

UN PROCEDIMIENTO DE CALCULO DE PROBABILIDADES DE IMPACTO DE AVIONES CONTRA UNA INSTALACION NUCLEAR (*)

Por ANTONIO VICENTE Y ORTIZ

Ing. de Caminos, Canales y Puertos.

Uno de los muchos aspectos que en relación con la seguridad de centrales nucleares hay que considerar en el proyecto de estas instalaciones, es el de la posibilidad de accidentes debidos al impacto de aeronaves contra las mismas. En el artículo se expone un procedimiento de cálculo para evaluar la probabilidad de accidentes de este tipo, para la estimación de los posibles riesgos de ellos derivables.

0. RESUMEN DEL ARTICULO

El presente artículo tiene como objeto indicar un procedimiento para evaluar cuál sería la probabilidad de impacto de una aeronave contra una instalación nuclear, y más concretamente contra una central nuclear.

Para ello, se han tomado fundamentalmente como base los cálculos detallados que, a manera de informe, ha realizado el *Institut für Reaktorsicherheit* (IRS), con la denominación IRS-W-12 (marzo 1975) (1), y el *Standard Review Plan*, sección 3.5.1.6 de USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission), de junio 1975 (3).

El procedimiento se basa fundamentalmente en considerar los distintos tipos de aviones que forman el tráfico aéreo, a saber:

- Helicópteros.
- Aviones deportivos y de negocios.
- Aviones comerciales (con carga de despegue superior a 5.700 Kg).
- Aviones militares de vuelo rápido (cazarreactores).

considerándose, además, diversas situaciones, tales como:

- Aterrizajes y despegues.
- Rutas o corredores aéreos.
- Tráfico aéreo libre.
- Areas de espera.
- Vuelos a baja altura.

Para cada una de las distintas situaciones anteriores, y en función del tipo de aeronave que se considere, se aplica una expresión que calcula la probabilidad de choque de ese tipo de aeronave con una central nuclear:

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de septiembre de 1977.

- En nuestro procedimiento de cálculo, la expresión para obtener la probabilidad de impacto se ha estimado que es la suma de las probabilidades resultantes consideradas, debido a que los sucesos son independientes entre sí. Por este motivo, la probabilidad que se obtiene es la más conservadora, ya que se supone que, caso de ocurrir un accidente que pudiera provocar el choque de una aeronave contra la instalación, la probabilidad de dicho evento se calcula con esa expresión final, en la que siempre interviene el tipo de avión más desfavorable para el cálculo.
- Se hace la observación de que, aunque los aviones militares son de masa inferior a los de pasajeros, se les tiene en cuenta a la hora de determinar probabilidades de impacto, como consecuencia de la elevada velocidad de vuelo a la que vuelan en comparación con la de los aviones comerciales. Respecto a los helicópteros y a los aviones deportivos y de negocios, aunque su masa y velocidad de crucero son pequeñas comparativamente con el resto de aeronaves que conforman el tráfico aéreo, sin embargo, se les debe tomar en cuenta, debido principalmente a la mayor ocurrencia de accidentes para estas aeronaves.

La antigua USAEC, hoy USNRC (11 y 12), basada en las conclusiones del informe Rasmussen (11 y 13), indica que el valor guía 10^{-4} choques/año sería un límite aceptable para las centrales nucleares. Hay que destacar que el valor a que llegó Rasmussen es de por sí conservador, por las premisas pesimistas introducidas en sus hipótesis, y que no obstante, en la actualidad, la USNRC, según consta en su *Standard Review Plan* (3), adopta un valor aún más conservador (10^{-5} por año) que el obtenido en aquel informe, indicando que los recintos de contención de las centrales nucleares deberían proyectarse para soportar los impactos de aeronaves, sólo si la probabilidad de tal evento fuese mayor de 10^{-5} por año.

1. INTRODUCCION

Cualquier instalación de tipo nuclear —y más particularmente una central nuclear— que esté ubicada en territorio español, deberá cumplimentar con todas las normas de seguridad promulgadas en España para que dicha central sea licenciable. Para evaluar los posibles riesgos que pueden derivarse en relación con el tráfico aéreo, estimando cuál es la probabilidad de que una aeronave caiga sobre la central nuclear y, en particular, sobre el edificio del reactor, se ha desarrollado un procedimiento de cálculo basado en magnitudes de tipo probabilístico, que es el que se comenta seguidamente.

Se han efectuado para algunos emplazamientos en distintos lugares del mundo diversos estudios, que determinan el cálculo de esta probabilidad en cualquier circunstancia de caídas de aeronaves, los cuales se mencionan a continuación:

- Joerissen y Zuend estimaron la probabilidad y consecuencias de que una aeronave cayese sobre una central nuclear con un reactor de agua ligera, considerando la probabilidad de choque de la aeronave, penetración de los misiles originados en la colisión a través de los muros y los daños producidos en las estructuras y sistemas relacionados con la seguridad. Esta pro-

babilidad de choque fue determinada de las estadísticas disponibles en los accidentes de aviación para cada tipo de vuelo, suponiendo que, aproximadamente, un tercio de esos accidentes ocurrían fuera de la vecindad de un aeropuerto (distancia del aeropuerto, mayor de 20 Km, aproximadamente), y considerando sólo aviación comercial. Posteriormente, para facilitar los cálculos de área virtual de impacto se supuso que la aeronave llevaba un ángulo medio de impacto de 45° sobre la horizontal.

