

LOS REACTORES DE POTENCIA ESTADO ACTUAL Y TENDENCIAS PREVISIBLES

Por FEDERICO GODED ECHEVARRIA,
Ingeniero de Caminos.

En el presente trabajo aporta el autor una interesante y completa información sobre el estado en que actualmente se encuentra en el mundo la construcción de reactores de potencia. En este primer artículo se hace una reseña de los distintos tipos y una síntesis del avance en esta materia en los últimos años.

I

Una imagen bastante elocuente de la evolución de las técnicas de la ingeniería nuclear la proporcionan las curvas de la figura 1.^a (*), que a continuación vamos a comentar. La curva (a) se refiere al número total de reactores en el mundo, existentes o proyectados, sean éstos de investigación o de potencia, y se obtiene de las curvas (b) por simple suma de ordenadas. Del examen de la curva (a) se deduce con clara evidencia que el período de creación de teorías,

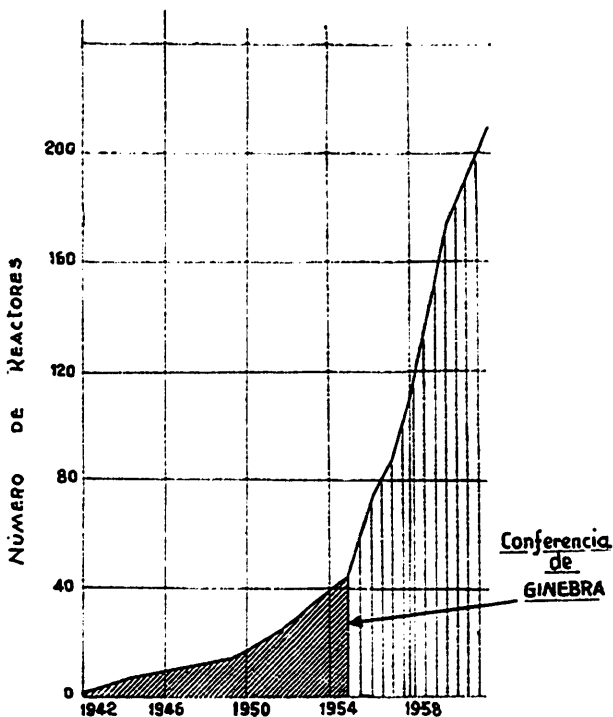


Fig. 1.^a, a. — Año de puesta en marcha.

(*) James A. Lane: Where reactor development stands today. Nucleonics. August, 1956. Vol. XIV, núm. 8, páginas 30-37.

de experimentación y de puesta a punto de las nuevas técnicas, puede considerarse que terminó un poco antes de la Conferencia de Ginebra.

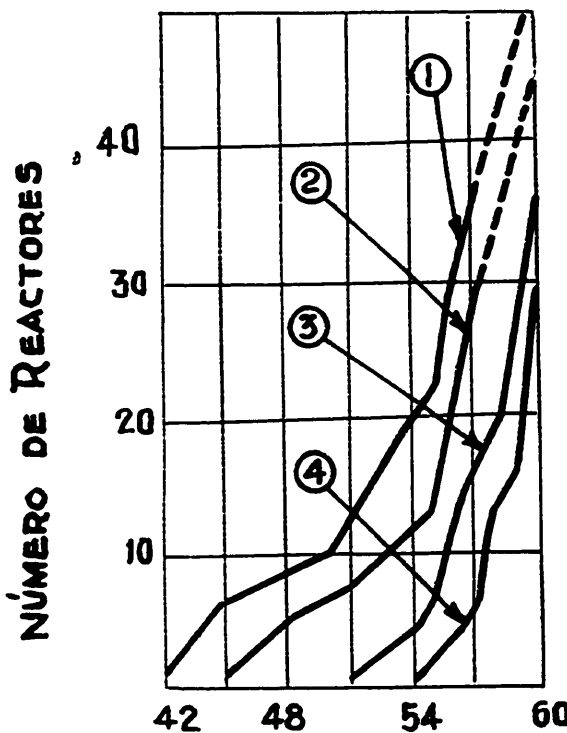


Fig. 1.^a, b. — 1, U. S. A., investigación y prueba; 2, investigación resto del mundo; 3, U. S. A., potencia y prototipos de potencia; 4. potencia resto del mundo.

