleari italiane pone svariati problemi legati al *decommissioning* degli impianti; si procede quindi alla messa a punto di metodologie mirate alla definizione di campi di attivazione e di dose relativamente ai materiali strutturali esterni al nocciolo a partire dalle condizioni operative degli impianti considerati.

Prove di combustione di pozze di sodio liquido in aria presso i laboratori di RSE.

5.3 L'EVOLUZIONE DEL NUCLEARE

L'energia nucleare rappresenta tuttora una scelta strategica chiaramente adottata in tutti i Paesi maggiormente industrializzati. La SET Plan Technology Map dell'Unione Europea valuta che la produzione di energia elettrica da fonte nucleare, nonostante le preoccupazioni suscitate dall'incidente di Fukushima, manterrà nei prossimi decenni un peso paragonabile a quello attuale e quindi decisamente significativo. Per contro, una serie di questioni aperte ostacola un più ampio e diffuso sfruttamento di questa fonte energetica, come il rischio di incidenti nell'esercizio degli impianti, il confinamento delle scorie radioattive a vita lunga, le non molto abbondanti riserve di uranio naturale e il rischio di un impiego del materiale radioattivo per fini terroristici.

I gravi incidenti avvenuti a Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) e Fukushima (2011) hanno fatto sì che le scelte di politica energetica e i processi autorizzativi siano diventati più critici e severi verso l'atomo, spingendo la ricerca verso soluzioni impiantistiche orientate ad una sicurezza sempre maggiore.

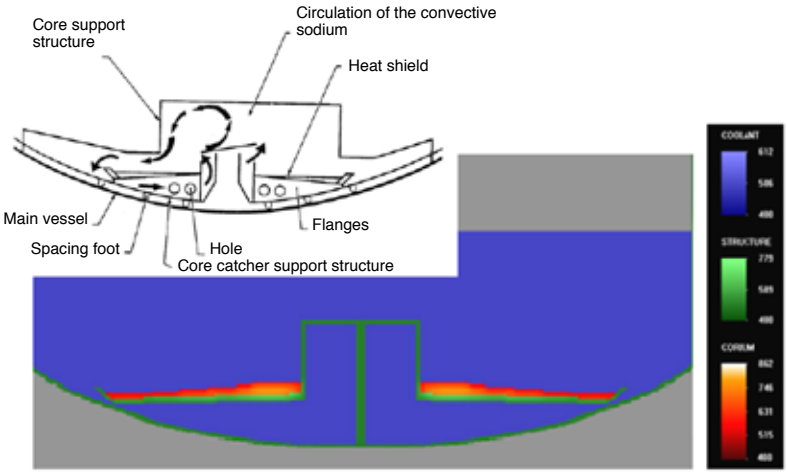
Infatti, gli scenari incidentali più gravi, che un tempo non erano considerati nel dimensionamento delle strutture e dei sistemi di emergenza per via della loro bassa probabilità di accadimento, sono ora inclusi nei cosiddetti "incidenti di base di progetto" (Design Basis Accidents) dei nuovi impianti, al fine di evitare conseguenze radiologiche per la popolazione esterna anche in caso di fusione del nocciolo del reattore.

Queste tendenze hanno condotto negli ultimi anni allo sviluppo degli impianti di tipo termico ad acqua leggera di Terza Generazione Avanzata (Gen III+), i cui primi esemplari sono rappresentati dagli EPR in costruzione in Finlandia, in Francia e in Cina e dagli AP1000, anch'essi in costruzione in siti cinesi e già scelti per nuove realizzazioni negli USA.

Sul fronte della ricerca, lo scenario dell'incidente giapponese ha fatto guadagnare terreno allo sviluppo dei reattori modulari di piccola taglia (SMR) già lanciato negli anni scorsi dagli americani, mentre per la cosiddetta "Quarta Generazione" di reattori, sono in posizione di privilegio i reattori veloci refrigerati a metallo liquido, considerati fra i più adatti al raggiungimento dell'obiettivo di sostenibilità del nucleare nel lungo termine.

Montaggio di un'apparecchiatura sperimentale per l'esecuzione di test con metalli liquidi.

Un ipotetico scenario incidentale di un reattore veloce a sodio di IV Generazione: analisi di refrigerabilità di una porzione di nocciolo fuso mediante il simulatore fast-running CORIUM-2D sviluppato da RSE.



5.4 IL RUOLO DI RSE

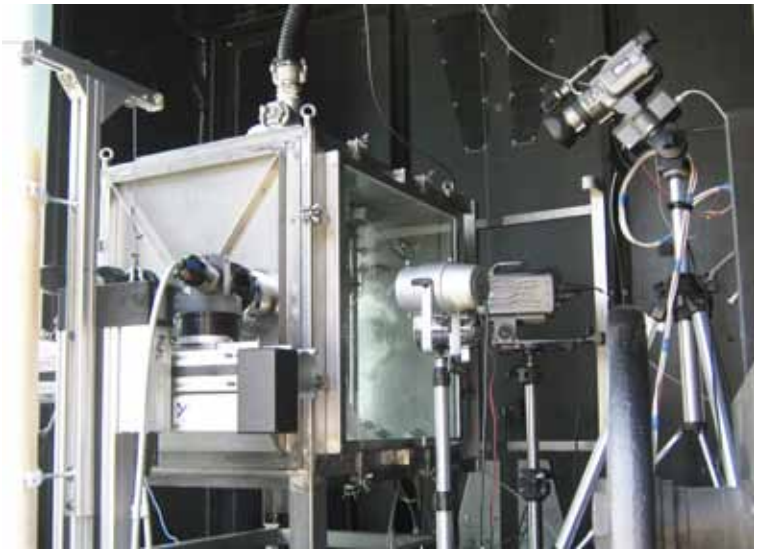
Dalla fine degli Anni '80, i ricercatori delle istituzioni da cui proviene RSE, insieme ai colleghi di Ansaldo, di ENEA e delle università italiane, partecipano attivamente ai programmi internazionali di sviluppo di reattori innovativi, come lo SBWR di General Electric e l'AP600 di Westinghouse, attraverso specifici accordi stipulati dalla struttura nucleare di ENEL. Vengono svolte anche ricerche sperimentali sui sistemi di sicurezza passivi (ad esempio sistemi di asportazione del calore dal contenitore basati su meccanismi di convezione naturale), e sviluppato e sperimentato un sistema di iniezione del refrigerante in condizioni di emergenza basato su uno *steam injector*, poi brevettato, che raggiunge prestazioni di interesse internazionale. Per molti anni vengono anche gestiti accordi di collaborazione con la francese EDF per lo sviluppo e validazione di strumenti di calcolo avanzato, come gli italianissimi LEGO-PST ed ECART tuttora sviluppati da RSE per l'analisi del processo di generazione nucleare in situazioni sia di esercizio sia di incidente.

Sulla base delle esperienze acquisite, i ricercatori milanesi sono in grado di sviluppare propri strumenti di simulazione degli incidenti nucleari che sono riconosciuti a livello internazionale, e si fanno anche promotori di programmi sperimentali di rilevanza europea.

Tra questi sono da menzionare il Progetto STORM (Simplified Tests On the Resuspension Mechanism) dedicato allo studio delle fenomenologie di deposizione e risospensione degli aerosol radioattivi in caso di incidente con degrado del nocciolo, realizzato in collegamento con il JRC-Ispra, e il Test COLIMA dedicato alla ritenzione dell'aerosol radioattivo nelle crepe di un contenitore in calcestruzzo danneggiato, realizzato attraverso una collaborazione tra gli specialisti di RSE e quelli del centro francese CEA di Cadarache. Queste competenze sono sfruttate anche nell'ambito di collaborazioni con ENEA e Università di Pisa dedicate alla valutazione dei possibili rilasci di radioattività in eventi incidentali del reattore sperimentale a fusione ITER.

Questo coinvolgimento di RSE nella ricerca nucleare internazionale consente a tutt'oggi di mantenere aggiornate competenze nel settore elettroenergetico nel suo insieme, comprendendo anche la fonte nucleare, che copre attualmente circa il 30% dello share elettrico europeo e per la quale si prospettano nuovi sviluppi.

Le competenze sviluppate da RSE sono di tipo industriale e applicativo, caratterizzate da una forte sensibilità nei confronti delle esigenze della progettazione e della gestione degli impianti per la produzione energetica nucleare di grande potenza, con particolare attenzione alla loro interazione con la rete elettrica e con l'ambiente,



Apparecchiatura LISOF (LIquid SOdium Facility) dedicata allo studio dell'interazione di piccoli getti di sodio in aria.

sì da rappresentare un punto di riferimento qualificato per l'industria nazionale che opera sul nucleare estero.

In particolare, RSE è in grado di valutare i rischi associati alle scelte nucleari dei Paesi confinanti, e di mantenere vive e aggiornate le competenze disponibili in un contesto di collaborazioni internazionali e di programmi di cooperazione promossi dall'Unione Europea: un coinvolgimento che consente una valutazione tecnico-economica sempre aggiornata dell'opzione nucleare sull'intero ciclo tecnologico, disponibilità e costi di materiali e impianti, approvvigionamento di combustibile, gestione delle centrali, decommissioning e smaltimento rifiuti.

Strumenti di calcolo di particolare rilievo che vengono sviluppati in questo contesto sono i simulatori ingegneristici sia degli impianti PWR di ultima generazione sia di quelli a neutroni veloci raffreddati a metallo liquido di IV Generazione. Questi simulatori, costruiti con il codice LEGO-PST, consentono di acquisire sensibilità sul comportamento stazionario e dinamico dell'impianto da studiare e sulla sua risposta a perturbazioni e anomalie anche di notevole entità.

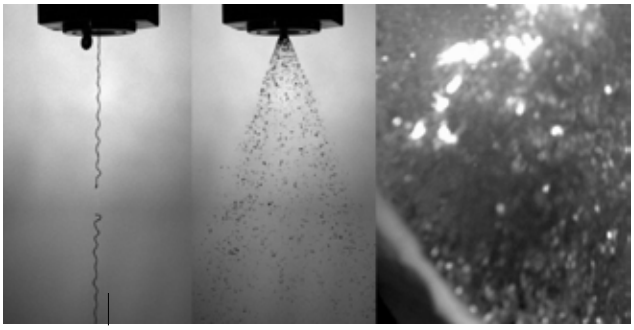
Nel contesto delle attività finalizzate alla simulazione dell'intero impianto, la modellazione della fisica del reattore svolge un ruolo fondamentale, consentendo di tener conto delle mutue interazioni tra processi neutronici e termoidraulici. Nel caso dei reattori veloci, i modelli di fisica del reattore e gli strumenti di calcolo in dotazione a RSE permettono anche di valutare la fattibilità degli obiettivi strategici di autofertilizzazione, non proliferazione e bruciamento degli attinidi minori.

Un approccio specifico è invece adottato da RSE per il tema degli "incidenti severi". In tale ambito, vengono indagate le conseguenze della fusione del nocciolo, le tecniche per il suo confinamento in sicurezza, il rilascio di radionuclidi dal combustibile e il rischio di contaminazione dell'ambiente esterno.

Su questo tema più che mai scottante, i ricercatori milanesi partecipano in ambito internazionale a programmi di ricerca teorici e sperimentali con un ruolo di primo piano, grazie anche a una particolare competenza specialistica ampiamente riconosciuta, maturata nel campo della fisica degli aerosol e delle interazioni chimico-fisiche dei prodotti radiotossici che possono essere rilasciati all'ambiente esterno. I risultati di questi studi sono utilizzati per la verifica e il miglioramento dei modelli sviluppati sia da altri centri di ricerca europei e americani sia dallo stesso RSE per il proprio codice ECART, riconosciuto tra gli strumenti di analisi più avanzati dalla Nuclear Regulatory Commission statunitense e dalla OECD/NEA.

Il recente incidente avvenuto in Giappone nella centrale di Fukushima è per esempio oggetto di dettagliate analisi, svolte in collaborazione con ENEA e con i partner del network europeo SARNET (Severe Accident Research NETwork) dedicato proprio alla ricerca sulle fenomenologie degli incidenti nucleari gravi.

Un tema importante affrontato da RSE sempre sul fronte della sicurezza è quello dei rischi associati all'impiego del sodio liquido come termovettore nei reattori di IV Generazione, in quanto questo metallo presenta alcune criticità in caso di fuoriuscita e contatto con aria o con acqua. Tale argomento è affrontato mediante sperimentazione di base sui fenomeni di nebulizzazione e innesco di fiamme, oltre che attraverso lo sviluppo e l'applicazione di strumenti di simulazione numerica.



Apparecchiatura LISOF (LIquid SOdium Facility): riprese ad alta velocità di test sperimentali realizzati in collaborazione con il Politecnico di Milano e l'Università di Pisa.

Sul fronte dei reattori veloci di IV Generazione raffreddati a metallo liquido, RSE sviluppa modelli termofluidodinamici per il codice di simulazione LEGO-PST validati attraverso benchmark internazionali coordinati da OECD/NEA.

Nell'ambito di iniziative EURATOM e in collaborazione con ENEA, RSE partecipa allo studio e alla caratterizzazione di alcuni materiali innovativi candidati ad impieghi nei reattori veloci raffreddati a piombo liquido. Si tratta di acciai con medio-alto contenuto di cromo, rafforzati dalla dispersione di ossido di ittrio (acciai ODS – Oxide Dispersion Strengthened). RSE effettua, prima e dopo l'esposizione al piombo liquido, prove meccaniche di trazione, resilienza e *creep* ed esegue dei test mediante tecnica *small punch*, con prove ad alta e bassa temperatura, per ottenere una caratterizzazione delle proprietà meccaniche equivalente a quella ottenibile con le prove convenzionali ma con un quantitativo estremamente ridotto di materiale.

6 Rinnovabili

6.1 IDROELETTRICO

Un componente d'epoca di una centrale idroelettrica.

La produzione idroelettrica, circa il 14 per cento della produzione totale nazionale e quasi il 70 per cento della produzione di energia da fonti rinnovabili, ha certamente giocato un ruolo chiave nello sviluppo industriale del Paese all'inizio del secolo scorso e, in particolare, nell'immediato dopoguerra, come è ben evidenziato dall'andamento delle attività costruttive legate alla realizzazione di serbatoi che costituiscono le principali infrastrutture dei grandi impianti idroelettrici.

Ragioni tecniche oggettive e scelte di politica energetica hanno sensibilmente ridotto il ruolo dell'idroelettrico in termini di produzione percentuale nel corso degli ultimi decenni.

È convinzione diffusa che per il grande idroelettrico sia difficilmente ipotizzabile uno sviluppo futuro importante. I motivi sono molteplici: vincoli di tipo finanziario (tempi di ritorno degli investimenti molto lunghi); intensa antropizzazione del territorio italiano; riduzione dei siti favorevoli dal punto di vista geo-morfologico; diffusa ostilità da parte di gruppi di pressione. A queste cause, di tipo socio-economico, se ne aggiungono altre di natura tecnica e legislativa che condizionano fortemente la producibilità da fonte idroelettrica:

- vincoli regionali sul Deflusso Minimo Vitale (DMV);
- riduzione della capacità d'invaso per interrimento del serbatoio;
- vincoli di tipo amministrativo e legislativo;
- competizione tra gli usi "concorrenti" della risorsa idrica;
- limitazione di invaso per problemi di sicurezza;
- dismissione di dighe (marginale ma destinato a crescere in ragione della vetustà di molte realizzazioni).

Tuttavia, questa tipologia di impianti rimane insostituibile, oltre che per il contributo strategico dal punto di vista della generazione elettrica, per il sostegno offerto alla gestione ottimale della rete e per la valenza ambientale. Infatti, il settore idroelettrico comporta significative riduzioni delle emissioni di CO_2 e delle importazioni di combustibili fossili (nel 2008 dell'ordine rispettivamente di 23 milioni di tonnellate di CO_2 e di circa 2,8 miliardi di euro di costi).

La società ISMES e il Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale di ENEL, da cui proviene il background di RSE in questo settore, sono stati costituiti negli Anni '50 e '60 con lo scopo di fornire alle società elettriche dell'epoca

il necessario supporto ingegneristico per la progettazione, la realizzazione e l'esercizio in sicurezza delle opere infrastrutturali degli impianti idroelettrici. Molte di queste competenze sono descritte nel capitolo *Idraulica e strutture* della presente monografia.

In questo capitolo dedicato alle energie rinnovabili si mettono in luce alcune delle attività più recenti e significative svolte da RSE nel settore idroelettrico.

Per una stima realistica del potenziale relativo all'intero territorio nazionale, RSE ha effettuato uno studio a partire dalle caratteristiche meteorologiche e idrogeologiche dei vari bacini idrografici, tenendo conto dei fattori oggettivi che ne determinano la valutazione:

- dimensione del bacino di captazione;
- quota dell'impianto;
- uso attuale dell'acqua;
- effetto delle zone urbanizzate;
- distanza dalle linee di media tensione;
- presenza di zone geologicamente instabili;
- presenza di parchi naturali e zone protette.

RSE ha sviluppato diversi prodotti software messi a disposizione degli operatori che intendono effettuare delle analisi di fattibilità nel settore del mini-idro:

- software *SMART Mini-Idro*: programma per la valutazione tecnico-economica di impianti mini idroelettrici ad acqua fluente. È uno strumento di conoscenza e di aiuto nelle decisioni e a supporto di studi di pre-fattibilità;
- software *VAPIDRO-ASTE*: programma per il calcolo del potenziale sfruttabile in un'asta fluviale considerando impianti con derivazione (presa, condotta forzata) e impianti "puntuali" (senza condotta forzata);
- *SITO INTERNET* (http://minihydro.rse-web.it): sito dedicato allo sviluppo del mini-idro in Italia che fornisce gli elementi per il calcolo delle mappe del potenziale idroelettrico.

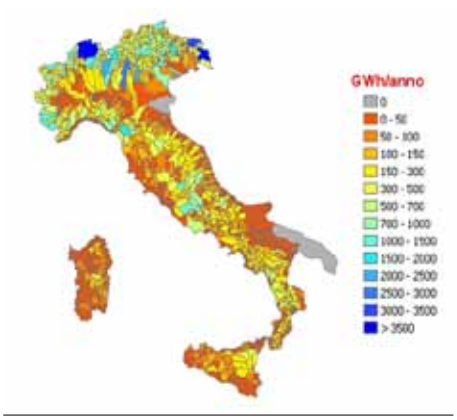
Un altro ambito di interesse su cui RSE svolge attività di ricerca riguarda l'incremento della capacità di accumulo mediante pompaggio idroelettrico (convenzionale e con acqua marina) del sistema elettrico italiano, attraverso l'individuazione di siti idonei a nuove installazioni e la riqualificazione e il pieno utilizzo delle infrastrutture idrauliche e idroelettriche esistenti. A questo fine è stato sviluppato il database HESCI (Hydro Energy Storage Capacity in Italy), uno strumento progettato per fornire un supporto per la valutazione delle potenzialità dei sistemi di accumulo di energia di grande taglia mediante centrali di pompaggio. Lo studio ha consentito di individuare siti potenzialmente interessanti che

apporterebbero un contributo significativo all'attuale capacità di accumulo disponibile: in termini di potenza installata tale contributo ammonterebbe complessivamente a quasi 3 GW e in termini di energia potrebbe consentire il dispacciamento di circa 9 TWh/anno.

Infine, in questi ultimi anni sono stati studiati e sperimentati con successo prototipi di nuova concezione, con centrale in caverna che sfruttano il mare come serbatoio inferiore. La sperimentazione condotta su un impianto pilota di 30 MW in Giappone ha confermato la validità delle scelte tecniche adottate e le valutazioni economiche relative all'installazione su vasta scala di impianti di questo tipo.

La ricerca condotta da RSE ha portato all'individuazione di quattro siti posti lungo la costa del Sud Italia e nelle isole (Sicilia, Sardegna, Calabria e Basilicata), potenzialmente idonei per l'installazione di impianti di pompaggio marino di taglia variabile tra 140 e 300 MW per una potenza complessiva di circa 800 MW. Con un funzionamento a pieno regime consentirebbe di accumulare quasi 5 TWh l'anno, corrispondenti a circa 4,6 TWh dispacciabili in rete.

Mappa del potenziale idroelettrico massimo elaborata da RSE per il territorio italiano.



6.2 SOLARE FOTOVOLTAICO

La tecnologia fotovoltaica consente la trasformazione diretta della radiazione solare in energia elettrica tramite celle fotovoltaiche. Queste sfruttano la proprietà di alcuni materiali semiconduttori di generare elettricità se colpiti da radiazione solare. Il materiale prevalentemente utilizzato per produrre celle fotovoltaiche è il silicio a cristallo singolo (monocristallino) o a cristalli multipli (policristallino). Altri materiali utilizzati sono i cosiddetti "film sottili" (quali silicio amorfo, tellururo di cadmio, diseleniuro di indio e rame). Le celle solari basate su materiale semiconduttore depositato in strati molto sottili (dell'ordine del micron) sono sviluppate con l'obiettivo di ridurre i costi con processi di produzione su grande scala. Tuttavia, per questi materiali devono ancora essere superati numerosi problemi tecnici, specie nell'area della stabilità outdoor e della resa nel processo costruttivo.

Alla fine del 2011, in tutto il mondo sono stati installati circa 67 GW di impianti fotovoltaici come produzione di energia elettrica immessa in rete o come generazione locale per utenze e comunità isolate dalla rete.

In Italia, alla stessa data, erano in esercizio circa 330.000 impianti per 12,8 GW installati e 11 TWh elettrici prodotti. Tale ampia diffusione in Italia è avvenuta grazie agli incentivi del "Conto Energia", giacché il costo del kWh prodotto da questa tecnologia è tuttora più elevato rispetto alle fonti tradizionali.

Tuttavia il consistente trend di diminuzione dei costi degli impianti fotovoltaici porta a prevedere che nelle regioni più soleggiate d'Italia (Sicilia, Puglia, Calabria e Sardegna) nel giro di qualche anno si raggiungerà la "grid-parity" (cioè il punto in cui l'energia elettrica prodotta con questa fonte energetica uguaglierà il prezzo dell'energia della rete elettrica). A tale scopo è da tenere in conto che la produzione di energia elettrica con impianti fotovoltaici varia con la collocazione degli stessi nelle varie regioni italiane. Lo stesso impianto ha una produzione elettrica annua attesa pari a 1.050 kWh/kWp a Milano, 1.300 a Roma e 1.400 a Messina. Dal punto di vista della gestione del sistema elettrico nazionale, il ragguardevole livello di penetrazione raggiunto dagli impianti fotovoltaici (circa il 30 per cento della potenza totale generata in giornate con basso carico) impone, in tempi molto stretti, una loro adeguata regolamentazione e integrazione.

Lo sviluppo della tecnologia fotovoltaica in Italia è stato avviato negli Anni '80 quando ENEL ed ENEA hanno avviato programmi di ricerca, sviluppo e dimostrazione. A metà degli Anni '90, ENEL aveva già realizzato numerosi impianti in zone isolate non collegate alla rete elettrica nazionale (piccole isole, rifugi e comunità montane, oasi naturalistiche, eccetera) e aveva avviato le prime sperimentazioni di impianti fotovoltaici sui tetti. Nello stesso periodo, ENEL ha portato a compimento la costruzione della allora più grande centrale fotovoltaica del mondo (3,3 MW), mentre alcuni operatori hanno avviato la produzione di moduli e inverter per impianti fotovoltaici, grazie anche alle attività di ricerca di ENEA ed ENEL.

Dal 2000 RSE ha inglobato le precedenti esperienze di ENEL in questo settore e ha condotto numerose attività di ricerca per lo sviluppo di componenti e impianti fotovoltaici connessi alla rete o da essa isolati e per la loro efficace integrazione nel sistema energetico italiano. Le attività di RSE hanno riguardato diversi ambiti, fra i quali la sperimentazione di impianti ibridi fotovoltaico-eolico-diesel per l'alimentazione di piccole reti elettriche come testimoniano gli impianti installati nel Villaggio di Oeledo in Indonesia e in Val Codera (SO).