- Chelapati, Kennedy, Wall, Augenstein y Wais clasificaron las aeronaves en distintas categorías de acuerdo con su peso, con un límite en 12.500 libras (5.680 Kg), y clasificaron los accidentes en las inmediaciones de los aeropuertos (en distancias hasta 5 millas = 8 Km del aeropuerto considerado), estimando la superficie virtual de la central suponiendo que la trayectoria de la aeronave formaba un ángulo de 10° sobre la horizontal, alrededor de toda la central, sin especificar la dirección del impacto.
- Para los reactores de agua ligera, Three Mile Island, Shoreham, Rome Point y Zion, que están localizados en las proximidades de aeropuertos comerciales, tal como indica la figura 1 para alguno de ellos, se ha efectuado un estudio donde únicamente se han considerado las aeronaves que despegan y aterrizan en esos aeropuertos.
- Eisenhower estudió la probabilidad de que una aeronave cayese en la vecindad de un aeropuerto, como función de la distancia de caída a las pistas

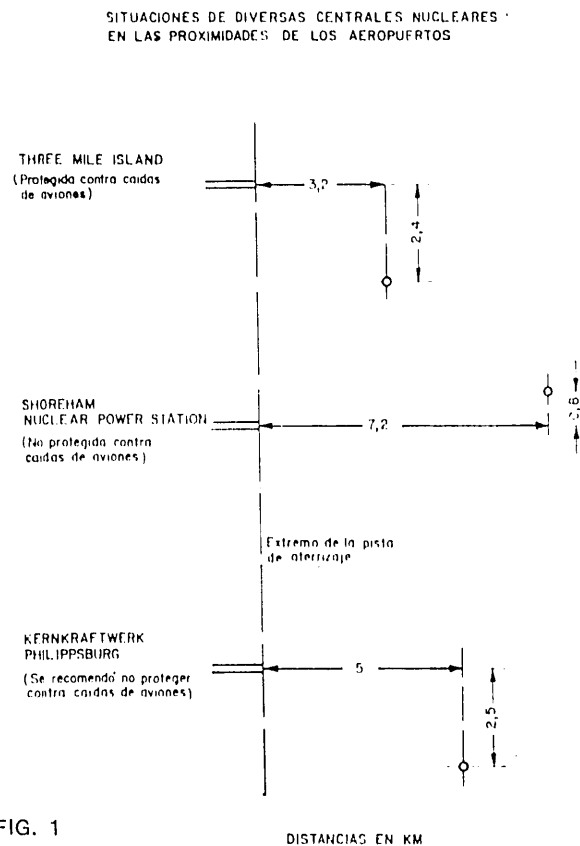
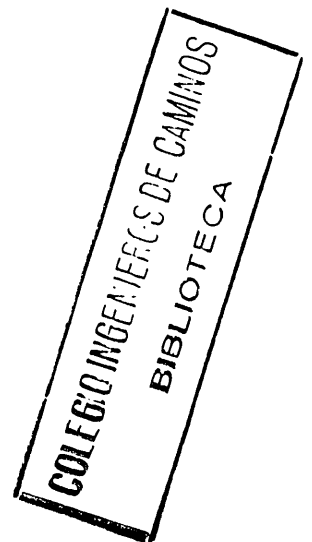


FIG. 1



de aterrizaje del mismo, y lo aplicó a las centrales nucleares de Three Mile Island, Shoreham y Rome Point, que están en las inmediaciones de aeropuertos comerciales.

- Hornyik, en un estudio para un emplazamiento propuesto en las inmediaciones de una zona de entrenamiento de aviones militares, introduce la densidad de tráfico alrededor del aeropuerto y determina la probabilidad de choque sobre el emplazamiento por los aviones que aterrizan o que llevan un vuelo de aproximación a baja altura.

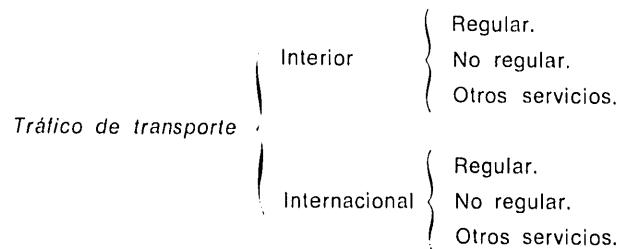
El presente estudio tiene en cuenta todas las situaciones del comportamiento del tráfico aéreo general, el cual se comentará en el apartado 2 siguiente, pero, no obstante, para su correcta aplicación debe efectuarse un estudio particular de la zona donde esté ubicada la central.

2. ESTUDIO DEL TRAFICO AEREO EN GENERAL

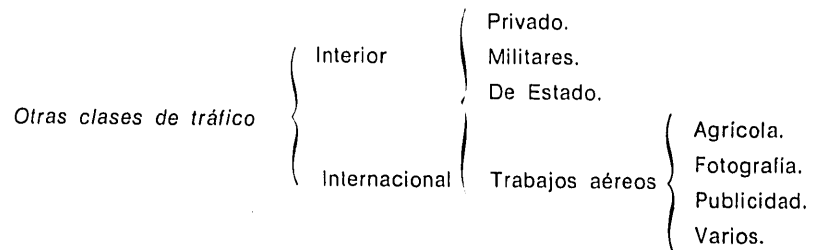
Según la Subsecretaría de Aviación Civil, en España el tráfico, en una primera división atendiendo a la finalidad, se divide en:

- a) Tráfico de transporte.
- b) Otras clases de tráfico.

a) El tráfico de transporte puede realizarse de forma interior o internacional, y en cada una de ambas modalidades puede ser regular, no regular o de otros servicios:



b) El tráfico de otras clases puede ser interior o internacional, y para ambos, de una determinada clase:



Tráfico de transporte Supone la explotación comercial por parte de una empresa de transporte.

Otras clases de tráfico La explotación no persigue un fin comercial (excepto trabajos aéreos).

<i>Tráfico interior</i>	Todos los vuelos de aeronaves nacionales o extranjeras en los cuales todas las etapas de vuelo se encuentran en aeropuertos españoles.
<i>Tráfico internacional</i>	Todos los vuelos de aeronaves nacionales o extranjeras en los que, en el total del mismo, el origen o destino no está situado en territorio español.
<i>Tráfico regular</i>	El compuesto por valores efectuados de acuerdo con un horario publicado, o de un modo tan regular o frecuente que constituyen una serie sistemática identificable, ofrecidos al público, los vuelos extraordinarios ocasionados por exceso de tráfico de los vuelos regulares y vuelos de pago preparatorios de servicios aéreos proyectados.
<i>Tráfico no regular</i>	Compuesto por vuelos fletados y especiales por remuneración, no efectuados de un modo regular y los viajes "todo comprendido que no se hayan notificado bajo servicios regulares.
<i>Tráfico otros servicios</i>	Compuesto por vuelos efectuados por empresas de transporte tales como de emplazamiento, de prueba, de instrucción, etc.
<i>Tráfico privado</i>	Realizado por un particular o aeroclub.
<i>Tráfico militar</i>	Aeronaves militares en aeródromos civiles.
<i>Tráfico de Estado</i>	Vuelos oficiales.
<i>Tráfico de trabajos aéreos</i> ..	Relativo a los trabajos: agrícola, fotográfico, publicidad o varios.

