



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio dei fenomeni osservabili a seguito di transitori d'impianto
estesi oltre i limiti di progetto

M. Sumini, F. Teodori



Report RdS/2011/342

STUDIO DEI FENOMENI OSSERVABILI A SEGUITO DI TRANSITORI D'IMPIANTO ESTESI OLTRE I LIMITI DI PROGETTO.

M. Sumini, F. Teodori (Università di Bologna)

Novembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

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

Responsabile Progetto: Massimo Sepielli, ENEA

Titolo

**Studio dei fenomeni osservabili a seguito di transitori d'impianto
estesi oltre i limiti di progetto**

Ente emittente ENEA

PAGINA DI GUARDIA

Descrittori
Tipologia del documento: Rapporto tecnico

Collocazione contrattuale: ACCORDO DI PROGRAMMA Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico PIANO ANNUALE DI REALIZZAZIONE 2010 Progetto 1.3.2.a: Fissione nucleare: Metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata.

Argomenti trattati: Sicurezza dei Reattori Nucleari, Termine Sorgente, Analisi incidentale, Codici e piattaforme di calcolo, norme e requisiti, metodi di valutazione.

Sommario

I contenuti di questo documento CIRTEN sono stati inseriti nel deliverable PAR2010-ENEA-LA2-011. Per completezza, esso viene allegato al suddetto deliverable. Sono qui descritte le principali caratteristiche del codice integrale a parametri concentrati MELCOR e le caratteristiche di alcuni modelli in esso utilizzati per le valutazioni dei principali parametri termofluidodinamici e della dinamica del trasporto, diffusione e deposizione dei componenti del termine sorgente (prodotti di fissione, aerosol, particolati e residui strutturali). Si riportano anche alcune considerazioni sulla evoluzione del codice verso una struttura più avanzata e potente, implementata nella più recente release.

Note

Questo documento è stato preparato in stretta collaborazione con i proff. M. Sumini e F. Teodori (CIRTEN, UNIBO).


Copia n.
In carico a:

| | | | | | | |
|------|-------------|------|-----------|-------------------|-----------------|-------------|
| 2 | | | NOME | | | |
| | | | FIRMA | | | |
| 1 | | | NOME | | | |
| | | | FIRMA | | | |
| 0 | EMISSIONE | | NOME | F. De Rosa | P. Incalcaterra | M. Sepielli |
| | | | FIRMA | <i>F. De Rosa</i> | | |
| REV. | DESCRIZIONE | DATA | CONVALIDA | VISTO | APPROVAZIONE | |



CIRTEN

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca TEcnologica Nucleare

UNIVERSITA' di BOLOGNA

Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale

DIENCA

**Studio dei fenomeni osservabili a seguito di transitori
d'impianto estesi oltre i limiti di progetto**

Autori

M. Sumini

F. Teodori

CERSE-UNIBO RL 1001/2011

Bologna, Novembre 2011

Lavoro svolto in esecuzione dell'Obiettivo 1.1 Attività A1
AdP MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico- Piano Annuale di Realizzazione 2010
Progetto 1.3.2.a "Fissione nucleare: Metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di
generazione evolutiva alimentati ad acqua pressurizzata"

Studio dei fenomeni osservabili a seguito di transitori d'impianto estesi oltre i limiti di progetto

M. Sumini, F. Teodori

Università di Bologna - Dipartimento DIENCA

Laboratorio di Montecuccolino

via dei Colli, 16 - 40136 - Bologna

22 novembre 2011

Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Il codice MELCOR | 3 |
| 1.1 | Struttura del Codice | 5 |
| 2 | Implementazione e Portabilità | 18 |
| 2.1 | Migrazione da MELCOR 1.8.6 a MELCOR 2.X.X | 18 |
| 2.2 | MELCOR su diverse architetture e piattaforme | 18 |

Introduzione

Quanto esposto in questo report è da intendersi come sintesi di un lavoro di acquisizione di strumenti, conoscenze e competenze finalizzate allo studio dei fenomeni osservabili in caso di situazioni transitorie d'impianto, estese oltre i limiti deterministici di progetto.

Dopo un'attenta analisi di quanto offerto dal panorama internazionale, si è individuato nel codice MELCOR lo strumento più idoneo ad analisi di questo tipo.

MELCOR è un codice integrato multiplatforma, orientato alle applicazioni ingegneristiche, in grado di simulare l'evoluzione di incidenti severi in reattori nucleari di potenza ad acqua leggera. MELCOR è sviluppato, a partire dal 1982, dal Sandia National Laboratory per la U.S. Nuclear Regulatory Commission, come strumento di valutazione del rischio per impianti nucleari di potenza ad acqua leggera ed è il successore del Source Term Code Package.

MELCOR è in grado di simulare un ampio spettro di fenomeni che si succedono quando si verifici un incidente severo in un impianto che ospiti un reattore nucleare di potenza ad acqua leggera, sia esso bollente o pressurizzato.

Come sarà mostrato, il punto di forza di MELCOR sta nella sua struttura modulare, fortemente orientata agli oggetti, che conferisce al codice una flessibilità e un adattabilità non riscontrabile negli altri codici presenti nel panorama internazionale, al punto che, pur essendo stato concepito per applicazioni finalizzate ai reattori ad acqua leggera, è stato usato con successo per simulare reattori dell'est europeo: reattori delle classi VVER e RBMK.

Capitolo 1

Il codice MELCOR

MELCOR è un codice integrato orientato alle applicazioni ingegneristiche, concepito principalmente allo scopo di simulare la progressione degli incidenti in reattori nucleari di potenza. MELCOR è in grado di affrontare l'ampio spettro dei fenomeni e delle problematiche, che si presentano nel corso di incidenti severi in reattori ad acqua bollente e pressurizzata.

