

# Cátedra Juan Manuel Kindelan

Jornadas I+D. Consejo de Seguridad Nuclear.

César Queral

ETSI Minas y Energía (UPM)

Madrid, España

31 de mayo de 2018





# Actividades realizadas en 2017: Becas

- Se concedieron **8 becas de doctorado**, **3 de Proyecto Fin de Master** y **1 de Proyecto Fin de Grado**.
  - Análisis de secuencias de pérdida parcial de la circulación natural
  - Análisis de márgenes de seguridad en secuencias accidentales mediante metodologías BEPU.
  - Análisis de secuencias de tipo ATWS
  - Análisis de secuencias con pérdida del sumidero de calor
  - Comparación de estrategias de enfriamiento en secuencias accidentales
  - Análisis de estrategias FLEX de gestión de accidente severo mediante equipos portátiles (código MELCOR 2.1).
  - Desarrollo de un modelo de reactor AP1000 para el código MELCOR 2.1.
  - Necesidades de I+D en el campo de los materiales. Extensión de vida. (Colaboración con la plataforma CEIDEN)
  - Comparación de metodologías de fiabilidad humana.



# Actividades realizadas en 2017

- Se defendió una tesis doctoral en 2017 financiada por la Cátedra Kindelan.  
Autor: Luis Mena Rosell. Verificación de Guías de Gestión de Accidente Severo. Secuencias de SBO en reactores PWR
- **Premio a mejor tesis doctoral UPM (defendida en 2016): Francisco Javier Montero Mayorga**
- Bolsa de viaje para asistir al congreso Nuclear Energy for New Europe 2017 para presentar una ponencia.
- Publicación durante 2017 de: 7 artículos internacionales, 3 ponencias internacionales y 3 ponencias en la reunión de la SNE.



# Actividades realizadas en 2017

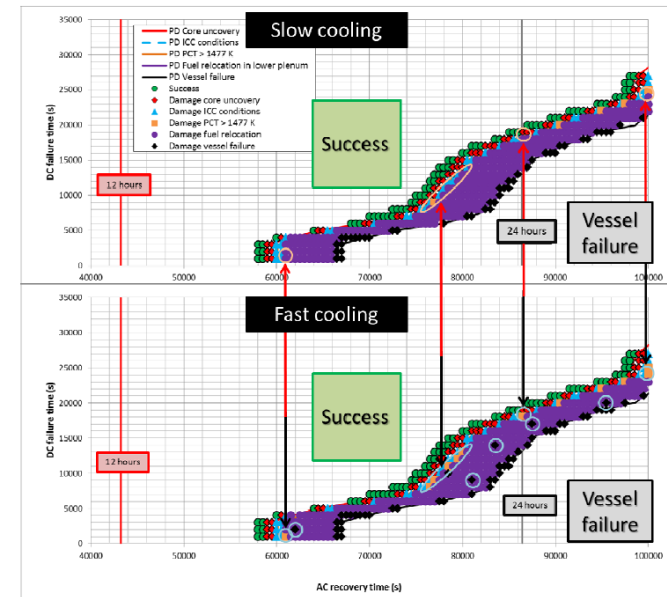
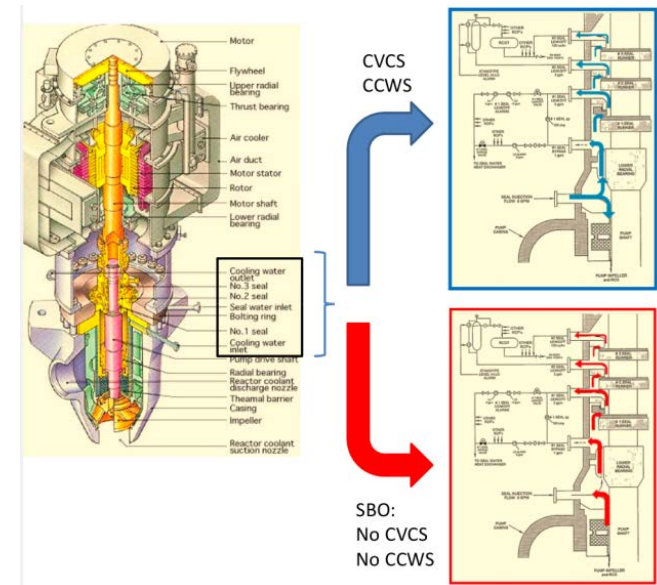
- 2017. Organización del curso sobre **Operación y Seguridad en Centrales Avanzadas** (30 horas) con 15 alumnos inscritos.
- **2018.** Curso sobre Desmantelamiento de instalaciones nucleares. 4 al 8 de junio de 2018. **70 inscritos.**

- Aspectos sociales y económicos
- Licenciamiento y regulación de los procesos de desmantelamiento y clausura.
- Aspectos legales del desmantelamiento y clausura de instalaciones
- Costes Financieros
- Del fin de la operación al desmantelamiento de las centrales nucleares
- Preparativos para el desmantelamiento y la clausura
- Experiencia y lecciones aprendidas en el PDC de Vandellós I.
- Los riesgos en la clausura de instalaciones
- El papel del inspector residente
- Clausura de fábricas de concentrados y restauración de emplazamientos mineros
- La PR en los desmantelamientos
- La garantía de calidad en los procesos de desmantelamiento
- Técnicas de descontaminación. Técnicas de corte y demolición
- Gestión de materiales y acondicionamiento de residuos
- Impacto radiológico durante el desmantelamiento
- Impacto radiológico de los materiales desclasificados.
- Desclasificación y liberación de los terrenos
- El control regulador de los desmantelamientos de las instalaciones del CIEMAT.
- Descontaminación y Desmantelamiento de Instalaciones Nucleares y radiactivas de centros de investigación.
- Experiencia previa en desmantelamientos.
- Actividades de pre-desmantelamiento en un BWR.

# Actividades realizadas en 2017: Tesis Doctorales

- **Título:** Verificación de Guías de Gestión de Accidente Severo. Secuencias de SBO en reactores PWR
- Autor: **Luis Mena Rosell**
- Director: César Queral