Otras definiciones que facilita la Subsecretaría de Aviación Civil del Ministerio del Aire son las siguientes:

<i>Movimientos de aeronaves</i> ..	Es la suma de entradas más salidas de las aeronaves en el aeropuerto considerado.
<i>Corriente de tráfico</i>	Se discriminan en los dos sentidos por entradas y salidas.
<i>Kilómetros recorridos</i>	Igual a la suma de los productos obtenidos al multiplicar el número de vuelos efectuados en cada etapa de vuelo por la distancia de la etapa.
<i>Horas de vuelo</i>	Se refieren a la hora entera más próxima y se basa en el tiempo entre calzos.
<i>Salida de aviones</i>	Igual al número de aterrizajes efectuados o etapas de vuelo recorridas.

En el estudio que puede desarrollarse para una central nuclear referente al tráfico aéreo general, se ha subdividido aquél en dos subapartados, a saber:

- Clases de aeronaves.
- Categorías de tráfico aéreo.

2.1. Clases de aeronaves.

Las clases de aeronaves que componen el tráfico aéreo se denominan por la letra X, y en cada grupo se tiene:

- X-1, *Helicópteros.*
- X-2, *Avionetas.*
- X-2, *Aviones sin motor.*
- X-3, *Aviones hasta 20.000 Kg de carga de despegue.*
- X-4, *Aviones con carga de despegue superior a 20.000 Kg.*
- X-5, *Aviones militares rápidos (cazarreactores).*

2.2. *Categorías de tráfico aéreo.*

Las categorías de tráfico aéreo están denominadas por la letra Y, y determinan las fases de vuelo en que se encuentra una determinada aeronave. Tendremos, por tanto, lo siguiente:

- Y-1, *Aterrizajes y despegues.*
- Y-2, *Rutas aéreas (corredores aéreos).*
- Y-3, *Tráfico aéreo libre.*
- Y-4, *Areas de espera.*
- Y-5, *Vuelos a baja altura.*

2.3. *Composición de las clases de aeronaves con las categorías de tráfico aéreo.*

De los subapartados anteriores puede formarse una serie de combinaciones que son las que conforman el tráfico aéreo general de cualquier país, y en particular, España. De esta manera tendremos que las posibles combinaciones de las aeronaves con las categorías de tráfico aéreo (X/Y) serían:

Combinación (X/Y)	Clase de aeronave	Categoría del tráfico
1/1 1/3 1/4	Helicópteros.	Aterrizajes y despegues. Tráfico aéreo libre. Areas de espera.
2/1 2/2 2/3 2/5	Avionetas.	Aterrizajes y despegues. Rutas aéreas. Tráfico aéreo libre. Vuelos a baja altura.
3/1 3/2 3/3 3/4	Aviones hasta 20.000 kilogramos de carga de despegue.	Aterrizajes y despegues. Rutas aéreas. Tráfico aéreo libre. Areas de espera.
4/1 4/2 4/4	Aviones con carga de despegue mayor de 20.000 kilogramos.	Aterrizajes y despegues. Rutas aéreas. Areas de espera.
5/1 5/2 5/3 5/4 5/5	Aviones militares.	Aterrizajes y despegues. Rutas aéreas. Tráfico aéreo libre. Areas de espera. Vuelos a baja altura (entrenamientos).

3. METODO DE CALCULO GENERAL

Las expresiones utilizadas para el cálculo de las probabilidades de choque en este estudio se deducen teniendo en cuenta las distintas categorías de tráfico aéreo (Y), mencionadas en el apartado 2.2.

Previamente se va a indicar una expresión general para la obtención de la probabilidad media, tomando en consideración tanto el número de accidentes ocurridos en una zona determinada del país, como la superficie de esa zona. Así, pues, se tendrá:

3.0. Cálculo de probabilidades medias (análisis global).

Si denominamos por:

f = número de choques/año (frecuencia) para cada tipo de aeronave considerado.

S_c = superficie de la central (Km²).

S = superficie de la zona que se considera (Km²):

España peninsular	492.463 Km ²
Islas Baleares	5.014 Km ²
Islas Canarias	7.273 Km ²
Total España	504.750 Km ²

La probabilidad de choque vendrá expresada por:

$$P_{00} = f \cdot \frac{S_c}{S} \quad [\text{Choques/año}]$$

3.1. Cálculo de probabilidades en caso de aterrizajes y despegues (Y = 1).

En todos los estudios realizados referentes a las caídas de aviones se ha llegado a la conclusión de que las dos terceras partes de estas caídas tienen lugar en los despegues y aterrizajes. Por este motivo, se han efectuado diversos estudios para las centrales nucleares ubicadas en emplazamientos distantes de las pistas de aterrizaje 5 millas (≈ 8 Km), y se han obtenido diversas expresiones, según se tratara de aeronaves con carga de despegue superior a 5.700 Kg o de aeronaves militares de vuelo rápido (cazarreactores).

3.1.1. Aeronaves comerciales de masa superior a 5.700 Kg.

Según las estadísticas americanas, adoptadas también por los alemanes [TU 15 (1974), Mr 4 April] (2), la frecuencia de accidentes dentro de una semicircunferencia de centro, el final de la pista de aterrizaje y radio, $R = 9$ Km aproximadamente, sigue una ley exponencial del tipo:

$$f_{x,1}(R) = a_x \cdot e^{-b_x \cdot R} \quad (\text{caídas/vuelo})$$

donde:

$f_{x,1}$ = frecuencia de accidentes, según la clase de aeronave X y para la categoría aterrizajes y despegues.

a_x, b_x = valores constantes determinados estadísticamente, para la clase de aeronave X.

R = distancia desde el extremo de la pista a la central nuclear.