Como una consecuencia de ello, a los 45 reactores de potencia e investigación ahora existentes, se les unirán antes de 1960 otros 127 más (*).

El decaje existente entre las curvas (b) 1 y 3 muestra, por otra parte, el período de tiempo necesari-

(*) Las cifras anteriores no incluyen ni los reactores de propulsión marinos o aéreos, ni los de producción de Pu.

rio para vencer los primeros obstáculos técnicos y mostrar la posibilidad económica de producir energía eléctrica. Los reactores de investigación y de prueba de materiales, en el periodo de unos diez años que separa los orígenes de ambas curvas, permitieron establecer esta posibilidad sin ningún género de dudas.

A partir de este momento comienza el desarrollo, primero, de diversos prototipos de reactores de potencia, llamados demostradores de potencia, y después, de los reactores de potencia a escala natural, pues los resultados de los cálculos dejan, o bien sin respuesta, o bien con una respuesta sólo aproximada, un buen número de problemas, y la construcción previa del prototipo se convierte, como resultado de ello, en una etapa previa imprescindible.

De los 20 tipos distintos de reactores de potencia posibles, es evidente que los primeros en salir de la etapa de ensayo del prototipo han sido los más simples y los que presentaban menor número de incógnitas.

Este proceso industrial lógico ha seguido y sigue este desarrollo en los dos países que pueden elegir soluciones sin ser frenados por limitaciones de suministro de materias primas o de técnicos, es decir, en U.S.A. y Rusia. En los países europeos, estas limitaciones han impreso un carácter especial al referido proceso industrial. Así, vemos que Inglaterra, Suecia y Francia, que son por ahora los únicos países europeos que tienen en estado avanzado el desarrollo de centrales nucleares, han elegido reactores de uranio natural, con el fin de asegurarse la independencia y la autonomía en el delicado punto del combustible, punto tanto más delicado cuanto mayor y más trascendental ha de ser el consumo del mismo. Eligiendo el UN, no sólo consiguen la autonomía y evitan un drenaje de divisas creciente con el consumo, sino que con la producción de Pu inherente al mismo lograrán también autonomía en el futuro para los más avanzados tipos de reactores que el día de mañana puedan constituir la base de sus programas de producción de energía eléctrica (*).

Los reactores de UN, grafito y CO₂, que son los

(*) "The contribution of nuclear Power to UK and World Energy resources UP to 1975", by Sir John Cockroft P/389, Geneve Conference.

elegidos por Inglaterra y Francia para cubrir las primeras etapas de sus programas de producción de energía eléctrica nuclear, tienen las enormes ventajas de ser intrínsecamente seguros y de no utilizar materiales nuevos, costosos y exóticos, ya que, por el contrario, se emplean en la construcción de esta clase de reactores materiales que la industria ha producido de una manera rutinaria durante largo tiempo, y no se usan técnicas nuevas (*). Estos hechos, unidos a las considerables mejoras en el rendimiento, ya conseguidas con respecto a Calder Hall, y que se introducirán en las centrales que Gran Bretaña ha de construir en el primer periodo de su programa nuclear, hacen prever que este tipo de central nuclear se ha de construir todavía dentro de veinticinco años, en ruda competencia con los más avanzados tipos actualmente en evolución (**).