Tra la gran varietà di aspetti dell'evoluzione incidentale, che possono essere trattati, citiamo:

- la risposta termoidraulica nel sistema di raffreddamento, nella cavità del reattore, negli edifici di contenimento e confinamento;
- perdita di refrigerante con esposizione del core , riscaldamento del combustibile, ossidazione delle guaine, degrado del combustibile e deformazione delle barre, fusione del nocciolo e reallocazione dei materiali;
- il rilascio e trasporto di radionuclidi;
- la produzione, il trasporto e la combustione di idrogeno;
- fenomeni di espulsione di materiali fusi;
- aggressioni al calcestruzzo;
- reazione delle strutture al calore;
- impatto dei sistemi di sicurezza sul comportamento della termoidraulica e dei radionuclidi.

Il codice è costituito da un'unità di controllo e da un numero di moduli principali, o pacchetti, i quali nel loro insieme modellano le componenti principali di una centrale nucleare e le loro reciproche interazioni.

Il codice è stato progettato con un approccio orientato agli oggetti, collocando i diversi pacchetti in una struttura accuratamente modulare.

Interfacce ben definite, predisposte allo scopo, permettono ad ogni istante uno scambio completo e consistente di informazioni tra i diversi moduli, cosicché i fenomeni siano esplicitamente accoppiati passo passo per tutta la durata della simulazione. La struttura fortemente modulare agevola la manutenzione e l'aggiornamento del codice.

Alle sue origini, MELCOR era stato concepito come un codice preponderantemente "parametrico", in risposta all'esigenza di tempi di esecuzione rapida e per oggettive lacune nella conoscenza della fenomenologia degli incidenti nei reattori.

Nel corso degli anni le incertezze fenomenologiche si sono andate riducendo, gli utilizzatori sono via via diventati più esigenti e i modelli implementati in MELCOR sono diventati sempre più realistici. La crescita esponenziale della potenza di calcolo dei moderni elaboratori e il decrescere dei loro costi hanno rimosso i limiti più stringenti allo sviluppo del codice. Ad oggi la maggior parte dei modelli implementati in MELCOR sono deterministici. L'uso di modelli strettamente parametrici è limitato in aree, nelle quali ancora prevalga una forte incertezza fenomenologica, dove non esista un consenso diffuso sull'approccio deterministico da usare.

Senza con questo ledere la sua natura deterministica, MELCOR è stato disegnato per agevolare l'analisi di sensitività e di incertezza con l'introduzione di coefficienti di sensitività: leggi di correlazione, che altri codici trattano come costanti, sono implementate in MELCOR come parametri opzionali variabili. Questo permette all'analista di capire quanto certe variabili possano influenzare l'evoluzione della simulazione, suggerendo il livello di precisione, con la quale certe stesse variabili debbano essere acquisite. Parametri di questo tipo, come altri parametri di natura numerica, quali criteri di convergenza o numero limite di iterazioni, sono codificati in MELCOR come coefficienti di sensitività, che possono essere introdotti come parametri opzionali di input.

La capacità di modellazione di MELCOR sono quanto più possibile generali e flessibili. grazie all'adozione di un approccio a volumi di controllo nella rappresentazione dell'impianto. Nessuna specifica nodalizzazione è imposta all'utilizzatore, il quale gode di ampi gradi di libertà nello scegliere il livello di dettaglio del modello, che si accinga a costruire. Una geometria specifica del reattore è richiesta solo nella rappresentazione del core. Persino in questo caso, tuttavia, un semplice modello base è sufficiente a rappresentare il core di un reattore ad acqua leggera, bollente o pressurizzato, e da esso si può partire verso una rappresentazione più specializzata, con un ampio numero di livelli di dettaglio e complessità crescenti

1.1 Struttura del Codice

MELCOR è composto da un numero di diversi moduli, o pacchetti, ciascuno dei quali modella una diversa porzione della fenomenologia incidentale. Li elenchiamo in questa sezione e ne diamo una descrizione sintetica, con un livello di dettaglio utile a capire le potenzialità e la flessibilità del codice.

BUR Il pacchetto BUR (BURn) simula la combustione di gas all'interno dei volumi di controllo. I modelli di combustione implementati sono in grado di calcolare l'effetto della combustione di miscele precostituite di gas, senza simulare la reale cinetica della reazione o tracciare la reale propagazione del fronte di fiamma. A partire dalla realease 1.8.5 è stato introdotto un semplice modello per la diffusione della fiamma, applicabile alla combustione di miscele molto ricche di idrogeno, che invadano volumi contenenti ossigeno. I modelli codificati in MELCOR sono sono gli stessi implementati nel codice HECTR 1.5. Le sole differenze significative sono migliorie, apportate per permettere all'utilizzatore un più diretto controllo dei modelli, con l'introduzione di coefficienti di sensibilità, e per introdurre parametri opzionali, che sono usati per sovrascrivere i parametri nominali nei volumi di controllo, nei quali abbia luogo il riscaldamento diretto della struttura di contenimento (DCH).

Può valer la pena sottolineare, che a questi parametri si può o meno far ricorso a discrezione dell'utilizzatore. Il modello di diffusione della fiamma si può usare, per simulare la combustione durante un DCH, lasciando invariati i parametri nominali.

Le deflagrazioni sono innescate se le frazioni molari in un volume di controllo soddisfanno una forma dell'equazione di LeChatelier. Sono eseguiti test per verificare sufficienti concentrazioni di O_2 e H_2 , così come per computare l'effetto inibitore della presenza di eccessive concentrazioni di diluenti (H_2O e CO_2). Le deflagrazioni si possono propagare nei volumi di controllo adiacenti, se, in quei volumi, sono soddisfatti test addizionali per le frazioni molari di H_2 e CO e se il percorso è aperto a flusso di gas: ad esempio l'area di scambio è diversa da zero e il percorso non è coperto da acqua.

