

# Estudio de Predicción para Periodos de Reposo del Buque Inducido por las Olas

Págs. 85-92

*José Girón Sierra<sup>a</sup> Cristina Mateos Fernández de Betoño<sup>b</sup>*

<sup>a</sup>Doctor en Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, gironsi@dacya.ucm.es

<sup>b</sup>Ingeniero Naval y Oceánico, Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación. cmatfe2@ext.mde.es

---

## Resumen

El diseño de buques con buen comportamiento en la mar es una de las preferencias en la adquisición de los nuevos buques de las Armadas dentro del cual se establecen límites de operación para el despegue y aterrizaje de helicópteros y RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems).

Se denomina Periodo Quiescente de un buque a un tiempo de tranquilidad o de menor movimiento durante la navegación. Durante estos períodos es más fácil realizar ciertas operaciones delicadas, como por ejemplo el aterrizaje o despegue de helicópteros o RPAS sobre las cubiertas de vuelo de los buques. De este modo, se pretende obtener una mejor predicción de los períodos de reposo inducidos por las olas y sus efectos en los movimientos del buque.

**Palabras claves:** Período quiescente, wavelet, olas, RPA, USV.

## Abstract

A preference in the purchase of new vessels of Navies is the good seakeeping through design vessel within operating limits for takeoff and landing of helicopters and RPAS are established.

When there is a less movement during shipping or times we quiet, this is called a Quiescent Period. During these periods it is easier to perform certain sensitive operations, such as for example the landing or take off of helicopters or RPAS on the flight decks of ships. In this way aims to improved prediction of quiescent periods for wave induced ship motions.

**Keywords:** Quiescent period; wavelet; waves, RPA, USV.

---

*Fecha de recepción: Junio de 2015*

*Fecha de aceptación: Agosto de 2015*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los barcos pasan la mayor parte de su vida en el mar y en este entorno tan impredecible, se dificultan las operaciones que se realizan a bordo en condiciones adversas. En el mundo del comportamiento de un buque en la mar se denomina período quiescente (PQ) de un buque a un tiempo de tranquilidad o de menor movimiento durante la navegación. Durante estos períodos es más fácil realizar ciertas operaciones delicadas, como son por ejemplo el aterrizaje o despegue de helicópteros, aprovisionamiento vertical y desde luego RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) sobre las cubiertas de vuelo de los buques. Por lo que sería de gran ayuda tener la capacidad de predecir con cierta antelación la llegada de un PQ para poder hacer cualquiera de estas predicciones.

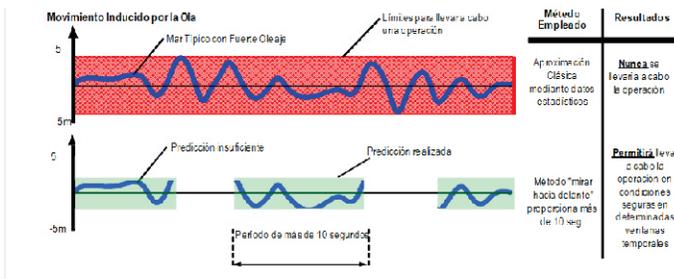


Figura 1. Métodos de predicción

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente estos estudios se pueden aplicar también para el arriado e izado de lanchas tipo RHIBS, entrada en dique de plataformas navales de las unidades de infantería, USVs (*Unmanned Surface Vehicles*)... Y si el sistema permitiera conocer cómo se va a mover el buque, podríamos actuar preventivamente con los actuadores consiguiendo una disminución de los movimientos.

Existen dos alternativas metodológicas para predecir los PQ. Una de ellas se puede decir que mira

hacia el pasado “look back or look at the past” y la otra mira al futuro “look at the future”.

La que “mira al pasado” va registrando los movimientos del buque a lo largo del tiempo, y por medios estadísticos, u otros medios más simples, trata de predecir los próximos movimientos. Normalmente este enfoque está limitado entorno a unos 6 segundos (Colwell, 2004).