L'attività si è sviluppata anche nell'ambito degli impianti fotovoltaici integrati nell'edilizia ("tetti fotovoltaici") con la sperimentazione di impianti pilota, e successivamente con la progettazione, la realizzazione e la valutazione delle prestazioni energetiche di impianti connessi alla rete di distribuzione, di taglia compresa tra qualche kW e ad alcuni MW. In me-

rito, RSE sta eseguendo il monitoraggio e la valutazione delle prestazioni di numerosi impianti dislocati sul territorio nazionale (i dati di funzionamento di questi impianti sono disponibili sul sito http://fotovoltaico.rse-web.it/).

Nel laboratorio fotovoltaico sperimentale presso la sede di Milano, RSE svolge attività per la caratterizzazione di componenti innovativi (moduli, inverter). L'unità *PV Module Test field* di questo laboratorio consente il confronto prestazionale di moduli fotovoltaici di differente tecnologia con caratteristiche innovative, nell'ambito di attività di ricerca (Ricerca di Sistema Italiano, EU project SOPHIA ed EU project DERri): moduli in silicio cristallino, in Si-mono Back contact, Eterogiunzione Si-a e Si-mono, nonché in film sottile (CdTe, CIS, Si amorfo). I risultati delle analisi di questi moduli sono costantemente confrontati con quelli di analoghi moduli installati in altri siti, nell'ambito di accordi di collaborazione con alcuni Centri di Ricerca (ENEL Ricerca a Catania, EURAC a Bolzano, eccetera).

Laboratorio fotovoltaico sperimentale presso la sede di RSE a Milano.

L'unità *PV Inverter Test field* consente, invece, la caratterizzazione di inverter fotovoltaici con caratteristiche innovative; la potenza del generatore fotovoltaico è pari a 13 kW ed è facilmente configurabile in serie e parallelo, in modo da adattarsi al tipo di inverter in prova. In particolare, l'unità consente di provare gli inverter in relazione alle norme esistenti o ai progetti normativi a cui RSE partecipa.

Infine, l'unità *impianto ibrido ad energie rinnovabili* per utenze isolate dalla rete elettrica consente la sperimentazione di componenti e impianti ibridi per l'elettrificazione di comunità isolate.

RSE contribuisce, e in alcuni casi coordina, lo sviluppo di normativa nel settore fotovoltaico, partecipando e gestendo il comitato italiano CEI CT82 e l'analogo europeo CENELEC TC82. È anche attiva la partecipazione di RSE nell'Accordo di collaborazione IEA PVPS (Photovoltaic Power Systems), su incarico del MSE e in collaborazione con ENEA.

A oggi, grazie alle attività di ricerca e di sperimentazione, alle collaborazioni con istituti di ricerca internazionali e ai contatti con le istituzioni, nonché con i principali operatori del settore, RSE mantiene una posizione di riferimento nel solare fotovoltaico.

6.3 LO SVILUPPO DEL FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE

Lo sforzo per produrre energia fotovoltaica a costi competitivi è stato perseguito fin dai primi Anni '70, seguendo tre differenti approcci tecnologici. Il primo ha riguardato la tecnologia del silicio mono e policristallino. L'idea di partenza: trasferire ad uso terrestre la tecnologia sviluppata per i dispositivi impiegati nello spazio nell'alimentazione elettrica dei satelliti, cercando di diminuirne i costi di produzione. Tale obiettivo è sicuramente stato raggiunto: a inizio 2011 il prezzo dei moduli in silicio cristallino era attorno a 1,80 dollari per watt, a fine anno si è scesi a 0,90 e sono in previsione ulteriori riduzioni.

Il secondo approccio tecnologico ha riguardato lo sviluppo delle celle a film sottile. Ci si era resi conto, infatti, che la realizzazione di celle solari al silicio prevedeva comunque una tecnologia di fabbricazione costosa; non sarebbe stato meglio allora individuare nuovi materiali, adatti alla conversione fotovoltaica, economici quanto uno strato di vernice e in grado di essere depositati come la vernice su qualsiasi supporto, in particolare a basso costo? Questa tecnologia è arrivata recentemente alla fase produttiva con le celle solari al tellururo di cadmio (CdTe); trova ap-

Reattore per la crescita di celle fotovoltaiche multigiunzione installato presso la sede RSE di Piacenza.

plicazione nell'integrazione architettonica e gode ancora di un forte sviluppo, in particolare se si guarda alla ricerca nel campo delle celle solari realizzate mediante materiali organici.

La terza proposta tecnologica ha riguardato l'utilizzo della concentrazione solare. Al contrario delle tecnologie a film sottili, che essendo meno efficienti richiedono una maggiore estensione dei moduli, nel caso della concentrazione la quantità di materiale fotovoltaicamente attivo viene fortemente ridotta, proporzionalmente al fattore di concentrazione, e sostituita con materiale meno costoso, quale è ad esempio il vetro, la plastica o il silicone utilizzati per costruire le lenti. L'utilizzo della concentrazione solare sta trovando un rinnovato interesse, perché in parte sta beneficiando delle ricadute tecnologiche sviluppate in campo spaziale, così come era successo nei primi Anni '70 per la tecnologia del silicio; dall'altra, le sperimentazioni fino ad oggi condotte hanno trovato sintesi in sistemi ad alta efficienza.

Banco ottico per la caratterizzazione di celle fotovoltaiche multigiunzione installato presso la sede RSE di Piacenza.

Nel maggio 2005 alla conferenza sul fotovoltaico a concentrazione tenutasi in Arizona, gli scienziati dell'Istituto NREL annunciavano di avere raggiunto l'efficienza record del 37,9 per cento sulla loro cella a multigiunzione.

Solo un mese più tardi, la Spectrolab, della compagnia Boeing in California, annunciava nella conferenza europea di Barcellona di avere superato il record precedente con una cella multigiunzione avente l'efficienza del 39 per cento a 236 soli.

Negli anni successivi, prima il Fraunhofer Institute di Friburgo poi ancora gli americani di NREL hanno innalzato il valore record di efficienza al 41,1 per cento e al 42,6 per cento rispettivamente, fino ad arrivare ai giorni nostri, in cui il record di efficienza del 43,5 per cento è stato raggiunto dalla società americana Solar Junction.

In modo corrispondente anche il valore di efficienza dei moduli è cresciuto, e nel gennaio 2012 la società americana Semprius ha annunciato di aver raggiunto il valore di efficienza record del 33,9 per cento (@.850 W/m^2). Bisogna comprendere la portata di tali risultati: l'utilizzo delle celle a multigiunzione, grazie ai crescenti valori di efficienza di conversione, consentirà nelle regioni dotate di adeguata radiazione solare di rendere questa tecnologia competitiva rispetto alle tradizionali forme di produzione di energia. Le previsioni, infatti, sono di ulteriore incremento dei valori di efficienza dei dispositivi e di riduzione dei costi dei vari componenti di sistema.

Anche l'Italia e in particolare RSE gioca un ruolo di primo piano nel panorama internazionale riguardante lo sviluppo del solare a concentrazione. Molteplici infatti sono gli attori sul territorio nazionale che operano in questo campo. Tra le industrie e i centri di ricerca, si citano senza pretesa di esaustività: ENEL, ENEA, RSE, CESI, CRP, CON-INOA, ST Microelectronics, SGS Future, Angelantoni, Calzavara, Savio, Riello, CREAR, Alitec, IDEA, CCR SARET, Pirelli Labs, Becar-Beghelli, AEST (Gorizia). Tra le società citate, diverse partecipano a progetti di ricerca e sviluppo industriale nell'ambito dei programmi Governativi "Industria 2015".

RSE ha iniziato a sviluppare la tecnologia del fotovoltaico a concentrazione dal 2006, nell'ambito dei Programmi di Ricerca del Settore Elettrico, utilizzando le competenze acquisite fin dagli Anni '80, in CISE, in particolare nei programmi di ricerca e sviluppo riguardanti i dispositivi fotovoltaici. Il personale RSE è stato infatti coinvolto in diversi progetti di ricerca finanziati dall'Agenzia Spaziale Italiana ed Europea per lo sviluppo delle celle a multigiunzione. L'esperienza maturata ha portato RSE a coordinare dal 2008 il più grande progetto europeo integrato, APOLLON, sul fotovoltaico a concentrazione all'interno del VII Programma Quadro Europeo. Nel 2007 RSE ha realizzato una prima *test facility* per la caratterizzazione dei moduli a concentrazione con celle a multigiunzione, mentre negli anni successivi l'attività di ricerca si è ampliata con l'installazione del primo impianto MOCVD, con sistema di riscaldamento differenziato e sistema di iniezione dei gas per la crescita di materiali innovativi, fino alla messa a punto dei nuovi laboratori presso la sede di Piacenza per lo sviluppo dell'intero dispositivo fotovoltaico a concentrazione.

I laboratori ospitano evaporatori per la deposizione dei metalli e dei *coating* antiriflettenti, le tecniche per la litografia con microscopio elettronico a scansione e le tecnologie per gli attacchi chimici che si rendono necessari nelle varie fasi del processo realizzativo del dispositivo.

La *test facility* è stata ampliata per accogliere, oltre alla caratterizzazione outdoor dei moduli, diverse esperienze di misura: dalla fotoluminescenza, alla risposta spettrale, alla misura dei coefficienti di temperatura e di resistenza termica dei moduli, fino alla messa a punto di sistemi intelligenti per l'inseguimento solare, con il deposito di un brevetto in tale ambito.

Le attività sperimentali sui dispositivi e sui moduli sono accompagnate da un'attività di simulazione elettro-ottica e termica con programmi software avanzati e dall'attività di caratterizzazione dei materiali con diverse tecniche, tra cui la diffrazione a raggi X a doppio cristallo, le misure di capacità-tensione per la determinazione del profilo di drogante, le misure di effetto Hall per la determinazione della mobilità.

Recentemente, RSE ha acquisito competenze per la simulazione delle ottiche per la concentrazione solare e ha lanciato una campagna nazionale per la misura della radiazione diretta, a cui aderiscono diversi partner dislocati sul territorio Italiano, allo scopo di creare un *data base* su scala nazionale che possa essere di riferimento per le previsioni di produzione energetica.

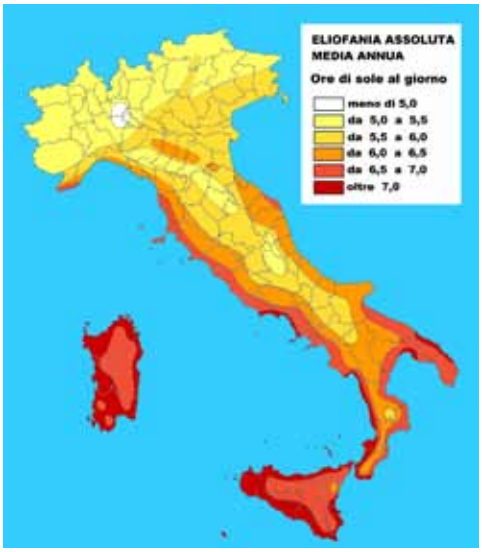
Oltre a partecipare a programmi in cooperazione con l'industria, nell'ambito dei programmi "Industria 2015", RSE coordina il Gruppo di Lavoro 7 sul fotovoltaico a concentrazione del Comitato Elettrotecnico Italiano e dal 2012 il progetto Europeo SUN on CLEAN, in cooperazione con centri di ricerca in Spagna, Russia e Brasile.

6.4 SOLARE TERMODINAMICO

Con solare termodinamico o solare termoelettrico si intende l'insieme delle tecnologie finalizzate a convertire l'energia solare concentrata in energia elettrica per via termodinamica con sviluppo di calore ad alta temperatura.

Nato, come gli altri settori delle fonti rinnovabili, dall'esigenza di trovare un'alternativa al petrolio negli Anni '70, si è sviluppato in modo discontinuo, alternando sviluppi importanti a periodi di stasi ed è arrivato al successo commerciale negli ultimi anni. Attualmente comprende 4 *concept* tecnologici: torre centrale, parabole lineari, collettori di Fresnel, dish–Stirling.

Il generatore solare Eurodish da 10 kWe di RSE è l'unico impianto dish–Stirling sperimentato in Italia. Il test riguarda le prestazioni e la compatibilità con la rete di bassa tensione.



La radiazione solare diretta è il parametro di riferimento per il funzionamento degli impianti solari termodinamici. Le analisi svolte da RSE permettono di identificare le aree più idonee alla realizzazione di questi sistemi.

Nei primi tre sistemi l'energia della radiazione concentrata è trasferita al vapore di un sistema standard di generazione elettrica turbina-alternatore, mentre nel dish-Stirling la radiazione è convertita direttamente in energia meccanica e quindi elettrica. A differenza del solare fotovoltaico, il solare termodinamico può accumulare l'energia termica solare con sistemi che permettono di superare l'aleatorietà della fonte solare. La flessibilità dell'impiego dell'energia termica dà origine ad un ricco set di soluzioni tecnologiche, dalle prestazioni e dai costi differenti.

L'Italia è uno dei Paesi promotori dello sviluppo del solare termodinamico come confermano le ricerche iniziate negli Anni '80 con la realizzazione dell'impianto Eurelios, uno dei primi al mondo ad essere collegato alla rete elettrica.

Durante gli Anni '90, le attività si concentrano sulla acquisizione estesa di dati di radiazione solare diretta nel Sud Italia e sulla realizzazione di studi di fattibilità di impianti. Fra questi, di rilievo la prima valutazione di dettaglio per la realizzazione di un impianto commerciale a parabole lineari in Italia proposto dagli inventori di questa tecnologia e la partecipazione ai progetti comunitari del settore.

Dagli Anni Duemila, RSE ingloba le precedenti esperienze ENEL Ricerca in questo settore e realizza un'attività di test di un generatore solare termodinamico dish–Stirling. La sperimentazione, che prosegue da alcuni anni ed è ancora oggi l'unica di questo tipo in Italia e una delle poche in Europa, permette di valutare potenzialità e limiti di questa tecnologia e la sua applicabilità nel nostro Paese. Attualmente l'interesse è focalizzato sui componenti del motore Stirling la cui affidabilità nel tempo risulta decisiva per il successo di questo sistema.

A oggi, grazie ai contatti con le principali istituzioni di ricerca internazionali del settore e al continuo aggiornamento, RSE mantiene una posizione di riferimento nella comunità nazionale del solare termodinamico e di rappresentanza presso l'IEA.

L'incrocio tra le competenze sulla generazione convenzionale, l'analisi del territorio e la gestione del sistema elettrico assicura a RSE la possibilità di contribuire agli studi di fattibilità tecnico-economici multidisciplinari di questo tipo di impianti, la cui realizzazione è prevista nei piani nazionali di crescita delle fonti rinnovabili.

6.5 EOLICO

Come fonte di energia, il vento è oggetto di rinnovato interesse in concomitanza di ogni crisi petrolifera, dall'autunno del 1973 in poi. Ma proprio per la variabilità e difficile prevedibilità della fonte, gli impianti eolici almeno inizialmente appaiono adatti a svolgere un ruolo integrativo, o solo in parte sostitutivo nei confronti degli impianti di generazione a combustibili fossili.

In vari Paesi dell'Europa settentrionale e in America sono avviati programmi di ricerca per perfezionare gli aerogeneratori al fine di aumentarne la taglia, migliorarne il rendimento e accrescerne l'affidabilità.

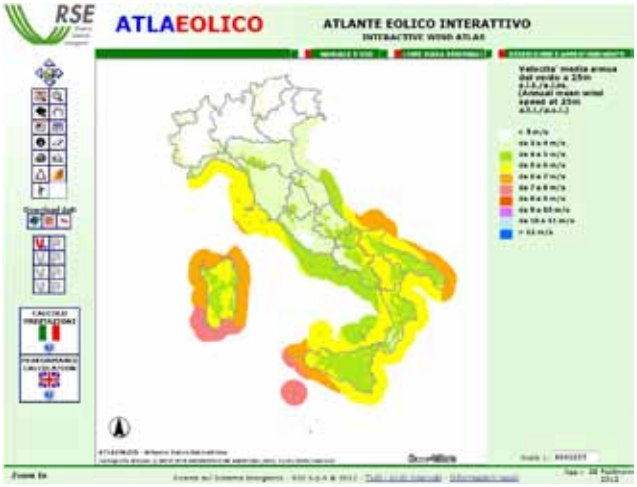
In Italia, le attività di ricerca sulla produzione di elettricità dal vento prendono il via presso la Direzione Studi e Ricerche di ENEL, le cui competenze sono in parte confluite in RSE, nell'ambito del Progetto Vele (1980-1987). Sono installate stazioni anemometriche, i cui dati confermano che anche l'Italia, pur non avendo risorse paragonabili a quelle di altri Paesi, dispone di siti, soprattutto al Sud in Sicilia e in Sardegna, potenzialmente idonei ad ospitare impianti eolici. Contemporaneamente inizia la sperimentazione di prototipi di aerogeneratori, costruiti da FIAT, Aeritalia e Riva Calzoni, in due campi prova realizzati in Sardegna, rispettivamente a Santa Caterina di fronte all'isola di Sant'Antioco, e in Alta Nurra nel Comune di Sassari. Sono macchine con potenze fra 3 kW e 68 kW e diametri di rotore fra 5 e 13 metri, che oggi possono apparire decisamente piccole; ma è quanto viene prodotto dall'industria eolica nazionale dell'epoca. Ad Alta Nurra, in particolare, è costruita la prima centrale con più macchine dello stesso tipo (10 unità da 50 kW) realizzata in Italia, per ricerche sugli effetti della reciproca interferenza aerodinamica.

Dal 1988, al Progetto Vele seguono nuovi programmi. La rete di stazioni anemometriche è ampliata arrivando, alla fine del secolo, a un totale di 220 stazioni di misura, cui sono da aggiungere altre 24 stazioni installate o riattivate dopo il 2000 per la messa a punto dell'Atlante Eolico dell'Italia di RSE. I dati raccolti sono utilizzati anche dalla Commissione Siti per preparare, nel 1992, un rapporto nazionale che si rivela subito molto utile per gli imprenditori che sviluppano i primi impianti eolici commerciali.

Test su aerogeneratore nella sala prove RSE.

Le macchine di Alta Nurra sono sostituite da vari aerogeneratori di media taglia, con potenze fra 200 kW e 400 kW e diametri di rotore fra 32 e 34 metri. In particolare, sono provati due prototipi italiani, il Medit della WEST e l'M30 della Riva Calzoni, sviluppati con il supporto di ENEA e poi seguiti dalle rispettive versioni industrializzate, accanto a due unità di produzione estera, una della WEG (Gran Bretagna) e l'altra della Vestas-DWT (Danimarca). Si confrontano così tecnologie diverse, con rotori a una, a due e a tre pale, in condizioni climatiche marine con forte inquinamento salino.

Nel 1992 è installato in Alta Nurra anche il prototipo del primo aerogeneratore italiano di grande taglia, il GAMMA 60 da 1.500 kW, con rotore del diametro di 60 metri e caratteristiche tecniche particolarmente innovative, sviluppato dalla WEST con il supporto di ENEA.



Pagina di ingresso al sito dell'Atlante Eolico dell'Italia di RSE.

Per acquisire informazioni sul comportamento degli aerogeneratori in un ambiente montano con ghiaccio e forte turbolenza, e quindi sulla fattibilità di centrali eoliche oltre i 1.000 metri di altitudine, è costruito il campo prova di Acqua Spruzza, a 1.350 metri di quota nel Comune di Frosolone in Molise. Qui sono sperimentati, dal 1994, otto aerogeneratori di media taglia, cioè due unità per ciascuno dei quattro modelli italiani e stranieri provati anche in Alta Nurra, per un totale di 2.440 kW. Particolarmente interessanti si rivelano i risultati ottenuti nei mesi invernali.

Sempre negli Anni '90, nell'ambito di un programma dimostrativo, sono realizzate due centrali eoliche di produzione con macchine italiane: una da circa 11 MW, con 34 macchine Medit da 320 kW della WEST, a Monte Arci in Sardegna; l'altra da 9 MW, con 36 macchine M30 da 250 kW della Riva Calzoni, a Collarmele in Abruzzo.

Vengono così maturate in ambito ENEL significative esperienze nella prova degli aerogeneratori, nella gestione degli impianti, nella verifica delle prestazioni delle centrali eoliche e nell'elaborazione dei dati anemometrici. Si è tra i primi, a livello internazionale, a im-

piegare strumenti software (come WAsP) specifici per il *micrositing*, processo volto a definire la disposizione delle macchine sul terreno che rende massima l'energia prodotta da una centrale eolica. Sono anche tracciate, in collaborazione con Conphoebus, le prime mappe eoliche usando modelli fluidodinamici del vento, metodologia poi impiegata per l'Atlante Eolico dell'Italia sviluppato da RSE.

Le competenze acquisite sono utilizzate sia in progetti europei sia nella normativa tecnica del settore eolico, partecipando ai lavori del CEI italiano e dell'IEC. Prima ENEL e poi RSE sono firmatari per l'Italia, insieme all'ENEA, dell'accordo di collaborazione sull'energia eolica dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA Wind Implementing Agreement).

Negli anni più recenti, le attività di RSE sono la continuazione di quelle descritte. In particolare, la realizzazione dell'Atlante Eolico dell'Italia (consultabile interattivamente all'indirizzo web http://atlanteeolico.rseweb.it/viewer.htm) si avvale dei dati delle stazioni anemometriche di cui si è detto per la validazione delle mappe del vento ottenute con modelli. Questa validazione è tuttora in corso, soprattutto per le aree marine costiere (aree offshore), con nuove stazioni installate da RSE.

L'Atlante costituisce la base di altre attività per la valutazione del potenziale eolico nazionale sulla terraferma e offshore, mediante l'impiego di strumenti GIS e altro software specifico, a beneficio sia dei potenziali installatori d'impianti, sia delle Autorità incaricate della pianificazione degli usi del territorio. In quest'ambito, oltre agli aspetti tecnici, si tiene conto anche delle problematiche d'inserimento nell'ambiente, sviluppando strumenti software a esse dedicati. L'Atlante Eolico viene così a presentare, accanto alle mappe di velocità del vento e producibilità, "strati" d'informazioni su aree protette, legislazioni regionali e altri aspetti.

RSE continua comunque a interessarsi anche della tecnologia degli aerogeneratori, in particolare per quanto riguarda le problematiche di controllo, gli aerogeneratori offshore galleggianti, le piattaforme offshore multiuso e i sistemi minieolici, il cui mercato si sta sviluppando anche in Italia accanto alle più diffuse centrali con unità medie e grandi collegate alla rete ad alta tensione.

6.6 BIOMASSE

Fino alla metà degli Anni '90, l'utilizzo di biomasse per la produzione di energia elettrica non sembra riscuotere grande interesse. Le basse efficienze di conversione in energia elettrica delle tecnologie impiantistiche disponibili e le difficoltà di approvvigionamento della risorsa ne limitano

pesantemente l'interesse, almeno a livello di utility. A ciò si aggiunge che le poche ricerche sulla valorizzazione energetica di particolari residui, soprattutto di origine zootecnica, rappresentano sostanzialmente curiosità scientifiche senza applicazioni concrete immediate.

Un cambio di rotta si registra con la realizzazione dei primi impianti di teleriscaldamento, dove la valorizzazione dell'energia termica rende competitivo l'utilizzo di rifiuti urbani e residui di produzione in impianti dedicati. Tuttavia, l'ancora elevato impatto ambientale di queste tecnologie (soprattutto le emissioni di diossine), crea non pochi problemi con le popolazioni residenti presso i siti dei termovalorizzatori.