Il tasso di combustione è determinato dalla velocità della fiamma, dalle dimensioni caratteristiche del volume e dalla completezza della combustione. La velocità della fiamma e la completezza della combustione possono entrambe essere inserite come parametri di input o possono essere calcolate da funzioni di controllo definite dall'utente o dalle correlazioni di default del codice HECTR. Quest'ultime sono relazioni empiriche di origine sperimentale e dipendono dalle concentrazioni di combustibile e diluente.

Notare, che il codice prevede che i gas H_2 , CO , H_2O e O_2 siano definiti nel pacchetto NCG (NonCondensibile Gas), indipendentemente dal fatto che il pacchetto BUR sia o

meno attivo. Il vapore è automaticamente presente in tutti i calcoli di MELCOR, quindi non sono necessarie particolari azioni per includerlo.

Il pacchetto BUR stampa messaggi per avvisare l'utente, quando in un volume di controllo siano raggiunte le condizioni per una detonazione. Tuttavia solo le deflagrazioni sono simulate, le detonazioni sono semplicemente segnalate.

CAV Il pacchetto CAV (CAVity) è usato per simulare l'interazione tra i detriti, spesso fusi, del core e il calcestruzzo della cavità del reattore in una o più fasi della simulazione. La simulazione si basa su modelli mutuati dal codice CORCON-mod3.

Il sistema fisico, considerato in CAV, consiste in una cavità asimmetrica di calcestruzzo, che contiene uno o più strati di detriti. Il pacchetto calcola il trasferimento di calore tra i detriti e il calcestruzzo, così come il trasporto di calore attraverso i detriti tra i vari strati fino alla superficie. Dopo aver calcolato il flusso di calore, viene calcolato il tasso di ablazione del calcestruzzo e i prodotti dell'ablazione sono aggiunti al far parte del contenuto della cavità. Sono simulate le reazioni chimiche, che coinvolgono prodotti gassosi generati dalla decomposizione del calcestruzzo (H_2O e CO_2), per interazione col materiale presente nella cavità, e i prodotti delle reazioni sono trasportati ai rispettivi layer.

Le condizioni al contorno, in corrispondenza della superficie superiore dei detriti, sono calcolate dal pacchetto CVH (Control Volume Hydrodynamic) introducendo allo scopo un volume di controllo, che funge da recettore del calore generato e dei gas, rilasciati durante l'interazione. Se nel volume associato è presente dell'acqua, si assume che questa ricopra i detriti. Il trasferimento di calore all'acqua è calcolato con le metodologie di CORCON.

Di default il pacchetto CAV assume che tutti i detriti, metalli e ossidi, siano miscelati a formare un unico layer. Tuttavia, l'utente ha facoltà di scegliere modelli più complessi, che prevedano più strati. Due opzioni sono accessibili. La prima, tipica del CORCON-mod2, non permette miscele di metalli e ossidi. Permette un massimo di tre strati. Un layer inferiore di ossidi pesanti, un layer intermedio di metallo e un layer superiore di ossidi leggeri. La seconda opzione prevede il ricorso a modelli di trasporto deterministici, che considerano la possibilità di migrazione di ossidi pesanti nel layer di metallo e di metallo nel layer di ossidi leggeri per fenomeni di diffusione all'interfaccia, in competizione con gli effetti della gravità che tende a ristabilire la stratificazione.

L'utente può scegliere di specificare il contenuto iniziale di ciascuno strato o di un unico strato miscela di fasi, disponendo in basso gli strati più pesanti. Tuttavia, in generale, non viene specificata nessuna composizione iniziale. I detriti saranno depositati nella cavità dal pacchetto COR (CORE) e dal pacchetto FDI (Fuel Dispersion Interactions),

attraverso il pacchetto TP (Transfer Process). L'utente può anche imporre direttamente tassi di deposizione, usando il pacchetto EDF (External Data File) e il pacchetto TP. In tutti i casi le densità relative e le mixing option determineranno la stratificazione del materiale depositato.

Il calore di decadimento liberato all'interno della cavità può essere ottenuto direttamente da una funzione di controllo imposta dall'utente o calcolato, usando i pacchetti DCH (Decay Heat) e RN (RadioNuclide). Nel primo caso, o qualora il pacchetto RN non fosse attivo, per tracciare la ridistribuzione dei prodotti di fissione, devono essere specificate due funzioni di controllo ausiliare, che definiscano la frazione del calore di decadimento totale, generata in ciascuna fase (ossido e metallo). L'utente può introdurre queste funzioni in ogni caso, sovrascrivendo i calcoli di MELCOR. Il codice COCON contiene un semplice modello per il calore di decadimento, ma detto modello non è accessibile in MELCOR.

Se sono simulate più di una cavità, il materiale può fluire dall'una all'altra. Se il pacchetto RN è attivo, l'inventario di radionuclidi associato al materiale trasferito è anch'esso ridistribuito. In questo caso il pacchetto TP non svolge alcun ruolo.

Il trasferimento di materiale tra le cavità può avvenire al verificarsi di tre condizioni:

- rottura assiale;
- rottura radiale;
- intervento di una funzione di controllo definita dall'utente.

Ciascuna di queste condizioni può portare ad un versamento in un'altra cavità. Si tenga conto tuttavia che sono ammessi solo trasferimenti unidirezionali da una cavità ad un'altra. In questo modo se una rottura determina flusso di materiale da una cavità A ad una cavità B, da questa non può esserci ritorno di materiale nella cavità A. In alternativa al versamento, l'utente può scegliere di forzare l'interruzione dei calcoli quando sia verificata una rottura, oppure di ignorare le rotture come se le pareti continuassero a confinare il materiale.

