

# ÍNDICE DE CONTENIDO

---

|   |    |
|---|----|
| Resumen .....   | 11 |
| Abstract .....  | 13 |
| Capítulo 1. Criterios y bases de diseño para un Reactor Nuclear Compacto .....  | 15 |
| 1.1    INTRODUCCIÓN .....   | 15 |
| 1.2    TRAYECTORIA TECNOLÓGICA DE LOS REACTORES NUCLEARES .....                 | 15 |
| 1.3    CAPACIDADES NACIONALES EN DISEÑO DE REACTORES NUCLEARES .....            | 17 |
| 1.4    BASES DE DISEÑO PARA UN REACTOR NUCLEAR COMPACTO .....                   | 19 |
| 1.4.1    Aplicación .....   | 20 |
| 1.4.2    Potencia mínima de diseño .....  | 20 |
| 1.4.3    Selección del tipo de reactor .....                                    | 21 |
| 1.4.4    Configuraciones posibles para el RNC.....                              | 21 |
| 1.4.5    Operación y durabilidad del reactor .....                              | 24 |
| 1.4.6    Elemento Combustible y Resistencia a la Proliferación .....            | 25 |
| 1.4.7    Confinamiento y blindaje de la isla nuclear .....                      | 26 |
| 1.4.8    Circuito Secundario y Generador de Vapor .....                         | 26 |
| 1.4.9    Seguridad Nuclear y Accidentes Base de Diseño .....                    | 27 |
| 1.4.10    El concepto de “batería nuclear” y alcance del RNC.....               | 28 |
| 1.5    GRADO DE ACEPTACIÓN DEL CONCEPTO “CAREM” COMO REACTOR DE PROPULSIÓN..... | 29 |
| 1.6    CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO .....                                | 31 |
| Capítulo 2. Concepto preliminar del Reactor .....                               | 32 |
| 2.1    INTRODUCCIÓN .....   | 32 |
| 2.2    DISEÑOS DE REFERENCIA .....  | 32 |
| 2.2.1    Reactor S2W – Submarino Nautilus (EE.UU.).....                         | 32 |
| 2.2.2    Otto Hann (Alemania).....  | 33 |
| 2.2.3    Reactor MRX (Japón) .....  | 34 |
| 2.2.4    Reactores Modulares (SMR) .....  | 35 |
| 2.2.5    El reactor CAS-48 (Francia). Comparación y Análisis.....               | 36 |
| 2.3    PRIMERA PROPUESTA DE REACTOR.....  | 40 |
| 2.4    NÚCLEO DE COMBUSTIBLES TIPO “BARRA” .....                                | 42 |
| 2.5    GENERADOR DE VAPOR Y CIRCUITO SECUNDARIO .....                           | 45 |
| 2.6    CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO .....                                | 47 |
| Capítulo 3. Metodología de Diseño Neutrónico .....                              | 49 |
| 3.1    INTRODUCCIÓN .....   | 49 |
| 3.2    DESCRIPCIÓN BÁSICA DE LA LÍNEA DE CÁLCULO ADOPTADA .....                 | 50 |

|  |  |     |
|--|--|-----|
| 3.2.1  | MonteCarlo con Quemado y el <i>General Manager Code</i> .....                      | 50  |
| 3.2.2  | Verificación de la línea Monte Carlo.....  | 52  |
| 3.3  | DISEÑOS EVOLUTIVOS DE NÚCLEO .....   | 52  |
| 3.4  | DESCRIPCIÓN DEL NÚCLEO 3F .....  | 59  |
| 3.5  | NÚCLEO BASADO EN ELEMENTO COMBUSTIBLE TIPO "PLACA" .....                           | 68  |
| 3.5.1  | Descripción de los núcleos ASPIRIN I y II.....                                     | 69  |
| 3.6  | DESCRIPCIÓN DEL NÚCLEO ASPIRIN III.....  | 75  |
| 3.6.1  | Evolución del exceso de reactividad .....  | 78  |
| 3.6.2  | Gestión de los elementos de control .....  | 79  |
| 3.6.3  | Quemado promedio del núcleo y elementos combustibles .....                         | 81  |
| 3.6.4  | Distribución axial de potencia por Elemento Combustible .....                      | 81  |
| 3.6.5  | Densidades Isotópicas Y Secciones Eficaces De Gadolinio Y Hafnio.....              | 83  |
| 3.7  | VERIFICACIÓN DE CÁLCULO Y COMPARACIÓN.....   | 84  |
| 3.8  | RESUMEN Y COMPARACIÓN DE LOS NÚCLEOS ESTUDIADOS .....                              | 86  |