Es evidente que, por las razones anteriores, los países europeos, especialmente Francia e Inglaterra, en las primeras etapas, permanecerán apegados al modelo de reactor ahora elegido de UN y CO₂. Pero, como antes dijimos, existen actualmente otros 19 tipos de reactores de potencia posibles y probablemente otros nuevos se revelarán también posibles en el futuro, y es conveniente, para poder adquirir una correcta idea del panorama actual y de las posibles tendencias en el futuro, señalar el número de reactores diferentes que se pueden concebir y referirnos, aunque sólo sea brevisimamente, a las dificultades esenciales que se encuentran en lograr la puesta a punto de los 20 nuevos que antes hemos mencionado.

En la tabla I se indican los diversos elementos básicos posibles de un reactor (**).

Aunque no son factibles todas las combinaciones posibles entre las distintas variables del cuadro anterior, existen, por lo menos unas 100 realizables. El problema fundamental en esta primera década ha sido, pues, la selección de los tipos con mayores pro-

(*) "The place of the Calder Hall type of reactor in nuclear power generation", Sir Christopher Hinton, Symposium on Calder Works Nuclear Power Plant, Nov. 1956.

(**) "Nuclear Engineering", October 1956, y también el trabajo de Sir Christopher Hinton, antes citado.

(***) "Survey of fuel cycles and reactor types", Alvin M. Weinberg, P/862, Geneve Conference.

TABLA I

Combustible	Material fértil	Energía de los neutrones	Fluido de refrigeración	Geometría	Moderador
U-233	Th	Rápidos.	Gas.	Homogéneo.	H ₂ O
U-235	U	Resonancia.	Metal líquido.		D ₂ O
Pu-239		Lentos.	H ₂ O.	Heterogéneo.	Be
UN			D ₂ O.		BeO
			Hidrocarburos.		C
			Etc.		Etc.

habilidades de lograr producción económica de energía eléctrica.

Los 20 tipos que en el periodo mencionado se han seleccionado y se encuentran en periodo de estudio o ensayo, por estar o construidos o en construcción, son los de la tabla II (*).

De un detenido examen del cuadro anterior, se deduce que el vasto número de tipos de reactores en desarrollo es debido, más que al número de moderadores posibles, a la amplia gama de fluidos de refrigeración posibles, ya que no menos de 13 fluidos de refrigeración diferentes se están ensayando.

TABLA II

Denominación del reactor	Proyectista
H ₂ O moderated:	
Submarino termal (STR).	ANL, Westinghouse, G. E.
Army Package Power (APPR).	ORNL, Alco.
Agua a presión (PWR).	Westinghouse, Yankee Atomic.
Agua a presión Th-U.	Babcock & Wilcox.
Agua hirviendo (EBWR, etc.).	ABL, AMF, G. E., Norway.
Doble ciclo agua hirviendo.	General Electric.
Homogéneo U-235 (HRE).	ORNL.
D ₂ O moderated:	
Refrigerado H ₂ O.	Canadá.
Refrigerado D ₂ O.	Canadian General Electric.
Refrigerado CO ₂ .	U.R.S.S., Suecia.
Refrigerado sodio.	NDA, Foster Wheeler.
Homogéneo (HRT, etc.).	ORNL, Westinghouse, Los Alamos.
Graphite moderated:	
Refrigerado aire (G-1).	Francia.
Refrigerado H ₂ O (Calder-Hall, G-2).	Inglaterra, Francia.
Refrigerado H ₂ O.	C. E. (Harford), U.R.S.S.
Refrigerado sodio (SRE, SGR).	NA.
Refrigerado bismuto.	B. & W., Florida power groups.
Combustible metal líquido.	B. & W., BNL.
Refrigerado nitrógeno, turbina de gas, ciclo cerrado.	Ford Instrument.
Organic moderated:	
Refrigerado difenil (OMRE).	NAA.
Beryllium moderated:	
Submarino intermedio.	G. E. (KAPL).
Unmoderated:	
Rápido de recria.	ANL, APDA, Los Alamos, Inglaterra.
Plutonio fundido.	Los Alamos.

(*) Esta tabla II y la III, están tomadas del artículo de J. A. Lane, antes citado.