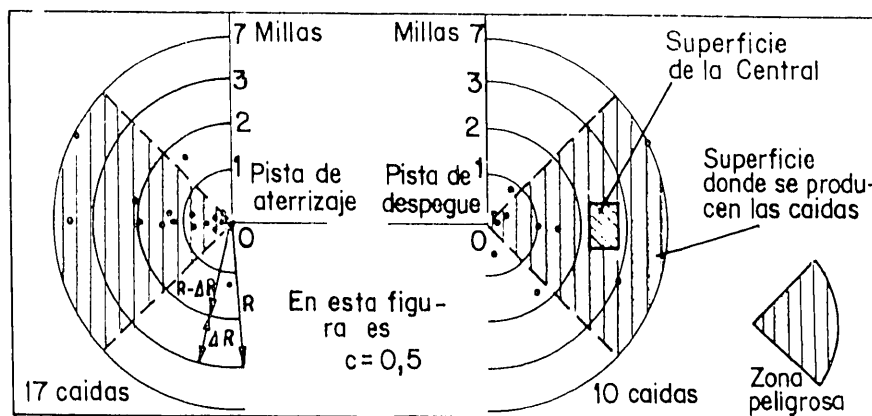
Considerando el área de una corona circular, de radios R y $R - \Delta R$, se tendrá:

$$S(R) = \pi [R^2 - (R - \Delta R)^2] = \pi [2R \cdot \Delta R - (\Delta R)^2]$$

Es práctica generalmente empleada en este tipo de estudio que se adopte como valor del incremento del radio la unidad. Así, pues, como entonces es $\Delta R = 1$ Km, se tendrá como expresión simplificada:

$$S(R) = \pi \cdot (2R - 1)$$

Al no considerarse la corona circular completa, debido a que los accidentes tienen lugar preponderantemente en las proximidades de las pistas, bien en el aterrizaje o bien en el despegue, según se muestra en la figura A, habrá que considerar solamente la superficie donde tienen lugar las caídas, y eso se cuantifica mediante un factor C que es menor que la unidad ($C < 1$).



Caidas de aviones en aterrizajes y despegues con un movimiento de $9'6 \cdot 10^6$ (aeronaves tráfico comercial y charter en USA durante 1956-1965)

FIG. A

Así, pues, la superficie donde se producen las caídas a tener en cuenta será, entonces:

$$S(R) = C \cdot \pi \cdot (2R - 1)$$

Si denominamos ahora por:

S_c = superficie de la central (Km^2).

$d_{x,1}$ = número de movimientos en el aeropuerto considerado por año (= aterrizajes + despegues), para cada clase de aeronave X.

llegamos a obtener la siguiente expresión que calcula la probabilidad de choque:

$$P_{1,1} = d_{x,1} \cdot f_{x,1}(R) \cdot \frac{S_c}{S(R)}$$

es decir, sustituyendo los valores obtenidos anteriormente se obtiene:

$$P_{1,1} = d_{x,1} \cdot \frac{a_1 \cdot S_c}{C \cdot \pi} \cdot \frac{e^{-b_1 \cdot R}}{2R - 1}$$

Para aeronaves comerciales de masa superior a 5 700 Kg es práctica usual, según la estadística alemana, adoptar los siguientes valores medios:

$$a_1 = 1,16 \cdot 10^{-9}$$

$$C = 0,5$$

$$b_1 = 0,983$$

Según se verá en el apartado 3.7.3, se va a adoptar en este estudio que la central nuclear está ubicada en una superficie de forma cuadrada, de 100 m de lado; por tanto, $S_c = 0,01 \text{ Km}^2$. Y así, pues, sustituyendo todos estos valores en la última expresión que calcula la probabilidad, se llega a:

$$P_{1,1} = d_{x,1} \cdot \frac{7,4 \cdot 10^{-9}}{2R - 1} \cdot e^{-0,983 R} \quad [\text{Choques/año}]$$

que es la expresión que se aplica para el cálculo de las probabilidades de caída de aeronaves comerciales con carga de despegue superior a 5.700 Kg.

3.1.2. Aeronaves militares de vuelo rápido.

Para este tipo de aeronaves es $X = 5$, pudiendo efectuarse el siguiente estudio:

Si la central nuclear está ubicada en la ruta de vuelo y dentro de la zona de aproximación del aeropuerto, es decir, a una distancia aproximada $R \leq 15 \text{ Km}$, el tiempo en que un avión sobrevuela la central antes de la fase de aterrizaje o después de la fase de despegue viene indicado por:

$$t = \frac{b}{V}$$

Siendo:

b = dimensión (Km) del área de ubicación de la central según la dirección del eje de la pista de aterrizaje y/o despegue.

V = velocidad media de vuelo del avión militar (Km/h), en aterrizajes o despegues.

Denominado, además, por:

$f_{a,1}$ = número de caídas/hora de vuelo de los aviones militares rápidos (frecuencia).

$d_{a,1}$ = número de movimientos (aterrizajes + despegues) por año, del aeropuerto considerado.

la probabilidad de choque de los aviones militares rápidos sobre una central nuclear que diste menos de 15 Km de las pistas de aterrizaje de un aeropuerto, viene indicada por la siguiente expresión:

$$P_{1,2} = \frac{b}{V} \cdot f_{a,1} \cdot d_{a,1} \quad [\text{Choques/año}]$$

3.2. Cálculo de probabilidades en caso de corredores aéreos ($Y = 2$).

En los casos en que una aeronave siga una determinada ruta aérea, se espera que aquélla siga una línea de vuelo, a menudo definida y señalada mediante señales de radar y/o demarcaciones. La ruta de vuelo que en realidad sigue la aeronave se desvía de este camino ideal marcado, debido a una variedad de razones: inexactitud de los sistemas de navegación, inexactitud de los controles, malas condiciones atmosféricas (viento, visibilidad, etc.), mal funcionamiento en los controles de la aeronave o en los de tierra, error del piloto de la aeronave, etc. Por este motivo, se define una función de densidad de tráfico aéreo, que tiene en cuenta todos los vuelos, excepto aquéllos en los que la aeronave ha colisionado. La forma exacta de esta función es desconocida y puede llegar a ser más bien compleja, debido a la naturaleza y variedad de los efectos que la determinan. Sin embargo, parece ser consistente con los teoremas de probabilidad suponer que las desviaciones de la aeronave del camino ideal pueden ser aproximadas, al menos en parte, mediante una función de tipo gaussiano. Tal aproximación puede esperarse que sea representativa de la realidad tanto como que dichas desviaciones se deban a combinaciones de gran número de influencias independientes y aleatorias. La desviación estándar que caracteriza la función de Gauss puede estar relacionada de manera directa con los datos disponibles o la exactitud de la navegación. En nuestro estudio, y según Fürste y Glupe [TU 15 (1974), Mr 4 April] (2), se considera que la máxima desviación con respecto al eje ideal de la ruta es de 2° , a efectos de determinar esa desviación estándar.