| 3.9  | CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO .....  | 87  |
| Capítulo 4. Metodología de Diseño TermoHidráulico .....              |  | 89  |
| 4.1  | INTRODUCCIÓN .....   | 89  |
| 4.2  | DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO TERMOHIDRÁULICO.....                             | 89  |
| 4.2.1  | Análisis de sub-canal con COBRA-IV y rutinas simplificadas. ....                   | 89  |
| 4.2.2  | Modelo simplificado para Generador de Vapor.....                                   | 92  |
| 4.2.3  | Convección natural: verificación preliminar para combustible tipo barras .....     | 94  |
| 4.2.4  | Rutinas para cálculo bajo régimen de convección natural.....                       | 98  |
| 4.2.5  | Acople Neutrónico-TermoHidráulico .....  | 101 |
| 4.2.6  | Estimación de fenómenos críticos .....   | 103 |
| 4.3  | CÁLCULO TERMOHIDRÁULICO DE NÚCLEO .....  | 104 |
| 4.3.1  | Implementación de COBRA-IV para núcleos tipo barra. Resultados.....                | 104 |
| 4.3.2  | Resultados obtenidos con Volúmenes Finitos - COBRA-IV para núcleos tipo barra..... | 107 |
| 4.3.3  | Resumen de parámetros TermoHidráulicos para núcleo tipo barra .....                | 111 |
| 4.3.4  | Resumen de parámetros TermoHidráulicos para núcleo tipo Aspirin .....              | 114 |
| 4.4  | CONSIDERACIONES FINALES DEL CAPÍTULO.....  | 119 |
| Capítulo 5. Diseño de Elementos Combustibles de Larga Duración ..... |  | 120 |
| 5.1  | INTRODUCCIÓN .....   | 120 |
| 5.2  | CRITERIOS RELATIVOS A LA SELECCIÓN DEL TIPO DE ELEMENTO COMBUSTIBLE.....           | 120 |
| 5.3  | OPERACIÓN DEL REACTOR, RAMPAS DE POTENCIA.....                                     | 123 |
| 5.4  | CRITERIOS RELATIVOS A LA OPERACIÓN NAVAL .....                                     | 128 |
| 5.5  | CRITERIOS RELATIVOS A LA OPERACIÓN DEL REACTOR, TASA DE FALLA .....                | 129 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 5.6   | DESCRIPCIÓN DE LOS COMBUSTIBLES PROPUESTOS.....                             | 131 |
| 5.6.1   | GEOMETRÍA Y CONSTRUCCIÓN DEL ASPIRIN.....                                   | 133 |
| 5.6.2   | DISEÑO DEL HUELGO DE FABRICACIÓN.....                                       | 135 |
| 5.6.3   | ASPECTOS TÉRMICOS Y EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL ASPIRIN .....                    | 139 |
| 5.6.4   | ENSAYOS Y CALIFICACIÓN DE LAS PASTILLAS .....                               | 144 |
| 5.7   | PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO BAJO IRRADIACIÓN .....                         | 150 |
| 5.7.1   | Estimación de la tensión de rotura .....                                    | 150 |
| 5.7.2   | Propiedades del UO <sub>2</sub> con el quemado .....                        | 151 |
| 5.7.3   | Expansión térmica, módulo de elasticidad del Zircaloy-4.....                | 154 |
| 5.8   | MATERIALES PARA VAINAS Y ESTRUCTURAS.....                                   | 156 |
| 5.8.1   | Aspectos del Zircaloy-4 y criterios de selección.....                       | 156 |
| 5.9   | CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO .....                                   | 158 |
| Capítulo 6. Generador de Vapor Compacto .....   |   | 160 |
| 6.1   | INTRODUCCIÓN .....  | 160 |
| 6.2   | GENERADOR DE VAPOR COMPACTO .....   | 161 |
| 6.2.1   | Análisis TermoHidráulico preliminar.....                                    | 163 |
| 6.2.2   | Separadores y secadores de vapor .....                                      | 168 |
| 6.3   | INSTALACIONES EXPERIMENTALES PARA ENSAYO DE PROTOTIPOS .....                | 169 |
| 6.3.1   | Circuito primario.....  | 170 |
| 6.3.2   | Suministro de potencia de los componentes.....                              | 174 |