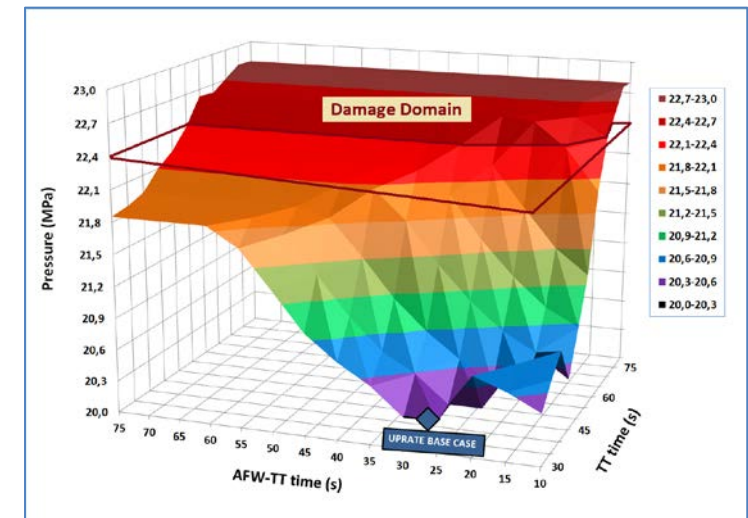
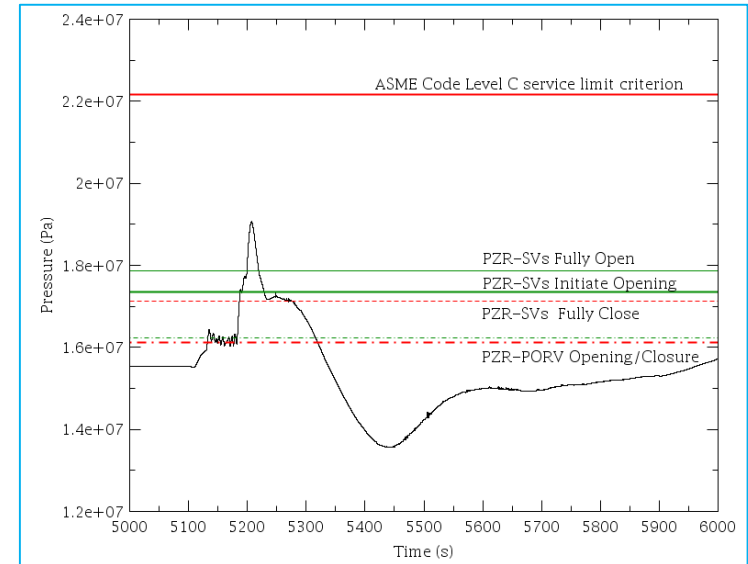
- Análisis de secuencias de SBO con/sin LOCA de sellos.
- Tiempos disponibles para la recuperación de sistemas y la actuación con equipos portátiles.
- Comparación de estrategias de gestión de accidente severo.



# Actividades realizadas en 2017: Tesis Doctorales

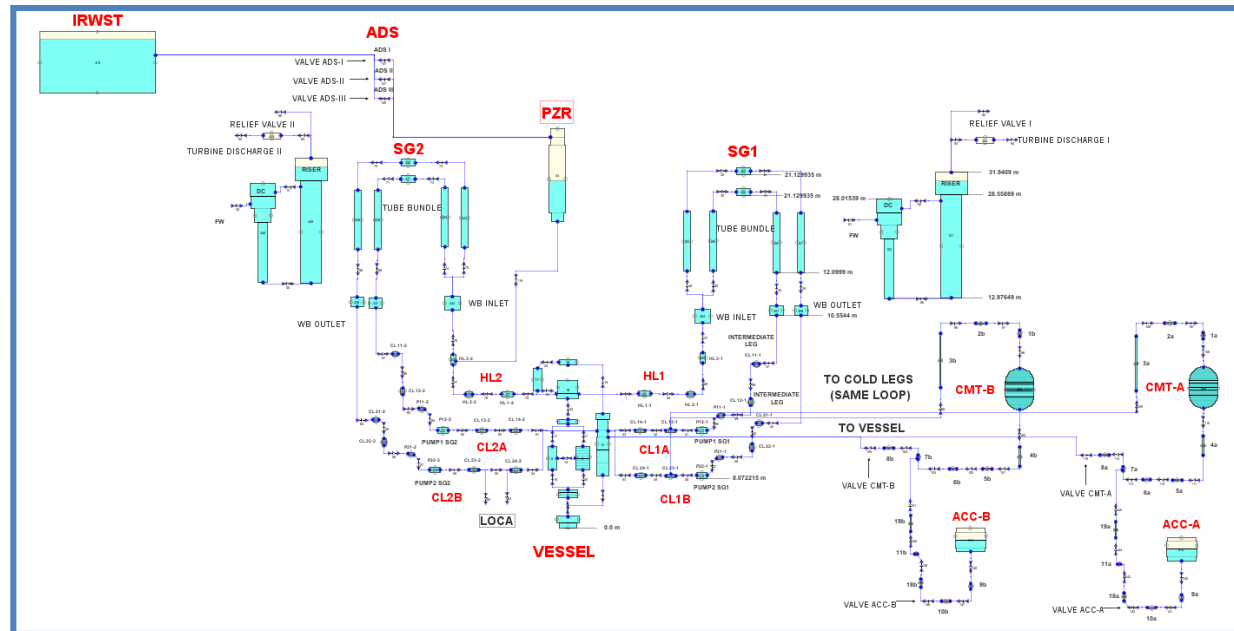
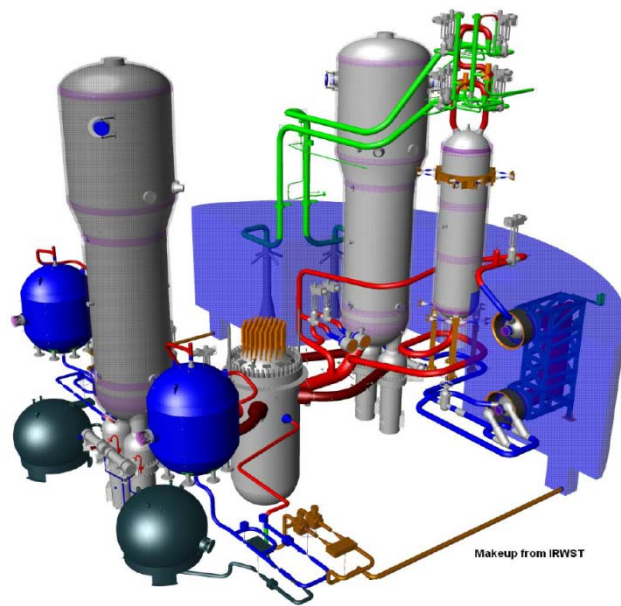
- **Título:** Análisis de secuencias de ATWS en reactores PWR
- **Autor:** María José Rebollo Mena
- **Director:** César Queral

- Sensibilidad de la secuencia a parámetros, fallos de sistemas y acciones humanas.
- Propuesta de PIRT para ATWS
- Verificación de los criterios de éxito en ET de ATWS
- Optimización de los tiempos de actuación del sistema AMSAC
- Análisis de secuencias de LOCA, SGTR, MSLB inducidas por secuencias de ATWS.



# Actividades realizadas en 2017: PFM

- Título: Desarrollo de un modelo de reactor **AP1000** con el código MELCOR
- Autor: **David Castro Nora**
- El objetivo principal ha sido la obtención de un modelo detallado de **AP1000** para el código MELCOR que permita el análisis de secuencias de accidente severo.