En consecuencia, podremos escribir lo siguiente:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} \cdot dx$$

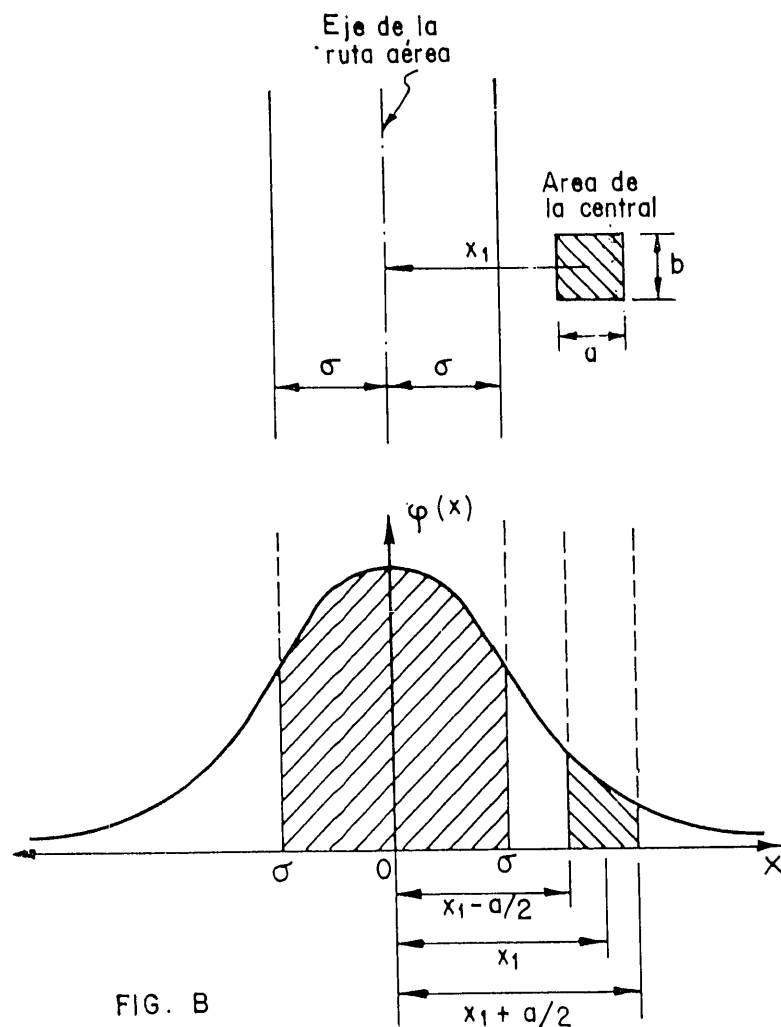


FIG. B

σ = desviación estándar (desviación lateral máxima) de la variable aleatoria x .

$$\Phi \left(x_1 - \frac{a}{2} < x < x_1 + \frac{a}{2} \right) = \Delta \Phi = \int_{x_1 - \frac{a}{2}}^{x_1 + \frac{a}{2}} \varphi(x) \cdot dx \quad [1]$$

$$\Phi(-\infty < x < \infty) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) \cdot dx = 1$$

Para el cálculo de la expresión [1] se procede con las tablas normales $N(0,1)$, y para ello se tipifica la variable aleatoria x , restándole su media y dividiendo por su desviación estándar σ ; a la nueva variable aleatoria se la denomina por la letra λ , y el cálculo probabilístico demuestra que la distribución de dicha variable es del tipo $N(0,1)$, pudiendo, en consecuencia, utilizar las tablas normales. Así, pues:

$$\lambda = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Como $\mu = 0$, ya que suponemos la gaussiana sentada sobre la media, queda:

$$\lambda = \frac{x}{\sigma} \rightarrow x = \lambda \cdot \sigma$$

Sustituyendo en la expresión [1]:

$$\begin{aligned} \Delta \Phi &= \Phi \left(x_1 - \frac{a}{2} < x < x_1 + \frac{a}{2} \right) \Phi = \left(x_1 - \frac{a}{2} < \lambda \cdot \sigma < x_1 + \frac{a}{2} \right) \\ &= \Phi \left(x_1 - \frac{a}{2} < \lambda \cdot \sigma < x_1 + \frac{a}{2} \right) \int_{x_1 - \frac{a}{2}}^{x_1 + \frac{a}{2}} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\lambda^2}{2}} \cdot d\lambda \end{aligned}$$

Para la máxima desviación de 2° respecto al eje ideal de la ruta y considerando la distancia máxima de radiofaros existente en la República Federal de Alemania de 149 Km (radiofaros de Weser y Eelde), según Fürste y Glupe, se obtiene una desviación lateral máxima de 2,6 Km, según muestra la figura C:

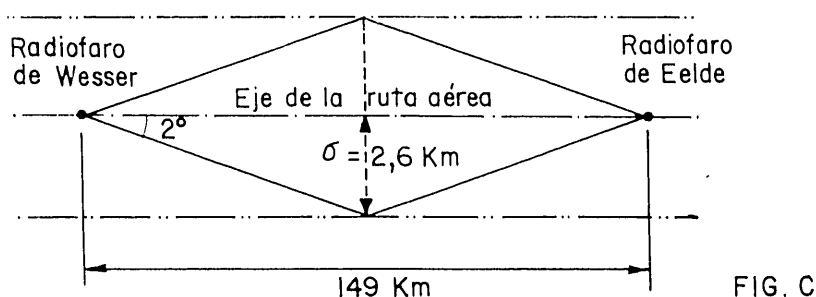


FIG. C

Sin embargo, como medida de seguridad y dado que cabe la posibilidad de que un avión que se mueve sobre la ruta aérea pueda encontrarse en su trayectoria con otra aeronave, al tratar de evitarla, puede desviarse una magnitud mayor de 2,6 Km. Esta desviación se cifra empíricamente en otros 2,6 Km adicionales.