Si se clasifican estos fluidos de acuerdo con las dificultades crecientes de su manejo, y otros problemas, se obtienen los resultados de la tabla III (*):

TABLA III

POSIBILIDAD TÉCNICA DE REACTORES DE POTENCIA			
Refrigerador	Moderador	Tipo de reactor	Fecha estimada en que se establecerá la viabilidad técnica
Aire.	Grafito.	G-1.	1955
CO ₂ .	Grafito.	Calder-Hall.	1956
H ₂ O.	Grafito H ₂ O.	APS-1, PWR, STR.	1955-57
D ₂ O.	D ₂ O.	BER, NPD.	1955-56
Solución de UO ₂ SO ₄ .	H ₂ O.	HRE.	1956
N.A.	Grafito.	SRE.	1956
NaK, Na.	Ninguno.	EBR.	1958
Solución concentrada de UO ₂ SO ₄ .	D ₂ O.	HRT.	1956
ThO ₂ en suspensión.	D ₂ O.	TBR.	1960
Bi, U + Bi.	Grafito.	LMFR.	1959
Difenil.	Difenil.	OMRE.	1957
Acido fosfórico.	H ₂ O.	LAPRE-1.	1956
Aleación de Pu fundido.	Ninguno.	LAMPRE.	1960

(*) A continuación damos la clave de la nomenclatura en uso de los tipos de reactores más importantes.

Power-Reactor Nomenclature.

Alam	Swedish Power Reactor (nat. U, D ₂ O).
ALPR	Argonne Low-Power Reactor (boiling water).
APPR	Army Package Power Reactor (pressurized water).
APS-1	USSR Atomic Power Station (graphite, H ₂ O).
ARE	ORNL Aircraft-Reactor Experiment.
BGR	Bismuth Graphite Reactor.
BORAX-1	Boiling-Water-Reactor Experiment.
BWR	Boiling-Water-Reactor (dual-cycle).
Calder Hall	U.K. Dual-Purpose Reactor (Graphite, CO ₂).
CDR	CO ₂ D ₂ O Reactor.
CGR	CO ₂ Graphite Reactor.
EBR-1, EBR-2	Experimental Breeder Reactors (fast).
EBWR	Experimental Boiling Water Reactor.
EL-3	French Enriched-U, D ₂ O Research Reactor.
Eve	Swedish Power Reactor (nat. U, D ₂ O).
FBR	Fast Breeder Reactor.
G-1, G-2	French Power Reactors (air, graphite; CO ₂ Graphite).
HIR	Homogeneous Reactor.
HIRF	Homogeneous-Reactor Experiment (UO ₂ SO ₄ , H ₂ O)
HRT	Homogeneous-Reactor Test (UO ₂ SO ₄ , D ₂ O).
LAMPRE	Los Alamos Molten-Pu-Alloy Reactor Experiment.
LAPRE-1, LAPRE-2.	Los Alamos Power-Reactor Experiments (UO ₂ , H ₃ PO ₃).
LMFR	Liquid-Metal-Fueled Reactor (U + Bi).
LSR	Large Ship Reactor (pressurized H ₂ O).
NPD	Canadian Nuclear Power Demonstration (U + D ₂ O)
OMRE	Organic-Moderated-Reactor Experiment (diphenyl)
PAP	Pennsylvania Advanced Reactor (aqueous homogeneous).
PWGR	Pressurized Water Graphite Reactor.
PWR	Pressurized Water Reactor.
R-3a, R-3b	Sweden Power Reactors (nat. U, D ₂ O).
SAR	Submarine Advanced Reactor (pressurized H ₂ O).
SDR	Sodium D ₂ O Reactor.
SFR	Submarine Fleet Reactor.
SGR	Sodium Graphite Reactor.
SIR-A, SIR-B	Submarine Intermediate Reactors.
SRE	Sodium Reactor Experiment (Na, graphite).
STR-1, STR-2	Submarine Thermal Reactors (pressurized H ₂ O).