# Actividades realizadas en 2017: Artículos publicados

- **Dynamic event trees without success criteria for full spectrum LOCA sequences applying the integrated safety assessment (ISA) methodology.** C. Queral, J. Gómez-Magán, C. París, J. Rivas-Lewicky, M. Sánchez-Perea, J. Gil, J. Mula, E. Meléndez, J. Hortal, J.M. Izquierdo, I. Fernández, Reliability Engineering & System Safety, Volume 171, 2018, pp 152-168
- **Current Status and Applications of Integrated Safety Assessment and Simulation Code System for ISA.** J.M. Izquierdo, J. Hortal, M. Sanchez Perea, E. Meléndez, C. Queral, J. Rivas-Lewicky.. Nuclear Engineering and Technology, Volume 49, Issue 2, March 2017, pp 295-305.
- **Verification of AP1000 low-margin PRA sequences based on best-estimate calculations.** C. Queral, J. Montero-Mayorga, J. Rivas-Lewicky, M.J. Rebollo. Annals of Nuclear Energy, Volume 104, June 2017, pp 9-27
- **Analysis of primary bleed and feed strategies for selected SBLOCA sequences in a German Konvoi PWR using ASTEC V2.0.** Ignacio Gómez-García-Toraño, Víctor-Hugo Sánchez-Espinoza, Robert Stieglitz, César Queral. Annals of Nuclear Energy, Volume 110, 2017, pp 818-832,
- **Three-dimensional simulation of a LBLOCA in an AP1000 containment building,** Kevin Fernández-Cosials, Zuriñe Goñi, Gonzalo Jiménez, César Queral, Javier Montero, In Energy Procedia, Volume 127, 2017, pp 234-241





# Actividades realizadas en 2017: Artículos publicados

- **Modelo detallado para un diseño estándar PWR-Westinghouse con el código MELCOR 2.1.** Marta Ruiz Zapatero, Rafael Bocanegra Melián, Gonzalo Jiménez Varas César Queral Salazar. Nuclear España AÑO 2017. Marzo 382 PÁGINAS: 49-54.
- **LA ENERGÍA NUCLEAR EN CHINA: PASADO, PRESENTE Y FUTURO (Parte 1 y 2).** Gonzalo Jimenez Varas y Cesar Queral Salazar. Dyna. Ingeniería e Industria. 2017
- **R&D activities of the Spanish research institutions and universities on Gen IV reactors and advanced nuclear systems.** F. Álvarez Velarde,V. Bécares, D.Cano Ott, J. Cobos, F. Fera, M. García, N. García Herranz,L.E. Herranz, D. López, S. Martorell, M. Perlado, C. Queral, M. Serrano, G. Verdú. Nuclear España 2017. NÚMERO: Enero 380. PÁGINAS: 28-33.
- **Analysis of PWR SBO sequences with RCP passive thermal shutdown seals.** Luis Mena-Rosell, Cesar Queral, Marta Ruiz-Zapatero, Miguel Sanchez-Perea, Gonzalo Jimenez, Javier Gomez-Magan, Javier Hortal, Victor-Hugo Sanchez-Espinoza. Journal of Nuclear Science and Technology ([aceptado](#)).
- **Impact of Flex Strategies and Auxiliary Feedwater System Recovery in Total Loss of Feedwater Sequences.** C. Queral, J. Mula, C. París, M. Ruiz-Zapatero, J. Gómez-Magán, M. Sánchez-Perea, E. Meléndez, J. Gil. Reliability Engineering & System Safety ([aceptado](#))
- **Assessment of primary and secondary bleed and feed procedures during a Station Blackout in a German Konvoi PWR using ASTECV2.0.** Ignacio Gómez-García-Toraño, Víctor-Hugo Sánchez-Espinoza, Robert Stieglitz, César Queral, María-José Rebollo. Annals of Nuclear Energy ([aceptado](#))



# Actividades realizadas en 2017: Ponencias

- **FLEX strategy implementation for LOCA sequences in PWR-Westinghouse.** Marta Ruiz-Zapatero, Rafael Bocanegra, César Queral. 26th International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE 2017), Bled (Eslovenia), September 11-14, 2017.
- **Cátedra Juan Manuel Kindelán del Consejo de Seguridad Nuclear: 14 años apoyando la Formación en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica.** Queral, C., Elorza, F.J., Ramos, L. Segundo Simposio Internacional sobre Educación, Capacitación, Divulgación y Gestión del Conocimiento Nuclear Buenos Aires, Argentina 13 al 17 de noviembre de 2017.
- **El Seminario de Seguridad Nuclear en Reactores Avanzados como herramienta de divulgación de la tecnología nuclear.** Jimenez, G. , Ruiz Zapatero, M., Fernandez-Cosials, K. , Garcia Laruelo, J., Queral, C. Segundo Simposio Internacional sobre Educación, Capacitación, Divulgación y Gestión del Conocimiento Nuclear Buenos Aires, Argentina 13 al 17 de noviembre de 2017.
- **Análisis BEPU de secuencia LBLOCA con el código TRACE incluyendo análisis termomecánico.** Eneko Zugazagoitia, Cesar Queral, Julio Rivas Lewicky, José María Posada. SNE-RA 43, Malaga, España.
- **AP1000 Large Break LOCA best-estimate and conservative comparison with TRACE5 patch 4.** Julio Rivas-Lewicky, Cesar Queral, Eneko Zugazagoitia. SNE-RA 43, Malaga, España.



# Actividades realizadas en 2017: Retornos CSN

La I+D desarrollada gracias a la Cátedra Kindelan ha permitido desarrollar personal en nuevos campos y obtener hallazgos que han sido comunicados al CSN:

- Verificación y propuestas de mejora en GGAS en secuencias de SBO.
- Verificación de POE en secuencias de LOCA.
- Márgenes de seguridad en APS mediante metodologías BEPU.
- Nuevas tecnologías: Reactores avanzados AP1000.