Así, pues, para la moderna navegación, y en el caso de la República Federal Alemana, se adopta $\sigma = 5,2$ Km como desviación estándar.

En el caso de España, y considerando también que se adopta como máxima desviación 2° , habrá que tomar en cuenta la distancia entre dos radiofaros consecutivos, al hacer el estudio en una ruta determinada, y tener en consideración lo precedente.

Si denominamos por:

$d_{x,2}$ = número de vuelos/año por la ruta aérea, para cada clase de aeronave que constituye el tráfico aéreo.

$f_{x,2}$ = número de accidentes/vuelo Km, en rutas aéreas para cada clase de aeronave.

b = dimensión (Km) del área de ubicación de la central, según la dirección de la ruta aérea.

podemos escribir la siguiente expresión, que calcula el valor de la probabilidad de choque:

$$P_{12} = d_{x,2} \cdot f_{x,2} \cdot b \cdot \Delta \phi$$

es decir:

[Choques/año]

$$P_{12} = d_{x,2} \cdot f_{x,2} \cdot b \cdot \int_{x_1 - \frac{a}{2}}^{x_1 + \frac{a}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot d\lambda$$

3.3. Cálculo de probabilidades en caso de tráfico aéreo libre ($Y = 3$).

Suponiendo que en zonas más lejanas a una cierta distancia del aeropuerto considerado cada dirección de vuelo sea igualmente probable, la probabilidad de que una central nuclear situada a una distancia R de dicho aeropuerto sea sobrevolada será:

$$p' = \frac{a}{2\pi R}$$

Si la central está sobrevolada con una velocidad media de V (Km/h.), el tiempo durante el cual una aeronave permanece sobre la central en cada vuelo será:

$$t = \frac{b}{V}$$

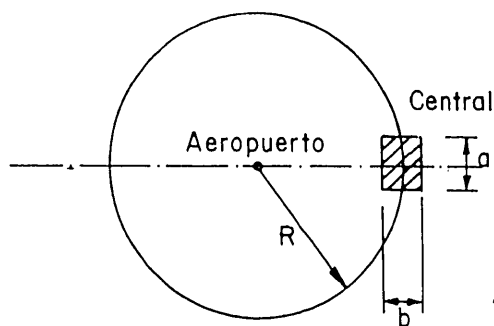


FIG. D

Si denominamos por:

$d_{x,3}$ = número de movimientos en el aeropuerto considerado (aterrizajes + despegues), para cada clase de aeronave.

$f_{x,3}$ = frecuencia de choque por hora de vuelo, para cada clase de aeronave

se tendrá que el tiempo máximo de permanencia de todas las aeronaves que sobrevuelan la central viene determinado por:

$$T = \frac{a}{2 \pi R} \cdot \frac{b}{V} \cdot d_{x, z}$$

Por último, la expresión que proporciona el cálculo de la probabilidad de choque será:

$$P_{z, z} = \frac{a}{2 \pi R} \cdot \frac{b}{V} \cdot d_{x, z} \cdot f_{x, z} \quad [\text{Choques/año}]$$

3.4. Cálculo de probabilidades en caso de áreas de espera ($Y = 4$)

Según los estudios hechos por alemanes y americanos respecto a este tema, se indica que la frecuencia de choque en las áreas de espera no es mayor que en las rutas aéreas. En consecuencia, la *frecuencia de choque en las áreas de espera puede tomarse aproximadamente igual que en las rutas aéreas*.

Así, si denominamos por:

$f_{x, z}$ = frecuencia de choque por hora de vuelo de las clases de aeronaves que están en las áreas de espera.

$d_{x, z}$ = número de aeronaves por año que están volando en el área de espera.

t = tiempo de estancia de las aeronaves en el área de espera (horas).

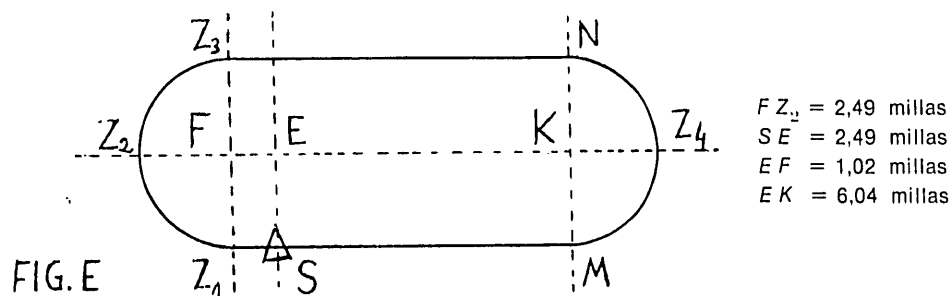
S = área de la zona de espera (Km^2).

a, b = dimensiones de la central nuclear (Km).

podemos obtener una expresión análoga a las obtenidas para los tres casos precedentes, es decir:

$$P_z = f_{x, z} \cdot d_{x, z} \cdot t \cdot \frac{a \cdot b}{S} \quad [\text{Choques/año}]$$

Las aeronaves en las áreas de espera, generalmente siguen un circuito con una trayectoria teórica perfectamente definida cuya forma y dimensiones vienen indicadas en la figura E siguiente:



La trayectoria de las aeronaves en el área de espera generalmente es de gran precisión sobre el circuito, si bien hasta llegar a él hay que realizar ciertas maniobras o virajes que pueden hacer sobrevolar cualquier parte de la zona de protección, y que no se pueden precisar en cuanto a frecuencia, ya que depende de la ruta de aproximación de la aeronave a la espera.

Una vez está la aeronave centrada sobre el circuito, suele seguirlo con gran exactitud pudiendo, en consecuencia, ser tratado dicho circuito según el modelo aplicable a corredores aéreos en general.

Como el margen de error de los instrumentos de control de navegación es del orden de 2° , según se vio en el apartado 3.2, puede determinarse la desviación estándar de idéntica manera a como se determinó en dicho apartado. En este caso, como no es previsible que existan en el mismo circuito más de una aeronave, dada la peligrosidad que ello entrañaría, no habría que considerarse una desviación adicional a la estándar.

