

PROGRAMAS DE CÁLCULO PARA SIMULADORES DE TREINAMENTO E DE ENGENHARIA

ANIBAL N. GEBRIM⁽¹⁾, ANTÔNIO C. DE O. BARROSO⁽¹⁾ E FLAVIO DE ARAUJO F⁽²⁾
⁽¹⁾ Instituto de Pesquisa Energética Nuclear (IPEN-CNEN/SP) Coordenadoria para Projetos Especiais COPESP
Av. Prof. Lineu Prestes 2242 CEP 05508 - São Paulo - SP

RESUMO

Este trabalho apresenta um resumo das principais características dos sistemas de cálculos usados nos principais simuladores para plantas nucleares PWR e BWR. Foram abordados os modelos termohidráulicos, os computadores necessários e a validação dos códigos.

INTRODUÇÃO

Nos últimos 15 anos os requisitos impostos aos simuladores de treinamento tornaram-se muito mais exigentes. Isto gerou a necessidade de modelos mais complexos, fundamentados em princípios básicos e com capacidade de representar a quase totalidade dos fenômenos possíveis de ocorrer nas situações normais e de acidente. Também os procedimentos de qualificação e validação tornaram-se mais extensivos e abrangentes, como é recomendado pela EPRI nas publicações "Analytic Simulator Qualification Methodology" e "Simulator Qualification Plan".

Após o acidente TMI-2, surgiu a tendência de se incorporar as ferramentas de análise de segurança interfaces gráficas e facilidades de se incluir ações do operador e falhas mecânicas durante a simulação, criando os analisadores de planta ou simuladores de engenharia.

Os fatos acima comentados fizeram com que os modelos usados nos simuladores de treinamento e nos de engenharia se aproximassem bastante daqueles usados nos códigos de análise de acidentes das séries RELAP, TRAC, CATHARE, etc.

Neste trabalho procura-se apresentar uma visão global das características dos principais produtos disponíveis tanto para analisadores de planta como simuladores de treinamento. Ao fim do trabalho apresenta-se uma tabela que sumariza os tópicos discutidos.

DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE CÁLCULO EXISTENTES

1. O BWR Plant Analyser do Brookhaven Nacional Laboratory (BNL). O BNL desenvolveu um analisador de planta para reatores BWR e que será possivelmente estendido para PWRs. A principal característica desta ferramenta de cálculo é a sua alta velocidade de simulação. Isso foi obtido a partir das seguintes considerações:

- . selecionar o modelo termohidráulico bifásico mais simples que permita representar as informações experimentais relevantes e todos os processos de interesse;
- . eliminar do modelo selecionado os fenômenos irrelevantes;
- . fazer o máximo possível de integrações analíticas e avaliar as soluções analíticas dinamicamente durante a simulação;
- . evitar iterações, substituído-as por interpolações e resultados pré-tabulados.
- . combinar, avaliar e pré-tabular variáveis de estados, propriedades materiais e correlações constitutivas.

De acordo com a primeira consideração, o BNL selecionou o modelo de quatro equações mais o modelo de 'drift', que consiste do balanço de massa para o gás e de três equações de balanço para a mistura da massa, momento e energia.

Deprezou-se os efeitos acústicos no líquido e computou-se todas as propriedades físicas do fluido através da pressão média do volume total, conforme a segunda consideração.

Integra-se analiticamente a equação do momento sobre todo circuito fechado, eliminando as pressões intermediárias, atendendo a terceira consideração.

O código utiliza um método de integração explícito.

O analisador de plantas foi implementado num PDP-11/34 com dois processadores paralelos AD10. Cada um deles constituído de sete microprocessadores, com memória própria.

O código vem sendo validado através de comparação com códigos já estabelecidos TRAC-BD1, RELAP5 e RAMONA-3B. Como exemplos de validação pode-se citar:

- . trip na turbina com e sem bypass;
- . fechamento das válvulas de isolamento do vapor;
- . partida inadvertida da bomba de suprimento;
- . desligamento e falha no desligamento do reator;
- . queda das barras de controle;
- . perda de água de suprimento;
- . falha no regulador de pressão;
- . falha no controle da bomba de recirculação;
- . desligamento das bombas de recirculação.

2. TREAT. A Westinghouse desenvolveu um programa de cálculo termohidráulico em tempo real, chamado TREAT, para analisar transientes operacionais com possível ação do operador.