# Márgenes de seguridad mediante metodologías BEPU



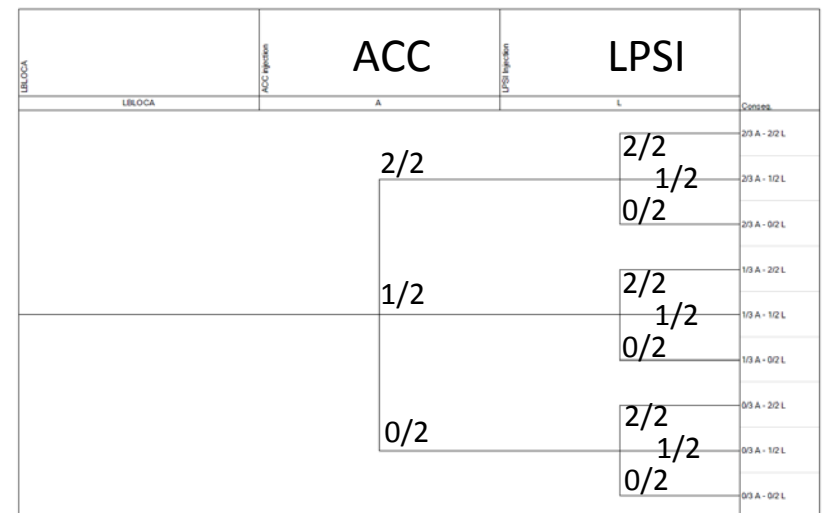
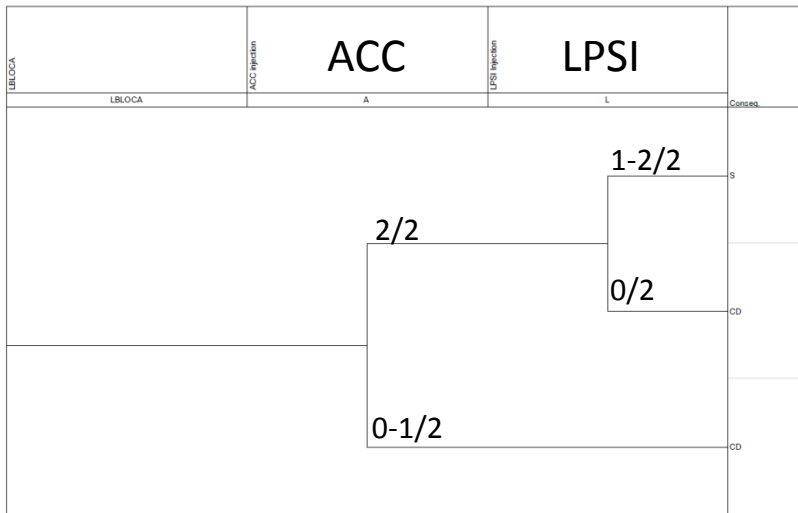


# Introducción

- Tesis doctoral de Eneko Zugazagoitia Hernando. Aplicación de metodologías BEPU en el análisis de seguridad.
- **Objetivo:** Calcular los márgenes de seguridad en secuencias de LOCA en el contexto del análisis probabilista de seguridad

# Árboles de sucesos expandidos (EET)

- Por una parte **se introduce el concepto de árbol de sucesos expandidos** (utilizado en el APS del diseño AP1000 para secuencias de bajo margen).

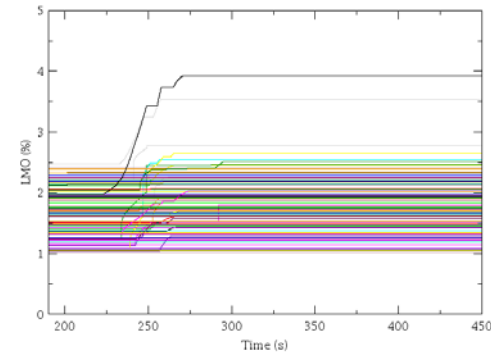
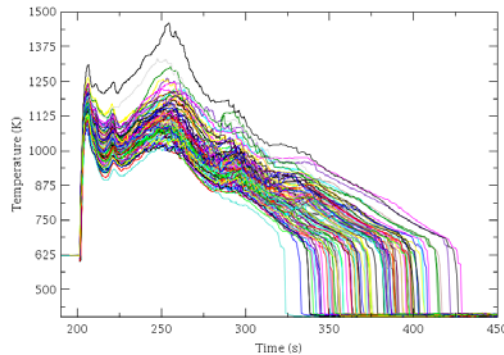


- Los EET reducen algunos conservadurismos del APS a costa de eliminar parcialmente el concepto de criterio de éxito y sustituirlo por una rama para cada configuración y su probabilidad asociada.

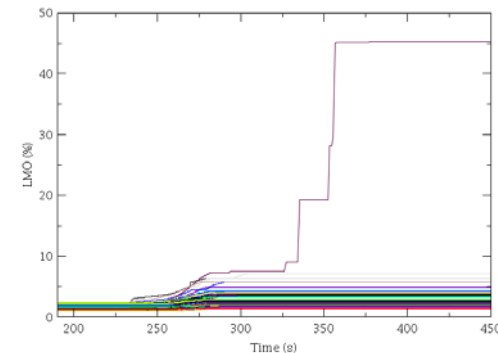
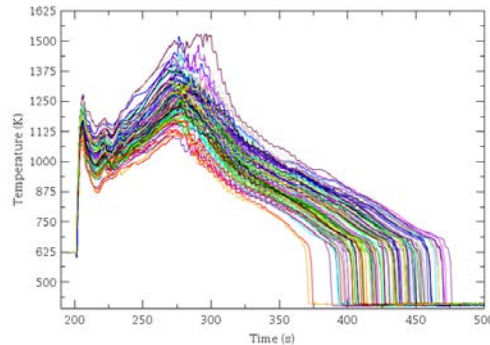
# Muestreo por Monte Carlo

- Por otra se realiza un **muestreo por Monte Carlo** para cada secuencia del árbol expandido.

2ACC-2L-100%



1ACC-1L-100%



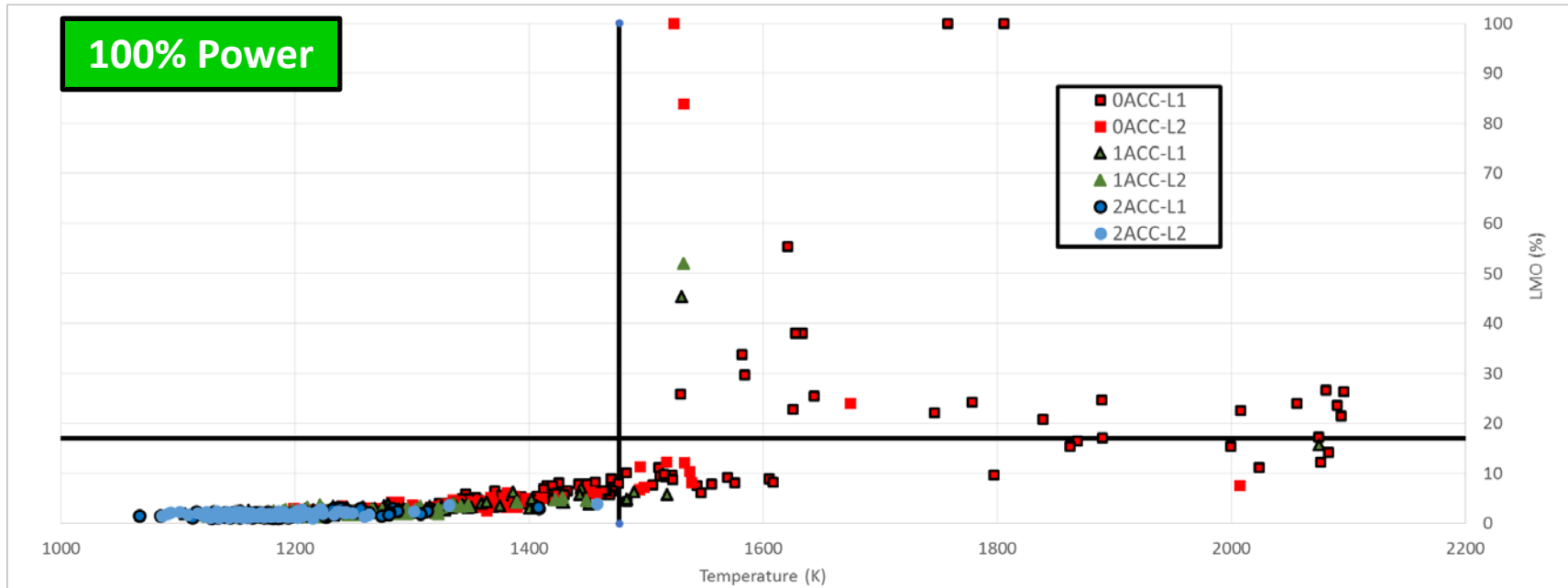
- Los muestreos se realizan al 100% y 105% permitiendo analizar la reducción de márgenes de seguridad por aumento de potencia (en la línea de los trabajos realizados en el ejercicio **NEA-SM2A**).