La que “mira al futuro” realiza medidas a distancia de la ola incidente. Con suficiente distancia como para asegurar una buena antelación, que puede llegar a unos pocos más segundos. En esta metodología además de la realización de medidas a distancia, se llevan a cabo dos funciones más. Una de ellas es calcular la posible deformación de la ola en su viaje hasta el buque. La otra es calcular cómo se va a mover el buque en respuesta a la ola que le llega. Para esto último se suele emplear un modelo y técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFDs) o resultados en un laboratorio de ensayos de dinámica del buque como el Canal de Experiencias Hidrodinámicas del pardo (CEHIPAR), ubicado en Madrid.

De hecho, el buque actúa como un “filtro”, de modo que tiende a una oscilación dominante dentro de un rango de frecuencias.

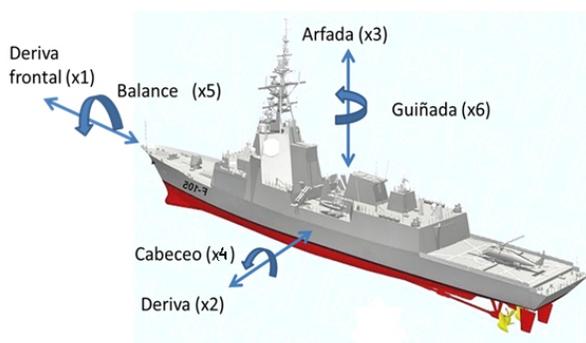
## 2. ESTADOS DEL MAR Y MOVIMIENTOS DEL BUQUE

La predicción de PQ se deberá definir por el estado del mar y los parámetros de la navegación (rumbo y velocidad). Además influyen la luz y las condiciones

atmosféricas, tipo de buque, cubierta de vuelo y vehículo aéreo, el modo de aterrizar y la existencia o no de sistemas de ayuda.

Para conseguir la estabilización necesaria durante una determinada operación es muy útil poder predecir con suficiente antelación la venida de un PQ, y acompañar esta predicción con una valoración de la calidad, entendiéndose ésta como los PQ de mayor duración y cuya incidencia sobre el comportamiento del buque sea menor (cabeceo, balance y arfada).

Estos movimientos son los más relevantes de cara al comportamiento en la mar del buque, pero se debe hacer notar que el buque también se ve afectado por los correspondientes al resto de grados de libertad del mismo (deriva frontal, deriva lateral y guiñada).



**Figura 2.** Movimientos de un buque  
Fuente: Elaboración propia

Es posible encontrar funciones de transferencia correspondientes a los seis movimientos (Girón-Sierra, Esteban, Recas, De-Andres, De la Cruz, Riola, Aranda, & Velasco (2005)). Estas funciones ponen en relación el oleaje y los movimientos correspondientes del buque.

$$(m + a_{11})\ddot{x}_1 + b_{11} \dot{x}_1 = F_1$$

$$(m + a_{22})\ddot{x}_2 + b_{22} \dot{x}_2 + a_{24}\ddot{x}_4 + b_{24} \dot{x}_4 + a_{26}\ddot{x}_6 + b_{26} \dot{x}_6 + c_{26} x_6 = F_2$$

$$(m + a_{33})\ddot{x}_3 + b_{33} \dot{x}_3 + c_{33} x_3 + a_{35}\ddot{x}_5 + b_{35} \dot{x}_5 + c_{35} x_5 = F_3$$

$$a_{42}\ddot{x}_2 + b_{42} \dot{x}_2 + (I_{44} + a_{44})\ddot{x}_4 + b_{44} \dot{x}_4 + c_{44} x_4 + a_{46}\ddot{x}_6 + b_{46} \dot{x}_6 + c_{46} x_6 = F_4$$

$$a_{53}\ddot{x}_3 + b_{53} \dot{x}_3 + c_{53} x_3 + (I_{55} + a_{55})\ddot{x}_5 + b_{55} \dot{x}_5 + c_{55} x_5 = F_5$$

$$a_{62}\ddot{x}_2 + b_{62} \dot{x}_2 + a_{64}\ddot{x}_4 + b_{64} \dot{x}_4 + (I_{66} + a_{66})\ddot{x}_6 + b_{66} \dot{x}_6 + c_{66} x_6 = F_6$$

Cabe mencionar (Lloyd, 1988) como un libro en el que se encuentran detalles matemáticos sobre estados del mar, en concreto sobre sus espectros, como pueden ser los de Bretschneider para mar abierto, y JONSWAP para mares costeros, sobre modelos matemáticos de los seis movimientos del barco en respuesta a las incidencias, sobre estudios con modelos de barcos a escala, etc.