Os modelos inseridos no TREAT consideram fluido não homogêneo e sem equilíbrio entre as fases, tendo capacidade portanto para prever respostas do sistema durante uma condição de alta volatilização, característica de pequenos LOCAs.

Cada volume de controle contém duas regiões separadas, vapor e líquido. As propriedades do fluido em cada região são resolvidas independentemente. Cinco equações de conservação são utilizadas para descrever o comportamento do fluido (duas equações de massa, mistura e vapor, duas equações de energia, mistura e vapor e uma equação de momento para a mistura).

Para reduzir a complexidade do conjunto de equações e permitir uma simulação em tempo real, algumas simplificações foram feitas. A propriedade do fluido em cada subsistema isolado, como o primário ou secundário, é computada usando-se a pressão global do sistema. As vantagens desta simplificação são a redução no tempo de computação e o aumento da estabilidade da solução. A desvantagem é que ondas acústicas não podem ser avaliadas sem equações auxiliares. Um processo iterativo é usado para computar a pressão global. O modelo de drift é usado para calcular as vazões do vapor e líquido. O conjunto de equações é resolvido por um método semi-implícito (Predictor Corrector Method).

O processo de validação baseia-se na comparação com resultados de outros códigos já avaliados pela NRC e também na comparação de dados operacionais de transitórios e acidentes em

plantas nucleares de que a Westinghouse dispõe. Os eventos operacionais incluem :

- . scram manual;
- . trip em turbina;
- . rampa de potência máxima;
- . fechamento de válvulas de isolamento de vapor;
- . falha no tubo do gerador de vapor em R. E. Ginna;
- . circulação natural em Kewaunee;
- . fuga de água na selagem das bombas de refrigeração da central H. B. Robinson

O código é processado em Mini-computadores Gould serie 32

3. TRACS. A General Electric desenvolveu um código chamado TRACS para ser usado em simuladores de BWR. O TRACS é baseado no TRACG, que é uma versão da GE do TRAC-BWR.

O escopo do TRACS inclui acidentes como perda de refrigerante, transiente operacionais sem scram e treinamento de procedimentos operacionais de emergência.

O vaso do reator pode ser nodalizado tri- dimensionalmente em coordenadas cilíndricas ou bi-dimensionalmente em coordenadas cartesianas ou cilíndricas.

TRACS resolve um total de oito equações : equações de massa para o vapor, ar, líquido e boro, duas equações de momento para o gás e líquido e duas equações de energia para o gás e o líquido. As correlações constitutivas são calculadas dependendo do regime de escoamento, isto é, escoamento monofásico líquido, borbulhante, chum, anular ou gasoso.

Os mais importantes efeitos e fenômenos termohidráulicos simulados pelo TRACS, são:

- . circulação natural e forçada;
- . fluido simples e a duas fases, incluindo não-equilíbrio termodinâmico;
- . acompanhamento do nível de mistura;
- . limitação de contra corrente (CCFL);
- . descobrimento do núcleo do reator;
- . injeção do sistema de refrigeração de emergência;
- . reação metal-água e liberação de hidrogênio.

As expressões algébricas para propriedade e correlações constitutiva foram reescritas como uma tabela interpolável.

A validação para diversos eventos é feito seguindo a metodologia do EPRI para qualificação de simuladores de treinamento. Os transientes usados para validação são:

- . trip de turbina ;
- . isolamento das válvulas da linha de vapor sem scram;
- . perda de água de alimentação sem HPCS (high pressure core spray system) e RCIC (reactor core isolation cooling);
- . quebra na linha de recirculação sem HPCS e RCIC;
- . quebra na linha de recirculação com um LPCI (low pressure colant injection) e falhas no ADS (automatic depressurization system);
- . quebra na linha de vapor com um LPCI e falhas no ADS;
- . trip e partida nas bombas de recirculação

O código foi inicialmente implementado num CRAY-XMP

4. RETACT. O programa de cálculo RETACT (Real-Time Advanced Core and Thermohydraulic) foi desenvolvido pela LINK e tornou-se operacional em 86 após uma série de testes de validação. A LINK passou a incorporá-lo nos seus simuladores de treinamento para operadores de centrais nucleares. Uma versão de 'Plant Analyser', com aplicações em engenharia e estudos de segurança baseado no RETACT, está disponível. O programa de cálculo é aplicável tanto para PWRs como BWRs.