Los resultados de los Monte Carlo se pueden analizar de diversas maneras:

1. Distribución binomial con un intervalo de confianza (95%).
2. Ajuste a distribuciones de probabilidad (PDFs) e integración por encima de los criterios de aceptación.
3. Análisis de sensibilidad y selección de los principales parámetros. Posteriormente se integra el producto de las PDFs en la región de daño.
4. Existen además otras alternativas no aplicadas en este análisis (p.e. superficies de respuesta o criterio de Wald).



# 1. Tratamiento como una distribución binomial



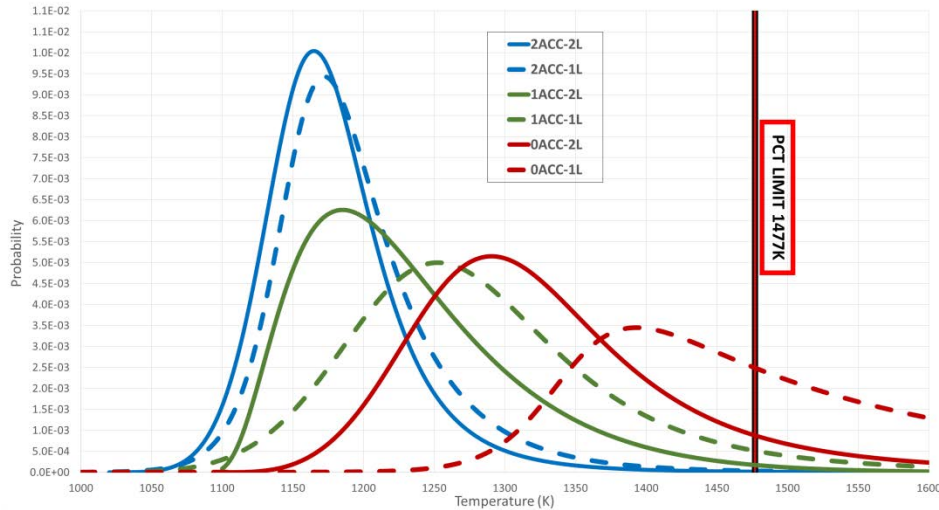
Obtención de intervalos de confianza mediante **Clopper-Pearson**

| Sequence | JCDP     |              |          |              |
|----------|----------|--------------|----------|--------------|
|          | 100      |              | 105      |              |
|          | Mean     | Upper 95% CL | Mean     | Upper 95% CL |
| 2ACC-2L  | 0.00E+00 | 3.62E-02     | 1.00E-02 | 5.45E-02     |
| 2ACC-1L  | 0.00E+00 | 3.62E-02     | 1.00E-02 | 5.45E-02     |
| 1ACC-2L  | 1.00E-02 | 5.45E-02     | 4.00E-02 | 9.93E-02     |
| 1ACC-1L  | 5.00E-02 | 1.13E-01     | 1.60E-01 | 2.47E-01     |
| 0ACC-2L  | 1.10E-01 | 1.88E-01     | 2.30E-01 | 3.25E-01     |
| 0ACC-1L  | 4.50E-01 | 5.53E-01     | 7.90E-01 | 8.65E-01     |



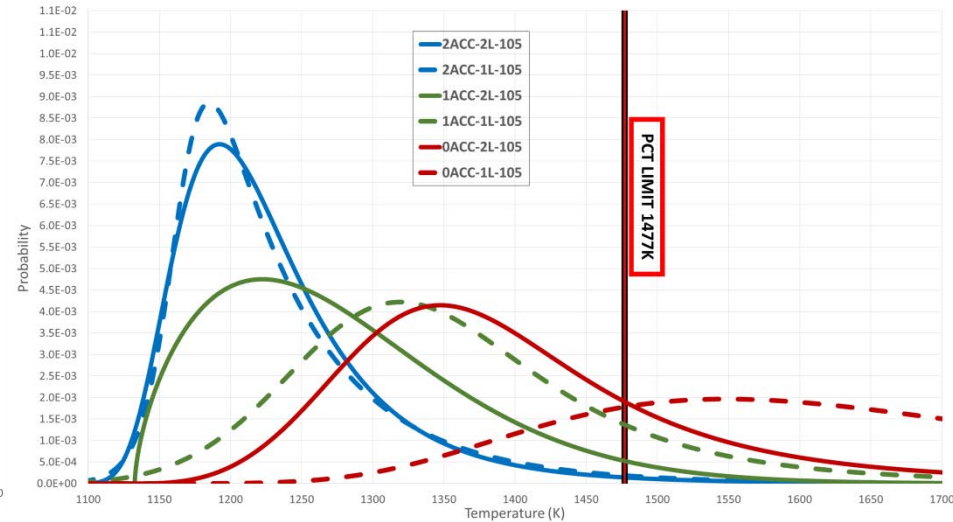
## 2. Ajuste a distribuciones de probabilidad (PCT)

### 100% Power



| Sequence | P(PCT>1477K) |
|----------|--------------|
| 2ACC-2L  | 1.10E-03     |
| 2ACC-1L  | 1.77E-03     |
| 1ACC-2L  | 9.52E-03     |
| 1ACC-1L  | 4.81E-02     |
| 0ACC-2L  | 8.72E-02     |
| 0ACC-1L  | 5.08E-01     |