A metà degli Anni '90, l'interesse della ricerca ENEL si accentra sulla produzione di biogas da liquami di origine zootecnica, ma la difficoltà di un *upgrade* del biogas (che contiene circa il 40 per cento di CO_2) a biometano e, soprattutto, il contenuto di composti solforati che provocano problemi di corrosione alle tubazioni metalliche, ne limita pesantemente il trasporto e l'utilizzo. I problemi sono sostanzialmente gli stessi di quelli registrati nello sfruttamento del biogas prodotto dalle discariche esauste di rifiuti urbani.

Il primo vero progetto di utilizzo integrato sul territorio di biomasse per la produzione di energia elettrica si concretizza nella realizzazione di un impianto, alimentato a cippato di pioppo, nel Comune di Cascina (Pisa). Il progetto, supportato da finanziamenti della Commissione europea, prevede l'approvvigionamento di biomassa attraverso la tecnica della *short rotation forestry*. Problemi riguardanti il sito dell'impianto e il prezzo di mercato del cippato di pioppo, che vede utilizzi più remunerativi nell'industria dei pannelli di legno, decretano però il sostanziale fallimento dell'iniziativa.

La ricerca si sposta quindi sulla co-combustione di residui agroforestali, soprattutto in impianti a carbone, ma i problemi di "sporcamento" delle caldaie e l'abbassamento della temperatura di fusione delle ceneri, con conseguenti problemi di fermo impianto per il ripristino, decretano l'abbandono anche di questa strada.

Occorre attendere i primi anni del 2000 per vedere un rinnovato interesse nella co-combustione di CDR (Combustibile Derivato dai Rifiuti) in centrali a carbone (Fusina). Le problematiche che questa nuova tecnologia genera sono però molte e vanno dall'alimentazione dell'impianto – non realizzabile attraverso le esistenti linee di macinazione e alimentazione del carbone – al rischio di corrosione in diverse parti dell'impianto, dovuto alla presenza nel CDR di cloruri e all'elevata temperatura di esercizio.

È evidente che l'utilizzo di biomasse e residui per la produzione di energia elettrica richiede che l'investimento industriale sia in parte ricompensato da incentivi pubblici.

In tale ambito citiamo il CIP6, provvedimento del Comitato Interministeriale Prezzi adottato il 29 aprile 1992, che stabilisce prezzi incentivati per l'energia elettrica prodotta con impianti alimentati da fonti rinnovabili e assimilate (tra cui cogenerazione e utilizzo di scarti di lavorazione e/o di processi industriali).

Proprio in seguito a questo provvedimento si assiste ad un salto di qualità dal punto di vista delle tecnologie impiegate per la produzione energetica, soprattutto in cogenerazione: griglie fisse e mobili raffreddate ad aria o acqua, letti fluidi, pirolizzatori e gassificatori. Seguono altri provvedimenti di incentivazione più mirati: prima i Certificati Verdi, poi la tariffa omnicomprensiva.

Una Direttiva europea del 2001 include la frazione biodegradabile dei rifiuti urbani e speciali tra la "biomassa", rendendo di fatto incentivabile l'energia prodotta dai termovalorizzatori di rifiuti urbani e speciali. L'incentivazione dell'energia prodotta si sposta gradualmente sulla sola frazione biogenica del combustibile utilizzato e ciò comporta la messa a punto, da parte di RSE, di metodi mirati ed importanti contributi all'emanazione di standard nazionali ed internazionali utili alla sua quantificazione.

La ricerca RSE si sposta sulla generazione distribuita di energia elettrica, anche attraverso l'utilizzo di biomasse, rifiuti e residui industriali, con la sperimentazione di tecnologie all'epoca innovative quali l'utilizzo di cicli Rankine a fluido organico. Le problematiche "storiche" legate alla co-combustione di CDR (ora CSS, Combustibile Solido Secondario) e carbone sono affrontate da RSE con la realizzazione di sistemi innovativi di monitoraggio anche on-line della corrosione.

Gli studi e le ricerche di RSE si moltiplicano e spaziano dalla valutazione dei costi di produzione di energia in dipendenza della taglia della biomassa utilizzata e della tecnologia dell'impianto, alla valutazione della reale disponibilità di biomassa sul territorio e all'impatto sulla qualità dell'aria.

6.7 METEOROLOGIA PER LE RINNOVABILI

La quota di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili in Italia tocca il 24 per cento sul totale dei consumi. A questa quota, per la maggior parte contribuiscono gli impianti "programmabili", cioè quelli che possono essere gestiti, entro certi limiti, per produrre secondo un programma prestabilito come le centrali idroelettriche a serbatoio, geotermiche e a biomassa.

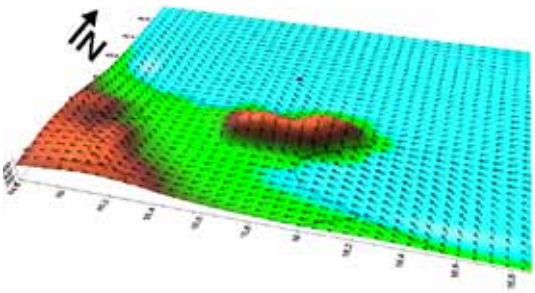
Gli impianti eolici e solari, e in parte quelli idroelettrici ad acqua fluente, sono invece soggetti a una produzione variabile nel tempo, legata alle condizioni meteorologiche. Pertanto, tali impianti collegati alle reti elettriche di bassa, media o alta tensione, non possono regolare la loro produzione seguendo la domanda di energia o le esigenze dei gestori delle varie reti. Possono al più scollegarsi da queste, venendo meno però al loro scopo. Fino ad alcuni anni fa, la variabilità della produzione eolica e solare era trascurabile per l'intero sistema elettrico italiano, ma oggi che la potenza installata si aggira intorno a 20 GW, la non programmabilità può causare problemi di sbilanciamento tra energia immessa e consumata.

Mentre il fabbisogno di elettricità a scala nazionale è ben prevedibile giorno per giorno, la produzione da fonti rinnovabili, come il sole e il vento, è da considerarsi "aleatoria", e provoca sbilanciamenti improvvisi sulla rete che devono essere subito compensati. Questo problema è già sentito dal Gestore della Rete Elettrica Nazionale, che per la sicurezza della rete si trova spesso a introdurre o togliere quote di potenza generate da fonti controllabili, in altre parole rapidamente disponibili e modulabili, come cicli combinati o unità idroelettriche a serbatoio. La quota di potenza che ogni giorno è messa a disposizione della rete per quest'operazione si chiama "riserva" ed è acquistata dal Gestore della Rete Elettrica Nazionale sul mercato libero con un costo che ricade sui consumatori.

Come risolvere questo problema? È necessario rendere prevedibile la produzione elettrica immessa in rete dalle fonti rinnovabili aleatorie e quindi prevedere quelle variabili atmosferiche da cui derivano: vento, radiazione solare, precipitazione.

Con lo sviluppo delle energie rinnovabili in Europa, che in alcuni Paesi hanno raggiunto quote importanti

Ricostruzione del campo di vento sul promontorio del Gargano con un modello meteorologico a griglia fine, partendo da una situazione meteorologica reale a scala più grande.



Stazione meteorologica RSE sullo sfondo di Milano.

del totale dell'energia consumata, si sono profusi sforzi di ricerca per verificare l'utilità delle previsioni meteorologiche nel risolvere i problemi di integrazione di queste fonti nei sistemi elettrici. Questo è accaduto dapprima in Paesi a forte diffusione delle rinnovabili, come Germania, Danimarca, Spagna, Olanda, per poi diventare un'esigenza anche in Italia.

Alla base delle applicazioni meteorologiche per le rinnovabili ci sono i modelli numerici di atmosfera, quelli che sono stati usati fin dalla seconda metà del secolo scorso con lo scopo di prevedere il tempo con qualche giorno di anticipo, qualunque sia la natura degli eventi. È proprio l'importanza di questa missione che ha spinto la comunità mondiale a cooperare nel rilevamento delle grandezze caratteristiche dell'atmosfera (pressione, temperatura, vento, ...) e nel mettere a punto metodi per calcolare nel tempo l'evoluzione di tali grandezze.

I modelli meteorologici nascono dall'applicazione delle scienze fisiche all'atmosfera terrestre; essi, partendo da uno stato iniziale e imponendo forzanti esterne (energia solare, oceano, terreno), calcolano uno stato futuro. Negli ultimi anni questi modelli sono stati sempre più perfezionati sia dal punto di vista della rappresentazione fisica dei fenomeni, sia da quello della risoluzione spazio-temporale con cui sono eseguiti i calcoli.

Oggi si può affermare che i modelli meteorologici, opportunamente applicati alle fonti rinnovabili, contribuiscono a diminuire il livello di aleatorietà di queste. Conseguentemente, in Italia le previsioni meteorologiche sono entrate nei processi decisionali di molti produttori di energia elettrica e di società regolatrici del sistema quali GSE e Terna.

Anche se, per le valutazioni sulle energie rinnovabili, le grandezze fisiche d'interesse sono solo il vento, l'irradianza solare e la precipitazione, un modello meteorologico deve necessariamente prevedere in modo soddisfacente tutte le altre variabili atmosferiche che in vari modi interagiscono con quelle. Nel campo solare, inoltre, il problema è complicato dall'influenza dei fenomeni micro-fisici di difficile simulazione, come le nubi e la dinamica degli aerosol atmosferici.

Per questi motivi si sono creati filoni di ricerca dedicati alla previsione delle energie rinnovabili. RSE è leader in Italia in questo campo

grazie ad un gruppo di lavoro che opera sia sul fronte della ricerca modellistica, sia sulle applicazioni dei risultati tramite collaborazioni con le più importanti utility.

Un'altra importante applicazione della meteorologia all'energia solare ed eolica consiste nella stima della producibilità media su lungo periodo, necessaria alla identificazione ottimale dei siti. Infatti, la notevole variabilità climatica del nostro territorio, per quanto riguarda le grandezze fisiche che determinano l'energia producibile, è tale da rendere insufficienti le poche misurazioni disponibili e attendibili. Per questo motivo, si deve ricorrere a modelli meteorologici per costruire serie temporali nel passato delle grandezze necessarie, per un tempo sufficientemente lungo ad ottenere valutazioni statistiche stabili.

La meteorologia ha fornito al comparto delle energie rinnovabili anche il know-how sui metodi di misura di vento e radiazione solare, indispensabili questi per verificare le previsioni dei modelli e per ottenere statistiche utili a caratterizzare le potenzialità di un sito. Parte di questo know-how è servito a formulare normative e raccomandazioni emesse da enti come IEC, CEI, UNI.

I problemi sollevati dalle rinnovabili, nel tentativo di integrarle nelle reti elettriche, hanno spinto la meteorologia a perfezionare ulteriormente tecniche modellistiche e di misura. Nel primo caso con il perfezionamento di modelli locali diagnostici, che hanno lo scopo di migliorare ove possibile la previsione del modello meteorologico principale, considerando le caratteristiche del terreno con un dettaglio maggiore e utilizzando le differenze sistematiche tra variabile osservata e prevista. Nel secondo caso con uno sviluppo di strumentazione di remote-sensing dedicata alla misura del vento a diverse altezze e alla valutazione della turbolenza a piccola scala che influenza il rendimento fluidodinamico degli aerogeneratori.

RSE da alcuni anni si è dotato di vari modelli meteorologici di previsione che applica e verifica sistematicamente su alcuni impianti eolici e solari di prova. È stata avviata un'attività di misura delle varie componenti della radiazione solare (globale, diretta e diffusa) presso la sede milanese e mediante una stazione per la ricezione continua dei dati del satellite Meteosat sono elaborate ogni 15 minuti mappe della copertura e tipologia delle nubi su tutta l'Italia.

7 Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

7.1 LA PIANIFICAZIONE DELLE RETI ELETTRICHE DI TRASMISSIONE E DISTRIBUZIONE

Le esigenze di economicità, sicurezza e sostenibilità ambientale comportano una transizione tecnologica che vede l'inserimento sempre più massiccio di quote di energia proveniente da fonte rinnovabile. Nello stesso tempo è necessario garantire l'efficienza e la sicurezza nell'utilizzo delle infrastrutture con criteri applicabili a scala non più nazionale ma continentale. La pianificazione (*planning*) delle infrastrutture elettriche e, più in generale energetiche, deve mantenere il passo, e preferibilmente anticipare queste tendenze.

Vista di una linea aerea da 400 kV.

Le attività di ricerca, nate nei centri di ricerca ENEL e CESI e che proseguono in RSE, sono declinate in diverse linee che comprendono analisi di scenari di sviluppo del sistema elettrico italiano, strumenti per la pianificazione e lo sviluppo di interconnessioni con i Paesi europei e mediterranei, pianificazione di reti di distribuzione, qualità della fornitura elettrica, strumenti per la gestione in sicurezza e per la valutazione del rischio di disservizi.

In RSE sono sviluppate metodologie a diversa scala, geografica e temporale, basate su approccio deterministico o strumenti stocastici. Per quanto riguarda il dettaglio spaziale, si passa dalla singola rete in bassa o media tensione, per arrivare a regioni, zone di mercato e interi Paesi, con un dettaglio temporale che spazia dai minuti, ai mesi per poter coprire orizzonti di breve, medio o lungo termine (anni).

L'elenco dei *tool* sviluppati in RSE comprende applicazioni in grado di analizzare diversi scenari su un intero anno di orizzonte temporale e suggerire gli opportuni sviluppi per la rete di trasmissione (MTSIM), strumenti per studi di planning multi scenario per trovare le combinazioni per il rinforzo di una rete, minimizzando costi di investimento e costi operativi (ESPAUT), modelli di sviluppo dei sistemi elettrici nazionali e regionali (MATISSE), modelli per l'intero settore energetico delle regioni italiane (MONET). Tali strumenti

consentono di realizzare Studi a supporto della stesura del Piano d'Azione Nazionale per lo sviluppo delle rinnovabili (PAN), metodologie per il monitoraggio dello sviluppo delle rinnovabili, a supporto della regionalizzazione degli obiettivi nazionali PAN ("burden sharing"), o analisi di scenario sullo sviluppo della spesa per incentivi delle fonti rinnovabili elettriche e termiche.

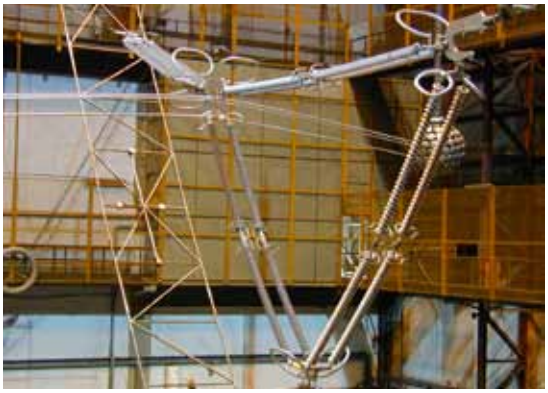
RSE sviluppa inoltre modelli in grado di gestire reti miste in corrente alternata (AC) e corrente continua (DC), allo scopo di rispondere alle nuove esigenze di integrare e trasportare energia prodotta da fonti rinnovabili in sistemi di grandi dimensioni interconnessi. Infatti, le sempre maggiori dimensioni e complessità degli attuali sistemi di trasporto dell'energia elettrica, la presenza di consistenti scambi tra aree distanti al fine di utilizzare al meglio i vantaggi offerti dalle fonti rinnovabili, i problemi connessi con la gestione dei flussi reattivi e dei livelli di tensione atti a garantire la qualità dell'esercizio, tendono a favorire la diffusione di porzioni di rete, non più riducibili a singoli cavi, esercite in DC ed integrate, anche con magliature complesse, con la parte rimanente del sistema di trasporto in AC.

Prove su isolatori compositi nel salone AT.

Per quanto riguarda la pianificazione della rete di distribuzione, lo strumento SPREAD, il cui sviluppo è nato oltre un decennio fa, è in grado di suggerire la migliore soluzione sia nelle modalità ordinarie di esercizio (rete "passiva"), sia includendo l'effetto di metodi avanzati di gestione delle reti "attive", in forte presenza di generazione distribuita e di sistemi di accumulo.

Le attività che riguardano la pianificazione sono condotte in sinergia con lo sviluppo di strumenti che supportano l'esercizio della rete, a partire dalla valutazione del rischio di disservizi a diversa scala geografica, anche a supporto dell'ottimizzazione delle attività di Asset Management (gestione della rete, definizione delle operazioni di manutenzione e delle linee di investimento).

Sul tema della qualità della fornitura elettrica, il sistema di Monitoraggio della Qualità della Tensione della Rete di Distribuzione in MT (QuEEN) sviluppato da RSE consente, attraverso l'apposito portale web, la consultazione del database di raccolta dei dati acquisiti fin dal 2006. Il pubblico ha accesso al sito web per effettuare estrazioni



Prove su catene isolanti per sostegni innovativi.

delle grandezze richieste solo in termini di aggregazioni e visualizzarne i risultati, mentre i referenti delle società che si occupano dell'esercizio delle reti accedono ai dati registrati di loro competenza, a livello di singolo punto di misura. In particolare sono visualizzabili i parametri che caratterizzano i singoli disturbi della tensione (interruzioni, buchi, sovratensioni, variazioni rapide, armoniche) e gli andamenti su base settimanale delle grandezze misurate. I dati estratti dal database sono rappresentati in forma tabellare e grafica con i riferimenti temporali relativi all'ora solare, e rappresentano una base affidabile per la valutazione dei diversi aspetti che riguardano il sistema elettrico. Per esempio, le valutazioni di sintesi consentono di fornire indicazioni utili all'Autorità nella preparazione dei "documenti di consultazione" e permettono di valutare il comportamento dei generatori distribuiti nei confronti dei disturbi della tensione in funzione delle regole di connessione che via via vengono proposte a livello normativo.

7.2 RETE DI TRASMISSIONE

Linee elettriche aeree – materiali e componenti

Le linee aeree in corrente alternata rappresentano la soluzione tecnicamente più semplice e diffusa, soprattutto per le medie ed alte tensioni, per il trasporto di energia elettrica. Infatti, in altissima tensione il 99,5 per cento delle linee è realizzato con questa tecnologia. Le linee aeree sono composte da conduttori nudi (nei quali circola la corrente), sostenuti con supporti isolanti (isolatori) su sostegni metallici. Per evitare che i conduttori scarichino tra loro e verso la terra, essi devono essere sospesi a grande altezza e separati da ampi spazi d'aria (almeno 2-3 metri per ogni 100 kV di tensione): gli isolatori hanno il compito di isolare i conduttori rispetto al sostegno e di tenere i conduttori in posizione.

Oltre ai suddetti componenti le linee aeree sono equipaggiate con altri elementi di morsetteria che collegano i conduttori agli isolatori (morse di amarro e di sospensione), oppure due tratti di conduttori

tra loro (giunti in campata), mantengono le distanze tra conduttori nei collegamenti a fascio (distanziatori) o smorzano le vibrazioni introdotte dal vento (*stockbridge damper*), che altrimenti a lungo andare potrebbero portare alla rottura dei conduttori stessi per fatica. La sperimentazione e messa a punto dei suddetti componenti delle linee che costituiscono la rete di altissima tensione (400 kV) del territorio italiano è stata effettuata per la maggior parte nei laboratori di CESI ed ENEL Ricerca a partire dagli Anni '60: in particolare nel salone AT di Via Rubattino, per quanto riguarda gli aspetti dielettrici e nel laboratorio di prove meccaniche di Brugherio, per gli aspetti meccanici (ora entrambi laboratori RSE). Sempre nel laboratorio di Brugherio sono state sperimentate le funi di guardia ottiche, che costituiscono i più di diecimila chilometri della rete di cavi ottici associati alle linee elettriche aeree di alta tensione italiana. Le esigenze di continuo incremento della capacità di trasporto e di sempre maggior affidabilità e disponibilità delle linee esistenti hanno spinto all'introduzione di nuovi componenti (conduttori e isolatori, in particolare) e di nuovi sistemi diagnostici e di monitoraggio. Questi temi sono ora affrontati da RSE, in stretta collaborazione con TERNA (il TSO italiano) con sperimentazioni nei propri impianti o su linee in esercizio. In particolare con riferimento agli isolatori sono state effettuate, e sono tuttora, in corso sperimentazioni su isolatori di materiale composito volte alla messa a punto di metodologie di prova e alla rilevazione del loro stato in esercizio, per una valutazione della loro vita residua.

Prove di conduttori innovativi sulla campata indoor del laboratorio RSE di Brugherio.

Sempre con riferimento agli isolatori compositi sono stati messi a punto e provati sistemi diagnostici per la rilevazione di fenomeni di degrado dell'isolamento mediante lavori sotto tensione (con sensori, anche ottici, di rilievo del profilo di campo elettrico) e da remoto (con rilievo di emissioni nell'ultravioletto).

Per quanto riguarda i nuovi con-

duttori che sono in fase di sviluppo e di introduzione sul mercato (tra questi anche con nuclei portanti in materiali compositi) sono state effettuate sperimentazioni su campate indoor, analizzando le differenti problematiche che si pongono nel trattare materiali non convenzionali quali elementi costituitivi di conduttori operanti ad elevate temperature. In particolare sono stati affrontati aspetti legati all'invecchiamento, alla fatica, alla flessione del conduttore, al comportamento termomeccanico, eccetera.

Con riferimento al monitoraggio, sono stati messi a punto ed installati in rete sistemi di valutazione e previsione della massima capacità di trasporto delle linee (a partire dal rilevo dei parametri meteorologici e della corrente transitante nei conduttori) e sistemi di misura del grado di inquinamento degli isolatori (prevalentemente di origine marina), che consentono la programmazione di operazioni di pulizia e manutenzione degli isolamenti (di linee e stazioni) nei tempi corretti, evitando possibili fuori servizio e ottimizzando i costi di interventi per manutenzione/pulizia.

Linee elettriche in cavo – materiali e componenti

L'altra parte della rete è costituita dal cavo interrato (esistono anche linee con isolamento gassoso, GIL, ma la loro applicazione è solamente sperimentale e limitata al momento a brevi distanze). La struttura dei cavi attualmente utilizzati per la posa interrata si compone principalmente di un conduttore centrale nel quale scorre la corrente, di una parte isolante (in materiale polimerico) che protegge ed isola elettricamente il conduttore, di uno schermo metallico messo a "terra", e di una guaina isolante protettiva esterna.

I principali vantaggi che le linee in cavo presentano rispetto alle linee aeree risiedono principalmente nell'annullamento dell'impatto visivo, nelle minori perdite, nella differente distribuzione del campo magnetico generato (che interessa un'area più limitata di una linea aerea di analoga potenza), nella possibilità di penetrare in aree urbane dove sarebbe invece impossibile la costruzione di nuovi elettrodotti aerei. Gli svantaggi nell'uso dei cavi interrati consistono sostanzialmente nel maggior costo della linea e nella lunghezza massima dei collegamenti, che per i cavi ad altissima tensione è di circa 25-30 chilometri.

Viste le differenti caratteristiche e prerogative delle linee aeree ed in cavo, una strada per confrontare diverse alternative tecnologiche di costruzione di una linea elettrica è quella di utilizzare un'analisi multi criterio, che permette di confrontare due o più alternative sulla base di differenti obiettivi, anche in conflitto tra loro, e gestire

Vista degli elementi costituenti un cavo di alta tensione.

in maniera più esplicita e trasparente questi conflitti rispetto all'analisi costi benefici. L'analisi classica attribuisce un punteggio ad ogni alternativa e ne indica quindi un ordinamento, sia complessivo sia in base ai singoli obiettivi.