Los requisitos de partida que se han tomado como referencia son los límites operacionales señalados por la STANAG 4154 (*Common Procedures for Seakeeping in the Ship Design Process*) para aterrizaje y despegue de helicópteros en buques.

Concretamente este STANAG habla de un máximo de 2,5° de balance, 1,5° de cabeceo, y una velocidad vertical de la pista de 1,0 m/s medidos en valores medios cuadráticos (r.m.s.). En recientes estudios se identifican hasta tres tipos de operaciones para los que se pueden determinar diferentes requisitos de predicción, resumiendo se habla de los siguientes contextos de predicción:

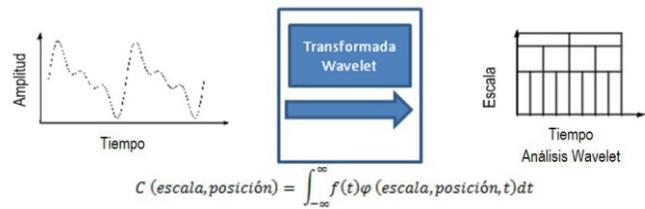
- Inferiores a treinta 30 segundos para operaciones tipo: aeronaves de ala fija - aterrizaje en portaaviones, helicópteros – aterrizaje y despegue, VERTREP.
- De aproximadamente un 1 minuto para operaciones

tipo: manejo de carga, lanzamiento y recogida de pequeñas embarcaciones tripuladas, reabastecimiento en la mar, operaciones de disparo, lanzamiento y recogida de vehículos no tripulados.

- Superiores al minuto para operaciones tipo: lanzamiento y recogida de sonares remolcados, embarque y desembarque de embarcaciones anfibia en buques tipo LPD.

Con estos medios de predicción lo que se pretende es permitir llevar a cabo las actuales operaciones bajo condiciones adversas de la mar, una predicción del orden de 30 segundos (Morris, Zienkiewicz and Belmont, 1997). Proporciona el suficiente margen para incrementar a un estado de mar superior. La idea fundamental que subyace en este estudio es que el oleaje va cambiando, se va deformando, a lo largo del tiempo y se necesita analizar paso a paso la información de dicha deformación.

La olas se pueden asemejar a ondas mecánicas, donde simplificando el proceso se pueden definir dos movimientos, el primero es un movimiento circular debido a la oscilación del medio movido por la onda y el segundo es la propagación de la onda que traslada el fenómeno con una dirección y una velocidad de onda. Se puede decir que la transformada de wavelet, vista como un proceso matemático, es una operación lineal que descompone una señal compleja en bloques elementales que aparecen en diferentes escalas o resoluciones, donde estos bloques pueden ser generados de una forma sencilla, simplificando su análisis y permitiendo limpiar la señal de interferencia externa.



**Figura 3.** Esquema transformada Wavelet  
Fuente: Elaboración propia

La selección de la wavelet que mejor se ajusta depende de las características propias de la señal de estudio, siendo por tanto la clave del estudio encontrar la mejor función base (wavelet madre). Esta función base debe de satisfacer dos condiciones que son:

- Ser oscilatorio (área total igual a cero)
- Decaer a cero rápidamente

Este método se emplea debido a que al transformar al dominio de frecuencias una señal se pierde la información temporal, imposibilitando indicar cuando ocurre una acción, cuando la señal no cambia con el tiempo (estacionaria) esta información no es importante, pero no es válido para el caso de análisis de olas, ya que se precisa determinar en cada caso esta información.