La probabilidad de impacto se calcularía empleando la fórmula siguiente:

$$P'_i = I'_{x,i} \cdot d_{x,i} \cdot b \cdot \Delta\phi + \Delta P_i$$

en donde:

$I'_{x,i}$ = número de accidentes por kilómetro de vuelo de las clases de aeronaves que están en las áreas de espera.

$d_{x,i}$ = número de aeronaves por año que están volando en el área de espera.

b = dimensión longitudinal de la central (Km).

$$\Delta\phi = \int_{x_1 - \frac{\sigma}{2}}^{x_1 + \frac{\sigma}{2}} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cdot dx$$

ΔP_i = contribución a la probabilidad total de impacto, que tiene en cuenta los virajes y otras circunstancias adversas que suponen las maniobras en el área de protección (área de espera) previas a la llegada al circuito.

El valor de ΔP_i se calcula mediante la expresión de P_i , en la cual ahora t tiene el siguiente concepto:

t = tiempo de maniobra de la aeronave hasta situarse con precisión sobre el circuito (suele adoptarse $t = 5$ minutos).

Es decir, será entonces:

$$\Delta P_i = I'_{x,i} \cdot d_{x,i} \cdot t \cdot \frac{a-b}{S}$$

Con las definiciones, exceptuando el tiempo t , indicadas en el apartado 3.4.

3.5. Cálculo de probabilidades en caso de vuelos a baja altura ($Y = 5$).

Para tomar en consideración este caso, denominemos por:

$f_{v,5}$ = frecuencia de choque por hora de vuelo de las aeronaves en las zonas de vuelo a baja altura.

t = tiempo medio de estancia de las aeronaves en la zona de baja altura

$d_{v,5}$ = número de aeronaves de cada clase que operan en dicha zona.

S = superficie de la zona de vuelos a baja altura.

S_c = superficie de la central nuclear.

obteniendo como expresión final de la probabilidad la siguiente expresión, que también es análoga a las expresiones calculadas anteriormente:

$$P_5 = f_{v,5} \cdot t \cdot d_{v,5} \cdot \frac{S_c}{S} \quad [\text{Choques/año}]$$

3.6. Cálculo de probabilidades totales.

Debido a que los sucesos anteriormente mencionados son independientes, la probabilidad resultante total es la suma de las probabilidades anteriores, es decir:

$$P_t = (P_{1,1} + P_{1,2}) + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad [\text{Choques/año}]$$

3.7. Cálculo del área de la central (área virtual).

3.7.1. Definición del área virtual.

Si consideramos un edificio y una aeronave, cuya trayectoria de posible impacto forma un ángulo α con la horizontal, se define como superficie virtual del edificio, para esa trayectoria, el área de la sombra proyectada por el edificio sobre el terreno, según la proyección cilíndrica de ángulo α .

3.7.2. Expresión general de la superficie virtual.

Sea $P(\alpha, \beta)$ la superficie virtual del edificio para un ángulo de impacto α con respecto a la horizontal, y una dirección que forma un ángulo β con referencia a una superficie plana vertical. La superficie virtual $P(\alpha, \beta)$ generalmente varía en función de los dos parámetros α y β , pero para cada aeronave que se aproxima al edificio esta superficie virtual puede ser bien establecida, lo cual conduce a la definición de superficie virtual media probable del edificio en cuestión:

Si denominamos por $A(\alpha)$ la probabilidad de llegada de una aeronave sobre el edificio con un ángulo de impacto α , y por $B(\beta)$ la probabilidad de que la direc-

ción de la aeronave forme un ángulo β con la superficie plana de referencia ($0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ y $0 \leq \beta \leq 2\pi$), la superficie virtual probable media para cualquier aeronave puede entonces estar definida por la siguiente expresión:

$$S_v = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} P(\alpha, \beta) \cdot A(\alpha) \cdot B(\beta) \cdot d\alpha \cdot d\beta$$

En los casos generales (edificios paralelepípedicos, emplazamientos geográficos montañosos, etc.), la superficie virtual probable media S_v es difícil de evaluar, pero en ciertos casos particulares, como es el presente, pueden efectuarse varias simplificaciones, que son comúnmente aceptadas por diversos investigadores (6):

- La probabilidad $B(\beta)$ de que la dirección de impacto de la aeronave forme un ángulo β con la superficie de referencia tiene una distribución que puede considerarse como generalmente uniforme.
- Si existe un edificio de revolución (cilíndrico o del tipo de edificio de reactor de agua a presión) el área proyectada sobre el terreno $P(\alpha, \beta)$ es constante con respecto a β .
- Para el análisis estadístico se vislumbra que la probabilidad $A(\alpha)$ de choque de aeronaves que puede afectar a la central nuclear está mayormente distribuida entre los ángulos de impacto iguales a 45° y 90° .

Para simplificar, y adoptando una premisa claramente pesimista, se considera que la mitad de las aeronaves chocan verticalmente con la central y que la otra mitad se supone que lo hace con un ángulo de impacto α igual a 45° .

Según M. Cravero y G. Lucenet, de Electricité de France (6), para un edificio cilíndrico de diámetro D y altura H el área virtual del mismo es igual a:

$$S_v = \pi \frac{D^2}{4} + \frac{DH}{2}$$

Para un edificio cilíndrico de tipo de agua a presión (PWR), de diámetro D y altura H , con una cúpula semiesférica sobre él, el área virtual del edificio es, según los mismos autores:

$$S_v = \pi \frac{D^2}{4} \left(\frac{3 + \sqrt{2}}{4} \right) + \frac{D}{2} \left(H - \frac{D}{2} \right)$$

3.7.3. Determinación de la superficie virtual en función de la aeronave.

En los cálculos anteriores se llegó a obtener la superficie virtual, suponiendo que la aeronave era un punto físico. Como las dimensiones de la aeronave no son despreciables frente a las dimensiones de un edificio industrial, se ha de determinar ahora la superficie virtual teniendo en cuenta una aeronave de referencia, tanto para la aviación comercial como para el resto.