O modelo termohidráulico é baseado na solução de nove equações de conservação para cada volume de controle, estas são: equação de massa para o vapor, líquido, gases não condensáveis e boro, equação de energia do gás e da mistura, equação da radioatividade no gás e líquido e finalmente equação de momento para a mistura.

Estas equações são complementadas por um conjunto de equações constitutivas para a transferência de calor e massa nas interfaces, área interfacial, mistura de nível, coeficientes de transferência de calor, operação de bombas, escoamento crítico, etc.

Os modelos termohidráulicos inseridos no programa pode simular uma serie de fenômenos físicos, como:

- . circulação forçada e natural, incluindo vazão reversa, para fluido em fase simples e em duas fases;
- . velocidade do gás e líquido através dos modelos de drift;
- . formação e movimento do nível de mistura;
- . liberação e movimento de gases não condensáveis que podem ser gerados em reações químicas
- . movimentação dos elementos radioativos que possam ser liberados
- . escoamento crítico

A integração espacial da equação de momento é feita para cada circuito fechado, enquanto que as equações de massa e de energia são integradas em cada volume de controle. A integração temporal é feita explicitamente. As propriedades físicas do líquido, vapor e gases não condensáveis são funções da pressão regional e da entalpia local.

Foram usados resultados de varios experimentos realizados em instalações como LOFT, SEMISCALE, OTIS, FIRST, bem como alguns testes experimentais em reatores PWR. Abaixo lista-se os principais casos:

- . pequena quebra na perna fria (Semiscale test S-LH-1) ;
- . injeção de gases não condensáveis (OTIS 240100);
- . pequena quebra na perna fria, caso básico, (OTIS 220100);
- . quebra de tamanho intermediário da perna fria (LOFT L5-1);
- . pequena quebra na perna fria com parada de bomba (LOFT L3-5);
- . perda de carga (LOFT L6-1);
- . transientes com as bombas principais (LOFT L6-2);
- . perda de água de suprimento (LOFT L6-5);
- . mal funcionamento múltiplo (LOFT L9-1)
- . casos de circulação natural (FRIGG);
- . pequena quebra na sucção da bomba (FIRST 6SB2C);
- . grande quebra na sucção da bomba (FIRST 6DBA1B), primeiros 30 minutos do acidente TMI-2 (NSAC);
- . ruptura nos tubos de geradores de calor GINNA (INPO)

O RETACT opera em tempo real em minicomputadores Gould serie 32

5. CENTS e CENTS-BWR. A Combustion Engineering Nuclear Power desenvolveu dois códigos de simulação em tempo real, CENTS (Combustion Engineering Nuclear Transient Simulation) e CENTS-BWR para PWR e BWR respectivamente, com aplicação em simuladores e analisadores de planta. Ambos cobrem um largo espectro de situações de operação normal e acidentes severos.

O modelo termohidráulico inserido no CENTS é composto por um conjunto de cinco equações (duas para massa, duas para energia e uma para o momento). A equação do momento é integrada para cada junção e a pressão é obtida para cada volume de controle através das equações de massa e energia em um processo iterativo.

O modelo termohidráulico para o CENTS-BWR é formulado por uma série de 9 equações mais o modelo de drift, estas são: equações de massa para o líquido, mistura, gases não condensáveis e boro, equação para os elementos radioativos dissolvidos e equação de energia para a mistura, equação de entalpia para o gás e uma equação de momento para a mistura. É usado um método implícito para integrar as equações de conservação.

O programa de calculo CENTS foi validado para duas configurações. A primeira, um reator PWR com dois circuitos, foi usada para avaliar transientes com o fluido monofásico e casos em que ocorra transição de monofásico para bifásico. A segunda configuração é um sistema híbrido, onde os fenômenos termohidráulicos são comparáveis àqueles que ocorrem em um BWR.

O processo de validação constou basicamente de comparações com dados de operação e cálculos executados com códigos consagrados como o RELAP.

Os seguintes transitórios foram analisados com a primeira configuração:

- . trip no reator;
- . trip nas bombas de recirculação;
- . resposta de pressão durante a parte inicial de um pequeno LOCA;

Para a configuração compatível com reator BWR os transitórios analisados foram:

- . transiente degrau de 50% na potência e simultânea redução na rotação das bombas de recirculação.
- . rejeição de 100% de carga;
- . fechamento de 84% na válvula de isolamento do vapor principal (MSIV);

O código está implementado em minicomputadores do porte de Gould série 32.