CF Il pacchetto CF (Control Function) permette all'utente di costruire delle funzioni delle variabili, presenti nel database di MELCOR, e di rendere i valori, che queste funzioni restituiscano, accessibili agli altri pacchetti.

L'utente può utilizzare, quali argomenti delle funzioni, variabili, i valori delle quali variano nel tempo, con l'evoluzione della sequenza incidentale, per cui queste funzioni di controllo sono funzioni del tempo.

Le CF sono un potente strumento, l'utilizzo del quale non è immediatamente ovvio. Ad esempio, la pressione in un volume di controllo può essere argomento di una funzione lo-

gica e determinare o meno l'apertura di una valvola o la rottura di un pannello. Allo stesso modo, la temperatura in un volume di controllo può essere argomento di una funzione a valori reali, che restituisca l'entalpia di una massa, che possa fungere da sorgente o pozzo di calore. Ancora, l'accumulo di particolato in un filtro può essere argomento di una funzione di controllo a valori reali, che restituisca la resistenza del filtro al flusso di materiale nella relativa flow path. Si possono costruire funzioni logiche di controllo complesse, che siano funzioni di un elevato numero di variabili di sistema. C'è la possibilità di definire variabili, diverse da quelle che costituiscono l'output standard di MELCOR, e far sì che vengano graficate o stampate. Il verificarsi di determinate condizioni, può essere usato per la generazione di output addizionali, che possono andare dalla stampa di un semplice messaggio. alla stampa di una tabella di valori, alla rappresentazione di un grafico.

CND Il pacchetto CND (Condenser) simula il funzionamento dell'ICS (Isolation Condenser System) e del PCCS (Passive Containment Cooling System); entrambi usano scambiatori di calore immersi in grandi piscine d'acqua. Diciamo subito, che MELCOR non ha lo scopo di predire le prestazioni di questi sistemi di scambiatori e condensatori. Allo scopo esistono complessi codici di termoidraulica. Calcoli di questo tipo richiederebbero oneri non compatibili con un veloce ed efficiente strumento di stima probabilistica del rischio. Molti vecchi BWR e i nuovi SBWR contengono ICS, per condensare il vapore generato nel core e restituirlo al sistema primario. Tuttavia solo gli SBWR includono il PCCS, per garantire la soppressione di vapore nel drywell durante un LOCA o quando le valvole di depressurizzazione livellano la pressione del vessel del reattore e del contenimento. Il livellamento è necessario, affinché l'acqua possa drenare nel vessel del reattore dalle piscine del GDCCS (Gravity Driven Cooling System), collocate molti metri sopra la cima del reattore. Il pacchetto CND è parte del pacchetto ESF.

COR Il pacchetto COR (CORe) simula la risposta termica del nocciolo e delle strutture interne del plenum inferiore, compresa la porzione della testa inferiore direttamente al disotto del nocciolo. Il pacchetto simula anche la redistribuzione dei materiali strutturali del nocciolo e del plenum inferiore durante la fusione, collasso e formazione di detriti, inclusa la rottura del vessel del reattore e il versamento di detriti nella cavità del reattore. Esso simula anche la risposta meccanica semplificata della testa inferiore del vessel al differenziale di pressione tra il plenum inferiore all'interno del vessel del reattore e la cavità del reattore all'esterno del vessel

All'interno di una singola cella del nocciolo, possono essere rappresentate diverse strutture come componenti distinte. Citiamo, ad esempio, pellet di combustibile, guaine, deflettori, barre di controllo. Allo stesso modo si possono rappresentare detriti solidi e letti di

materiale fuso. Ciascun componente può essere composto da diversi materiali mantenuti all'equilibrio termico.

Per ciascun componente di una cella, vengono simulati i più importanti processi di scambio termico. Si tiene conto dell'irraggiamento tra le varie componenti di una cella e tra le celle, in direzione assiale e radiale, così come l'irraggiamento alle strutture di contenimento (pareti del vessel e plenum superiore, modellate dal pacchetto HS) e all'acqua in fase liquida.

E' simulata la conduzione in ciascuna delle componenti, così come la conduzione/irraggiamento attraverso il gap tra combustibile e guaina. La trasmissione di calore per convezione al fluido presente in volumi di controllo adiacenti è simulata per un ampio range di condizioni del fluido e di temperature delle superfici strutturali, inclusa l'ebollizione nucleata e a film.

Il pacchetto simula l'ossidazione della zircaloy e dell'acciaio per entrambi i casi limite nei quali si verifichi la diffusione allo stato solido di ossigeno attraverso lo strato di ossido e la diffusione gassosa di vapore e ossigeno attraverso la miscela di gas. Viene simulata anche la reazione del B_4C col vapore.

Il modello di degenerazione del nocciolo è in grado di trattare:

- reazione eutettiche, che conducano alla liquefazione per temperature al di sotto del punto di fusione;
- reazioni di dissoluzione, che conducano a significative dislocazioni del combustibile, per temperature al di sotto della temperatura di fusione del UO_2 ;
- candling di materiale fuso e formazione e dislocazione di detriti solidi.

Nuova in MELCOR 2.X.X è la simulazione della convezione all'interno di letti di materiale fuso, sia nel core che nel plenum inferiore. Il modello è stato esteso, per tener conto della separazione dei letti di ossido fuso dai letti di metallo fuso, divisione dei radionuclidi tra fasi di ossido e metalliche, distribuzione uniforme di composizione ed entalpia attraverso una piscina di materiale fuso, trasferimento di calore tra materiale fuso e lo strato solido sottostante, formazione e movimento di ostacoli localizzati, all'interno di una cella. Esiste la possibilità di aggiornare variabili geometriche, quali superfici e volumi, per tener conto della variazione della geometria del nocciolo per effetto della degradazione e di modellare la variazione di resistenza idrodinamica dovuta alla reallocazione dei materiali.