Questo metodo, che costituisce un valido supporto alle decisioni, è stato ad esempio impiegato (da RSE e CESI) nella valutazione del collegamento tra Francia–Spagna, in cui sono state confrontate differenti tipologie di linee (diverse soluzioni di linee aeree, linee miste aeree ed in cavo, linee ad isolamento gassoso) tra le quali anche soluzioni di collegamenti in corrente continua.

Trasmissione in corrente continua

La trasmissione in corrente continua costituisce uno dei temi che riscontra un sempre maggiore interesse nel campo delle reti elettriche. Lo sviluppo della potenza trasmessa da linee DC (in cavo ed aeree) ha visto negli ultimi anni una crescita esponenziale, fino a superare i 100 GW nel 2011. Lo scenario di crescita prevede il superamento dei 300 GW da qui al 2020 (dati in perfetto accordo con i progetti di sviluppo già programmati in Paesi come Cina, India, Brasile).

Analogamente alla potenza, anche la lunghezza delle linee prevede una crescita esponenziale, con una attuale estensione (al 2010) della rete di 30.000 km di linee aeree e 6.500 km di linee in cavo.

Lo sviluppo futuro delle linee DC è legato agli indiscussi vantaggi che questa tecnologia offre rispetto alle linee AC, come per la trasmissione di energia prodotta dalle wind farm offshore (nel caso di cavi sottomarini di lunghezze superiori a 25-30 km è l'unica tecnologia disponibile, come sopra citato).

Nel caso di linee elettriche aeree, a parità di tensione e numero di conduttori impiegati le linee in corrente continua consentirebbero un incremento di portata fino a quasi due volte (grazie anche alle minori perdite per effetto pelle e per circolazione di potenza reattiva) con una maggiore flessibilità, stabilità e affidabilità di esercizio.

Nel caso della trasmissione in continua il flusso di potenza può essere regolato tra il 10 e il 100 per cento del valore nominale, con anche la possibilità di inversione del flusso stesso, e la tensione di esercizio può essere ridotta (tipicamente all'80 per cento), ad esempio in presenza di eventi estremi di inquinamento degli isolamenti delle linee aeree.

Studi di dimensionamento e di diagnostica degli isolamenti con tensioni continue sono in corso nei laboratori RSE (in particolare nel

laboratorio di polluzione artificiale), con la sperimentazione di nuove tecniche di prova e di rilevamento diagnostico, focalizzati in particolare su materiali polimerici. L'attività è di particolare interesse in quanto la presenza di inquinanti nell'ambiente influisce sul comportamento degli isolamenti in DC in maniera più marcata di quanto non accada per le linee in AC: sia per effetto della minor tenuta degli isolamenti a parità di tensione, sia per il maggiore accumulo di sostanze inquinanti, influenzato dal campo elettrico della linea. Per queste linee, il ricorso ad isolamenti in materiale polimerico costituisce spesso una soluzione obbligata, in quanto il materiale, grazie alla sua idrofobicità, consente dimensioni minori e miglior performance rispetto agli isolatori ceramici.

7.3 DISTRIBUZIONE IN CORRENTE ALTERNATA

Diversamente che nel caso dell'alta tensione, in Italia le linee di distribuzione sono costituite per circa il 50 per cento da collegamenti di linee in cavo.

Nel caso della distribuzione di energia elettrica all'interno delle città la soluzione di linea in cavo costituisce la quasi totalità dei collegamenti. Si tratta di una rete che è costituita in prevalenza (50-60 per cento) da cavi con isolamento in carta impregnata che hanno ormai raggiunto un'età media superiore ai 35 anni, con anche casi di linee installate nell'arco di tempo tra le due guerre.

In condizioni come queste dove i componenti hanno raggiunto e in alcuni casi superato la vita utile attesa, è determinante poter prevenire i loro possibili guasti e conseguenti fuori servizio, a volte particolarmente gravosi, e permettere l'adozione di nuove e più efficienti strategie di manutenzione, realizzando un aumento dell'affidabilità insieme ad una riduzione dei costi complessivi di gestione.

A questo fine negli anni passati sono state avviate attività di ricerca e sperimentazione volte ad approfondire i meccanismi che sono alla base dei fenomeni di degrado dei collegamenti in cavo. Accertati questi meccanismi (spesso associati a fenomeni di penetrazione d'acqua o al superamento locale dei gradienti elettrici di tenuta dei componenti), sono state individuate e messe a punto metodologie diagnostiche in grado di identificare, possibilmente in maniera precoce, opportuni parametri che possano descrivere l'evoluzione del degrado, così da fornire un allarme al superamento di soglie ritenute pericolose. A questo riguardo in particolare in

Vista del laboratorio Gabbia di Faraday.

ambito RSE sono state sperimentate e messe a punto misure di Spettroscopia Dielettrica in Frequenza (FDS), misure delle scariche parziali, misure di corrente di Polarizzazione e Depolarizzazione (PDC), misure del fattore di perdita (tgΔ) e misure di indice di polarizzazione (IP).

Sulla base di questa esperienza protocolli di prova in campo sono stati individuati e sperimentati nell'ambito di accordi con importanti società elettriche di distribuzione (ENEL, ACEA, A2A). Le successive analisi di laboratorio effettuate su cavi e accessori prelevati dall'esercizio, costituiscono un aspetto fondamentale nella attività diagnostica in oggetto in quanto consentono una sempre migliore definizione dei valori di soglia d'attenzione dei suddetti indicatori diagnostici.

I principali laboratori nei quali sono sperimentate e messe a punto le tecniche diagnostiche citate sono il laboratorio salone di alte tensioni, il laboratorio gabbia di Faraday e il laboratorio 18 kJ e prove invecchiamento cavi.

7.4 IL LABORATORIO DI TARATURA ACCREDIA

Un discorso a parte merita poi il laboratorio di taratura Accredia. Alla fine degli Anni '80 la riferibilità delle misure ai Campioni Nazionali diventa un tema "caldo" anche per le prove e le misure di alta tensione e di elevate correnti svolte nei laboratori di CESI.

Le grandezze da misurare sono del tutto particolari: tensioni impulsive che riproducono la fulminazione atmosferica, raggiungendo in un microsecondo qualche milione di volt; tensioni alternate di ampiezza pari a centinaia di migliaia di volt (in casa abbiamo un *banalissimo* 220V); correnti di corto circuito di decine di migliaia di ampere (l'interruttore differenziale, il comune *salvavita*, ci protegge da correnti di 30 mA).

Vengono quindi definite metodologie e sviluppati sistemi di misura di riferimento unici in Italia che permettono di effettuare la taratura di sistemi di misura di laboratorio per prove di alta tensione,

e che dopo qualche anno permettono al Laboratorio Metrologico di essere accreditato, come Centro di Taratura n.57 dall'allora SIT (Servizio di Taratura in Italia) per la taratura di sistemi e strumenti per Alte Tensioni impulsive (fino a 2.700 kV a impulso atmosferico).

Passa ancora qualche anno e l'accreditamento SIT viene esteso alla taratura di trasformatori di misura (trasformatori di corrente – TA fino a 6.000 A e trasformatori di tensione – TV fino a 60 kV AC).

Da allora il Laboratorio Metrologico, che oggi opera nel Dipartimento TTD, è l'unico in Italia per la taratura di oscilloscopi digitali, voltmetri di cresta, divisori e sistemi di misura per alte tensioni impulsive (attività svolta sia nei laboratori di RSE sia direttamente in campo), nonché per la taratura di TA e TV. L'accreditamento Accredia, che nel frattempo ha ereditato il ruolo del SIT, continua a qualificare il livello di eccellenza tecnica e misuristica presente nel Laboratorio Metrologico, e permette ai laboratori industriali, ai costruttori e agli utilizzatori (utility del sistema T&D) delle apparecchiature di misura citate, di ottenere la riferibilità ai Campioni Nazionali e Internazionali, e attraverso gli accordi multilaterali di cui Accredia è firmatario, di vedere riconosciuta internazionalmente la qualità e l'affidabilità metrologica delle proprie misure.

Taratura on-site di divisore di tensione per prove impulsive.

7.5 MICRORETE DI DISTRIBUZIONE IN CORRENTE CONTINUA

Fino ad oggi la corrente continua ha trovato impiego nelle linee di trasmissione di grande potenza sopraccitate, nella trazione elettrica, negli azionamenti industriali, nelle applicazioni elettrochimiche, e nelle alimentazioni di elevata continuità, come gli impianti di emergenza.

Viceversa nelle applicazioni tradizionali ha finora prevalso l'uso della corrente alternata, soprattutto grazie alla possibilità di trasfor-

mare agevolmente i parametri di tensione e corrente attraverso il trasformatore, una macchina ad alta efficienza e molto affidabile, e grazie alla disponibilità del motore asincrono.

Ne consegue che gran parte degli utilizzatori sono stati progettati per una alimentazione diretta in alternata, sia pure a diversi livelli di tensione, a seconda della potenza assorbita.

Il nuovo scenario conseguente alla liberalizzazione del mercato elettrico e allo sviluppo delle fonti rinnovabili, si caratterizza per un'aumentata complessità di gestione dei flussi di potenza che richiede al sistema elettrico una maggiore flessibilità e controllabilità; a questo si deve aggiungere una crescente difficoltà nella costruzione di nuove linee ad alta tensione.

In questa situazione il sistema di trasmissione e quello di distribuzione potrebbero avvalersi di reti in corrente continua grazie alla più elevata capacità di trasporto e al minore impatto ambientale di un elettrodotto in DC, rispetto ad uno di pari potenza in AC.

Inoltre, la necessità di integrare nella rete di distribuzione una sempre maggiore quantità di generatori distribuiti che sono spesso caratterizzati da una produzione in corrente continua, come nei moduli fotovoltaici o che hanno comunque la necessità di uno stadio in continua prima dell'allacciamento alla rete, come nel caso delle microturbine a gas, sta portando ad un crescente interesse per i sistemi di distribuzione in corrente continua.

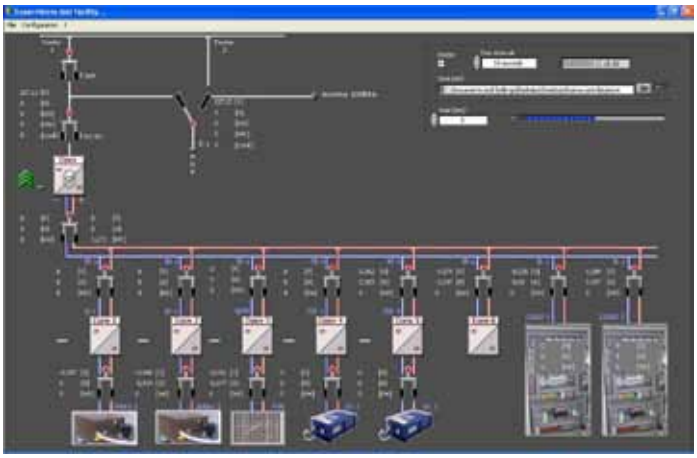
Si deve ricordare che una quota sempre più consistente di energia elettrica subisce una "conversione elettronica" prima del suo uso finale, ad esempio gran parte delle apparecchiature elettrodomestiche, sebbene alimentate in alternata, funzionano di fatto in corrente continua e quindi potrebbero trarre beneficio, sia sotto il profilo costruttivo che sotto quello energetico, dalla disponibilità di una sorgente di alimentazione in corrente continua che permetterebbe non solo di semplificarne lo stadio di ingresso, ma anche un risparmio economico associato all'eliminazione del raddrizzatore e della capacità di filtro.

Lo sviluppo delle tecnologie elettroniche di potenza consente, oggi, di realizzare anche in corrente continua funzioni un tempo solo prerogativa delle reti in corrente alternata. Ci si può quindi chiedere se oggi l'uso della corrente alternata sia da ritenersi la scelta più conveniente e razionale.

L'adozione della continua presenterebbe indubbi vantaggi di carattere generale quali una più ridotta caduta di tensione, una crescita dell'efficienza complessiva del sistema elettrico, un aumento dell'affidabilità della rete di distribuzione, una maggiore capacità di

trasporto delle linee poiché non mette in gioco potenza reattiva, una più facile connessione della generazione distribuita (GD) attraverso l'utilizzo di convertitori DC/DC, in alternativa ai più complessi e costosi convertitori DC/AC, un miglior filtraggio dei disturbi sulla tensione rendendo meno pesante il problema dell'inquinamento armonico e meno frequenti i disservizi correlati con disturbi provenienti dalla rete in alternata, con conseguente incremento della qualità della fornitura e del risparmio economico.

Nel 2003 il CESI avvia delle attività nell'ambito dei progetti GENDIS21 e RETE21 della Ricerca di Sistema, per valutare nuove possibilità d'impiego delle reti di trasmissione e distribuzione in corrente continua. Ad esempio, nel settore della trasmissione sono condotti studi per valutare la possibilità di potenziamento della rete di trasporto nazionale a 380 kV con l'inserimento, ad esempio, di un collegamento HVDC (High Voltage Direct Current) da 1.200 MW e inoltre, vengono investigati i principali provvedimenti necessari per la trasformazione di linee esistenti in alta tensione da corrente alternata a corrente continua.



Sinottico sistema di supervisione microrete in DC.

Per quanto riguarda la rete di distribuzione si studiano reti in continua caratterizzate da un'elevata qualità e continuità dell'alimentazione da affiancare alle tradizionali reti in alternata, in aree in cui sono presenti imprese del terziario avanzato e industrie ad alta tecnologia che necessitano di essere alimentate con energia elettrica di alta qualità.

Si definisce l'architettura di una rete in bassa tensione in DC con GD e se ne analizzano gli aspetti di controllo, sicurezza, affidabilità e risparmio energetico. Infine, si conducono analisi economiche relative alla conversione da AC a DC dell'impianto elettrico di un albergo, di un Centro Elaborazione Dati e di un ospedale.

In considerazione degli incoraggianti risultati raggiunti, nell'ambito del progetto di Ricerca di Sistema "Trasmissione e Distribuzio-

ne", i ricercatori RSE iniziano nel 2006 lo sviluppo di una microrete sperimentale in bassa tensione.

La microrete in DC viene progettata per funzionare interconnessa alla test facility di GD in alternata per mezzo di un convertitore AC/DC da 100 kVA, che consente la gestione del flusso bidirezionale di energia tra le due reti, ma anche di operare in isola sfruttando le risorse energetiche ad essa connesse. La realizzazione della microrete nella sua attuale configurazione a due conduttori alla tensione di 400 V si completa nel 2009.

Particolare attenzione è dedicata alla realizzazione del sistema di controllo della rete al fine di garantire un elevato livello di qualità e di affidabilità della stessa, di consentire uno scambio di flussi di potenza con la rete in alternata, a bassa distorsione armonica e a elevato fattore di potenza. In dettaglio, le strategie di controllo sviluppate consentono, tramite un adeguato coordinamento tra i convertitori presenti in rete e il sistema di protezioni, di stabilizzare la tensione lato continua contenendo le perturbazioni provocate da guasti e da fenomeni transitori provenienti dalla rete in alternata o dovute al manifestarsi di improvvisi squilibri di potenza sulla rete in continua.

La rete sperimentale in DC comprende anche due carichi resistivi programmabili, ciascuno da 30 kW con potenza regolabile a passi di 1 kW, un emulatore di campo fotovoltaico da 50 kW, due batterie sodio-nichel cloruro (60 kWp, 32 kWh) e banchi di supercondensatori (60 kW, per 4 secondi) per massimizzare l'efficienza globale del sistema e per garantire una elevata qualità dell'alimentazione. I sistemi di accumulo sono connessi alla rete mediante convertitori DC/DC bidirezionali da 35 kW.

7.6 LA SUPERCONDUTTIVITÀ IN RSE

Il continuo aumento della domanda di energia e il contemporaneo aumento delle perdite in rete stanno ponendo nuove sfide nella gestione dei sistemi elettrici moderni. È noto, ad esempio, che le perdite in rete nei sistemi elettrici dei Paesi avanzati rappresentano circa il 6-10 per cento dell'energia prodotta. Una possibile strategia per fronteggiare questa situazione consiste nel miglioramento in termini di efficienza di tutti quei dispositivi tradizionali che costituiscono attualmente la rete elettrica e che possono trarre enormi benefici dall'uso di materiali innovativi. Tra questi ultimi, i Superconduttori ad Alta Temperatura (SAT o HTS in inglese), scoperti alla fine degli

Il prototipo di limitatore di corrente trifase da 9 kV durante i test dielettrici.

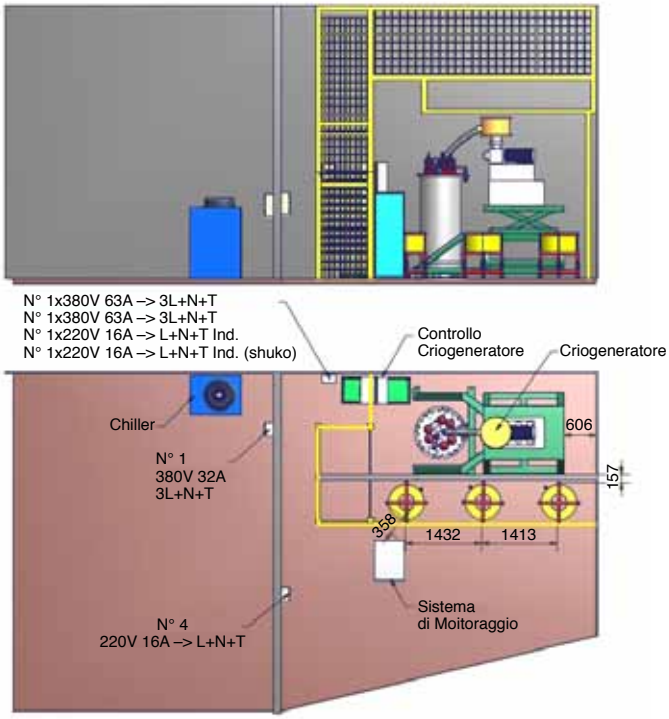
Anni '80, costituiscono la classe di materiali che presenta forse il maggior potenziale applicativo.

Presso RSE esistono competenze sulle applicazioni di potenza della superconduttività nel settore elettrico e un laboratorio attrezzato che ci permette di svolgere attività sperimentali di caratterizzazione e prova di conduttori e avvolgimenti SAT da affiancare alle attività di modellazione numerica, simulazione e progettazione di dispositivi a superconduttore. Le competenze di RSE vengono da lontano e hanno radici in ENEL ed in particolare nei centri di ricerca esterni che facevano capo a ENEL quali il CISE.

Breve storia

In passato abbiamo collaborato con diverse realtà industriali ed istituti di ricerca a diversi progetti di superconduttività applicata quali ad esempio la progettazione di cavi SAT 132 kV, 3 kA, la realizzazione di un sistema di accumulo SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) di taglia 1 MJ, 1 MW, la progettazione e realizzazione di passanti di corrente da 13 kA per il progetto LHC del CERN di Ginevra, lo studio di trasformatori SAT da 25 MVA, ed altri ancora.

L'incremento della magliatura della rete elettrica contribuisce a un aumento del valore delle correnti di corto-circuito: appare quindi



Lo schema di funzionamento del prototipo di limitatore di corrente trifase da 9 kV.

molto desiderabile per le società elettriche disporre di un dispositivo che, in caso di guasto, introduca istantaneamente una elevata impedenza elettrica limitando così l'entità delle correnti di corto-circuito. I superconduttori permettono la realizzazione di limitatori di corrente praticamente ideali, basati sulla transizione "stato superconduttore-stato normale" che si verifica quando viene oltrepassato il valore di corrente critica. Il limitatore superconduttivo, o SFCL (Superconducting Fault Current Limiter), di tipo resistivo, basato sulla transizione di un elemento superconduttivo posto in serie alla linea da proteggere, è senz'altro la configurazione più semplice e studiata.

Negli ultimi anni l'attività del nostro gruppo si è concentrata sullo studio e sviluppo di prototipi di Limitatori di Corrente SAT in grado di limitare istantaneamente le correnti di corto-circuito che si generano nei sistemi elettrici a fronte di eventi di guasto.

A livello internazionale i limitatori di corrente superconduttivi attirano un grande interesse anche se attualmente non sono disponibili in commercio dispositivi SFCL, ma sono già state realizzate installazioni di prototipi con diverse configurazioni sia in MT che in AT. In Italia, le principali attività di studio e sviluppo di dispositivi SFCL sono state svolte nell'ambito di un progetto finanziato dal Fondo per la Ricerca di Sistema (RdS) che ha consentito di progettare, realizzare e provare sperimentalmente vari prototipi di limitatori di corrente di tipo resistivo. Tale Progetto "LIMSAT" si è concluso con successo a fine 2005, con le prove di corto circuito su un prototipo trifase di SFCL di taglia 3,2 kV/1,2 MVA.

Questo primo passo ha fornito le esperienze necessarie per puntare allo sviluppo e alla successiva installazione di un prototipo di

limitatore di corrente trifase in una rete reale di distribuzione in MT (9 kV, 220 A). Inizialmente è stato sviluppato il progetto di un dispositivo limitatore di corrente monofase realizzato mediante conduttori in BSCCO–2223 (SAT di prima generazione). Va sottolineato che la fase realizzativa degli avvolgimenti SAT, cuore del dispositivo SFCL, è stata portata a termine completamente da personale RSE all'interno del Laboratorio Superconduttività. Il successo delle prove sperimentali ha consentito di proseguire con il progetto e la costruzione delle rimanenti due fasi, in modo da realizzare il dispositivo SFCL trifase completo.

Nel corso del 2011 tale prototipo di limitatore di corrente trifase è stato sottoposto prima alle prove di corto-circuito e poi a quelle dielettriche: durante le prime ha mostrato la capacità limitante prevista in sede di progetto, durante le seconde invece ha resistito alle sollecitazioni previste dalle norme per componenti elettrici di classe 12 kV, senza evidenziare scariche di alcun tipo attraverso le parti isolanti. È con grande soddisfazione, quindi, che ad inizio 2012 il limitatore è stato installato nella sottostazione S. Dionigi dell'azienda distributrice di Milano A2A Reti Elettriche, diventando ufficialmente il primo dispositivo del suo genere installato in Italia ed uno dei primi nel mondo.

Futuri sviluppi e prospettive

L'installazione del limitatore trifase ha consentito di iniziare un'attività sperimentale in campo che ha già fornito diverse indicazioni e sicuramente ne fornirà di ancora più importanti nei prossimi mesi. È naturale che il risultato raggiunto non è un punto di arrivo, ma è piuttosto un nuovo punto di partenza per raggiungere il traguardo successivo: riprogettare il dispositivo per una corrente nominale di 1 kA. Infatti, ciò consentirà di utilizzare lo stesso sito di installazione, non limitandosi però a proteggere un singolo *feeder*, bensì proteggendo ben quattro *feeder* alimentati dallo stesso trasformatore. Il nuovo progetto porrà nuove sfide al gruppo superconduttività di RSE, come ad esempio la scelta del materiale superconduttore da utilizzare e la temperatura di esercizio del dispositivo.

La stima guadagnata da RSE nel campo della superconduttività è anche riconosciuta a livello internazionale e a conferma di ciò, ad esempio RSE coordina l'Implementing Agreement della IEA (International Energy Agency) dedicato allo studio dell'impatto della superconduttività nel settore elettrico di potenza. Inoltre il gruppo superconduttività è stato ed è attualmente coinvolto in progetti europei; al momento RSE è uno dei principali partner del progetto euro-

peo ECCOFLOW che ha l'obiettivo di progettare, realizzare, testare ed installare in rete un dispositivo limitatore di corrente trifase (24 kV, 1 kA) a base di YBCO (SAT di seconda generazione).

Un traguardo in più, quindi, su una lunga strada di successi che, iniziata tanto tempo fa, non ha mai smesso di appassionare tutti coloro che hanno avuto la fortuna di incrociarla.