Una característica muy importante de este tipo de funciones es la de poder analizar una señal a diversas escalas, esta característica juega un papel importante, ya que los diversos algoritmos procesan los datos en diferentes escalas y resoluciones espaciales. Si se observa una señal a una escala pequeña (poca resolución) se apreciarán únicamente aquellas entidades de mayores dimensiones; igualmente si se observa la misma señal a una escala grande se podrán distinguir pequeños elementos o partes de la señal. Es necesario escoger adecuadamente la función prototipo

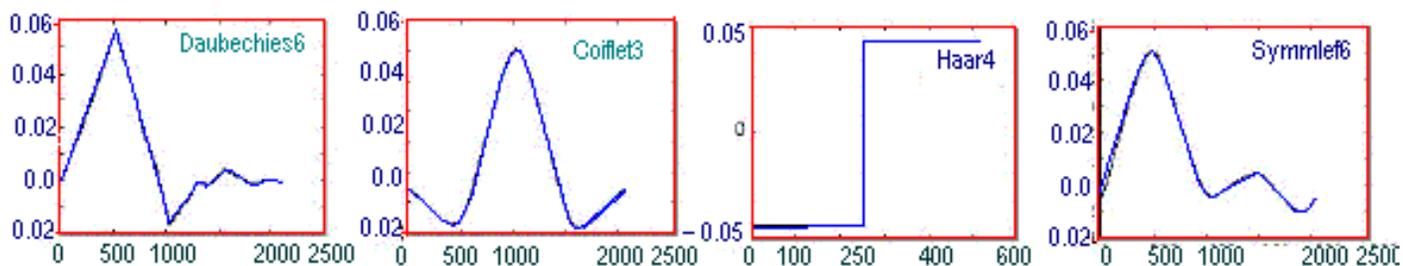
o wavelet madre, a partir de la cual se deriva toda una familia de versiones trasladadas y escaladas.

$$W_f(s, \tau) = \int f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt \quad (2)$$

Estas funciones wavelets son generadas a partir de la traslación ( $\tau$ ) y escalado ( $s$ ) de una misma función wavelet, a la que se denomina wavelet madre  $\psi()$ .

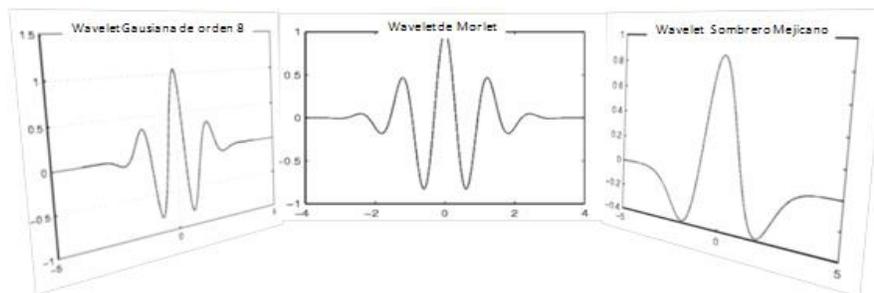
$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (3)$$

Mediante el factor de escala  $s$ , las wavelets se pueden dilatar  $s > 1$ , o contraer,  $s < 1$ , de manera que el valor de  $s$  permite cubrir rangos diferentes de frecuencias.



**Figura 4.** Ejemplos de wavelet madre  
Fuente: Elaboración propia

Existen diversos tipos de wavelets, entre ellas destacamos las de Gauss, Morlet, Sombrero Mejicano, Haar, Daubieches, Biortogonal, Coiflets, Symlets, Meyer, cuyas ecuaciones de las más representativas se indican a continuación.



**Figura 5.** Ejemplos de Wavelets  
Fuente: Cortés et al.

$$\text{Gauss: } F = Cp e^{-x^2}$$

$$\text{Morlet: } \psi(x) = (e^{-x^2/2}) \cos(5x)$$

$$\text{Sombrero Mexicano: } \psi(x) = (2\pi^{-1/4})(1 - x^2)(e^{-x^2/2})/\sqrt{3}$$

Finalmente se concluye que la wavelet tiene duración definida, además tienden a ser irregulares y asimétricas, permitiendo mayor adaptabilidad y mejor convergencia a la señal a tratar.

### 3. APLICACIONES EN DEFENSA

Es evidente que llegar a predecir con suficiente antelación los PQ, es fundamental para la Armada Española, teniendo en cuenta la importancia y repercusiones de la misma. Además de los buques cuya misión fundamental es operar con aeronaves y de los buques anfibios, claramente tiene aplicación en los nuevos Buques de Acción Marítima (BAM) que prevén maniobras de aterrizaje, despegue, reabastecimiento de combustible en vuelo estacionario (HIFR) y aprovisionamiento vertical (VERTREP), así como para futuras unidades como pueden ser las nuevas fragatas F-110.