El analizar en detalle las ventajas e inconvenientes de los 20 tipos reseñados, nos ocuparía demasiado y remitimos al lector interesado a las revistas especializadas (*). Aquí nos vamos a limitar únicamente al estudio de los reactores de uranio natural que, por las razones ya señaladas, parece han de ser los que más han de interesar en nuestro país en las primeras etapas del desarrollo de su programa de centrales nucleares.

Cuando se utiliza UN como combustible, queda reducido considerablemente el número de posibilidades indicado en la tabla I, y refiriéndonos únicamente a la geometría, energía de los neutrones y moderador, éstas son las indicadas en la tabla IV.

TABLA IV

Combustible	Energía de los neutrones	Geometría	Moderador
Uranio natural.	Lentos.	Heterogéneo.	Grafito.
		Homogéneo.	D ₂ O. D ₂ O.

El tipo homogéneo tiene interés teórico únicamente siendo las dos variantes del reactor heterogéneo las que actualmente están en desarrollo. Las dificultades que existían, tanto de precio como de

(*) Un interesante estudio, aunque ya algo retrasado, de los tipos principales de reactores, puede verse en el libro de S. Glasstone: "Principles of nuclear reactor Engineering".

posibilidad de suministro de agua pesada, han frenado el desarrollo de este tipo en las primeras fases del período de evolución de reactores de potencia. Estas dificultades que aún subsisten, están tendiendo a desaparecer. La producción de D_2O aumenta con ritmo creciente, y el precio actual puede cifrarse en \$ 28/lb. Con este precio y los substanciales descensos a prever en el futuro (*), las grandes ventajas de este reactor parece que impondrán un empleo creciente del mismo. Por ahora, los reactores de potencia de agua pesada en construcción son: los tres suecos, de potencias térmicas de 71, 75 y 91 Mw., que entrarán en funcionamiento los años 1960 y 1961; el noruego, de 20 Mw. térmicos, que comenzará a funcionar en 1959, y el canadiense, de 20 Mw. eléctricos, que entrará en funcionamiento en 1958. Posteriormente, tanto los suecos como los canadienses, parece han de desarrollar intensivamente el uso de este tipo. La plena utilización de las posibilidades de este tipo exige el empleo de D_2O , no sólo como moderador, sino como fluido de refrigeración, lo que hace que su desarrollo quede más y más vinculado al precio de D_2O .

Dado el interés demostrado por un gran número de países por los reactores de UN. U.S.A., que actualmente tiene en desarrollo dos programas de prototipos de reactores de potencia, está considerando seriamente el emprender un tercero de reactores de

(*) "Cheaper ways to make D_2O ". Paul Harteck. *Nucleonics*. September 1956, vol. XIV, núm. 9.

UN y D_2O , con el fin de facilitar a su industria privada las posibilidades de competir en el futuro mercado mundial de suministro de reactores (*).

Los resultados de este tercer programa americano no se podrán conocer antes del año 1960.

Se ve, pues, que de las dos centrales, la de grafito posee una ventaja inicial en factor tiempo de unos cuatro o cinco años. A esta ventaja debe sumarse el hecho de haber sido irrevocablemente elegida (**) por Inglaterra y Francia para cubrir las primeras etapas de sus programas de energía eléctrica nuclear, lo que, indudablemente, traerá como consecuencia la introducción en la misma de substanciales mejoras, principalmente en disminución del coste de primer establecimiento (***) .

Vamos a analizar ahora con algún detalle las más importantes ventajas e inconvenientes de cada una de las dos centrales, y para ello es indispensable comenzar recordando los conceptos esenciales de grado de quemado y de factor de regeneración del combustible o factor de conversión, que han de servirnos como patrón de medida para la comparación antedicha.

(Continuará.)

(*) *Nucleonics*. "Roundup of Key Developments in Atomic Energy", October 1956.

(**) "Nuclear Engineering", October 1956, pág. 265.

(***) "British Nuclear Energy Conference". Symposium on Calder Hall Works Nuclear Power Plants. Trabajo de Sir Christopher Hinton, antes mencionado.