8 Strumenti e automazione

8.1 ALLA RICERCA DELL'EQUILIBRIO PERFETTO

Ogni istante del giorno, e per tutti i giorni dell'anno, il sistema elettrico italiano è caratterizzato dal susseguirsi di richieste e di distacchi di carico in ogni parte del Paese, dalle città agli angoli più remoti della penisola e delle isole. Il diagramma di carico, ossia il grafico che esprime in funzione del tempo la potenza richiesta sulla rete elettrica italiana, rappresenta in maniera chiara l'alternarsi di questi eventi. Se di primo acchito può sembrare l'encefalogramma di un sistema impazzito, in realtà esso rappresenta la sintesi dell'esercizio dinamico, efficiente e in sicurezza del sistema elettrico in tutte le sue componenti, che di concerto garantiscono in ogni istante il bilancio tra carico e generazione.

Tutto questo è ottenuto grazie all'impiego di impianti, linee elettriche e apparati progettati con criteri di elevata flessibilità e affidabilità, governati per mezzo di sistemi di misura, regolazione e controllo (automazione) basati sulle più avanzate tecnologie hardware e software, con la supervisione di personale altamente specializzato.

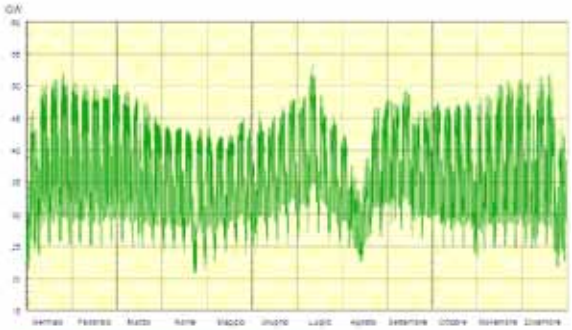
L'approccio sistemico al Sistema Elettrico, perseguito da ENEL Ricerca prima e da RSE ora, fornisce una visione aperta in tutte le direzioni, dalla generazione al consumo. Il metodo di lavoro seguito, rigoroso e logico, deve tener conto di una catena di passi: dall'identificazione del Sistema e della sua modellazione numerica, alla simulazione del comportamento statico e dinamico in presenza di varie soluzioni di controllo, fino alla progettazione e attuazione degli stessi con tecnologie avanzate, ai collaudi su simulatori, lo sviluppo di soluzioni per l'addestramento degli operatori e così via. Solo quando il sistema è analizzato nella sua interezza è possibile valutare il comportamento dinamico dei suoi componenti, minimizzando la possibilità dell'instaurarsi di pericolose incongruenze.

Un sistema sicuro e affidabile: il controllo e l'automazione della rete

Il sistema per il controllo e l'esercizio del sistema elettrico attuale beneficia fortemente della ricerca svolta in ambito ENEL e ora in RSE. Infatti, fin dagli Anni '60 al Centro Ricerche in Automatica di ENEL (CRA) sono studiate e realizzate funzioni di regolazione, controllo e automazione che consentono di esercire in sicurezza il sistema elettrico.

Lo studio di metodi di valutazione e miglioramento della fidatezza (Af-

Curva cronologica delle potenze orarie* nell'anno 2011



*Dati al netto dell'assorbimento per servizi ausiliari e per pompaggi

Il diagramma di carico della rete elettrica nazionale.

Fonte: Terna

fidabilità, Disponibilità, Sicurezza, …) dei sistemi d'automazione distribuiti, con miglioramenti sia delle architetture *fault tolerant* sia nel SW di base e applicativo, ha costituito un fattore essenziale per garantire la sicurezza del sistema.

Sulla base delle ricerche condotte in ENEL Ricerca a partire dagli Anni '80 sulla regolazione di tensione, frequenza, eccetera, RSE investiga molti diversi aspetti relativi al controllo del sistema, raggiungendo un'ampia e approfondita conoscenza di numerosi temi, tra i quali:

- il controllo della stabilità elettromeccanica (oscillatoria e transitoria) con la definizione di criteri di sintesi dei guadagni delle retroazioni addizionali stabilizzanti per lo smorzamento delle oscillazioni elettromeccaniche; lo studio di soluzioni di monitoraggio in linea e in tempo reale del grado di stabilità oscillatoria e transitoria del sistema elettrico;
- il controllo dei flussi di potenza attiva (regolazione primaria e secondaria della frequenza) tramite metodi per la prevenzione e risoluzione delle congestioni fra zone di mercato; modelli per la determinazione dei quantitativi di riserva disponibili; soluzioni innovative per la regolazione frequenza/potenza;
- il controllo dei flussi di potenza reattiva (regolazione primaria e secondaria delle tensioni di rete): con l'analisi di prestazioni del sistema di controllo coordinato delle tensioni di rete; la definizione di metodi e strumenti per la valutazione dei margini di carico e del livello di sicurezza associato ai piani di tensione;
- il controllo preventivo della sicurezza statica e dinamica (criteri di sicurezza e metodi di analisi): metodi per la valutazione probabilistica del rischio; metodi e strumenti per la valutazione della sicurezza statica e dinamica; analisi della sicurezza di esercizio in presenza di utenze interrompibili;
- il controllo correttivo dello stato di emergenza (piani di difesa, alleggerimento e separazione) con la definizione di indici di stabilità in linea e in tempo reale per la valutazione della stabilità di tensione e della stabilità transitoria del sistema elettrico; stabilizzazione dei transitori di rete a seguito di gravi incidenti;
- il controllo a partire da uno stato di disservizio (piani di ripristino,

riaccensione e rialimentazione): analisi di stabilità delle regolazioni durante le manovre di ripristino della rete; metodologie orientative per un piano di ripristino adattativo; analisi delle aleatorietà e del rischio nella definizione di piani flessibili di ripristino.

La bontà delle soluzioni sviluppate nell'ambito della ricerca è testimoniata dalla applicazione in campo di automatismi come l'ASAT (Automatismo per Stazioni AT), utilizzato nelle stazioni ad alta tensione. Lo stesso approccio è poi esteso per l'automazione delle cabine primarie della rete di distribuzione.

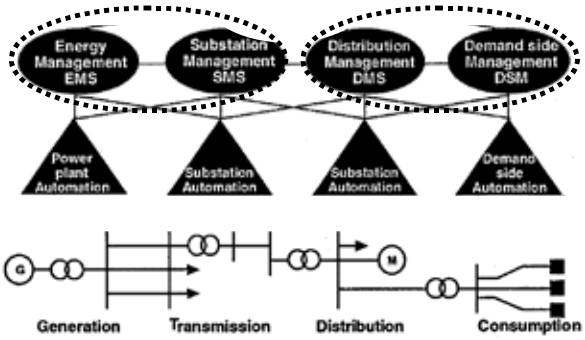
Nuove metodologie di controllo per il sistema elettrico

Alla luce dei cambiamenti in atto nel settore elettrico si osserva un forte incremento del grado di incertezza e della effettiva disponibilità, non più centralizzata, delle risorse necessarie al controllo del sistema (riserva, bande di regolazione, margini di reattivo, eccetera). In luogo di un sistema integrato, operato da un unico gestore, abbiamo oggi un sistema "multigiurisdizionale" che deve operare secondo regole più complesse.

A sua volta, l'automazione vede una diffusione progressiva dalla rete di trasmissione verso i livelli inferiori: la disponibilità di sistemi con architettura distribuita nel territorio permette di conseguire significativi vantaggi, quali per esempio il decentramento delle funzioni di governo (supervisione, monitoraggio e controllo) del sistema, che consente di aumentare la sicurezza a fronte di guasti, e la dislocazione di dette funzioni nei punti dove si rivelano più efficaci. Il problema della *sicurezza di esercizio* è trattato da RSE in termini di gestione dell'incertezza e del rischio associato alla disponibilità delle risorse di controllo.

Le ricerche degli ultimi anni riguardano soprattutto la definizione di metodi e strumenti per l'analisi e il controllo del rischio e per valutare in modo integrato i margini di sicurezza del sistema. La crescente penetrazione di generazione rinnovabile non programmabile, in particolare eolica e fotovoltaica, pone infatti sfide impegnative per la gestione del sistema elettrico e incrementa le esigenze di capacità di trasporto delle reti, di flessibilità di esercizio e di gestione delle incertezze. La presenza di una quota consistente di generazione non controllabile implica, ad esempio, la necessità di approvvigionare una maggiore

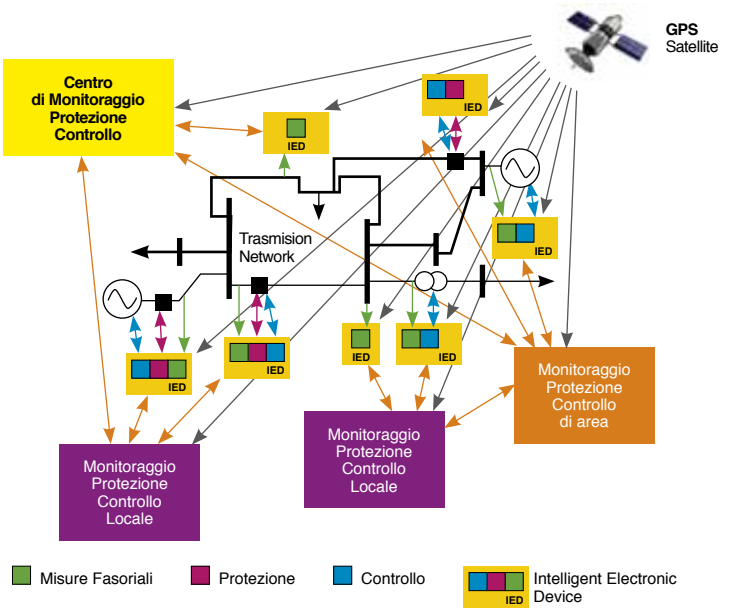
L'automazione nei diversi livelli del sistema.



quantità di riserva di generazione, disponibile a entrare in esercizio in caso di necessità per bilanciare prontamente il carico. La sicurezza del sistema elettrico futuro dipenderà in modo determinante dalle soluzioni per la gestione delle fonti di generazione rinnovabili che la ricerca sarà in grado di sviluppare.

In realtà, nella storia dei sistemi elettrici molti disservizi si sono sviluppati in accordo a scenari *non considerati* dal criterio deterministico N-1 (ossia il criterio di sicurezza secondo cui gli elementi che rimangono in funzione dopo il guasto di un singolo elemento devono essere in grado di sopportare il cambiamento dei flussi di potenza), perché apparentemente poco verosimili e poco significativi. Tali scenari scaturiscono dalla concomitanza di eventi multipli e comportamenti anomali, sia umani sia dei sistemi automatici di regolazione, controllo e protezione. Inoltre, la crescente volatilità delle condizioni di esercizio fa sì che non sia sempre facile valutare e rispettare lo stesso criterio N-1. Di qui l'esigenza perseguita da RSE di riconsiderare gli approcci alla gestione della sicurezza, considerando in modo più approfondito sia le contingenze multiple sia le incertezze, con un approccio basato sull'analisi e il controllo preventivo del rischio e sulla definizione di funzionalità di difesa avanzate. A tal fine vengono affrontati temi di grande rilevanza, dallo sviluppo di metodi e strumenti di analisi del *rischio di instabilità* per il sistema sempre più effi-

Sistemi di automazione e controllo integrati della rete AT. Architettura distribuita wide area.



cienti e accurati, alla valutazione di nuovi criteri di esercizio che possano garantire la sicurezza, allo studio di sistemi di controllo *real time*.

Il monitoraggio e controllo *real time* della rete rappresenta, infatti, un altro importante approccio per migliorare l'esercizio e per lo sviluppo della rete nel XXI secolo. Attualmente, per esempio, sono allo studio metodi per la valutazione della sicurezza del sistema elettrico in grado di gestire la triplice sfida della dimensionalità (trattandosi dell'intera rete elettrica europea), delle incertezze sulle misure e sull'evoluzione prevista (in particolare della generazione rinnovabile) e dell'individuazione delle migliori azioni di controllo, il tutto garantendo requisiti di tempi di elaborazione compatibili con l'ambiente on-line della sala controllo. L'adozione di sistemi di monitoraggio e controllo pensati appositamente per reti geograficamente molto estese (*Wide Area Monitoring and Control System,* WAMCS), basati su sistemi di misura fasoriale, promette di sfruttare al meglio l'infrastruttura di rete pur mantenendo la stabilità del sistema a fronte di repentine variazioni delle condizioni di funzionamento o di contingenze gravose.

RSE ha elaborato una visione coordinata della funzionalità di protezione dell'infrastruttura e del servizio, sulla base dei risultati ottenuti analizzando le protezioni, gli schemi di protezione del sistema (SPS) e i sistemi di monitoraggio su ampia area.

8.2 LE SMART GRID

La liberalizzazione del mercato elettrico, la crescente penetrazione delle fonti rinnovabili e della cogenerazione, la necessità di risparmiare energia e di ridurre l'uso dei combustibili fossili, sono gli elementi che stanno sempre più indirizzando lo sviluppo del sistema elettrico verso le reti di distribuzione di tipo attivo, cioè con centri di produzione di piccola-media potenza, sempre più distribuiti sul territorio, in grado di fornire energia elettrica in modo più economico, efficiente, affidabile e a minor impatto ambientale.

È quindi in atto un grande sforzo di ricerca in ambito internazionale per affrontare, con tecnologie e strategie innovative, i problemi che emergono in modo sempre più diffuso nella trasformazione del sistema elettrico da una struttura con grandi impianti di produzione centralizzata a forme che prevedono anche una generazione distribuita (GD) sul territorio con una forte presenza di fonte rinnovabile (eolica e fotovoltaica) che, diversamente dalle fonti tradizionali, è per sua natura imprevedibile e quindi non programmabile.

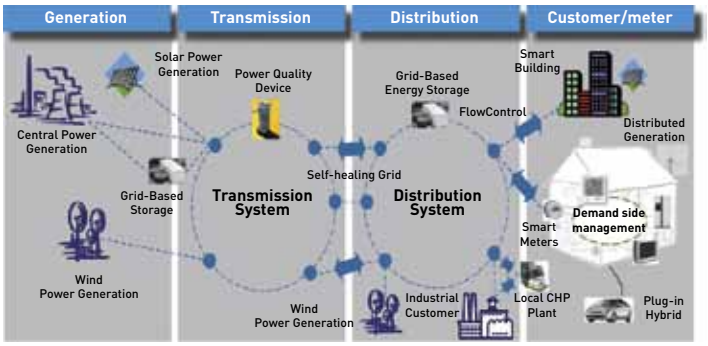
La GD è quindi un nuovo modello di produzione e distribuzione di energia, che si basa sull'integrazione nelle reti elettriche di distribuzione di diverse tecnologie a fonte rinnovabile (eolica, solare, biomasse, eccetera), e di impianti di cogenerazione a fonte fossile. Gli impianti di GD sono spesso localizzati in prossimità dell'utente finale, come all'interno di impianti industriali o di edifici commerciali o residenziali, per soddisfare in modo efficiente specifiche necessità energetiche o di qualità e affidabilità della fornitura. Vi sono però altri benefici meno evidenti, come la riduzione degli investimenti nelle infrastrutture di trasporto dell'energia elettrica, la riduzione delle perdite di energia nelle reti e dei costi di distribuzione.

Una diffusione sempre maggiore della GD porta la rete di distribuzione ad evolvere verso una struttura caratterizzata dalla suddivisione della rete stessa in aree attive controllate a livello locale e fortemente interconnesse tra loro e che presentano due tipologie di strutture: le microreti e i Virtual Power Plants (VPP). Per microreti si intendono reti di bassa tensione in cui sono presenti: generatori, accumuli elettrici, carichi, dispositivi e tecnologie informatiche per la loro gestione e controllo. Le VPP hanno le stesse caratteristiche ma si riferiscono ad aree geograficamente più estese e riguardano quindi i livelli di media e alta tensione della distribuzione che, grazie a strumenti informatici e di comunicazione, sono in grado di proporsi sul mercato dell'energia elettrica come un unico grande impianto virtuale che potrebbe anche aggregare più microreti. Le microreti e le VPP riproducono quindi al loro interno la struttura del sistema di produzione e distribuzione dell'energia, dove nel caso di eccesso di produzione il flusso energetico può invertirsi, cioè la rete di distribuzione viene ad assumere la funzione di trasporto bidirezionale dell'energia elettrica.

L'accresciuto ruolo delle reti elettriche porta al concetto di smart grid cioè di *rete intelligente*: una rete elettrica dove le azioni di tutti gli utenti ad essa connessi (generatori e consumatori) sono tra loro coordinate per garantire una fornitura elettrica efficiente, economica, sostenibile, di qualità e con elevato livello di sicurezza.

Si tratta di un sistema elettrico completamente automatizzato in grado di monitorare, controllare, proteggere e ottimizzare il funzionamento delle risorse energetiche ad esso connesse: generazione centralizzata e distribuita, VPP e microreti, sistemi di accumulo dell'energia, utenze industriali e consumatori finali con i loro elettrodomestici e veicoli elettrici, garantendo anche un flusso bidirezionale di informazioni e di energia elettrica.

In questo contesto si deve evidenziare il ruolo decisivo del cliente finale nello sviluppo delle smart grid, poiché è chiamato a modificare il



Lo schema di un sistema smart grid.
Fonte: Major Economies Forum on Energy and Climate – Technology Action Plan on Smart Grids

suo comportamento nell'uso dell'energia e a partecipare alla sua gestione attraverso l'utilizzo di tecnologie di automazione domestica per il controllo dei carichi e della generazione. In particolare l'utente di una smart grid deve adeguare la produzione in risposta a dei segnali di sistema (set-point ai generatori) e i consumi di energia attraverso segnali di prezzo (tariffe elettriche variabili) o alla disponibilità delle fonti rinnovabili, spostandone l'impiego in periodi di minor costo o riducendo i consumi.

Questo cambiamento strutturale richiede lo sviluppo di nuovi sistemi per la gestione e il controllo delle risorse energetiche distribuite che necessitano anche di mezzi e protocolli di comunicazione avanzati, comportando un'attività sperimentale che è condotta in alcuni impianti di ricerca (test facility) e in impianti pilota con utenze reali.

RSE dedica diverse attività di ricerca allo sviluppo e verifica di sistemi di controllo avanzati, sia di tipo locale integrati nei singoli generatori, sia metodi di regolazione di tipo centralizzato. Scopo di tali sistemi di controllo è garantire una vera integrazione dei generatori nei confronti della rete cui sono allacciati, nonché garantire il soddisfacimento di obiettivi più generali che possano supportare la diffusione delle fonti rinnovabili, per esempio il bilanciamento locale di generazione e carico.

Grazie anche a simulatori realizzati appositamente, RSE è in grado di valutare i benefici attesi dall'implementazione di tali sistemi, in termini di miglioramento dei parametri tecnici (tensioni, eccetera) e di incremento, in numero e potenza, dei generatori che è possibile connettere alla rete. Per esempio, il controllore VoCANT (Voltage Control for Active NeTworks) è in grado di individuare la soluzione che, al minor costo operativo, è in grado di soddisfare i requisiti tecnici impostati quali tensioni ai nodi della rete e scambio di potenza tra rete AT e rete di distribuzione MT, agendo su risorse di regolazione differenziate quali variatore sotto

carico, generatori controllabili, carichi e sistemi di accumulo elettrico. Gli algoritmi RSE non sono valutati unicamente in ambiente numerico, ma vedono una loro applicazione pratica nell'ambito di progetti dimostrativi nazionali ed europei (ad esempio, il progetto europeo GRID4EU).

Su questi temi i ricercatori RSE hanno realizzato nella sede di Milano, a supporto delle attività sperimentali, una test facility di generazione distribuita in bassa tensione nell'ambito della Ricerca di Sistema per il Settore elettrico e dei progetti europei DISPOWER, More-Microgrids e DER-Lab. Un'attività di ulteriore potenziamento è tuttora in corso, sia attraverso la ricerca nazionale, sia con il supporto del progetto comunitario DER-RI che ha l'obiettivo di potenziare il network dei laboratori europei nell'ambito della generazione distribuita (GD) e di mettere la test facility di RSE a disposizione dei ricercatori europei.

Uno strumento per la gestione dell'energia domestica (GED).

La test facility è una microrete e comprende varie tipologie di generatori innovativi e a fonte rinnovabile, sistemi di accumulo e carichi, dispositivi di protezione, nonché un sistema di supervisione e controllo che utilizza tecnologie di comunicazione differenti, tra cui quelle ad onde convogliate (*power line communication*).

La rete sperimentale è in grado di riprodurre varie tipologie di rete (radiale, ad anello e magliata) e di crearne le perturbazioni tipiche; inoltre i generatori e i carichi possono essere connessi in differenti punti della rete la cui lunghezza si può estendere sino a circa un chilometro.

RSE ha in corso diverse attività sperimentali riguardanti i sistemi di comunicazione e alcune importanti funzioni per il dispacciamento e il controllo delle risorse energetiche della test facility. Ci sono sperimentazioni inerenti l'accoppiamento delle fonti rinnovabili agli accumuli elettrici e il controllo di una microrete funzionante in isola, cioè non connessa alla rete principale.

La test facility è collegata alla rete di media tensione tramite un trasformatore MT/BT da 800 kVA, sono presenti diversi impianti a fonte rinnovabile come dei campi fotovoltaici basati su moduli e inverter di differente tecnologia con una potenza globale di circa 35 kW_p, un impianto solare termodinamico costituito da un concentratore parabolico e da un motore Stirling da 10 kW, e un impianto di cogenerazione a biomasse ba-

sato su un generatore a ciclo Rankine organico (ORC) da 10 kW_e e 90 kW_{TH} con caldaia alimentata a pellet. A questi si aggiunge un impianto ibrido, che può operare anche in isola, composto da un campo fotovoltaico da 10 kW_p, un sistema di accumulo elettrico con batterie al piombo, un motore diesel ed un generatore eolico simulato.

Sono inoltre installati due impianti alimentati a gas naturale: uno di trigenerazione con microturbina (100 kW_e, 167 kW_{TH}) e frigorifero ad assorbimento ed uno con motore a combustione interna (6 kW_e, 12 kW_{TH}) in assetto cogenerativo.

Le risorse energetiche della test facility comprendono anche sistemi di accumulo elettrico di differenti tipologie quali: batterie sodio-nichel-cloruro (SoNick) ad alta temperatura (90 kW_p, 50 kWh) e Litio ioni (69 kW_p, 36 kWh) per il bilanciamento dei flussi di potenza e una batteria Redox (45 kW, 90 kWh) per il livellamento dei picchi di carico (*peak shaving*).

Sono integrati nella test facility un carico trifase controllabile da remoto di tipo ohmico-induttivo da 100 kW + 70 kVAR che viene utilizzato per riprodurre i profili di carico tipici delle reti di bassa tensione e una casetta domotica con tetto fotovoltaico e carichi residenziali.

Inoltre, la microrete in corrente alternata s'interfaccia ad una microrete in corrente continua a 400 V per mezzo di un convertitore CA/CC da 100 kW.

8.3 IL RUOLO DELLE TECNOLOGIE DI COMUNICAZIONE

Per consentire il funzionamento coordinato e affidabile delle funzioni brevemente richiamate, è necessario il supporto di un sistema di telecomunicazioni adeguato: funzionale e sicuro, in modo da non minare i vantaggi conseguibili con il decentramento. I sistemi di comunicazione sono essenziali nell'ambito dell'automazione della rete, per il comando e controllo delle apparecchiature da postazioni remote (si pensi al telecontrollo delle stazioni di trasformazione in alta e media tensione o delle centrali di produzione), sia per la tele manutenzione.