A modo resumen podríamos indicar la siguiente relación de operaciones como susceptibles de obtener mejoras gracias a la detección de estos periodos, como pueden ser ventanas temporales que garanticen que la pista se encuentra en las condiciones adecuadas para tomar tierra de aeronaves de ala fija – *Ramp clearance during landing operation*, operaciones de despegue, aterrizaje o descarga de material de helicópteros - *Helicopter landing / take-off or pickup / delivery operations*, despliegue y recogida de lanchas - *Launch / recovery of manned crafts*, lanzamiento y recogida de vehículos no tripulados - *Launch / recovery of unmanned vehicles (UAV, USV, USSV, UUV)*, reabastecimiento en la mar - *Cable tensioning during abeam replenishment*, lanzamiento y recogida de sonar remolcados - *Launch / recovery of towed sonar*,

transporte de vehículos anfibios - *Amphibious transport vessel (ATS) – Landing Platform Dock (LPD)*, manejo y estiba de carga y otras actividades - *General handling, traverse or maintenance and repairs activities*, operaciones relacionados con el disparo de armamento – *Firing operations*, maniobras con estados de mala mar - *Manoeuvring and controllability in heavy seas*, etc. (Riola & Díaz, 2011).



Fuente: Armada española (www.armada.mde.es)



Fuente: US Navy



Fuente: Armada española (www.armada.mde.es)

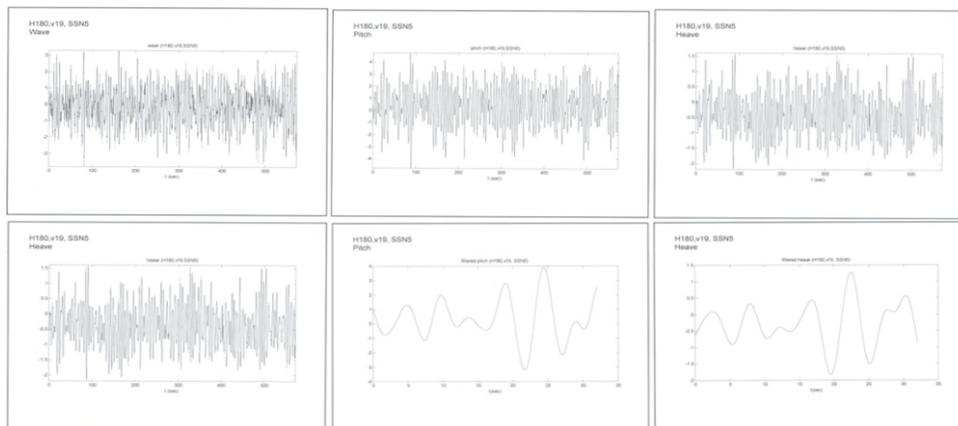
**Figura 6.** Operaciones como susceptibles de obtener mejoras gracias a este estudio

#### 4. RESULTADOS

A continuación se muestran las imágenes obtenidas correspondientes los resultados de este estudio. El CEHIPAR realiza mediante un modelo un conjunto de registros experimentales de los movimientos de esta plataforma en diversas condiciones de navegación. Durante cada experimento se ejecuta el método de pre-

dicción que corresponde, guardándose un registro sincronizado de medidas de movimientos.

Una vez dispuesto todo el conjunto experimental (modelo experimental y versión inicial de los programas) se trata de realizar navegaciones con mares irregulares y aplicar en tiempo real el método analizando los resultados que se obtienen.