6. SIPA (Simulator for Post Accidental operation), desenvolvido pela EDF, CEA e Thomson-CSF, tem basicamente três aplicações: simulador de treinamento, analisador de planta e estudos de segurança. SIPA descreve comportamento de um PWR em acidentes e operações normais.

O sistema primário e secundário, até o 'steam header', são descritos pelo CATHARE-SIMU, uma versão computacionalmente mais rápida do CATHARE. O CATHARE-SIMU usa as mesmas leis físicas e correlações do CATHARE, porém com algumas simplificações.

O CATHARE-SIMU, como o CATHARE, usa o modelo de dois fluidos, isto é seis equações de balanço para a massa, energia e momento de cada fase do fluido, além do que, calcula a quantidade de boro e radioatividade.

As principais modificações feitas no CATHARE foram:

- . equações do momento são colocadas na forma de soma e diferença de fases;
- . eliminação da linguagem de alto nível ESOPE (ESOPE é usado para dar completa flexibilidade na configuração);
- . tabelas termodinâmicas são reescritas por aproximações polinômiais;
- . limitação da nodalização e no passo de integração temporal;
- . modificação do critério de convergência;

As principais características do programa CATHARE-SIMU são:

- . quebra em qualquer ponto do circuito primário até diâmetros de 30 cm em um ou mais loops;
- . ruptura de até 120 tubos de um ou mais geradores de vapor;
- . transitórios operacional com ou sem trip;

CATHARE-SIMU foi validado em 35 transientes, comparado com o CATHARE ou com dados de plantas reais em transiente operacionais.

O SIPA está presentemente implementado em um CRAY-XMP e em minicomputador GOULD 32/8730. Versões para workstations estão em testes.

7. SIMULADOR do ATR. O centro de simulação do INEL, Idaho National Engineering Laboratory, vem trabalhando em dois projetos: um simulador de engenharia para o ATR (Advance Test Reactor) e o sistema de controle do EBR II. Dois componentes do ATR são: RELAP5 e NPA (Nuclear Plant Analyser). O NPA fornece uma interface interativa e saídas gráficas entre o usuário e o código RELAP.

No código base RELAP5 foram feitas tentativas de vetorização e paralelismo para acelerar o processamento. O processamento paralelo deu melhores resultados que a vetorização, conseguindo obter tempo real na simulação de um pequeno LOCA com um CRAY-XMP-48.

Na versão atual, o simulador de engenharia do ATR, utiliza o RELAP5/Mod 3, que apresenta os seguintes melhoramentos em relação ao seu antecessor, Mod 2.

- . limitação do fluido em contra-corrente;
- . transferência de calor na fase de reinundação;
- . estratificação vertical e horizontal;

- . reação água-metal;
- . modelo de transferência de calor por radiação;
- . 'deentrainment' no plenum superior;
- . melhoramento no modelo de não-condensáveis;
- . modelo de vazão crítica;
- . condensação em tubos horizontais;

O código processa em computador CRAY da série XMP

8. APROS. O centro de pesquisa da Finlândia, Technical Research center of Finland, junto com a firma Inatra Voima Oy (IVO), desenvolveu um analisador de plantas baseado no sistema APROS (Advanced PROCESS Simulator). Este sistema é hoje aplicado na planta nuclear do tipo soviético VVER-400, Loviisa.

O sistema APROS prevê dois tipos de interface com o usuário, uma através de uma workstation que contém uma biblioteca de símbolos dos componentes, outra através de um terminal comum de computador, usando para isto a linguagem de comandos do sistema. A biblioteca de modelos inclui modelos físicos para o fluido, transferência de calor, reações químicas ou nucleares bem como diferentes conjuntos de modelos de componentes para processo, automatização e sistemas elétricos.

O sistema APROS contém quatro diferentes tipos de modelos termohidráulicos unidimensionais (monofásico, modelo homogêneo, modelo de 5 equações e modelo de seis equações) e um modelo tridimensional (balanço de massa e energia para a mistura e uma equação tridimensional para o momento). Há também um modelo de concentração de boro. As propriedades materiais são calculadas através de tabelas.

A validação baseia-se na comparação com dados operacionais e de transientes da planta Loviisa e através de comparações com os códigos licenciados.