L'infrastruttura di comunicazione riveste dunque un ruolo sostanziale sia per l'esercizio in sicurezza degli impianti e delle reti, sia per quanto concerne la capacità di offrire servizi innovativi agli utenti.

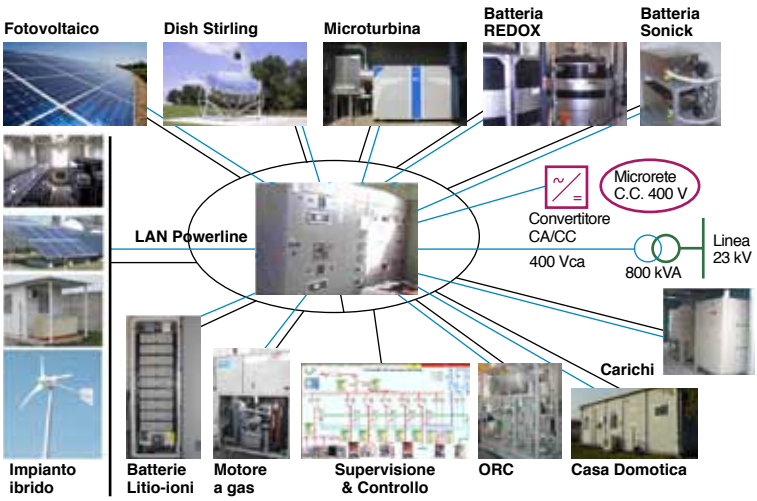
Un aspetto importante è rappresentato dagli standard per l'*interoperabilità*, su cui le imprese elettriche di tutto il mondo investono da decenni e che vede un coinvolgimento attivo di RSE in ambito normativo e nella promozione del loro impiego. I sistemi di automazione distribuiti dipendono infatti in modo essenziale da reti e standard di comunicazione per

garantire scambi informativi affidabili e sicuri tra i diversi soggetti che operano nel sistema.

In particolare, la diffusione della generazione distribuita richiede nuovi sistemi di comunicazione per consentire l'interazione tra il sistema di controllo della rete e i generatori di piccola taglia dislocati lungo la rete stessa. In RSE le comunicazioni per le smart grid sono approfondite mediante la valutazione delle tecnologie e delle architetture proposte, del traffico associato ai diversi casi applicativi e la caratterizzazione sperimentale di aspetti critici (per esempio, la definizione dei messaggi e la caratterizzazione della loro latenza per la disconnessione rapida di generatori di piccola taglia a seguito di uno specifico messaggio inviato dal sistema di protezione posto in cabina primaria).

Le reti di comunicazione, a cui è affidato il funzionamento delle infrastrutture critiche (tra cui la rete elettrica, ma anche trasporti e banche), possono rappresentare non solo un obiettivo diretto di attacchi (intenzionali) o di incidenti (non intenzionali), ma anche un mezzo per colpire indirettamente le infrastrutture critiche da esse supportate. Le *interconnessioni* tra le diverse infrastrutture determinano infatti una *interdipendenza* tramite la quale gli eventi si propagano da un sistema all'altro: si pensi per esempio alla prolungata mancanza di elettricità, che può interrompere il funzionamento di reti di comunicazione (come avvenuto durante il blackout del 2003).

In RSE è condotta l'analisi delle *funzioni di trasferimento* tra i sottosistemi coinvolti, per evidenziare possibili criticità (per esempio, potenziali



Test facility di generazione distribuita in bassa tensione di RSE, con il quadro dispositivi di protezione e configurazione rete al centro della figura.

instabilità della rete elettrica al variare dei ritardi delle comunicazioni). Inoltre, è condotta la valutazione sperimentale dell'effetto di attacchi *cyber* ai sistemi di controllo sull'esercizio della rete elettrica e dell'efficacia delle contromisure di sicurezza inserite nell'architettura. L'attività sperimentale si concentra sulle caratteristiche e i requisiti delle comunicazioni imposti dai sistemi di controllo e automazione (SCADA) impiegati nell'esercizio della rete elettrica, quali disponibilità continua, tempi di risposta brevi, ritardi di trasmissione limitati, flussi informativi integri e autorizzati, assenza di dati spuri e di perdite di dati.

8.4 INFORMAZIONI AFFIDABILI: IL RUOLO DELLA DIAGNOSTICA

I temi dell'affidabilità, della sicurezza e della gestione ottimizzata delle infrastrutture e dei componenti della rete elettrica rivestono, come visto, un ruolo fondamentale, che sta crescendo di importanza anche in conseguenza dell'aumentata complessità introdotta nel settore con l'avvento della liberalizzazione e della diffusione della generazione distribuita.

Era il 1962 quando, a poco più di un anno di distanza dalla realizzazione del primo laser (a rubino) da parte dell'americano Theodor Maiman, nei laboratori di elettro-ottica del CISE viene messo in funzione il primo laser a elio-neon costruito in Italia. Dopo questo primo importante risultato, negli anni immediatamente successivi sono realizzati anche il primo laser a ioni di Argon e il primo laser a CO_2.

A partire da questi primi fondamentali lavori sulle sorgenti laser, l'attività di elettro-ottica si estende rapidamente ad altri settori della stessa disciplina. Pur mantenendo attivo il filone di ricerca sulle nuove sorgenti (laser a stato solido e laser di potenza per le lavorazioni meccaniche), hanno inizio attività di spettroscopia laser con lo sviluppo di sistemi diagnostici (ad esempio, sistemi mobili LIDAR, Laser Imaging Detection and Ranging) per la rivelazione di specie chimiche nell'ambiente e attività di metrologia laser per l'analisi di deformazioni e vibrazioni su oggetti di grandi dimensioni. Particolare importanza rivestono le applicazioni in ambito spaziale (supportate dall'Agenzia Spaziale Europea) e nel campo della diagnostica della combustione (di interesse ENEL).

Nel primo caso rientrano, per esempio, lo sviluppo di un sistema interferometrico per l'analisi dei fluidi in condizioni di microgravità, utilizzato in due diverse missioni dello Space Shuttle, e la realizzazione di sorgenti laser per sistemi LIDAR operanti da satellite. Nell'ambito del secondo vengono invece sviluppati sistemi CARS (Coherent Anti-Stokes

Raman Spectroscopy), sistemi di velocimetria Doppler e sonde granulometriche per l'analisi del particolato in fluidi di processo (emissioni da camino, ceneri, polverino di carbone).

Attualmente lo sviluppo di strumentazione diagnostica basata su tecniche elettro-ottiche prosegue con nuove applicazioni sia nell'ambito della generazione che in quello della trasmissione e distribuzione. Per il primo tema si può ricordare lo sviluppo di un sistema spettroscopico nell'infrarosso per la determinazione della temperatura dei gas all'ingresso della turbina negli impianti turbogas e lo sviluppo di un sistema LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*) per la valutazione della composizione elementare del carbone inviato ai mulini di macinazione nelle centrali elettriche a carbone.

Sonda ottica per il controllo di scomparti blindati e isolati in gas (GIS).

Il contributo delle tecniche elettro-ottiche nei sistemi di trasmissione e distribuzione nasce dalla considerazione che gli *Asset* (linee aeree e in cavo, trasformatori, interruttori, sezionatori, eccetera) presentano condizioni di guasto nella maggior parte dei casi riconducibili a fenomeni di degrado dell'isolamento per effetto di sollecitazioni elettriche, termiche, meccaniche ed ambientali. Le strategie di *Asset Management* vedono l'inserimento della manutenzione su condizione (Condition Based Maintenance o CBM), basata sulla possibilità di stimare, tramite opportuni indicatori diagnostici del degrado, le condizioni e la vita residua del componente e prevedere di conseguenza l'intervento di manutenzione.

Per quanto riguarda le problematiche legate alla trasmissione, viene messo a punto un dispositivo a scansione laser per la valutazione da remoto sia della freccia dei conduttori delle linee aeree di alta tensione, sia dei depositi di ghiaccio (che nei casi estremi possono provocarne addirittura la caduta). Sono inoltre in avanzata fase di studio un sistema LIBS per la valutazione dell'inquinamento salino degli isolatori delle linee AT e due sensori di campo elettrico basati rispettivamente sull'uso di cristalli fotonici e di fibre ottiche micro strutturate contenenti cristalli liquidi fotonici.

Il citato degrado dei materiali isolanti dei componenti elettrici della rete di trasmissione e distribuzione (armadi di smistamento locale dell'energia elettrica, trasformatori) può compromettere drasticamente la vita e l'esercizio dei componenti stessi, con conseguenti perdite economiche

dovute al fuori servizio dell'impianto e delle attività produttive legate all'interruzione della fornitura energetica. Già negli ultimi anni '90 questo problema è affrontato dai nostri ricercatori che, insieme ad ENEL Ricerca, hanno applicato tecniche diagnostiche di tipo ottico per il controllo dell'integrità di scomparti (GIS Gas Insulated Substation) blindati e isolati in gas (esafluoruro di zolfo) per il trasporto di energia elettrica. La necessità di rivelare tempestivamente anomalie sulle parti isolanti dei componenti elettrici acquisisce notevole rilevanza soprattutto in questi ultimi anni in cui, a causa della sempre più pressante e articolata domanda di energia elettrica, si richiede spesso di estendere, ove possibile, l'esercizio di componenti elettrici anche se in avanzato stato di invecchiamento.

Questo stimola anche a livello internazionale un parallelo sviluppo di sensori affidabili e a basso costo, potenzialmente in grado di monitorare lo stato dei componenti anche durante l'esercizio senza interferire con la loro operatività. Uno dei motivi d'interruzione più comuni nella rete di distribuzione è legato alla presenza di fenomeni di prescarica in aria negli scomparti di manovra delle cabine di distribuzione, che permanendo a lungo possono provocare carbonizzazioni e perdita di isolamento fino alla scarica distruttiva. Le prescariche in aria sono debolmente visibili e hanno il massimo di emissione nell'UV; oltre a questo, producono emissioni acustiche e ozono.

RSE, partendo dalla consolidata esperienza sulla progettazione e nell'applicazione in ambito industriale di sensori a fibra ottica e di sistemi ottici per la misura di parametri fisici e chimici, realizza un nuovo sistema multisensore per rivelare precocemente gli effetti (ottici, acustici e ozono) associati alla prescarica, basato su dispositivi che presentano caratteristiche di immunità a emissione elettromagnetiche, isolamento e inerzia chimica di notevole interesse per applicazioni di "sorveglianza" di componenti del sistema elettrico.

9 Tecnologie per l'efficienza energetica

Negli ultimi anni il tema dell'efficienza energetica è diventato centrale nella strategia europea per una crescita sostenibile e rispettosa dell'ambiente. Le possibili aree di intervento riguardano i singoli processi di utilizzo dell'energia, la razionalizzazione dei consumi energetici negli edifici, nonché ottimizzazioni dedicate ad aggregati di utenze, aree pubbliche e reti nel loro insieme. Si osserva, inoltre, un rinnovato interesse verso l'applicazione del vettore elettrico al settore dei trasporti su strada.

9.1 L'EFFICIENZA NEI PROCESSI PRODUTTIVI

Le tecnologie elettriche utilizzabili nei processi produttivi sono note da tempo per la loro produttività, flessibilità e assenza di emissioni nel luogo di impiego. Anche negli usi termici esse spesso possono assicurare prestazioni energetiche superiori all'uso diretto dei combustibili fossili. Tali tecnologie, che ancora oggi trovano in Italia una diffusione minore rispetto agli altri Paesi industrializzati, dispongono di un potenziale di crescita considerevole, con benefici importanti anche per il Sistema Paese, che potranno manifestarsi quando saranno rimosse alcune barriere di tipo tariffario, culturale e di offerta qualificata degli apparati.

Prototipo di forno elettrico fusorio realizzato per le industrie del vetro.

Anche lo studio di queste tecnologie inizia nei Centri di ricerca ENEL mediante l'esplorazione sistematica dei processi industriali che più si avvalgono delle caratteristiche peculiari delle elettrotecnologie. I vantaggi maggiori si evidenziano per i trattamenti termici ed elettrochimici, per i quali il pregio principale consiste in rendimenti di conversione finale elevatissimi, dovuti alla selettività del trattamento, che molto spesso più che compensano le perdite termodinamiche nella produzione di energia elettrica.

Il quadro che ne risulta è estremamente vasto e differenziato, sia per quanto riguarda le tecnologie disponibili sia per la tipologia dei prodotti ottenibili grazie al loro impiego, e offre uno spaccato realistico di come l'industria italiana potrebbe avvantaggiarsi da un uso selezionato delle principali applicazioni.

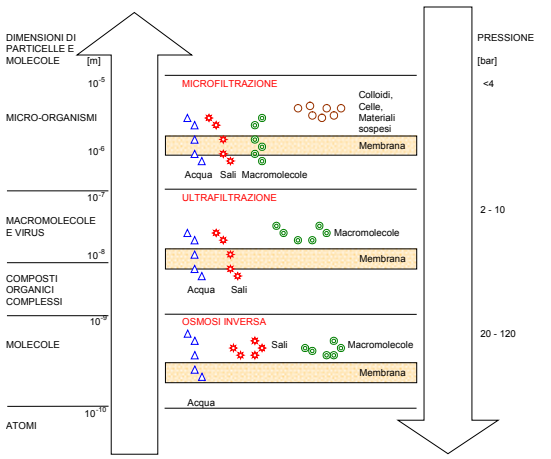
A partire da questa disanima inizia pertanto una fase di applicazioni sperimentali, con il duplice scopo di dimostrare praticamente i benefici ottenibili e di individuare ulteriori spunti di miglioramento tecnologico. L'attenzione si concentra sulle tecnologie che, con riferimento alla realtà produttiva dell'industria italiana, presentano il maggior potenziale in termini di tutela ambientale, risparmio energetico primario e miglioramento della produttività e qualità dei prodotti ottenibili.

Il primo progetto sperimentale riguarda lo sviluppo di un forno elettrico fusorio, a funzionamento discontinuo, espressamente concepito per l'industria del vetro artistico. Il principio applicato è quello del Riscaldamento Ohmico, che consiste nel far passare una corrente elettrica attraverso la miscela vetrificabile, la quale una volta preriscaldata presenta una conducibilità elettrica adeguata. Per effetto Joule l'energia elettrica si trasforma in calore, riscaldando fino a fusione in modo omogeneo e rapido l'intera massa.

Il forno, di cui vengono costruiti due prototipi dando origine ad un brevetto internazionale, è il risultato di un accordo di collaborazione fra ENEL, CESI, Stazione Sperimentale del Vetro e Associazione Industriali del Vetro di Venezia. Nelle dimensioni e nelle funzioni esso risponde alle esigenze di una vetreria artistica tradizionale ma, rispetto ad un forno a gas, consente una maggiore flessibilità operativa, il miglioramento della qualità del vetro, nonché soprattutto una drastica riduzione dei problemi di impatto ambientale.

In seguito vengono considerati i processi di concentrazione mediante evaporazione, tipici dell'industria alimentare e di quella dei trattamenti ambientali. La tecnica applicata è quella della Compressione Meccanica del Vapore (CMV), che si rivela molto efficace per il recupero di energia dal vapore prodotto in processi di concentrazione e distillazione di soluzioni liquide.

Essa consiste nell'aumentare, mediante compressione, la temperatura di saturazione del vapore, che può essere reimpiegato come fluido riscaldante nel processo dal quale proviene, dove viene fatto condensare. Oltre all'evidente beneficio energetico, che porta più che a dimezzare i consumi di energia primaria rispetto alle migliori tecnologie concorrenti, altri vantaggi della CMV sono: riduzione dei costi, possibilità di potenziare gli impianti di evaporazione senza adeguare i generatori di vapore, impianti compatti e facilmente inseribili negli edifici industriali, flessibilità operativa. La collaborazione con la Stazione Sperimentale per le Conserve Alimentari di Parma conduce alla costruzione di un evaporatore con caratteristiche di trasportabilità, ma in tutto simile ad un impianto industriale, che verrà utilizzato con risultati lusinghieri presso i poli produttivi di Parma e di Angri (SA).



Campi di azione e pressioni richieste per i sistemi filtranti.

In seguito si realizza anche un secondo evaporatore, previsto per la concentrazione dei percolati di discarica prima del loro smaltimento controllato, che utilizzato a valle di un pre-trattamento a membrana risulta in grado di concentrare la soluzione fino al 35 per cento in peso con un consumo di energia contenuto.

Anche le tecnologie a membrana rappresentano un oggetto di studio presso i laboratori di ricerca. Si tratta di metodi di filtrazione che consentono la separazione di molecole o di specie ioniche in soluzione. Esse trovano applicazione in diverse tipologie d'industria, in quanto consentono la chiarificazione dei liquidi alimentari, la purificazione e il riciclo di acque reflue e, in alcuni casi, la separazione di prodotti pregiati dai reflui e il loro riutilizzo. Secondo il principio fisico che determina la separazione si distinguono:

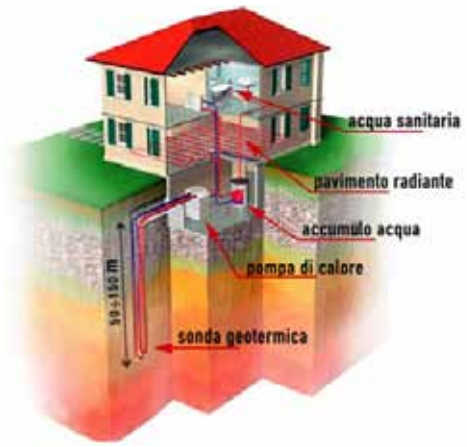
- i processi a elettro-membrana, in cui la separazione avviene attraverso lo scambio ionico, sotto l'influenza di un campo elettrico. Si possono avere membrane per elettrodialisi, oppure per elettrolisi, disposte tra una coppia di elettrodi all'interno di una cella elettrolitica;
- i processi in cui la separazione avviene mediante una differenza di pressione fra le due superfici delle membrane, che in base alle dimensioni crescenti delle particelle separate (e pressione di lavoro decrescente), possono essere così classificate: Osmosi Inversa, Ultrafiltrazione, Microfiltrazione.

I numerosi test eseguiti dai ricercatori, in campo e in laboratorio, dimostrano fra l'altro la fattibilità di processi innovativi sia per il trattamento di acque reflue, sia per le necessità dell'industria zuccheriera e delle conserve vegetali, impiegando membrane di osmosi inversa e stadi di microfiltrazione seguiti da elettrodialisi con membrane bipolari. In generale i processi a membrana, una volta verificatane l'applicabilità, risultano più convenienti di tecnologie concorrenti quali lo scambio ionico e l'evaporazione, rispetto alle quali presentano diversi vantaggi: affidabilità e compattezza dell'impianto, semplicità d'uso, salvaguardia delle proprietà organolettiche dei prodotti termosensibili (per la possibilità di operare a temperatura ambiente), minore consumo energetico.

9.2 LA SFIDA DELLA CLIMATIZZAZIONE DEGLI EDIFICI

Un settore particolarmente promettente sotto il profilo delle prestazioni energetiche è rappresentato dagli edifici dove il potenziale di risparmio è, secondo la Commissione Europea, pari a ben il 24 per cento dei consumi. Di questi, una parte significativa e in continua crescita, è costituita dai consumi per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti.

Tra le tecnologie che possono contribuire in maniera sostanziale a ottenere tali risparmi figura la pompa di calore, che è una macchina utilizzabile per la climatizzazione degli ambienti ed è in grado di trasferire il calore da una sorgente a bassa temperatura ad un pozzo a temperatura maggiore, utilizzando una limitata quantità di energia. La pompa di calore associa a prestazioni energetiche eccellenti anche l'utilizzo di energia da fonte rinnovabile, come riconosciuto dalla Direttiva Europea 2009/28/CE. Essa rappresenta pertanto una soluzione efficiente per la climatizzazione a ciclo annuale e costituisce una valida alternativa, anche economica, ai sistemi tradizionali basati su caldaie a gas e condizionatori elettrici.



Schema di principio di un impianto basato su pompa di calore con sonda geotermica.

Il ricorso alla pompa di calore per la climatizzazione estiva/invernale e la produzione di acqua calda sanitaria viene studiato nei centri di ricerca ENEL a partire dagli Anni '80, con lo scopo primario di selezionare le condizioni di impiego più convenienti, per i costi e i rendimenti di quegli anni. L'interesse iniziale, quasi completamente focalizzato sulle macchine aerotermiche, col tempo si è esteso fino a considerare anche apparecchi in grado di sfruttare l'energia termica delle acque superficiali e quella del sottosuolo, per il riscaldamento e il condizionamento di numerose tipologie di edifici situati in località diverse.

Grazie al lavoro di ricerca svolto, oggi RSE dispone di un Centro di Competenza sulle pompe di calore, che unifica le conoscenze acquisite nel corso degli anni e ha lo scopo di promuovere l'uso efficiente delle pompe di calore mediante l'elaborazione e la diffusione di informazioni sulle prestazioni reali degli impianti, e sui criteri per il loro dimensionamento, scelta ed esercizio. La presenza frequente di RSE ai tavoli di lavoro governativi e regolatori, nonché gli interventi ad incontri e convegni pubblici inerenti più in generale l'efficienza energetica degli edifici, ne testimonia inoltre il ruolo di attore svolto a livello nazionale

e internazionale. Il quadro delle competenze disponibili e delle attività caratteristiche del Centro può essere riassunto in quattro aree.

- *Monitoraggi energetici in campo*: si tratta di diagnosi energetiche strumentali, con le quali sono raccolte ed elaborate informazioni sull'esercizio reale (efficienza stagionale, energia erogata, energia assorbita, problemi di funzionamento) di impianti che rappresentano uno spaccato delle soluzioni di maggiore interesse per la realtà climatica italiana: pompe di calore ad aria, ad acqua di falda, geotermiche, con azionamento sia elettrico sia termico.
- *Modellazione edificio-impianto*: consente di simulare il funzionamento di una pompa di calore in modalità dinamica, integrata con il fabbisogno energetico dell'edificio al quale è dedicata; è uno strumento che risulta utilizzabile per la stima delle prestazioni stagionali di impianti situati in qualunque località per la quale si disponga dei dati climatici orari.
- *Modello di scambio energetico fra pompa di calore geotermica e terreno*: permette la verifica, fra l'altro, della persistenza nel tempo della risorsa geotermica e quindi l'idoneità di un campo di sonde a fornire l'energia termica richiesta anche dopo anni di funzionamento.
- *Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore*: si indirizzano agli operatori interessati all'analisi del degrado a lungo termine del potenziale termico del terreno. Consentono un primo dimensionamento del complesso di scambiatori, verticali o orizzontali, deputati al trasferimento di calore tra terreno e fluido termovettore della pompa di calore. È anche disponibile un metodo standardizzato che valuta le dimensioni di massima di un campo di scambiatori verticali, associati ad edifici residenziali di varia tipologia, zona climatica e vetustà.

9.3 LA DOMOTICA E L'USO RAZIONALE DELL'ENERGIA NELLE UTENZE

La diffusione dell'automazione nel sistema elettrico avvenuta negli ultimi decenni sta consentendo, come visto in precedenza, un profondo cambiamento nella rete elettrica, che si trasforma gradatamente in un insieme di *nodi intelligenti*. La diffusione della tecnologia negli ambienti domestici, d'altra parte, sta aumentando il numero delle funzioni svolte dai singoli dispositivi (illuminazione, lavaggio, eccetera) nonché la possibilità di avere applicazioni *avanzate* e tra loro integrate, ossia la domotica.

RSE è attiva da tempo sul tema della gestione della domanda, ossia le modalità con cui i clienti possono partecipare all'esercizio del sistema elettrico, tramite la disponibilità a modulare il profilo di prelievo in risposta a segnali di prezzo (tariffe) o segnali di rete (emergenza), diventando un *nodo intelligente* della smart grid. Un gruppo relativamente ristretto di clienti rispondenti può per esempio consentire la riduzione del picco di domanda in situazioni di sovraccarico, evitando di conseguenza gli alleggerimenti a rotazione e permettendo di salvaguardare le utenze critiche.