CVH Il pacchetto CVH (Control Volume Hidrodynamics), insieme al pacchetto FL (Flow Path), ha il compito di simulare il comportamento termoidraulico di acqua, vapor d'acqua e gas.

I processi termoidraulici intervengono in tutti gli aspetti della fenomenologia incidentale. In MELCOR, i pacchetti CVH e FL forniscono le condizioni al contorno per altri pacchetti fenomenologici, come BUR, CAV, COR, FDI e HS. Questi pacchetti di volta in volta costituiscono sorgenti o pozzi di energia e massa per CVH. COR e HS determinano anche delle variazioni nello spazio disponibile per i materiali fluidi.

La scelta nella costruzione dei modelli implementati in CVH ed FL è frutto di un compromesso tra richieste spesso in conflitto tra loro. I pacchetti devono essere veloci computazionalmente, ma anche affidabili e precisi. Non devono penalizzare le prestazioni di altri pacchetti. Devono permettere grande flessibilità nella nodalizzazione, per facilitare studi di sensitività, devono estrarre il massimo delle informazioni da nodalizzazioni grossolane e, ad un tempo, permette nodalizzazioni raffinate per comparazioni con codici più sofisticati.

Il metodo di calcolo scelto è del tipo volume di controllo - traiettoria di flusso simile a quanto implementato in RELAP4, HECTR, CONTAIN.

Tutti i materiali fluidodinamici e la loro energia risiedono in volumi di controllo. Con materiali fluidodinamici, si intendono il refrigerante (acqua), il vapore e i gas incondensabili. Non sono inclusi il nocciolo, i detriti, le strutture, i prodotti di fissione, aerosol o film d'acqua su superfici. I materiali fluidodinamici sono divisi in due campi indipendenti, ai quali si fa riferimento come piscina e atmosfera. I nomi sono suggeriti dalla intuitiva rappresentazione, comunemente usata, che vuole, per effetto della gravità, l'acqua raccogliersi sul fondo, tuttavia la reale interpretazione è meno rettilinea. La forma del volume è descritta con dettaglio sufficiente a determinare l'altezza del livello della piscina. Al di là di questo un volume di controllo non ha struttura interna ed è caratterizzato da una sola pressione e da due temperature, una per la piscina, una per l'atmosfera.

I volumi di controllo sono connessi da traiettorie di flusso attraverso le quali i materiali fluidodinamici possono muoversi senza stazionare, guidati da equazioni dei momenti per ciascun campo. Ciascun volume di controllo può essere connesso ad un numero arbitrario di altri volumi e sono permesse traiettorie di flusso parallele, che connettano la stessa coppia di volumi. Non ci sono restrinzioni alla rete di connessione, che si può in questo modo costruire. Piscina e atmosfera, la sola piscina o la sola atmosfera possono attraversare una traiettoria di flusso, dipendentemente dall'elevazione della giunzione rispetto al livello della piscina.

I volumi di controllo possono essere usati, per simulare sistemi fisici in innumerevoli modi. In alcuni casi i volumi di controllo possono rappresentare serbatoi e le traiettorie di flusso le tubazioni, di volume trascurabile, che li connettono. In altri casi possono rap-

presentare regioni geometriche di volumi fisici più grandi, con le tragiettorie di flusso a rappresentare ideali superfici di separazione interposte tra volumi di controllo adiacenti. In quest'ultimo caso si può pensare di costruire un'approssimazione alle differenze finite di un'equazione a una, due o tre dimensioni. Tuttavia, poiché l'equazione dei momenti per ciascuna tragiettorie è solo unidirezionale e poiché non c'è momento associato ad un volume di controllo, la rappresentazione non è fisicamente realistica.

Calcoli, effettuati in altri pacchetti, possono generare sorgenti e pozzi di energia nei volumi di controllo o cambiare il volume di spazio fisico accessibile ai materiali fluidodinamici. Questi effetti sono implementati come condizioni al contorno numericamente esplicite. Oltre alle sorgenti di calore dal pacchetto DCH, le sorgenti o pozzi di massa ed energia includono calore da HS, COR, CAV e FDI, acqua dalla condensazione o evaporazione di film o fusione di ghiaccio in HS o deposizione di goccioline di aerosol in RN, varie sorgenti di gas dal degasamento di strutture in HS o ablazione di calcestruzzo da CAV

La chimica delle ossidazioni in COR e BUR è modellata a costituire pozzi di reagenti e sorgenti di prodotti di reazione. Variazioni nel volume fisico accessibile ai materiali fluidodinamici sono conseguenze di fenomeni come il candling, collasso del nocciolo, che sposta materiali non fluidodinamici dentro o fuori da un volume di controllo.

DCH Il pacchetto DCH (Decay Heat) determina la generazione di calore dal decadimento dei prodotti di fissione. La potenza di decadimento è calcolata per i prodotti di fissione, che:

- sono presenti nei materiali del nocciolo;
- nei materiali della cavità del reattore;
- negli aerosol, sospesi o depositati; e
- nei vapori.

I livelli di calore di decadimento in funzione del tempo sono accessibili in MERCOR come una funzione ausiliaria, che può essere chiamata da altri pacchetti fenomenologici. Il pacchetto DCH non è coinvolto nei calcoli di prodotti di fissione o di reazioni chimiche. Questi processi sono simulati dal pacchetto RN.