### 105% Power

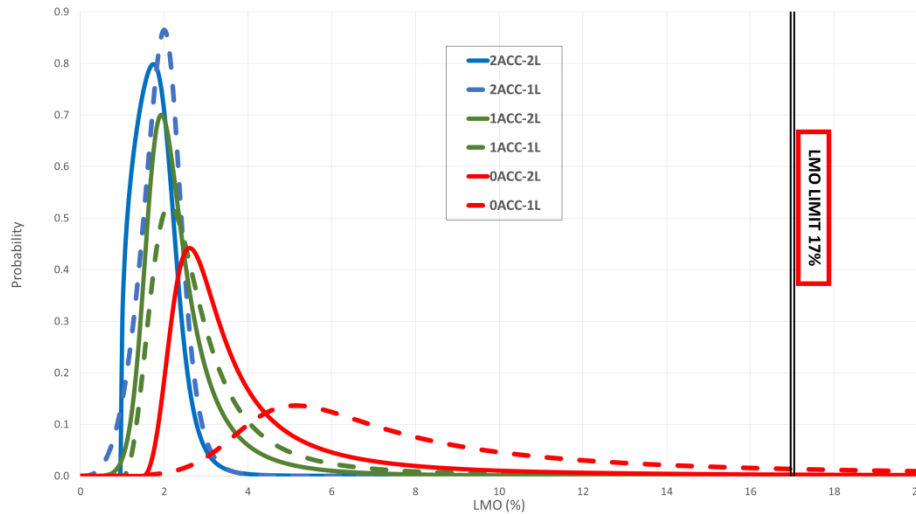


| Sequence | P(PCT>1477K) |
|----------|--------------|
| 2ACC-2L  | 1.03E-02     |
| 2ACC-1L  | 1.57E-02     |
| 1ACC-2L  | 3.23E-02     |
| 1ACC-1L  | 1.40E-01     |
| 0ACC-2L  | 2.19E-01     |
| 0ACC-1L  | 8.09E-01     |



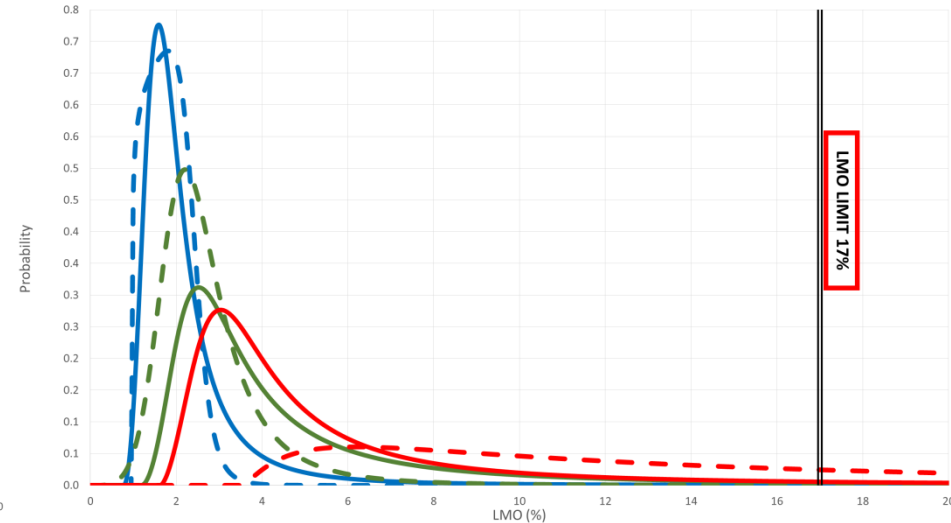
## 2. Ajuste a distribuciones de probabilidad (LMO)

### 100% Power



| Sequence | P(LMO>17%) |
|----------|------------|
| 2ACC-2L  | 3.13E-08   |
| 2ACC-1L  | 3.77E-10   |
| 1ACC-2L  | 5.12E-04   |
| 1ACC-1L  | 4.70E-03   |
| 0ACC-2L  | 2.74E-02   |
| 0ACC-1L  | 1.68E-01   |

### 105% Power



| Sequence | P(LMO>17%) |
|----------|------------|
| 2ACC-2L  | 1.07E-03   |
| 2ACC-1L  | 6.54E-04   |
| 1ACC-2L  | 7.32E-04   |
| 1ACC-1L  | 6.46E-02   |
| 0ACC-2L  | 7.14E-02   |
| 0ACC-1L  | 4.38E-01   |

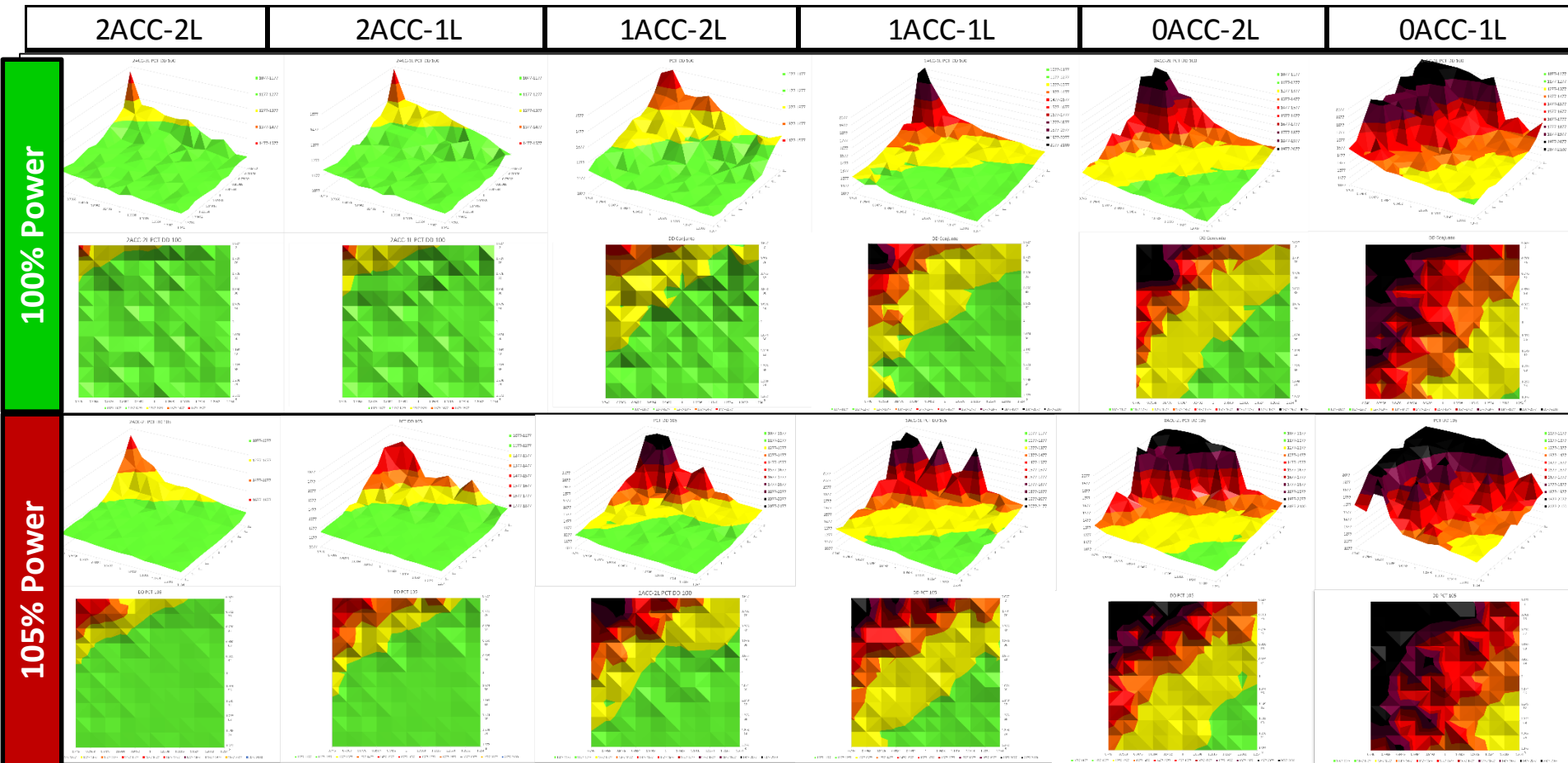
# 3. Obtención de parámetros dominantes (PRCC)