Foram usados os seguintes dados de transitórios da planta Loviisa:

- . balanço de planta (100%, 92% e 75% de potência);
- . teste de degrau de carga;
- . trip em duas bombas de recirculação;
- . trip em duas bombas do primário;
- . trip na turbina;
- . quebra na linha de suprimento do secundário;
- . transiente de alto resfriamento do primário;

As comparações com os códigos licenciados, foram feitas para os seguintes casos:

- . quebra na linha de vapor;
- . pequeno LOCA;
- . abertura na válvula de segurança do primário;
- . grande LOCA;
- . retirada das varas de controle

O analisador de planta de Loviisa foi instalado em diferentes computadores CRAY e Alliant, bem como workstations DEC, HP e SUN. A memória requerida depende do tamanho do modelo, dos parâmetros do sistema e velocidade de operação desejada. Valores típicos são de 5 a 15 Mbytes de memória e 25 Mbytes de disco. No caso de se estar usando saída de gráfico, os requisitos de memória pode dobrar.

Os requisitos de velocidade dependem do tipo de operação desejada. Para cálculos 'off line', máquina de 1 a 5 MFlops são suficientes. Para simulação em tempo real, máquinas de 10 a 25 MFlops seriam necessárias.

9. ATLAS. O analisador de planta alemão. ATLAS (ATHLET Analysis Simulator), desenvolvido conjuntamente pelo GRS (Gesellschaft für Reaktorsicherheit) e pela Siemens, tem como base o sistema de cálculo termohidráulico ATHLET.

Os três modelos termohidráulicos que compõem o sistema de cálculo ATHLET são: ALMOD, DRUFAN e FLUT. O modelo computacionalmente mais rápido e mais simples é o ALMOD, constituído por três equações básicas (massa, momento e energia), para a mistura. A equação do momento é integrada para cada circuito fechado e a pressão é avaliada para todo o sistema. O segundo modelo

disponível é o DRUFAN, que faz uso de quatro equações : duas de massa (vapor e gas), uma de energia e uma de momento para a mistura. As velocidades das fases são computadas através dos modelos de 'drift'. O terceiro e último modelo disponível é o FLUT. Formulado com o modelo de dois fluidos (seis equações), para estudar a fase de reinundação do núcleo do reator.

Usando-se do modelo inserido no ALMOD, alcançou-se tempo real na simulação de um pequeno LOCA. O método numerico de solução temporal das equações diferenciais ordinárias, adotado no ATHLET, é o FEBE (Forward Euler backward Euler).

Como exemplo de testes de validação podemos citar :

- . MARVIKEN, teste no. 22 ;
- . experimentos de quebra da linha de vapor da TOSHIBA;
- . experimentos LOBLMOD2;
- . UPTF, teste no. 11

O sistema de calculo ATLAS e os monitores estão instalados em um AMADHAL/5870 com duas estações de trabalho IBM 5080.

CONCLUSÃO

Existem claramente três linhas atuais de desenvolvimento de software para sistemas de calculos a serem utilizados em simuladores de treinamento e analisadores de plantas A primeira linha opta por um modelo termohidraulico simples, geralmente quatro ou cinco equações, com simplificações do tipo : Pressão Global ou pressões regionais para calculo das propriedades físicas e integração da equação do momento em cada circuito fechado. Este é o caso dos sistemas de calculo BNL e TREAT. Uma exceção é o sistema de calculo CENTS e CENTS-BWR, que utiliza um conjunto de cinco equações basicas, porem integra as equações do momento e da pressão localmente. A segunda linha opta por englobar em seu sistema de calculo varios modelos termohidraulicos e dependendo das características do caso a ser analisado, o usuário faz a seleção do modelo desejado. Este é o caso do sistema de calculo inserido no APROS e ATLAS. A terceira e formada pelos codigos já consagrados, como RELAP, TRAC e CATHARE Estes códigos por serem computacionalmente mais complexos, sofrem pequenas simplificações ou artificios na implementação computacional para se acelerar os calculos.

REFERÊNCIAS

- . Anderson, J. G. M., "TRACS code Achives Greater Realism", Nuclear Engineering International, vol 34, 45-47, 1987.
- . Anderson, J. G. M., "TRACS-Best Estimate Simulation Real Time", The Society for Computer Simulation International, 23-27 1990, Nashville, USA.
- . Beraha, D., "Fundamentals and Main Features of German NPA Project ATLAS", Easten Multi Conference Simulators VI, 1989, Tampa, USA

. Bourdon, A. "A nuclear Plant Analyser as a Comprehension Tool Training Courses", The Society for Computer Simulation International, April 23-27 1990, Nashville, USA.