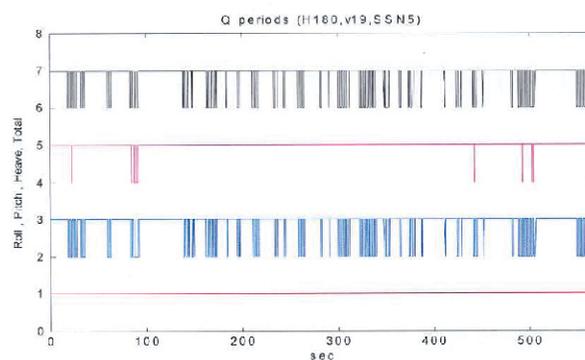
**Figura 7.** Gráficos correspondientes a los ensayos de SSN5, rumbo 180 y velocidad 19 nudos

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente este grupo de gráficos representan los valores finales tras las medidas originales y el procesamiento de los datos correspondientes a los valores

“roll” balance, “pitch” cabeceo, “heave” arfada y la composición de los tres, para distintos estados de mar y velocidades de avance.

QP: H180,v19, SSN5



**Figura 8.** SSN5 con rumbo 180°, velocidad de avance de 19 nudos (Riola, Girón & Díaz, 2013)

Fuente: Elaboración Propia

## 5. CONCLUSIONES

La literatura científica señala un conjunto de necesidades para ganar en seguridad en el aterrizaje de helicópteros sobre buques. Según Baitis (Baitis, 1977) dice que debemos desarrollar un predictor de PQ con un adelanto de 8-10 segundos para cabeceo y 20 segundos para balanceo (Sherman, 2007) Colwell (Colwell, 2004) por su parte, dice que un PQ de 4 segundos de duración es insuficiente, pero que 6 segundos pueden servir.

Se dan unos límites operacionales. En particular, en cuanto a los movimientos del barco, STANAG 4154 establece unos límites de  $1.5^\circ$  rms en cabeceo, y de  $2.5^\circ$  en balanceo. Otros autores amplían, no mucho, estos límites. En cuanto a las posibilidades de los métodos disponibles, los métodos de predicción basados en historia llegan como mucho a tiempos de predicción de unos 15 segundos en cabeceo y arfada, y 10 segundos en balanceo.

Además de predecir un PQ, es conveniente determinar su duración. De esto hay poco escrito en la literatura. Quizá porque pueden darse dos o más PQ breves pero muy cercanos, o porque la conjunción de todos los factores relevantes –límites de movimientos, aceleraciones verticales, condiciones ambientales, etc.- puede ser difícil de juzgar.

Con el programa que se está desarrollando por los autores de este artículo se permitirá conocer con antelación suficiente los PQ en la cubierta de vuelo de un buque, en condiciones de mar en las que actualmente es inviable.

## REFERENCIAS

- Baitis, A. E. (1977). *A Summary of Ship Deck Motion Dynamics as Applied to VSTOL Aircraft*. (Navy-/NASA VSTOL Flying Qualities Workshop). US Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- Colwell, J. L. (2004). *Flight Deck Motion System (FMDS): Operating Concepts and System Description*. (Defence R&D Canada, Technical Memorandum, DRDC Atlantic TM 2004-003).
- Sherman, B. W. (2007). *The Examination and Evaluation of Dynamic Ship Quiescence Prediction and Detection Methods for Application in the Ship-Helicopter Dynamic Interface*. (Thesis). Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Girón-Sierra, J., Esteban, S., Recas, J., De-Andres, B., De la Cruz, J.M., Riola, J.M., Aranda, J. & Velasco, F. (2005). Overview of a Research on Actuators Control for Better Seakeeping in Fast Ships. In: Proc. IFAC World Congress.
- Lloyd, A.R.J.M. (1998). *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather*. A.R.M.J. Lloyd, Gosport, Hampshire, U.K.
- Morris, E. L., Zienkiewicz, H. K. and Belmont, M. R. (1997). Short-term Forecasting of the Sea Surface Shape. *International Shipbuilding Progress*, 45(444), 383-400.
- Riola, J.M., Girón, J.M. y Díaz, J.J. (2013). Smoothing warships movements based on wavelets. *Ship Science & Technology*. 6,(12), 51-62. Cartagena, Colombia

Riola, J.M.and Díaz, J.J. (2011). The Prediction of Calm Opportunities for Landing on a Ship. *Specialists Meeting AVT-189 Assessment of Stability and Control Prediction Methods for NATO Air & Sea Vehicles – Applied Vehicle Technology Panel (AVT) – Research and Technology Organization (RTO) – NATO*. Portsmouth West, United Kingdom.