In quest'ottica si colloca l'attività di RSE, che sviluppa e verifica in campo sistemi per la gestione razionale dell'energia a livello di singola utenza, nonché modalità di interazione tra reti energetiche e clienti finali, mediante l'impiego di dispositivi di gestione del carico/accumulo/micro-(co)generazione locale in diverse configurazioni.

Le usuali funzioni offerte dagli impianti domotici in RSE sono superate a favore di un approccio più ampio e dinamico, che realizza una gestione ottimizzata e integrata dell'energia, comprendente quindi non unicamente i carichi elettrici ma anche la gestione termica e degli eventuali generatori locali.

Dal punto di vista pratico, lo scopo della gestione dei carichi del Gestore Energia Domestica (GED) è mantenere il flusso di potenza elettrica prelevata dalla rete inferiore a un determinato livello, variabile nel tempo, agendo su dispositivi quali elettrodomestici e illuminazione. Il sistema calcola questa soglia di potenza, denominata nella piattaforma GED *potenza target*, che al suo massimo coincide con la potenza contrattuale, in base alle preferenze impostate e al prezzo dell'energia, e va ad agire sui soli dispositivi che sono stati inseriti nella gestione dei carichi (tipicamente, lavastoviglie, lavatrice e boiler).

Per quanto riguarda la gestione dei carichi termici, abbiamo visto che la climatizzazione degli edifici, anche residenziali, sarà sempre più basata sulla combinazione *caldaia-condizionatore*, senza trascurare la diffusione crescente di condizionatori reversibili, a pompa di calore, in grado di erogare anche il servizio di riscaldamento durante la stagione invernale. La disponibilità di diverse fonti energetiche si presta pertanto all'implementazione di logiche gestionali che sfruttino i differenziali di prezzo fra gas e elettricità, tenuto conto dei rendimenti dei generatori di calore. RSE prosegue nello sviluppo e verifica nel proprio laboratorio (*casetta domotica*) delle strategie di riscaldamento *bi-combustibile* (gas-energia elettrica), quantificando il risparmio economico che è possibile conseguire a parità di richiesta termica.

La diffusione della generazione locale aumenta le possibilità di gestione energetica: nella piattaforma GED è implementata una funzione

di *dispacciamento locale* che mira a realizzare un funzionamento coordinato tra carichi e generatori presenti nell'utenza, affinché sia raggiunto il desiderato equilibrio tra l'immissione e il prelievo netto di energia elettrica dalla rete, in direzione dello scenario *edificio a energia zero*.

Visti i numerosi temi coinvolti, RSE contribuisce all'attività normativa del settore e partecipa a diversi progetti di ricerca europei sull'argomento (INTrEPID, eccetera) che vedono la presenza di utility, operatori di telecomunicazioni, produttori di elettrodomestici.

9.4 IL SETTORE PUBBLICO: L'ILLUMINAZIONE

L'illuminazione pubblica è parte integrante nella gestione amministrativa di ogni Comune: da un lato è al servizio della comunità e delle aziende locali, dall'altro promuove lo sviluppo economico, migliora la sicurezza della viabilità e la sicurezza psicologica dei cittadini, perfeziona il comfort abitativo e ambientale.

La riduzione dei consumi di energia negli usi finali e la promozione dell'efficienza energetica nel settore dell'illuminazione pubblica sono diventati in questi ultimi anni obiettivi di rilevanza strategica della nostra ricerca nazionale, proprio per l'importanza che ricopre la spesa dell'energia elettrica nel bilancio di ogni Comune. Con gli sviluppi del settore illuminotecnico e l'applicazione di nuove tecnologie d'illuminazione a basso consumo s'identifica nell'illuminazione pubblica un settore dotato di un alto potenziale di risparmio energetico.

L'azione di ricerca di sistema di RSE è orientata a promuovere l'efficienza nell'illuminazione stradale e nelle aree pubbliche attraverso il supporto scientifico alle politiche energetiche per la realizzazione d'interventi di riqualificazione energetica e di nuovi impianti energeticamente efficienti.

In quest'ambito RSE contribuisce con Linee Guida operative per la realizzazione di impianti di pubblica illuminazione, destinate a chi si trova ad operare su sistemi più o meno complessi di illuminazione di spazi pubblici. La Guida intende supportare gli amministratori a meglio interpretare la funzione dell'illuminazione stradale, capirne i problemi

gestionali e massimizzare i benefici che derivano dalla progettazione oculata di tali impianti.

Con analoghi obiettivi RSE ha collaborato in CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) alla redazione e diffusione di una seconda Guida indirizzata all'efficienza energetica di impianti di illuminazione.

9.5 LA COGENERAZIONE E I DISTRETTI ENERGETICI

Accanto alle attività di ricerca, sviluppo e dimostrazione sulle tecnologie elettriche ad alta efficienza per gli usi finali, si sviluppano dalla fine degli Anni '70, in particolare al CISE, una serie di studi sulla cogenerazione di elettricità e calore, seguendo la strada, pionieristica per l'Italia, indicata dall'Azienda Municipalizzata di Brescia.

Le attività di ricerca culminano nella progettazione concettuale e nel dimensionamento di massima dell'impianto RETE, acronimo di Reggio Emilia Total Energy, sviluppato a cavallo tra la fine degli Anni '70 e l'inizio del decennio successivo, in collaborazione con l'AGAC (Azienda Gas Acqua Consorziale) di Reggio Emilia e l'AERIMPIANTI.

RETE rappresentava il primo esempio di impianto di tri-generazione, in grado di fornire all'utenza energia elettrica, calore e freddo. Due motori a gas assicuravano la produzione di energia elettrica e di calore, recuperato da appositi scambiatori; l'impianto era dotato di due caldaie di integrazione, per sopperire alle punte di richiesta termica, e da due gruppi frigoriferi ad assorbimento, in grado di utilizzare – in estate – il calore recuperato dai motori per generare freddo per le utenze commerciali.

Il sistema consentiva di ottenere un'efficienza energetica complessiva di circa l'80 per cento e un risparmio di energia primaria, rispetto alle soluzioni "convenzionali" di quasi il 30 per cento su base annua. L'impianto, oggi chiamato RETE1, in quanto altre installazioni si sono affiancate nel tempo, è tutt'ora parte integrante del sistema di generazione di energia della città di Reggio Emilia.

La confluenza in CESI nel 2000 vede una integrazione con le attività e le competenze sull'efficienza energetica e le elettro-tecnologie; con la creazione di RSE l'attività riceve un impulso sia sul lato degli studi, focalizzando l'attenzione sui distretti industriali, sia su quello sperimentale, con l'acquisizione e il test di motori e sistemi avanzati.

Presso la test facility di Generazione Distribuita vengono infatti installati e caratterizzati sistemi di cogenerazione di vario tipo, basati su microturbine, motori a combustione interna e microcogeneratori

Stirling. È attualmente in corso un progetto di ricerca, con la partecipazione di varie aziende italiane e di centri di ricerca fra cui RSE, per lo sviluppo di un sistema di microcogenerazione domestica basato su fuel cell ad alta temperatura a ossidi solidi (SOFC).

L'ottimizzazione dei consumi energetici può essere condotta a scala ancora maggiore, a livello di distretto energetico: tali realtà del settore residenziale e terziario costituiscono spesso situazioni di grande complessità per l'irregolarità dei profili delle diverse domande di servizio termico e per la presenza contemporanea di varie tipologie di generatori, cogeneratori e trigeneratori e di serbatoi di accumulo.

Il software GDPint, sviluppato da RSE, attraverso la programmazione oraria dei generatori termici e dei componenti presenti sulla rete (compresi i generatori distribuiti) è in grado di ottimizzare un anno di esercizio, con dettaglio orario, e di stilarne il bilancio energetico ed economico, fino a fornire la valutazione economica dell'investimento espressa in base ai più comuni indicatori di convenienza (PBT, TIR e VAN). L'applicazione si rivolge ad un'ampia varietà di possibili utenti (progettisti, gestori d'impianti di riscaldamento o cogenerazione, ESCo) per la valutazione o il supporto alla presentazione di una proposta di intervento, e più in generale a chiunque voglia verificare la remuneratività di un progetto di efficienza energetica. In questo ambito RSE svolge attività di supporto agli Enti locali, allo scopo di favorire la nascita di distretti energetici ad elevata efficienza e di verificarne le prestazioni su durate pluriennali.

9.6 LE NUOVE APPLICAZIONI: I VEICOLI ELETTRICI

L'evoluzione verso un sistema energetico sempre più sostenibile contempla anche una rivisitazione dei mezzi di mobilità, che devono continuare a rispondere alle esigenze degli utenti, ma anche diminuire l'impatto ambientale, in termini sia di riduzione dell'inquinamento locale sia delle emissioni globali. Queste esigenze possono oggi essere soddisfatte da un'adeguata integrazione di mobilità pubblica e privata, basata in parte su trazione elettrica (metropolitane, tram, autobus, sperimentazioni di car sharing elettrico) e in parte su trazione a combustione interna, diventata via via più *pulita*. Nel medio termine (dal 2020 in poi), una maggiore sostenibilità energetica e ambientale può essere raggiunta solo attraverso una progressiva riduzione della trazione a combustione interna a favore di quella elettrica.

Già a partire dagli Anni '70 la ricerca europea e italiana destina notevoli risorse allo sviluppo dei veicoli elettrici. Un ruolo molto importante

è assunto da ENEL e dai suoi centri di ricerca (e in particolare dal CESI) che, con la collaborazione del Centro Ricerche FIAT (CRF), costituisce al suo interno un parco di alcune decine di veicoli, la cui sperimentazione conduce all'individuazione degli aspetti tecnologici con necessità di approfondimenti e miglioramenti. Nello stesso periodo è allestito presso CESI il laboratorio di prova delle batterie, attualmente gestito da RSE, dove si sperimentano procedure di prova, strumenti per la gestione e la diagnostica, prove di vita su batterie per uso veicolare e stazionario (inizialmente batterie al piombo e zinco-aria, attualmente batterie litio-ioni, sodio/cloruro di nichel e supercondensatori). In passato le automobili elettriche non sono riuscite ad avere una diffusione significativa, nonostante l'interesse internazionale, perché non hanno retto la concorrenza dei veicoli convenzionali a combustione interna, non essendo ancora sufficienti le loro prestazioni in termini di autonomia, vita attesa e costi. L'interesse dell'industria verso i veicoli elettrici è ripreso dal 2007-2008. In questi anni i target fissati dalla Commissione Europea per le emissioni di CO_2 da veicoli si sono dimostrati fondamentali per motivare il settore automobilistico; nello stesso tempo le problematiche di inquinamento dell'aria, in costante peggioramento nei centri urbani, hanno indotto diverse Amministrazioni a introdurre restrizioni e ticket di accesso per i veicoli più inquinanti e contemporaneamente hanno favorito la diffusione di veicoli più efficienti ed "ecologici", erogando incentivi per il loro acquisto.

Auto elettrica in ricarica nella test facility di RSE.

Nello stesso periodo si sono infine diffuse batterie con prestazioni adatte alla trazione veicolare, come le batterie litio-ioni.

In questo contesto in evoluzione si sente la necessità di disporre di competenze multidisciplinari utilizzabili dai diversi attori della filiera (autorità pubbliche e regolatorie, operatori di rete, costruttori automobilistici e dell'indotto, utenti di mobilità) in ogni fase dello sviluppo: dalla presa di decisioni agli sviluppi tecnologici e alla verifica prestazionale. Per questo RSE si è inserita con un progetto di ricerca finalizzato alla valutazione dei diversi impatti conseguenti alla diffusione dei veicoli

elettrici nel panorama italiano. Nel progetto, dopo l'iniziale definizione di scenari di mobilità al 2030, la valutazione degli impatti ha riguardato i molteplici campi coinvolti dallo sviluppo della mobilità elettrica: le emissioni e la qualità dell'aria, il sistema di generazione elettrica, la rete di trasmissione e distribuzione, lo sviluppo della normativa nazionale e internazionale, l'analisi del ciclo di vita delle auto elettriche rispetto a quelle a combustione interna e la loro accettabilità sociale.

Alla fine del primo triennio di attività si è così creato in RSE un Centro di Competenza sulla mobilità elettrica, che raduna esperti delle diverse discipline capaci di raccordarsi per offrire un prodotto omogeneo e di valore.

Dimostrazione della stazione di ricarica per le auto elettriche presso RSE.

Gli studi effettuati hanno permesso di verificare che la trazione elettrica è in grado di coniugare la riduzione delle emissioni con lo sfruttamento delle energie rinnovabili, in particolare dove è più alta la concentrazione abitativa. Inoltre, anche nel caso in cui l'energia da fonte rinnovabile non fosse disponibile per soddisfare completamente il fabbisogno della mobilità e si dovesse ricorrere a quote di energia elettrica prodotta in centrali alimentate da combustibili fossili, la maggiore efficienza di conversione associata alla trazione elettrica garantirebbe minori emissioni per chilometro percorso, oltre ad evitare l'emissione di prodotti di combustione dannosi (particolato fine e ossidi d'azoto) nelle aree di utilizzo. Anche nell'ipotesi di introduzione in Italia di circa il 25 per cento di veicoli ricaricabili da rete (elettrici puri o ibridi) l'incremento di energia richiesta su base annua risulterebbe inferiore al 5 per cento al 2030, quindi con un limitato impatto sul sistema di generazione di energia elettrica (che non dovrebbe nemmeno essere rinforzato rispetto alla sua evoluzione standard), mentre l'integrazione delle infrastrutture di ricarica con i sistemi di gestione intelligente della rete potrebbe consentire di ottimizzare le potenze messe a disposizione per la ricarica dei veicoli elettrici.

Per la diffusione delle auto elettriche è necessaria la predisposizione di una rete di punti di ricarica capillare per servire i clienti nei luoghi in cui essi ne hanno bisogno: parcheggi pubblici, garage condominiali e box di proprietà. I primi utenti saranno quelli con la possibilità di ricaricare le auto a casa propria, attraverso dispositivi domestici chiamati *Wall box*, opportunamente telegestiti in modo da evitare la

contemporaneità di ricarica al ritorno a casa e da ottimizzare l'esercizio e la pianificazione della rete elettrica. I punti di ricarica in ambito pubblico, già disponibili e visibili in molte città e anche presso la sede di RSE in Via Rubattino 54 a Milano, mettono a disposizione potenze di ricarica dell'ordine di qualche decina di kW, adeguata alla ricarica rapida dei veicoli elettrici.

Già si stanno studiando le ricariche ultra rapide (con potenze superiore a 50 kW) da rendere disponibili dove gli utenti sono già abituati a rifornire le loro auto, ovvero presso distributori *ibridi* di combustibili fossili tradizionali e di elettricità. Si è dimostrato che tali distributori possono essere, in generale, facilmente alimentati dalle reti di media tensione esistente e che comunque si potrebbe ricorrere a sistemi di accumulo di energia elettrica opportunamente dimensionati e utilizzati per livellare i picchi di carico, permettendo agli impianti di ricarica di connettersi anche alle reti elettriche in bassa tensione.

È allo studio la possibilità di utilizzare le batterie che alimentano i veicoli, quando sono collegate alle colonnine di ricarica, anche come accumulo distribuito, che possa svolgere servizi ancillari di rete (chiamati V2G: Vehicle to Grid), quali la regolazione della tensione e della frequenza o la compensazione dell'errore di previsione di fonti di energia rinnovabili non programmabili. A questo scopo sono in corso prove di vita delle batterie, con l'obiettivo di verificare che questa modalità di lavoro non ne determini un invecchiamento precoce. Inoltre la test facility di generazione distribuita di RSE è predisposta per condurre sperimentazioni adatte a determinare i migliori algoritmi di controllo per effettuare in contemporanea l'ottimizzazione della ricarica dei veicoli elettrici e la fornitura di servizi V2G.

10 Compatibilità ambientale degli impianti

10.1 RADIOECOLOGIA E STUDI AMBIENTALI PER IL COMPARTO DELLE ACQUE

Tra la fine degli Anni '70 e l'inizio degli Anni '80, su incarico di ENEL, il CISE esegue misure di radioattività ambientale, finalizzate alla definizione dei livelli di fondo naturale in siti identificati dal Piano Energetico Nazionale come potenzialmente idonei ad ospitare nuovi impianti nucleari (Progetto RANUSI – RAdioattività NUovi Siti).

Parallelamente ENEL e CISE lanciano due grandi Progetti di Radioecologia aventi come obiettivo lo studio dei cicli biogeochimici di radionuclidi generati negli impianti nucleari. Il Progetto REM (RadioEcologia Marina) è interamente basato sullo studio degli omologhi stabili dei radionuclidi d'interesse ed è legato alle attività di costruzione della centrale elettronucleare di Montalto di Castro. Le competenze radiometriche presenti in ENEL e CISE trovano comunque applicazione nello studio di processi ambientali come la determinazione della velocità di sedimentazione (^{210}Pb), del tempo di residenza dei metalli pesanti nelle acque marine (^{234}Th) e della diffusione di specie chimiche dai sedimenti (^{222}Rn).

Cantiere di costruzione di un impianto di generazione.

In ambito fluviale (fiume Po) il Progetto REP (RadioEcologia Padana) ha sostanzialmente gli stessi scopi, oltre a quelli legati ad un monitoraggio, principalmente effettuato nelle stazioni di Isola Serafini (PC) e Castel San Giovanni (PC), del rilascio controllato (a bassissimi livelli di attività) di radionuclidi provenienti dalle Centrali di Trino Vercellese e di Caorso.

Di notevole importanza è l'attività di costruzione delle curve livello-portata di vari corsi d'acqua, soprattutto il fiume Po e Garigliano, che ha costituito l'ossatura dell'attuale rete di rilevamento gestita dalle Autorità di Bacino competenti.

L'attività sperimentale si traduce nella messa a punto di sistemi innovativi di campionamento e analisi di matrici ambientali (acqua, particolato sospeso, sedimenti, acque interstiziali, matrici biologiche) a quel tempo uniche a livello nazionale e all'avanguardia a livello internazionale. Molte di queste metodologie sono poi state tradotte in linee guida e norme tecniche nazionali, alcune delle quali tuttora in uso.

A livello strumentale, particolare enfasi viene data allo sviluppo di sistemi di monitoraggio dello scambio di specie chimiche all'interfaccia acqua-sedimenti (carotatori e spremitori di sedimenti, camere bentiche), che posizionano ENEL e CISE ai massimi vertici internazionali di settore, con citazioni in numerose pubblicazioni e rassegne pubblicate su riviste di prestigio.

Le conoscenze acquisite in tale settore sono risultate, ancora oggi, di grande attualità nella realizzazione, in collaborazione con il CNR-ISMAR di Ancona, di un lander bentico autonomo (AMERIGO) dedito al monitoraggio degli scambi di CO_2 all'interfaccia acqua-sedimento di siti potenzialmente idonei per lo stoccaggio geologico della CO_2.

Il natante Pandora utilizzato dal CISE per campagne di misura sul Po.

Sul fronte dell'informatizzazione e della modellazione matematica, un grande sforzo è dedicato allo sviluppo di modelli di dispersione e riaccumulo di radionuclidi in ambiente fluviale (modello DRAF-Dispersione di radionuclidi in Ambiente Fluviale) e marino (modello DRAM-Dispersione di radionuclidi in Ambiente Marino), e alla creazione di Banche Dati (DataPo e Datamare) per ordinare i dati sperimentali raccolti nel corso di anni di studi (dati chimici, fisici, oceanografici, meteorologici, correntometrici, mareografici, eccetera).

I modelli matematici sviluppati, che lavorano su algoritmi di tipo deterministico e stocastico, racchiudono moduli "chimici" e "fisici" di dispersione e riaccumulo, ma anche moduli "fluidodinamici", per simulare il movimento delle acque e il conseguente trasporto di radionuclidi.

Le conoscenze acquisite costituiscono ancora oggi un patrimonio di informazioni e di strumenti applicativi che trovano applicazione nei settori più svariati quali la dispersione termica degli scarichi delle centrali di produzione di energia elettrica, la migrazione di inquinanti in siti contaminati e la simulazione degli effetti dell'iniezione di CO_2 nel sottosuolo.

L'incidente di Chernobyl (1986) e l'esito del referendum sul nucleare sono lo spartiacque delle attività di radiometria e radioecologia di ENEL e CISE. Le competenze in ambito radiologico, radiometrico e radioecologico, e la disponibilità di strumentazione avanzata per la misura della contaminazione radioattiva trovano impiego nell'emergenza susseguente alle ricadute radioattive sul territorio nazionale e alla necessità di misurare la contaminazione di terreni, acque e derrate alimentari, al fine di calcolare la dose di esposizione della popolazione. Negli anni successivi, le attività si spostano progressivamente sul *decommissioning* delle centrali nucleari (Progetto GAR-GARigliano) e sui suoi effetti ambientali.

Conclusa l'era del nucleare, la sensibilità dell'opinione pubblica si spo-

Il natante Pandora durante il passaggio in conca ad Isola Serafini.

sta verso l'impatto sull'ambiente delle attività industriali, compresa la generazione di energia elettrica mediante combustibili convenzionali (olio combustibile e carbone).

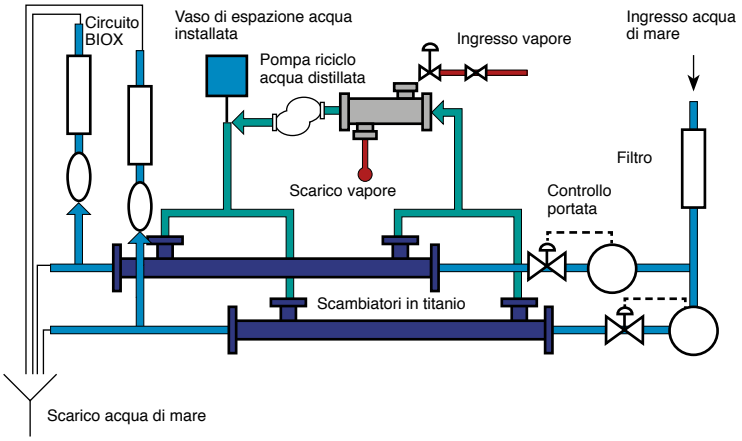
Ormai da diversi anni vengono emesse numerose Direttive europee e leggi nazionali sulla qualità delle acque (Legge Merli, 1976), sui rifiuti (1982) e sui siti industriali pericolosi (Direttiva Seveso, 1982). ENEL e CISE sono impegnati nella valutazione dell'impatto ambientale degli impianti di produzione di energia elettrica (idroelettrico, geotermico, termoelettrico), e nella gestione e applicazione della legislazione di settore, attività che rappresenta ancora oggi argomento di studio di RSE, soprattutto indirizzato al contributo alla normazione di metodi e strumenti di monitoraggio delle acque, di caratterizzazione dei residui e dei rifiuti, e delle problematiche legate alla gestione degli invasi artificiali, soprattutto riguardo la definizione e la quantificazione del "Deflusso Minimo Vitale" per le specie ittiche indigene.

Tra le problematiche più importanti affrontate in questo periodo vi è l'attività di caratterizzazione delle ceneri di carbone ai fini di un loro riutilizzo, che ha portato a un forte contributo nazionale nella redazione delle norme tecniche europee di settore (CEN). Le conoscenze acquisite in tale ambito sono ancora oggi utilizzate per lo studio dell'utilizzo di residui e rifiuti nella produzione di energia elettrica rinnovabile da biomasse e sulla classificazione e produzione di Combustibili Solidi Secondari (CSS).

Spremitore di sedimenti (squeezer).