|                       | PCT - PRCC |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         | Confidence Level >99.9% |
|-----------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------|
|                       | 100        |         |         |         |         |         | 105     |         |         |         |         |         |                         |
|                       | 2ACC-2L    | 2ACC-1L | 1ACC-2L | 1ACC-1L | 0ACC-2L | 0ACC-1L | 2ACC-2L | 2ACC-1L | 1ACC-2L | 1ACC-1L | 0ACC-2L | 0ACC-1L |                         |
| BreakDC               | 0.69       | 0.70    | 0.46    | 0.54    | 0.64    | 0.39    | 0.57    | 0.58    | 0.35    | 0.56    | 0.62    | 0.32    |                         |
| Power                 | 0.26       | 0.43    | 0.27    | 0.37    | 0.13    | 0.26    | 0.54    | 0.44    | 0.44    | 0.20    | 0.45    | 0.30    |                         |
| DHeat                 | 0.31       | 0.26    | 0.55    | 0.73    | 0.73    | 0.54    | 0.31    | 0.40    | 0.61    | 0.64    | 0.64    | 0.47    |                         |
| PPE                   | 0.49       | 0.57    | 0.54    | 0.46    | 0.53    | 0.43    | 0.71    | 0.67    | 0.53    | 0.43    | 0.60    | 0.30    |                         |
| Forced Convection HTC | -0.72      | -0.70   | -0.81   | -0.86   | -0.90   | -0.88   | -0.80   | -0.81   | -0.83   | -0.82   | -0.82   | -0.80   |                         |
| Film Boiling HTC      | -0.60      | -0.69   | -0.91   | -0.90   | -0.90   | -0.77   | -0.66   | -0.78   | -0.83   | -0.89   | -0.86   | -0.70   |                         |
| Transition Boiling    | 0.67       | 0.62    | 0.63    | 0.42    | 0.42    | 0.43    | 0.22    | 0.27    | 0.18    | 0.18    | 0.19    | 0.18    |                         |
| CHF                   | -0.65      | -0.49   | -0.11   | 0.27    | 0.11    | 0.13    | -0.68   | -0.42   | -0.04   | 0.00    | -0.02   | -0.02   |                         |
| ACC_P                 | 0.15       | 0.10    | 0.07    | 0.15    | 0.11    | -0.01   | 0.02    | 0.13    | 0.19    | -0.08   | 0.12    | -0.04   |                         |
| LPSI injection Factor | 0.13       | 0.20    | -0.41   | -0.03   | -0.30   | -0.31   | 0.03    | -0.09   | -0.30   | -0.10   | -0.05   | -0.18   |                         |
| RCPBroken             | -0.08      | -0.04   | 0.09    | 0.14    | -0.18   | -0.13   | -0.10   | 0.02    | 0.09    | 0.09    | 0.13    | 0.13    |                         |
| RCPIntact             | 0.08       | -0.07   | -0.05   | 0.10    | -0.09   | 0.05    | 0.04    | 0.34    | -0.05   | -0.06   | -0.24   | -0.09   |                         |
| GapHTC                | -0.01      | -0.09   | -0.09   | 0.07    | -0.37   | 0.00    | 0.10    | 0.00    | -0.26   | -0.24   | -0.13   | -0.12   |                         |
| CLADDING INNER RADIUS | -0.15      | 0.32    | 0.02    | 0.36    | 0.25    | 0.05    | 0.10    | 0.18    | 0.17    | 0.17    | -0.01   | 0.13    |                         |
| CLADDING THICKNESS    | -0.15      | -0.05   | -0.08   | -0.11   | -0.16   | -0.14   | 0.03    | -0.08   | 0.06    | -0.20   | -0.42   | -0.22   |                         |
| PELLET RADIUS         | -0.22      | -0.15   | -0.03   | 0.03    | -0.13   | -0.04   | -0.15   | -0.06   | -0.13   | -0.06   | -0.10   | -0.05   |                         |
| DISH DEPTH            | 0.09       | 0.02    | -0.02   | 0.13    | -0.08   | -0.09   | -0.07   | 0.01    | -0.07   | 0.02    | 0.18    | -0.29   |                         |
| PELSHOULD             | -0.02      | 0.10    | -0.18   | -0.02   | 0.10    | 0.21    | 0.11    | -0.10   | -0.16   | -0.06   | -0.16   | -0.13   |                         |
| SPRING VOL            | 0.16       | -0.09   | -0.02   | -0.35   | -0.04   | 0.05    | 0.08    | -0.03   | -0.08   | 0.11    | -0.14   | 0.14    |                         |
| PLENUM HEIGHT         | 0.03       | 0.04    | -0.02   | -0.02   | -0.02   | -0.16   | -0.05   | -0.03   | -0.25   | -0.05   | 0.00    | -0.08   |                         |
| Fuel Density          | -0.36      | -0.07   | -0.20   | -0.19   | 0.03    | -0.16   | -0.05   | -0.12   | 0.06    | -0.21   | -0.44   | -0.09   |                         |
| KUO2                  | -0.78      | -0.77   | -0.75   | -0.60   | -0.58   | -0.24   | -0.78   | -0.81   | -0.56   | -0.39   | -0.54   | -0.40   |                         |
| Burst Temperature     | -0.01      | 0.05    | -0.07   | -0.21   | 0.15    | 0.02    | -0.14   | -0.05   | -0.17   | -0.16   | -0.02   | -0.02   |                         |
| M-W Reaction          | 0.12       | 0.04    | 0.05    | 0.19    | -0.04   | 0.13    | 0.02    | -0.05   | 0.16    | -0.05   | -0.04   | 0.02    |                         |
| ContPress             | 0.00       | -0.04   | -0.17   | -0.15   | -0.14   | -0.34   | 0.07    | -0.05   | -0.14   | 0.10    | -0.02   | -0.03   |                         |
| ACC_T                 | -0.09      | -0.13   | -0.12   | 0.05    | -0.11   | -0.03   | -0.04   | -0.05   | 0.05    | -0.11   | 0.15    | -0.04   |                         |
| GapPress              | -0.06      | 0.03    | -0.05   | 0.14    | 0.10    | -0.05   | -0.03   | 0.09    | 0.06    | 0.17    | 0.06    | 0.09    |                         |
| Burst Strain          | -0.27      | -0.11   | -0.18   | -0.26   | -0.03   | -0.14   | 0.01    | -0.28   | -0.10   | -0.36   | -0.43   | -0.12   |                         |
| OxLayer               | -0.05      | -0.12   | 0.02    | -0.11   | -0.09   | 0.02    | -0.14   | -0.36   | -0.11   | -0.05   | -0.07   | -0.05   |                         |