| 6.3.3   | Generador de vapor prototipo .....  | 174 |
| 6.3.4   | Circuito secundario.....  | 175 |
| 6.3.5   | Selección del fluido de trabajo y calefactor para el circuito primario..... | 175 |
| 6.4   | COMENTARIOS FINALES DEL CAPÍTULO .....                                      | 178 |
| Capítulo 7. Evaluación de un Presurizador ..... |   | 179 |
| 7.1   | INTRODUCCIÓN .....  | 179 |
| 7.2   | DIMENSIONAMIENTO DEL PRESURIZADOR.....                                      | 179 |
| 7.3   | CÁLCULO DE CAMBIOS DE MASA Y POTENCIA.....                                  | 180 |
| 7.4   | VERIFICACIÓN DE TRANSITORIOS OPERACIONALES CON RELAP .....                  | 183 |
| 7.5   | OPERACIÓN DE CALEFACTORES Y DUCHAS.....                                     | 190 |
| 7.6   | CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO .....                                   | 191 |
| Capítulo 8. Diseño General del Reactor.....     |   | 192 |
| 8.1   | INTRODUCCIÓN .....  | 192 |
| 8.2   | CONFIGURACIÓN BÁSICA DEL RNC.....   | 192 |
| 8.3   | SISTEMAS ASOCIADOS AL CIRCUITO PRIMARIO .....                               | 197 |
| 8.3.1   | Sistema de presurización de primario .....                                  | 199 |

|  |  |     |
|--|--|-----|
| 8.3.2  | Sistema de control de volumen .....  | 200 |
| 8.3.3  | Sistemas de emergencias.....   | 202 |
| 8.3.4  | Sistemas de provisión de agua de mar (SPAM) y de agua desmineralizada..... | 204 |
| 8.4  | INSTRUMENTACIÓN NUCLEAR Y ARRANQUE DEL RNC.....                            | 205 |
| 8.4.1  | Descripción y clasificación básica .....                                   | 205 |
| 8.4.2  | Fuente de neutrones isotópica .....  | 212 |
| 8.4.3  | Maniobra de arranque, núcleo fresco .....                                  | 213 |
| 8.5  | DISEÑO Y LAY-OUT DEL RNC PARA EL CASCO TR-1700.....                        | 214 |
| 8.5.1  | Descripción básica del submarino Diésel-eléctrico TR-1700.....             | 215 |
| 8.5.2  | Adaptaciones necesarias para la propulsión nuclear .....                   | 217 |
| 8.5.3  | Principales recipientes, dimensiones y ubicación preliminar.....           | 220 |
| 8.6  | CONTROL DE REACTIVIDAD Y ACTUADORES.....                                   | 221 |
| 8.6.1  | Decisiones de diseño para el control de reactividad y potencia .....       | 221 |
| 8.6.2  | Tecnologías aplicables para actuadores .....                               | 226 |
| 8.7  | CICLO DE POTENCIA Y CO-GENERACIÓN.....                                     | 228 |
| 8.7.1  | Parámetros básicos del ciclo de potencia .....                             | 229 |
| 8.7.2  | Propuestas de ciclos directos y regenerativos.....                         | 230 |
| 8.7.3  | Planta para desalinización de agua de mar.....                             | 236 |
| 8.8  | COMENTARIOS FINALES DEL CAPÍTULO .....                                     | 237 |
| Capítulo 9. RNC+ y Aplicaciones .....            |  | 239 |
| 9  | Introducción .....   | 239 |
| 9.1  | DISEÑO DE REFERENCIA: "SIMPLE COMPACT REACTOR" CAE, CAE - FRANCIA .....    | 239 |
| 9.2  | GRADO DE MADUREZ TECNOLÓGICA Y APLICACIONES PARA EL RNC.....               | 242 |
| 9.3  | REQUERIMIENTOS PARA RNC+ .....   | 244 |
| 9.4  | CONFIGURACIÓN BÁSICA DEL RNC+ .....  | 245 |
| 9.5  | DISEÑO NEUTRÓNICO Y THI.....   | 247 |
| 9.6  | CONSIDERACIONES FINALES .....  | 250 |
| Capítulo 10. Control y Operación de Planta ..... |  | 252 |
| 10.1   | INTRODUCCIÓN .....   | 252 |
| 10.2   | PROGRAMA DE OPERACIÓN DEL REACTOR NUCLEAR COMPACTO .....                   | 252 |
| 10.3   | MODELO DE PLANTA DE BAJO ORDEN .....                                       | 253 |