La necessità di ingenti quantitativi d'acqua per raffreddare il vapore del ciclo termico spinge a collocare gli impianti di potenza termoelettrici nei pressi di una risorsa idrica adeguata. In Paesi come l'Italia, con estese aree costiere e un solo fiume di grandi dimensioni, la scelta del sito marino risulta privilegiata. Nei circuiti di raffreddamento, soprattutto quelli alimentati con acqua di mare, si ritrovano le condizioni ideali per la crescita degli organismi biologici litoranei quali mitili, denti di cane, alghe e altri organismi incrostanti (*biofouling*) i cui effetti deleteri, come l'occlusione dei tubi del condensatore, la corrosione e il degrado precoce delle strutture, risultano incompatibili con l'esercizio degli impianti. Per ovviare all'impatto degli organismi biologici, gli impianti devono attuare strategie *antifouling*, la più comune ed efficiente delle quali è la clorazione.

Schema di un impianto pilota realizzato per lo studio di un sistema antifouling innovativo.



Nel corso del secolo scorso, la scoperta di problematiche legate alla potenziale formazione di sottoprodotti della clorazione nell'acqua potabile, ha richiamato l'attenzione dell'opinione pubblica e degli organismi normativi. Con l'entrata in vigore della legge Merli (1976), la concentrazione di cloro ammessa agli scarichi degli impianti è stata perciò fortemente ristretta e regolamentata.

Le problematiche ambientali connesse ai trattamenti *antifouling* hanno guidato molte ricerche ENEL già negli anni Ottanta. L'attenzione è stata volta soprattutto a studiare le alternative innovative alla clorazione e a validare l'effettiva compatibilità ambientale e l'efficacia dei nuovi prodotti proposti dal mercato. Negli anni Novanta tali studi hanno portato al brevetto di un sistema di monitoraggio dei trattamenti basato su una sonda elettrochimica sensibile alla crescita di *biofilm* e ai trattamenti ossidanti dell'acqua, denominato BIOX. Tramite l'esperienza maturata in ENEL, i ricercatori di RSE hanno svolto un ruolo decisivo nel supportare gli impianti siti sulla Laguna di Venezia, con l'accordo delle autorità competenti, nel delicato compito di sostituire i trattamenti di clorazione con alternative valide e accettabili sotto il profilo dell'impatto ambientale. Grazie all'esperienza

Circuito sperimentale per lo studio dei trattamenti antifouling realizzato presso un impianto termoelettrico.

in Laguna e alla partecipazione in autorevoli gruppi di lavoro e progetti europei, il know-how di RSE sulle problematiche dei circuiti di raffreddamento è riconosciuto in ambito internazionale e la validazione impiantistica e ambientale dei trattamenti è stata estesa a molti altri impianti siti sul territorio nazionale e all'estero.

10.2 STUDI AMBIENTALI SUL COMPARTO ATMOSFERA

La meteorologia e la modellistica

Lo studio dei processi di dispersione in aria degli inquinanti emessi da centrali elettriche inizia negli Anni '70, soprattutto nell'ambito della sicurezza nucleare. Infatti in quegli anni l'Italia, dopo le prime tre centrali nucleari di Trino, Latina e Garigliano, intende avviare un programma di energia nucleare ben più vasto. In caso di incidente nelle centrali nucleari con conseguente fuoriuscita di materiale contaminato, gas o particelle, è di estrema importanza definire l'area intorno alla centrale dove ricadono i contaminanti e la loro concentrazione. Questo problema è direttamente collegato alle capacità dispersive delle prime centinaia di metri di atmosfera sopra la superficie.

Alcune variabili atmosferiche come il vento, il profilo verticale della temperatura, giocano un ruolo decisivo nel rimescolamento dell'aria in prossimità del suolo e quindi nella dispersione di qualsiasi materiale gassoso o in forma di particelle sospese. In conseguenza di ciò, in vicinanza delle centrali nucleari, si costruiscono torri per la misura di questi parametri meteorologici a varie altezze (quella di Trino era alta 120 metri). Per motivi logistici e di sicurezza, queste torri non possono però essere alte molto più di un centinaio di metri. In certe condizioni è noto che il *boundary layer* può avere altezze maggiori e l'altezza raggiunta dal rilascio di inquinante, radioattivo o non, specialmente se caldo, può essere molto più alta della centrale stessa, causando ricadute anche a distanze ragguardevoli dal punto di emissione. Le limitazioni delle torri meteorologiche spingono perciò la ricerca verso due direzioni entrambe necessarie. La prima: lo sviluppo di strumentazione di *remote sensing*, capace di stimare la temperatura e il vento a quote molto più alte di quelle delle torri. L'altra: la modellistica di diffusione in grado di prevedere le concentrazioni al suolo di un inquinante emesso da una sorgente conosciuta.

A quei tempi la ricerca di ENEL, in collaborazione con gruppi del CNR e Università, incomincia a produrre prototipi di strumentazione di *remote sensing*, quali il SODAR (SOund Detection And Ranging) – per la misura del vento e della turbolenza ad altezze fino a 800-1.000 metri – e il RASS

(Radio Acoustic Sounding System) per la misura della temperatura dell'aria a diverse altezze fino a circa 1.000 metri.

È fondamentale per la sperimentazione di tali strumenti la loro installazione presso alcune centrali termiche di ENEL, quali ad esempio Turbigo (MI) e Fusina (VE). Tali apparati sono stati anche realizzati in versione trasportabile per soddisfare l'esigenza di brevi campagne di misura.

L'attenzione di ENEL nel frattempo si è spostata dalle centrali nucleari, dove il problema della dispersione è presente solo nei rari casi di incidente, alle centrali termiche ad olio o carbone, dove ovviamente il problema della diffusione dei prodotti della combustione è sempre presente.

Nei grandi centri industriali, come Brindisi e Porto Marghera, dove oltre alle centrali ENEL sono presenti diverse fonti di inquinamento, è anche importante discriminare la causa e la provenienza di determinate concentrazioni registrate al suolo dalle autorità locali di sorveglianza.

Installazione dell'unità mobile SODAR.

Da un punto di vista scientifico il problema si complica in quanto i modelli matematici di diffusione, studiati e tarati per un'unica fonte, si devono adattare a più sorgenti e tener conto della variabilità delle condizioni meteorologiche. Il modello *a pennacchio gaussiano* usato finora non è più sufficiente; si sperimentano i modelli "a particelle" che permettono di seguire il moto indipendente di molti frammenti dell'inquinante (particelle) in base ad un campo dinamico delle variabili meteorologiche. Questi modelli di diffusione, più complessi, hanno però necessità di essere alimentati da modelli meteorologici tridimensionali in grado di fornire il campo di vento e temperatura con un dettaglio di poche centinaia di metri; questa necessità diventa ancora più importante in siti con orografia complessa. I modelli numerici di atmosfera, sviluppati nei servizi meteorologici di diversi Paesi per le previsioni del tempo a pochi giorni in avanti, sono venuti incontro alle esigenze della simulazione della dispersione di inquinanti in aria.[1] Si assiste quindi allo sviluppo e sperimentazione di modelli meteorologici a griglia fine e *ad area limitata*, in grado cioè di poter simulare l'atmosfera su porzioni di territorio, impiegando minori risorse di calcolo, ma con dettaglio su-

1 *G. Finzi, P. Bonelli. G. Bacci:* "A stochastic model of surface wind speed for air quality control purposes", *Journ. of Climate and Appl. Meteorology, Vol.23,N.9, Sept. 1984*

periore ai modelli *globali*, indispensabili invece per le previsioni con un maggior orizzonte temporale.

Con la costruzione di centrali a combustibili fossili sempre più grandi, i modellisti della diffusione devono affrontare un altro problema: il calcolo ottimale dell'altezza dei camini. Infatti, essendo ovvio che un camino più alto disperde meglio i fumi di uno più basso, il problema sta nel trovare un'altezza minima sufficiente a ridurre sotto i limiti di legge la concentrazione al suolo degli inquinanti. Questo problema è sentito prevalentemente in Pianura Padana dove le particolari condizioni meteorologiche non facilitano la dispersione degli inquinanti. Un esempio è il camino della centrale di Tavazzano (LO), alto 250 metri.

Una stazione meteorologica.

Negli Anni '90, le problematiche della diffusione di inquinanti perdono interesse quando ENEL affronta il problema alla radice, adottando elettrofiltri e sistemi di cattura degli ossidi di zolfo, già all'interno del camino; più recentemente invece il passaggio al metano, con le centrali termiche a ciclo combinato, ha diminuito l'interesse per le emissioni inquinanti.

Un altro problema ambientale, meno focalizzato sulle emissioni della singola centrale, è quello del *trasporto transfrontaliero* degli inquinanti, presentatosi agli inizi degli Anni '80 e che ha offerto nuovi obiettivi alla ricerca sull'ambiente aria. Tutto inizia quando alcuni fenomeni di acidificazione delle acque dei laghi norvegesi e il degrado delle foreste tedesche fanno esplodere in Europa il problema delle responsabilità transnazionali dell'inquinamento. Bisogna ricordare che Gran Bretagna e molti Paesi dell'Europa Centro-Orientale adottavano e adottano tuttora in modo massiccio il carbone per la produzione di energia elettrica. Le emissioni della combustione del carbone contengono dosi elevate di ossidi di zolfo che combinandosi con l'acqua liquida atmosferica generano in certe circostanze livelli di acidità non trascurabili per gli ecosistemi.

Le cosiddette *piogge acide* sono state studiate per anni, sia da un punto di vista modellistico sia sperimentale. ENEL installa nei primi Anni '80 una rete, unica in Italia, per il rilevamento della composizione chimica della pioggia, dotata di strumentazione ideata e costruita per questo scopo. I pluviometri *wet-dry* permettono di raccogliere campioni separati di pioggia e di ricaduta di pulviscolo secco. Tali campioni, inviati ogni settimana al laboratorio di analisi, permettono di caratterizzare chimicamente le precipitazioni che vengono poi messe a confronto con le traiettorie delle masse d'aria corrispondenti alla settimana di campionamento.

Nel 1986, a seguito dell'incidente nucleare di Chernobyl, le conoscenze e i software sviluppati da ENEL per il trasporto transfrontaliero si rivelano utilissimi per un'applicazione non ancora sperimentata. Infatti, utilizzando i campi tridimensionali di vento prodotti dal Centro Europeo di Reading (ECMWF), normalmente impiegati per le previsioni meteorologiche, il CRTN di ENEL, per mezzo di un suo originale modello di traiettorie (STRALE)[2], pubblica ad un solo anno di distanza dall'incidente una mappatura completa della distribuzione del *fall-out* verificatosi nei giorni successivi all'incidente su tutta l'Europa. Considerando che a quel tempo le misure di radioattività dell'aria disponibili erano scarse e le autorità preposte al monitoraggio radioattivo focalizzavano la loro attenzione solo sulle centrali italiane, la mappatura realizzata dal CRTN si rivela subito molto utile per verificare, anche se a posteriori, la tempistica e la distribuzione del *fall-out* sull'Italia.

Negli anni successivi il modello STRALE viene perfezionato fino a diventare uno strumento utile per qualsiasi emergenza ambientale su grande scala.[3]

Sempre nel campo dell'inquinamento da combustione, il CRTN con il CISE sviluppano una tecnica per il riconoscimento del tipo di sorgente inquinante basata sulla morfologia e composizione chimica delle micro-particelle di aerosol disperse in aria. Numerose analisi al microscopio elettronico e con il metodo PIXE (attivazione del campione mediante impatto con protoni accelerati), hanno portato alla compilazione di un atlante delle particelle solide immesse in aria a seguito di vari tipi di combustione.

Un'altra applicazione della meteorologia nasce presso il CRTN di ENEL con il nome di progetto METOPE (METeorologia per l'Ottimizzazione della Produzione Elettrica). Scopo del progetto è verificare se e come le previsioni meteorologiche, ottenute dai modelli numerici, possano essere utilmente impiegate per ottimizzare la gestione dei bacini idroelettrici e la previsione del fabbisogno a scala nazionale. In quegli anni si assiste ad un grande sviluppo della modellistica meteorologica in tutti i Paesi. Il centro Europeo di Previsioni a Medio Termine di Reading in Inghilterra (ECMWF), finanziato da molti Sta-

2 *P. B. Ferrari, P. Bonelli, G. Calori* "STRALE – A package for the simulation of Long Range Transport and dispersion of pollutants", *Environmental Software, Vol.6, N. 1, Marzo 1991, 1991*

3 *P. Bonelli, G. Calori, G. Finzi.* "A fast long-range transport model for operational use in episode simulation. application to the Chernobyl accident", *Atmospheric Environment, Vol. 26A, No14, pp.2523 – 2535, 1992*

RASS in configurazione fissa utilizzato per il monitoraggio del profilo di temperatura presso la centrale termoelettrica ENEL di Turbigo.

ti tra cui l'Italia, inizia ad essere operativo nel 1979, diffondendo i campi tridimensionali delle principali variabili meteorologiche fino a 10 giorni in avanti. Il CRTN avvia un accordo con l'Aeronautica Militare, rappresentante italiano presso ECMWF, per ricevere i dati del modello. Risorse informatiche di grande potenzialità sono messe in campo per ricevere e trattare questi dati. Il CRTN è tra i primi centri ENEL ad usare gli innovativi calcolatori VAX della Digital utilizzati per lo sviluppo e la sperimentazione operativa di software dedicati alla ricezione, archiviazione, rappresentazione dei dati sia provenienti dal modello di previsione, sia delle misure e osservazioni meteorologiche provenienti dalle stazioni sinottiche italiane.

Le stazioni di misura sono infatti essenziali per stabilire l'attendibilità delle previsioni meteorologiche, che dipende fortemente dal tipo di grandezza in esame. Ad esempio, la quantità di precipitazione può essere prevista dai modelli più o meno bene a seconda della complessità orografica del territorio.[4] I bacini idroelettrici, come si sa, sono situati prevalentemente sulle Alpi, dove scarseggiano punti di misura di tipo sinottico, gestiti dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica. La forte presenza ENEL sui territori montani, attraverso le sue centrali idroelettriche, ha reso disponibile in passato una gran quantità di misure di precipitazione, raccolte e archiviate con scopi di sicurezza o puramente idrologici. Un obiettivo del METOPE è raccogliere ed analizzare questi dati per valutare l'attendibilità della previsione di precipitazione e formulare metodi di impiego della previsione stessa.[5]

Per quanto riguarda la correlazione della temperatura con il fabbisogno elettrico, si analizzano dati di carico a livello nazionale e regionale assieme a dati di temperatura dell'aria registrati dalle stazioni meteorolo-

4 *P. Bonelli, R. Pelosini* "Modellistica ad area limitata per la previsione di forti eventi di precipitazione sulle Alpi", *La Météorologie, 7a serie, n. 45, Dicembre 1992, 1992*

5 *E. Molteni, P. Bonelli, P. Bacci* "Precipitation over Northern Italy: A description by means of Principal Component Analysis", *Journal of Climate and Appl. Meteorology, Vol.22, N.10, Oct. 1983*

giche ottenendo i primi modelli di previsione del fabbisogno. La possibilità di far girare "in casa" un modello meteorologico si è concretizzata con lo sviluppo del modello MEPHYSTO, originato da un modello dinamico *eta–coordinate* con uno schema radiativo completamente rinnovato. Questo modello ha permesso le prime simulazioni sull'Italia con un passo di griglia di 17 km circa. Situazioni meteorologiche estreme come quelle che hanno determinato le frane in Valtellina del 1987 sono state ben simulate da questo modello.[6]

Dalla consapevolezza che le linee elettriche aeree sono esposte agli eventi atmosferici più violenti, come i forti temporali e le formazioni di ghiaccio, si sono sviluppati una serie di strumenti informativi dedicati alla previsione e allerta di tali fenomeni: STAF (Storm Track Alert and Forecast)[7] e WOLF (Wet-snow Overload aLert and Forecasting)[8].

Per quanto riguarda invece le energie rinnovabili *aleatorie*, eolico e solare, con i loro problemi di integrazione nella rete, la ricerca si è indirizzata verso l'applicazione di modelli meteorologici alla previsione della produzione di energia eolica e di energia fotovoltaica attraverso le grandezze vento e radiazione solare globale al suolo. La ricerca è ancora in corso e mira a impiegare la previsione meteorologica nella gestione dell'energia rinnovabile dalla sua produzione alla sua immissione in rete. Si rimanda al capitolo dedicato alle rinnovabili per maggiori dettagli.

Il controllo delle emissioni

La crescente sensibilità dell'opinione pubblica per le questioni ambientali da un lato, e l'armonizzazione della normativa europea in materia di qualità dell'aria – che richiedeva il rispetto di limiti sempre più stringenti – dall'altro, hanno contribuito a consolidare anche in Italia, a partire dagli anni Ottanta, l'attività di controllo delle emissioni di inquinanti in atmosfera da impianti industriali e da centrali termoelettriche.

Al CISE, attorno alla metà degli Anni '80, si crea un gruppo di tecnici e ricercatori dedicati ai controlli delle emissioni industriali ma anche allo

6 *R. Buizza, R. Pelosini,* "Rainfall Prediction with a Limited-Area Model during an Intense Storm over Northern Italy", *IL NUOVO CIMENTO, Vol. 17 C, N.5, sett.-ott. 1994*

7 *P. Bonelli, P. Marcacci, E. Bertolotti, E. Collino, G. Stella,* Nowcasting and assessing thunderstorm risk on the Lombardy region (Italy), *Atmospheric Research, Volume 100, No.4, June 2011, 503-510*

8 *P. Bonelli, M. Lacavalla, P. Marcacci, G. Mariani, and G. Stella,* Wet Snow Hazard for Power Lines: a Forecast and Alert System applied in Italy, Natural Hazards and Earth System Sciences, *11, 2419-2431, 2011, Copernicus*

sviluppo di nuovi metodi di campionamento e misura. Parallelamente, la ricerca ENEL lavora sullo sviluppo di tecnologie di combustione e di trattamento degli effluenti che consentano di ridurre le emissioni in atmosfera dalle centrali a combustibile fossile.

Le attività del CISE trovano ben presto un ulteriore motivo di sviluppo nella collaborazione con questi programmi di ricerca e sviluppo: nella seconda metà degli ani Ottanta, infatti, il CISE si trova coinvolto nel vasto progetto sperimentale per la riduzione delle emissioni di ossidi di azoto dagli impianti termoelettrici ad olio e carbone, che prevede l'adozione di tecniche di combustione innovative sulle principali tipologie di caldaie a vapore utilizzate, con il compito di effettuare i monitoraggi di gas e particolato – in caldaia e al camino – su numerosi impianti, tra cui La Casella, La Spezia, Fusina, Monfalcone, Sermide e altri. Il progetto sarà coronato da pieno successo: nel giro di pochi anni l'adozione di tecniche di combustione a bassa produzione di inquinanti e di trattamento degli effluenti prima del loro rilascio al camino porteranno le emissioni di ossidi di azoto degli impianti termoelettrici a scendere di quattro-cinque volte, adeguandosi così alle più restrittive norme europee in vigore. Analogo successo avranno i programmi di riduzione per l'anidride solforosa (soprattutto grazie all'adozione di combustibili più "puliti", oltre che a sistemi di trattamento fumi) e di polveri.

Apparecchiature per il controllo di emissioni nell'atmosfera.

Tra la metà degli Anni '80 e '90 la legislazione nazionale progressivamente si adegua a quella europea, imponendo da un lato limiti alle emissioni (e, di conseguenza, il loro monitoraggio e controllo) per una vastissima gamma di composti (collettivamente definiti, seppure in modo non rigoroso, "micro-inquinanti") per tutte le tipologie di impianti industriali, e dall'altro richiedendo l'adozione di sistemi di misura in continuo delle emissioni al di sopra di una certa taglia di impianto. L'ENEL (in particolare il Laboratorio di Piacenza della Direzione Costruzioni) e il CISE sono in prima fila nello sviluppo e nell'applicazione di metodi e strumenti per la caratterizzazione delle emissioni di micro-inquinanti.

Metalli, composti alogenati, ammoniaca, idrocarburi policiclici aromatici, diossine e furani sono i composti oggetto di interesse, che – a valle di un lavoro di messa a punto e validazione metodologica – vengono sistematicamente misurati alle emissioni dagli impianti termoelettrici – soprattutto ad olio combustibile e carbone.

Lo sviluppo di metodi per il campionamento e la misura di composti inquinanti procede di pari passo con la collaborazione con gli enti norma-

tori, attraverso la partecipazione di esperti del CISE ai gruppi di lavoro del CEN (Comitato Europeo per la Normativa) e – insieme con i colleghi del Laboratorio di Piacenza – al gruppo di lavoro "Qualità dell'aria" dell'UNI.

Ancora oggi RSE partecipa attivamente ai lavori del CEN in materia e coordina il gruppo UNI che si occupa di norme tecniche in materia di emissioni da impianti di combustione.

La necessità di dotare tutti i "grandi impianti di combustione" (ai sensi dell'omonima direttiva europea) di sistemi di monitoraggio in continuo delle emissioni in atmosfera e il carattere "fiscale" che le misure di tali sistemi vanno ad assumere nel certificare il rispetto o meno dei limiti di legge, spingono l'ENEL, in collaborazione con il CISE, ad intraprendere negli anni Novanta un vasto programma di qualificazione dei sistemi e degli strumenti commercialmente disponibili.

Un dettaglio delle attività di taratura.

Allo scopo, il CISE realizza il proprio laboratorio di Metrologia Ambientale, destinato alla verifica delle prestazioni dei sistemi di campionamento e misura utilizzati nel settore dell'inquinamento atmosferico.

Il Laboratorio, tuttora operativo presso la sede RSE di Milano, che rappresenta una delle prime realizzazioni del genere in Italia, consente la verifica e la caratterizzazione, secondo la più avanzata normativa tecnica internazionale, della strumentazione di misura e delle attrezzature di campionamento per emissioni ed aria ambiente.

Negli Anni '90 il CISE si dota anche di una serie di laboratori mobili, attrezzati sia per i controlli dell'inquinamento atmosferico sia per il monitoraggio delle emissioni, espandendo così le proprie attività al servizio qualificato per le Pubbliche Amministrazioni e per clienti che operano impianti industriali (inceneritori, raffinerie, cementifici, eccetera).

Alla confluenza del CISE in ENEL alla fine degli Anni '90, e poi nel 2000 nel CESI, insieme con le dotazioni strumentali del Laboratorio di Piacenza si viene così a costituire un polo di eccellenza per il monitoraggio ambientale, dedicato all'intero settore energetico.

La costituzione di RSE, nel 2005, conferisce un nuovo impulso alle attività di ricerca applicata sul controllo delle emissioni, finanziate dal Fondo Ricerca di Sistema Elettrico. Si affronta – ad esempio – il problema delle emissioni di polveri a bassissima concentrazione, tipiche dei moder-

ni impianti a ciclo combinato, sviluppando e portando alla normazione europea un metodo dedicato, o quello della determinazione della frazione biodegradabile (e, dunque, eligibile per la corresponsione dei Certificati Verdi) nella combustione di rifiuti, sviluppando anche in questo caso un metodo *ad hoc*, poi adottato dalla normazione nazionale in sede CTI.

Ancora, si sviluppa un sistema *open source* per la raccolta e l'elaborazione dei dati provenienti dai sistemi di misura emissioni, standardizzando e rendendo "trasparente" il processo di acquisizione e restituzione dei risultati: questo sistema, denominato ÆDOS viene adottato quale standard ufficiale dalla Regione Lombardia.

Infine si realizza, presso la sede di Milano, un impianto sperimentale per la simulazione delle emissioni da impianti di combustione, ancora una volta un *unicum* a livello nazionale, per la verifica dei metodi di misura, la conduzione di test interlaboratorio e la qualificazione del personale addetto alle misure.