Para el caso más desfavorable, la aeronave de referencia que se selecciona para la determinación de la superficie virtual es el "Boeing 747" para la aviación comercial, que es la aeronave de mayores dimensiones y peso (la dimensión a tener en cuenta corresponde a la distancia entre los ejes del cuerpo y la turbina situada más al extremo del ala; es decir, 21 m para dichas aeronaves), y una aeronave para el resto de la aviación, que tiene de envergadura 11 m (distancia a tener en cuenta, 5,5 m).

Para considerar las dimensiones del avión se incrementarán artificialmente las dimensiones del edificio, añadiendo una distancia d con los valores que se han indicado anteriormente para cada aeronave de referencia. De esta manera, se obtiene, según Cravero y Lucenet (6), las siguientes expresiones:

— EDIFICIO CILINDRICO:

$$S_{v'} = \pi \frac{(D + d)^2}{4} + \frac{(D + d)}{2} H$$

— EDIFICIO DE REACTOR DE AGUA A PRESION (PWR):

$$S_{v'} = \pi \frac{(D + d)^2}{4} \cdot \left(\frac{3 + \sqrt{2}}{4} \right) + \frac{D + d}{2} \left(H - \frac{D}{2} \right)$$

Por último, para el cálculo del área virtual de un edificio de reactor tipo agua a presión en función de cada aeronave de referencia se obtiene el siguiente valor:

SUPER-PHENIX ($D = 66$ m $H = 80$ m):

Aviación comercial ($d = 21$ m)	$S_{v'} = 8.600 \text{ m}^2$
Aviación general ($d = 5,5$ m)	$S_{v'} = 6.100 \text{ m}^2$

CENTRAL ALEMANA TIPO ($D = 62$ m $H = 53$ m):

Aviación comercial ($d = 21$ m)	$S_{v'} = 6.884 \text{ m}^2$
Aviación general ($d = 5,5$ m)	$S_{v'} = 4.692 \text{ m}^2$

— Generalmente, en los métodos de cálculo se considera en todas las circunstancias como superficie virtual de la central, el área del emplazamiento, que se supone cuadrado, de 100 m de lado, es decir:

$$S_{v'} = 10.000 \text{ m}^2$$

para cualquier tipo de aeronave de referencia, en lugar de los valores obtenidos para la central tipo. Esta consideración, de incrementar el área virtual resultante, nos permitirá trabajar dentro de una hipótesis más conservadora, ya que las expresiones de los apartados anteriores indican que la probabilidad de impacto (en choques por año) es directamente proporcional a la superficie considerada para la central nuclear, o a una dimensión característica de la misma, obteniéndose en consecuencia una mayor probabilidad de choque que si se hubiesen empleado los valores de la central tipo.

BIBLIOGRAFIA

1. LOTHAR SUTTERLIN: "Betrachtungen über das Risiko bei Flugzeugabsturz auf ein Kernkraftwerk". Informe IRS-W-12, marzo 1975.
2. WOLFGANG FURSTE y GERHARD GLUPE: "Absturzhäufigkeit von Flugzeugen auf Kernkraftwerke". TÜ, 15, Nr. 4, April 1974.
3. STANDARD REVIEW PLAN, Section 3.5.1.6. *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. June 1975.
4. NORMA ANSI N. 177, April 1974 (DRAFT). "Plan Design Against Missiles".
5. KARL HORNYIK y JOHN E. GRUND: "Evaluation of Air Traffic Hazards at Nuclear Plants". *Nuclear Technology*, vol. 23, July 1974.
6. M. CRAVERO y G. LUCENET, de Electricité de France: "Evaluation of the Probability of an Aircraft Crash on a Nuclear Power Plant".
7. G. JOERISSEN y H. ZUEND: "Risk of an Aircraft Crash on a Nuclear Power Plant". *Nuclex 72. Technical Meeting*, No. 9/4.
8. IVAN B. WALL: "Probabilistic Assessment of Aircraft Risk for Nuclear Power Plants". *Nuclear Safety*, 15, 3, 276-284, May-June 1974.
9. H. A. G. KOHLER: "Wahrscheinlichkeit eines Flugzeugabsturzes auf das Kernkraftwerk Krümmel". 10-III-1972.
10. ESPAÑA 1974: Subsecretaría de Aviación Civil (Ministerio del Aire).
11. COMISION DE ENERGIA ATOMICA DE LOS ESTADOS UNIDOS: "Evaluación de los riesgos de accidentes en centrales nucleares". Informe resumido (Wash-1400).
12. A. A. GARCIA y R. C. ERDMANN: "Final Report Prepared for Electric Power Research". Institute. Summary of the AEC Reactor Safety Study (Wash-1400). April 1975.
13. SIMON RIPPO: "The Rasmussen Study on Reactor Safety". *Nuclear Engineering International*, December 1974.
14. METROPOLITAN EDISON COMPANY: "Three Mile Island". *Amendment 10 Docket*, No. 50-289.
15. COMMONWEALTH EDISON COMPANY: "Zion Station Amendment 18". *Docket* No. 50-295. December 1971.
16. LONG ISLAND LIGHTING COMPANY: "Shoreham Nuclear Power Station, Amendment 3". *Docket* No. 50-322, 5 February 1969.
17. YANKEE ATOMIC ELECTRIC COMPANY: "Rome Point Preliminary Site Evaluation. Section VII and VIII". February, 16-1971.
18. KARL HORNYIK: "Airplane Crash Probability Near a Flight Target". *Transactions Ans.* Volume 16, p. 209.
19. D. G. ELSENHUT: "Reactor Sitings in the Vicinity of Airfields". *Transactions Ans.* Vol. 16, p. 210.
20. E. A. WAIS, R. P. KENNEDY e IAN B. WALL: "Probabilistic Assessment of Aircraft Hazard for Nuclear Power Plants (III)". *Transactions Ans.* Vol 14-11, p. 767.
21. C. V. CHELAPATI e IAN B. WALL: "Probabilistic Assessment of Aircraft Hazard for Nuclear Power Plants (II)". *Transactions Ans.* Volume 13-1, p. 218.
22. I. B. WALL y RICHARD C. AUGENSTEIN: "Probabilistic Assessment of Aircraft Hazard for Nuclear Power Plants (I)". *Transactions Ans.* Vol. 13-1, p. 217.