| 10.3.1   | Núcleo: cinética y aspectos térmicos.....                                  | 254 |
| 10.3.2   | Modelo para Presurizador y Generador de Vapor .....                        | 256 |
| 10.3.3   | Modelo para Chimenea (rama caliente) y Downcomer (rama fría) .....         | 258 |
| 10.3.4   | Generador eléctrico.....   | 259 |
| 10.3.5   | Modelo integrado de planta .....   | 259 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 10.4  | RESPUESTA DINÁMICA DE LA PLANTA SIN REGULADORES .....                  | 261 |
| 10.5  | DISEÑO DE REGULADORES .....  | 265 |
| 10.5.1.   | Regulador de Velocidad en Generador Eléctrico y Potencia Térmica ..... | 265 |
| 10.5.2.   | Seguimiento de rampas operacionales .....                              | 266 |
| 10.6  | CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO .....                              | 269 |
| Capítulo 11. Blindaje para Reactores Móviles .....  |  | 270 |
| 11.1  | INTRODUCCIÓN .....   | 270 |
| 11.2  | CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA.....     | 270 |
| 11.2.1  | Definición de zonas dentro de la contención del RNC .....              | 271 |
| 11.2.2  | Límites de dosis para los grupos .....                                 | 274 |
| 11.3  | CONSIDERACIONES CONCEPTUALES RELATIVAS AL BLINDAJE .....               | 278 |
| 11.3.1  | Configuraciones aplicables para el blindaje primario .....             | 278 |
| 11.3.2  | Aspectos adicionales.....  | 280 |
| 11.4  | CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO .....                              | 282 |
| Capítulo 12. Seguridad Nuclear y Emplazamiento..... |  | 283 |
| 12.1  | INTRODUCCIÓN .....   | 283 |
| 12.2  | MODELOS DETERMINÍSTICOS PARA ACCIDENTES BASE DE DISEÑO .....           | 284 |
| 12.2.1  | Modelo básico para la dinámica de planta .....                         | 284 |
| 12.2.2  | Implementación del modelo dinámico .....                               | 287 |
| 12.3.   | CARACTERÍSTICAS DE EVENTOS INICIANTES .....                            | 290 |
| 12.4.   | ACCIÓN PREVISTA DE LOS SISTEMAS DE SEGURIDAD .....                     | 291 |
| 12.5.   | TÉCNICA DE ANÁLISIS PROBABILISTA .....                                 | 294 |
| 12.6.   | RESULTADOS DEL ESTUDIO PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD.....                | 297 |
| 12.6.1.   | Árboles de Eventos para LOCA .....                                     | 298 |
| 12.6.2.   | Árboles de Eventos para LOHS.....                                      | 300 |
| 12.7.   | POSIBLES EMPLAZAMIENTOS DEL RNC-10.....                                | 302 |
| 12.3  | CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO .....                              | 306 |
| Conclusiones Generales .....                        |  | 307 |
| Agradecimientos .....                               |  | 310 |
| Abreviaturas y acrónimos.....                       |  | 311 |
| Bibliografía .....                                  |  | 312 |
| ANEXOS .....  |  | 320 |
| 1   | Especificaciones de los materiales empleados .....                     | 320 |
| 2   | Modelo de INPUT para COBRA-IV.....                                     | 321 |
| 3   | Resultados THI post-procesados para núcleo 3Fc .....                   | 323 |
| 4   | Resultados THI post-procesados para núcleo Aspirin 3.....              | 325 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 5 | Relación de potencia lineal entre combustibles tipo barra y placa ..... | 327 |
| 6 | Preguntas Frecuentes.....   | 329 |
| 7 | Modelo del circuito primario en RELAP5 .....                            | 333 |
| 8 | Registro de Datos .....   | 337 |
| 9 | Árboles de falla para el análisis probabilístico de seguridad .....     | 342 |