Alla generazione della potenza totale di decadimento contribuiscono sia i radionuclidi presenti nel nocciolo e nella cavità, al momento dello shutdown, sia i loro figli. Nel calcolo, il pacchetto DCH non tratta esplicitamente le singole catene di decadimento. Tracciare dettagliatamente ogni catena sarebbe troppo oneroso in termini di mole di calcolo. Quando il pacchetto RN è attivo, la potenza di decadimento è calcolata per ogni classe di radionuclidi usando tabelle precalcolate con ORIGEN. Se il pacchetto RN non è attivo, la potenza

di decadimento dell'intero sistema è calcolata con uno dei molti modi possibili specificati dall'utente.

EDF Il pacchetto EDF (External Data File) è uno strumento, attraverso il quale MELCOR di accede ai file esterni, i quali contengano serie storiche di dati.

A ciascun run di MELCOR, possono essere definiti uno o più di questi file. Ciascuno di essi conterrà una successione di record ciascuno dei quali riporterà valore del tempo e in corrispondenza valori di una o più variabili dipendenti, che saranno in questo modo delle funzioni del tempo.

I dati possono essere scritti su o letti da ciascun file. La direzione del flusso di dati è definita da MELGEN. Il pacchetto EDF ha la piena responsabilità di aprire, posizionare i file e di scrivere su o leggere da essi.

I dati, che sono stati letti da EDF, sono poi accessibili a tutti i pacchetti di MELCOR.

L'uso principale del pacchetto EDF è facilitare l'input di dati, che definiscano sorgenti e condizioni al contorno dipendenti dal tempo, particolarmente in casi, nei quali la mole di dati sia tale, per cui ricorrere a funzioni tabulari sarebbe impraticabile o comunque esporrebbe al rischio di commettere errori

Questi file di input possono:

- essere stati generati da altri run di MELCOR;
- essere stati generati da altri codici; o infine
- essere input per altri tool di simulazione.

EXEC Il pacchetto EXEC (Executive) ha la funzione di unità di controllo e il compito di gestire l'esecuzione di MELGEN e MELCOR. EXEC coordina i vari processi e la chiamata dei diversi pacchetti, incluso:

- la gestione dei file;
- il processamento dell'input e dell'output;
- la modifica dei coefficienti di sensitività;
- la selezione dei passi temporali;
- il tempo di avanzamento e;
- il termine dei calcoli.

FCL Il pacchetto FCL (Fan Cooler) è parte del pacchetto ESF e tratta il trasferimento di massa e calore associati con i fan cooler. Nel pacchetto è implementato un modello basato sul modello presente nel codice MARCH 2.0

FDI Il pacchetto FDI (Fuel Dispersal Interactions) simula:

- espulsioni in bassa pressione di combustibile fuso dal vessel del reattore nella cavità del reattore;
- espulsioni di combustibile fuso ad alta pressione con la possibilità di dispersione dei detriti nel volume e sulle superfici del contenimento.

La possibilità di esplosioni di vapore, per interazione del combustibile col refrigerante non è contemplata.

Durante l'espulsione in bassa pressione, il calore è trasferito dal combustibile fuso alla piscina d'acqua (se presente nel volume di controllo associato), quando esso fuoriesce e precipita sul pavimento della cavità. Il trasferimento di calore avviene normalmente per irraggiamento, ma è prevista una frazione per convezione. Tutta l'energia trasferita dal combustibile fuso è usata per far bollire l'acqua, il calore sensibile è trascurabile. In assenza d'acqua, il materiale passa attraverso il pacchetto FDI, senza rimozione d'energia.

Se la velocità del materiale espulso dal vessel del reattore eccede un valore critico, definito da un opportuno parametro di sensibilità, o se l'utente ha esplicitamente attivato l'opzione relativa, l'espulsione di materiale viene trattata col modello ad alta pressione. I processi simulati includono:

- l'ossidazione delle componenti metalliche del materiale espulso, per esposizione all'ossigeno e al vapore;
- la deposizione sulle superfici del materiale in sospensione; e
- il trasferimento di calore all'aria e alle superfici di deposizione.

FL Il pacchetto FL (Flow Path) stabilisce le connessioni tra i volumi di controllo determina le caratteristiche della rete attraverso la quale i materiali fluidodinamici possono fluire da un volume di controllo e l'altro. Nel fluire i materiali possono termicamente riequilibrarsi, condensare od evaporare. Questi possibili processi sono governati da modelli ereditati dal codice SPARC90.

Oltre alla geometria delle traiettorie di flusso, il pacchetto FL richiede che sia assegnata la resistenza al flusso, incluse le perdite di carico associate alle pareti e i volumi di con-

trollo e agli ostacoli generati per dislocazione di detriti dal pacchetto COR. C'è ancora la possibilità di usare modelli speciali, che simulino interventi esterni di valvole e pompe.