. Charlton, T. R., "RELAP5 Based Engineering Simulator", the Society for Computer Simulation International, April 23-27 1990, Nashville, USA.

. Cheng, H. S., "Boiling Water Reactor Plant Analyser Development at BNL", Nuclear Science and Engineering 92, 144-156, 1986.

. Cheung, A. C., "The Westinghouse Transient Real-Time Engineering Analysis TOOL", Specialists Meeting on Small Break LOCA Analyses in LWRs, Vol. 2. Pisa, Italy, 23-27 June 1985.

. Espinosa, R. J., "Implication of the Loop Momentum Simplification in Full Scope Simulators", The Society for Computer Simulation International, April 23-27 1990, Nashville, USA.

. Fabric, S., "Thermal Hydraulics in Nuclear Plant Simulator", Third Int Topical Meeting on Reactor Thermo-Hydraulic, 3.a-1 - 3.a-5, Newport, USA, 1985.

. Lin, E. K., "The Link Advanced Power Plant Simulator", Int Topical Meeting on Advances in Reactor Physics Math and Computation, 27-30 April, 1987, Paris.

. Rampson, V. H., "LWR Simulation Code Research at the INEL", Specialists Meeting on LOCA Analyses in LWRs, vol 2, June 23-27 1985, Pisa, Italy.

. Sim, S. K., "CENTS-BWR : An Interactive Nuclear Power Plant Simulator for the BWR", The Society for Computer Simulation International, April 23-27 1990, Nashville, USA.

. Techendorff, V., "The ATHLET Code as Process Modell for a LWR Nuclear Plant Analyser", 1990 Simulators VII Conference, Society for Computer Simulation, Nashville, 23-29 April, USA.

. Tiihonen, O., "APROS-Based Loviisa Power Plant Analyser", Specialist Meeting on Simulators and Plant Analyser, 9-12 June 1992, Lappeenranta, Finland.

. Wulff, W., "Modeling and Numerical Techniques for High-Speed digital Simulation of Nuclear Power Plants", Antecipated and Abnormal Transients in Nuclear Power Plants, April 12-15 1987, III-II9, Georgia.

ABSTRACT

This work presents one overview of the characteristics of the codes used at the main PWR and BWR nuclear power plants simulators. The termohydraulic models, the used computers and validation process are described.

Tabela 1: Principais características dos sistemas de cálculos

Instituições	Brookhaven National Laboratory	Westinghouse Electric Corporation	GRS/Siemens	General Electric	Technical Research of Finland	Singer Company	Combustion Engineering	EDF, CEA e Thomson	Idaho National Laboratory
Sistema de calculo	BNL	TREAT	ATLAS	TRACS	APROS	RETACT	?	CATHRE-SIMU	RELAPS
Uso	Analisador de plantas	Simulador e analisador de plantas	Analisador de Plantas	Simulador e analisador de plantas	Simulador e analisador de plantas	Simulador e analisador de plantas	Simulador e analisador de plantas	Simulador e analisador de plantas	Analisador de plantas
Separação de fases e não equilibrio	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Equações basicas	2 Massa, 1 energia e 1 momento	2 massa, 1 energia e 1 momento	3, 4 ou 6 equações	2 massa, 2 energia e 2 momento	3, 5 ou 6 equações	2 massa, 2 energia e 1 momento	2 massa, 2 energia e 1 momento	2 massa, 2 energia e 1 momento	2 massa, 2 energia e 2 momento
Equação de não condensáveis	não	não	não	sim	não	sim	sim	?	sim
Equação de boro	não	não	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Equação de Radioatividade	não	não	não	não	não	sim	sim	sim	não
Equação da pressão	Global	Global	Global e Local	Local	Global e Local	Global	Local	Local	Local
Equação do momento	Integral	Local	Local e Integral	Local	Local e Integral	Integral	Local	Local	Local
Integração temporal	Explicito	Semi-implicito	Semi-implicito	Semi-implicito	Implicito	Explicito	Implicito	Implicito	Semi-implicito
Computador	PDP/AD10	Mini-computador	AMDAHL	CRAY	Diversos	Mini-computador	Mini-computador	CRAY	CRAY
Validação com LOCA	?	Pequeno	Pequeno	Pequeno	Pequeno a grande	Pequeno a grande	?	Pequeno, a grande	Pequeno a grande
tempo real em grande número de situações	sim	sim	não	sim	sim	sim	sim	sim	não