A partir de los parámetros dominantes se obtienen los **dominios de daño** de cada secuencia.



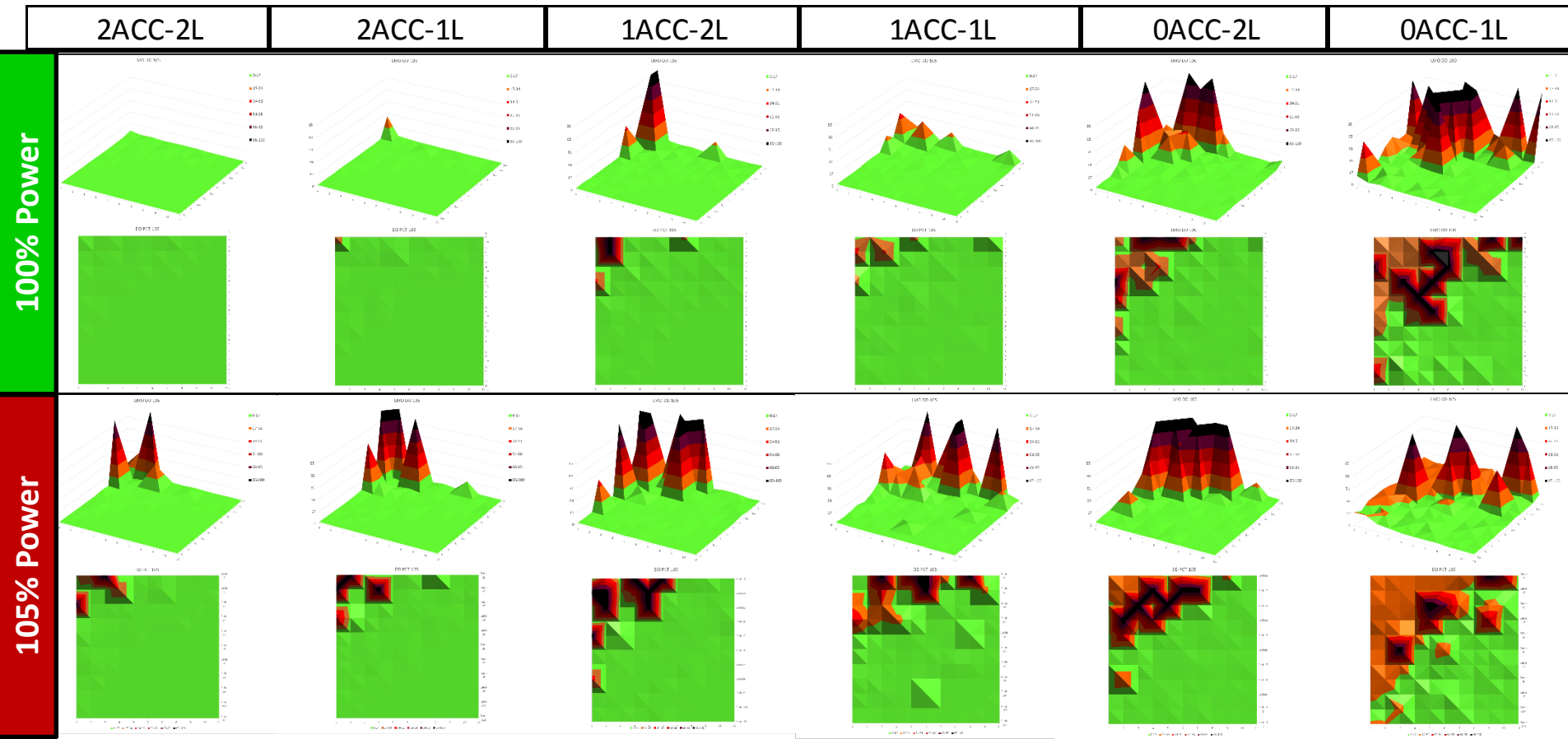
# 3. Obtención de dominios de daño e integración



| Sequence     |     | 2ACC-2L | 2ACC-1L | 1ACC-2L | 1ACC-1L | 0ACC-2L | 0ACC-1L |
|--------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| P(PCT>1477K) | 100 | 1.3E-04 | 1.3E-04 | 1.5E-03 | 2.4E-02 | 7.8E-02 | 4.7E-01 |
|              | 105 | 8.1E-03 | 1.1E-02 | 4.9E-02 | 8.9E-02 | 1.8E-01 | 7.6E-01 |



# 3. Obtención de dominios de daño e integración



|            | Sequence | 2ACC-2L  | 2ACC-1L  | 1ACC-2L  | 1ACC-1L  | 0ACC-2L  | 0ACC-1L  |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| P(LMO>17%) | 100      | 1.83E-04 | 7.70E-04 | 9.58E-03 | 1.17E-02 | 4.93E-02 | 2.21E-01 |
|            | 105      | 1.05E-02 | 1.27E-02 | 4.78E-02 | 7.39E-02 | 9.45E-02 | 2.54E-01 |

# Conclusiones y Trabajos futuros

- Los árboles expandidos reducen los conservadurismos del APS clásico.
- Las 3 técnicas aplicadas a la interpretación de los resultados de los Monte Carlo
  1. Distribución binomial con un intervalo de confianza (95%).
  2. Ajuste a distribuciones de probabilidad (PDFs) e integración por encima de los criterios de aceptación.
  3. Integración del producto de las PDFs en el interior del dominio de daño.

permiten calcular la variación de los márgenes de seguridad en aumentos de potencia y compararlo con los resultados clásicos del APS.

- Los resultados son similares con las 3 técnicas.
- Hay secuencias de **éxito** del APS clásico con una cierta probabilidad de **daño**.
- Hay secuencias de **daño** del APS clásico con una cierta probabilidad de **éxito**.

# Cátedra Juan Manuel Kindelan

Muchas gracias por su atención.