- HS** Il pacchetto HS (Heat Structure) calcola la conduzione di calore attraverso una struttura fisica solida senza soluzioni di continuità e il trasferimento di energia, attraverso le sue superfici esterne, ai volumi di controllo. Una Heat Structure è da intendersi come una struttura solida intatta, elementare con possibilità di conduzione di calore monodimensionale. Una Heat structure ha due superfici limite (sinistra e destra, per geometria piana, interna ed esterna, per geometria cilindrica, sferica o emisferica), sulle quali vanno imposte specifiche condizioni al contorno. Le Heat strutture sono molto versatili e possono essere usate per simulare componenti interne e pareti di un vessel, strutture di contenimento, barre di combustibile con generazione di calore, tubi di generatori di vapore, pareti di tubature etc...
- MP** Il pacchetto MP (Material Properties) determina le proprietà fisiche dei materiali, che sono richieste dai pacchetti fenomenologici. Tali proprietà sono calcolate usando leggi analitiche, correlazioni e tabelle. L'utente può definire nuovi materiali e le loro proprietà, così come sovrascrivere le proprietà di materiali standard.
- NCG** Il pacchetto NCG (NonCondensable Gas) determina le proprietà dei gas incondensabili all'interno dei volumi di controllo. Questi sono trattati come gas ideali e sono caratterizzati dal peso molecolare, dall'energia interna e dal calore specifico a volume costante, che viene determinato, in funzione della temperatura, tramite una funzione polinomiale, i coefficienti della quale possono essere specificati dall'utente.
- H2O** Il pacchetto H2O valuta le proprietà dell'acqua, basandosi sulle funzioni di stato di Keenan e Keyes estese alle alte temperature usando le tabelle termochimiche JANAF. H2O come NCG e CVT fa parte del pacchetto EOS (Equation Of State) e non richiede input da parte dell'utente
- PAR** Il pacchetto PAR (Passive Autochatalytic Recombiner) calcola la rimozione di idrogeno dall'atmosfera per l'azione di device passive. In PAR è implementato il modello parametrico di Fisher, valido per la gran parte degli strumenti di questo tipo. L'utente è chiamato a fornire in input i coefficienti di correlazione, che sono poi usati nelle equazioni del modello, per calcolare il flusso di gas attraverso l'unità. Partendo dal flusso di gas, dall'efficienza dello strumento, dal tempo di rilassamento, e dal tempo di ritardo (parametri forniti dall'utente), nota la frazione molare, calcolata internamente, si può determinare il tasso di reazione per l'unità. Il tasso è poi moltiplicato per il corrente passo temporale e per il

numero di PAR presenti in modo da ottenere le variazioni in massa di idrogeno ossigeno e vapore.

RN Il pacchetto RN (RadioNuclide) simula il comportamento di aerosol e vapori di prodotti di fissione, incluso il rilascio dal combustibile e dai detriti, la dinamica degli aerosol con condensazione e rivaporizzazione, deposizione sulle superfici delle strutture, trasporto attraverso le tragliettorie di flusso, rimozione attiva strumentale. Il pacchetto ha la capacità di tener conto di reazioni chimiche elementari controllate dall'utente.

Le condizioni al contorno per il pacchetto sono fornite da altri pacchetti: informazioni sui fluidi sono fornite dal CVH, le temperature del combustibile e dei detriti sono fornite da COR e CAV e la temperatura superficiale delle strutture è fornita da HS. COR e CAV rendono accessibili informazioni sulla reallocazione di masse di detriti, permettendo a RN di calcolare la reallocazione di prodotti di fissione non rilasciati. Allo stesso modo l'avvezione di radionuclidi tra volumi di controllo è determinata da CVH e il lavaggio di radionuclidi depositati sulle Heat Structure è determinato dal drenaggio di film d'acqua calcolati da HS. Quando richiesto RN determina il calore di decadimento per il corrente inventario di radionuclidi accedendo a DCH

SPR Il pacchetto SPR (Containment Spray) calcola il trasporto di massa e calore tra le goccioline d'acqua in sospensione e l'atmosfera dell'edificio di contenimento. Il modello usato è lo stesso del codice HECTR 1.5. Il modello assume, tra le altre cose, che le goccioline siano isoterme e sferiche, che precipitino a velocità costante e che non ci sia componente orizzontale della velocità.

Ogni volume di controllo può contenere un numero arbitrario di spray. La sorgente d'acqua di uno spray può essere la piscina di un qualunque volume di controllo oppure non essere assegnata. Si può stabilire il livello minimo d'acqua perché la sorgente sia attiva. Se l'acqua della sorgente contiene radionuclidi disciolti, non è contemplata la possibilità che questi siano trasportati con l'acqua e spruzzati.

TF Il pacchetto TF (Tabular Function) permette all'utente di definire tabelle di coppie di valori da assegnare ad arbitrarie variabili, dipendenti indipendenti, e di specificare le condizioni di estrapolazione. Queste tabelle sono poi acquisite dai pacchetti di MELCOR, come specificato dall'utente tramite input. L'uso comune delle tabular function include: specificare la potenza termica di decadimento; le sorgenti di massa ed energia per i volumi di controllo; le velocità nelle tragliettorie di flusso in funzione del tempo; definire le condizioni al contorno per le Heat Structure. Anche le funzioni di controllo possono accedere alle TF per specificare relazioni funzionali tra arbitrarie coppie di variabili,

Le funzioni tabulari sono definite da coppie di variabili indipendenti e dipendenti. Il valore della funzione è calcolato per interpolazione lineare tra i dati tabulati.

Nella maggior parte delle situazioni, le coppie di dati sono disposte in modo che la variabile indipendente costituisca una successione monotona crescente. Tuttavia è possibile introdurre delle funzioni gradino inserendo due o più valori uguali della variabile indipendente.

TP Il pacchetto TP (Transfer Process) fornisce un'interfaccia standard che permette ai vari pacchetti fisici di scambiare tra loro massa ed energia.

La massa può cambiare composizione quando attraversa il pacchetto TP. Questa proprietà, originariamente introdotta per altri scopi, viene utilizzata per gestire interfacce imperfette tra i vari pacchetti o tra un pacchetto e un file di dati esterni.

La maggior parte di questi pacchetti può essere attiva o inattiva durante una simulazione. EXEC, CVH e CVT alcune utilità sono sempre attive qualunque sia lo scopo del calcolo. Di default la maggior parte degli altri pacchetti è inattiva. Per esempio, BUR è normalmente disattivato, ragion per cui la combustione non sarà presa in esame senza che sia esplicitamente chiesto con attivazione del pacchetto. Nell'analisi completa di un incidente in un impianto nucleare di potenza tutti i pacchetti devono essere attivati.

Sebbene il codice sia stato concepito per simulare l'evoluzione di incidenti in reattori nucleari ad acqua leggera, le capacità di MELCOR sono sufficientemente flessibili da renderlo utilizzabile all'analisi di sistemi che non siano impianti nucleari di potenza. Nato come un codice per la valutazione probabilistica di rischio, MELCOR è visto oggi come uno strumento primario per calcoli di termini di rilascio (Leak Peak Factors). Quando si vogliono studiare LPF per impianti, che non coinvolgano reattori nucleari, i moduli da lasciare attivi sono quelli che permettono di simulare rilascio e trasporto di aerosol, i più comunemente usati sono:

- Executive Package (EXEC)
- NonCondensable Gas Package (NCG)
- Control Volume Hydrodynamics Package (CVH)
- Flow Path Package (FL)
- Heat Structures Package (HS)
- RadioNuclide Package (RN)
- Control Function Package (CF)

- Tabular Function Package (TF)

Capitolo 2

Implementazione e Portabilità

2.1 Migrazione da MELCOR 1.8.6 a MELCOR 2.X.X

MELCOR è stato sviluppato in FORTRAN 77 fino alla release 1.86. Da quando il progetto MELCOR è iniziato, il linguaggio FORTRAN si è evoluto in modo significativo e, al giorno d'oggi, tutte le piattaforme, o la stragrande maggioranza di esse, supportano il FORTRAN 95.

MELCOR 2.X.X nasce sostanzialmente il porting dell'originale codice sorgente sul più moderno FORTRAN 95, per rendere più agevole lo sviluppo e la manutenzione del codice. Tutti i futuri sviluppi, riguarderanno MELCOR 2.X.X, quindi una migrazione alla release più recente è auspicabile. La maggior parte degli algoritmi sono rimasti immutati, così che le funzionalità di MELCOR 1.8.6 e MELCOR 2.X.X sono le stesse, nel senso che non sono stati implementati modelli nuovi. Le novità introdotte sono a livello di architettura del codice e trasparenti all'utilizzatore, per il quale le maggiori difficoltà stanno nel nuovo formato degli input deck. La struttura del file di input è più orientata agli oggetti e i record hanno una diversa sintassi, così che i file di input scritti per precedenti versioni di MELCOR non sono direttamente utilizzabili nelle versioni più recenti ed è necessario un sostanziale processamento.

Gli sviluppatori di MELCOR hanno allo scopo realizzato degli Input Deck Converter, che agevolano il compito, anche se al momento il processo non è stato completamente automatizzato.

2.2 MELCOR su diverse architetture e piattaforme

Le più recenti release di MELCOR sono state compilate usando l'Intel Visual FORTRAN, che ha rimpiazzato il Compaq Visual FORTRAN, questo ha portato il vantaggio di

- avere binari nativi per architetture sia a 32 che a 64 bit;

- una migliore aderenza agli standard del FORTRAN 95; e
- un più consistente supporto per Linux, col risultato di una piena portabilità

MELCOR viene distribuito come binario precompilato, il codice sorgente non è accessibile, quindi non è stato possibile testarlo con altri compilatori.

I binari distribuiti sono compilati staticamente: non si sono finora riscontrati problemi per mancata presenza di dll (Windows) o shared objects (Linux).

I binari per Windows, hanno superato i test sulle diverse versioni di windows. Su linux è stato possibile testare solo binari a 32 bit, che girato con successo anche su piattaforme a 64 bit.

Bibliografia

- [1] Gauntt, R. O. (2000a) et al. MELCOR Computer Code Manuals, Vol. 1: Primer and Users' Guide, Version 1.8.5, NUREG/CR-6119 Rev. 2, SAND2000-2417/1, May 2000.
- [2] Gauntt, R. O. (2000b) et al. MELCOR Computer Code Manuals, Vol. 2: Reference Manuals, Version 1.8.5, NUREG/CR-6119 Rev. 2, SAND2000-2417/2, May 2000.
- [3] Gauntt, R. O. (2001) et al. MELCOR Computer Code Manuals, Vol. 3: Demonstration Problems, Version 1.8.5, NUREG/CR-6119 Rev. 0, SAND2001-0929P, May 2001.
- [4] Gauntt, R. O. (2008) et al. MELCOR Computer Code Manuals, Vol. 1: Primer and Users' Guide, Version 2.0.0, Working Version (Dec/29/2009), Revision 1237, Sandia National Laboratories, May 2008.
- [5] Gauntt, R. O. (2008) et al. MELCOR Computer Code Manuals, Vol. 2: Reference Manuals, Version 2.0.0, Working Version (Oct/19/2009), Revision 1237, Sandia National Laboratories, May 2008.
- [6] DOE, U.S. Department of Energy (2004). MELCOR Computer Code Application Guidance for Leak Path Factor in Documented Safety Analysis, (May 2004).
- [7] Gieseke J.A., Evaluation, U.S. Nuclear Regulatory Commission. Office of Nuclear Regulatory Research. Division of Accident, Laboratories, Battelle Memorial Institute. Columbus: Source term code package: a user's guide (Mod 1), Division of Accident Evaluation, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1986
- [8] RELAP4/MOD5 A Computer Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors and Related Systems User's Manual, Volume 1, RELAP4/MOD5 Description, ANCR-NUREG-1335, Idaho Nuclear Engineering Laboratory, Idaho Falls, ID (September 1976).
- [9] S. E. Dingman, et al., HECTR Version 1.5 User's Manual, NUREG/CR-4507, SAND86-0101, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (April 1986).

- [10] K. K. Murata, et al., Code Manual for CONTAIN 2.0: A Computer Code for Nuclear Reactor Containment Analysis, NUREG/CR-6533, SAND97-1735, 1997.