



Certificado en ISO 9001:2000
Laboratorios acreditados por EMA

SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES



“IMT, 20 años generando conocimientos y tecnologías para el desarrollo del transporte en México”

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFECTIVIDAD DE ROMPEOLAS EN UN TONEL ELÍPTICO A ESCALA REDUCIDA

Andrés Ramírez Valencia
Manuel de Jesús Fabela Gallegos
Miguel Martínez Madrid

Publicación Técnica No 286
Sanfandila, Qro 2006

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Evaluación experimental de la
efectividad de rompeolas en un tonel
elíptico a escala reducida**

**Publicación Técnica No. 286
Sanfandila, Qro. 2006**

Créditos y agradecimientos

Este documento fue elaborado por el M. C. Andrés Ramírez Valencia, el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos y el Dr. Miguel Martínez Madrid, asistente, investigador y coordinador, respectivamente, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte. Participaron también en actividades para su desarrollo los M. C. Carlos Adrián Favela Gallegos, Ricardo Hernández Jiménez, David Vázquez Vega, Javier Hernández Pérez y Oscar Flores Centeno.

Para su elaboración se tomó como base el documento “Evaluación experimental de la efectividad de rompeolas en un tonel elíptico a escala reducida”, presentado como Tesis de Maestría en el 2007 por el Ing. Andrés Ramírez Valencia, dentro del Programa de Maestría en Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Querétaro. A su vez, esta investigación forma parte del estudio El 19/04 “Desarrollo de geometrías y materiales alternativos de rompeolas en autotankers para el transporte de combustibles líquidos”, llevado a cabo en el Instituto Mexicano del Transporte.

Índice

	Página
Resumen	VII
Abstract	IX
Resumen ejecutivo	XI
Introducción	1
1 Antecedentes	3
1.1 Movimiento de fluidos en contenedores	3
1.2 Transporte de líquidos por carretera	5
1.3 Oleaje en autotanques	7
1.4 Elementos de atenuación del oleaje	8
1.5 Uso de rompeolas en autotanques	10
1.6 Necesidades de estudio.....	12
1.7 Definición del problema.....	13
1.8 Objetivo principal.....	14
2 Diseño estadístico de experimentos	15
2.1 Conceptos generales.	15
2.1.1 Historia del diseño estadístico de experimentos	15
2.1.2 Terminología del diseño experimental	16
2.1.3 Aplicaciones típicas del diseño experimental.....	18
2.2 Diversidad de esquemas experimentales.	18
2.3 Principios básicos del diseño estadístico	20
2.4 Pautas generales para diseñar experimentos.....	22
2.5 Hipótesis principales	25
2.6 Elección del tamaño de la muestra.	25
2.7 Intervalos de confianza.	26
2.8 Comparaciones múltiples de promedios.	26
2.9 Pruebas estadísticas adicionales.....	28
2.9.1 Prueba de normalidad.....	28
2.9.2 Análisis estadístico de varianza.	28
2.9.3 Estadístico de prueba P	28

	Página
2.10 Programas de análisis estadístico.....	29
2.11 Aspectos globales de las técnicas estadísticas.....	29
3 Proceso de experimentación	31
3.1 Etapas del proceso experimental	31
3.1.1 Identificación del problema	31
3.1.2 Factores y elección de niveles	31
3.1.2.1 Número de rompeolas	32
3.1.2.2 Tipo de rompeolas	32
3.1.2.3 Nivel de llenado	33
3.1.2.4 Velocidad	33
3.1.3 Respuesta de salida	34
3.2 Tipo de diseño experimental	34
3.2.1 Modelo lineal estadístico asociado	36
3.2.2 Hipótesis	38
3.2.3 Análisis estadístico de varianza	39
3.2.4 Programa estadístico de computadora	41
3.3 Tonel de escala reducida	41
3.3.1 Descripción del tonel de prueba.....	41
3.3.2 Estructura de soporte.....	43
3.3.3 Ensamble general y operación.....	43
3.3.4 Descripción de ejecución de la prueba	44
3.4 Instrumentación.....	45
3.5 Plan de ejecución de pruebas	47
3.6 Resultados de las pruebas.....	48
4 Análisis de datos	49
4.1 Empleo del programa computacional.....	49
4.2 Verificación de la validez del modelo	51
4.3 Prueba de bondad y ajuste	52
4.4 Gráficas de promedios de datos	53
4.4.1 Gráfica de efectos principales.....	53
4.4.2 Gráfica de interacciones	54

	Página
4.4.3 Conclusiones respecto a gráficas de promedios.....	55
4.5 Análisis estadístico de varianza	56
4.6 Comparaciones múltiples. Método de Tukey	57
Conclusiones y recomendaciones	61
Referencias	63
Anexos	65
ANEXO I. Matriz de promedios de F_0	65
ANEXO II. Valores promedio de F_0 ordenados de menor a mayor.	66
ANEXO III. Interacciones de segundo orden.	67
ANEXO IV. Interacciones de tercer orden.....	68
ANEXO V. Interacciones de cuarto orden.....	69
ANEXO VI. Orden de ejecución de las pruebas y resultados obtenidos	70
ANEXO VII. Comparaciones entre interacciones de tercer y cuarto orden ..	79



Resumen

Los autotanques son vehículos de carga pesada dedicados al transporte de carga fluida. Debido a los cambios de dirección y de velocidad, a niveles de llenado parcial se genera oleaje en la superficie libre del líquido transportado. El movimiento de oleaje interactúa con las paredes del contenedor, pudiendo alterar la estabilidad del vehículo. Para contrarrestar el oleaje longitudinal se utilizan barreras transversales a lo largo del tanque; sin embargo, existe poca o nula información relacionada con la efectividad y número adecuado de rompeolas.

En este trabajo se presenta el desarrollo y el diseño experimental, a nivel de laboratorio, aplicado para evaluar la efectividad de los rompeolas. Para la evaluación se utilizó un tonel a escala reducida, sobre el que se probaron factores como número de rompeolas, geometría de rompeolas, nivel de llenado y velocidad de desplazamiento para generar oleaje. La variable de respuesta fue la fuerza de oleaje producida longitudinalmente para cada combinación de factores. El análisis de varianza mostró que los cuatro factores, así como las combinaciones entre sus niveles, son significantes a un 95% de confiabilidad. No obstante, el factor de mayor efecto sobre la magnitud de la fuerza de oleaje longitudinal fue el factor nivel de llenado, seguido por el tipo de rompeolas empleado. De aquí, que el oleaje puede ser atenuado con igual o mayor efectividad utilizando variantes de geometría de rompeolas.



Abstract

Tanker trucks are heavy vehicles used for liquid cargo transportation. Due to directional and velocity changes, sloshing of liquid cargo is produced at partial fill levels. To counteract longitudinal sloshing, transversal baffles are used inside the tank; however, there is lack of information related with baffles' effectiveness and so, with the proper quantity.

In this work, the development and experimental design at lab level to evaluate baffles effectiveness is presented. For doing so, a small cylindrical elliptical tank was used, for testing factors as quantity of baffles, baffle's geometry, fill level and forward velocity to produce sloshing. The response variable was longitudinal sloshing force produce for each factors combination. Variance analysis showed that the four factors, as well as their levels combinations are significant at 95% of confidence. However, fill level in first place and type of baffle in second, showed the major effect on longitudinal sloshing force. Hence, sloshing can be attenuated with the same or better effectiveness using the proposed variants of baffle's geometry.

Resumen ejecutivo

Los autotankes son vehículos de carga pesada dedicados al transporte de carga fluida. De ellos, sobresalen los empleados para el traslado de combustibles líquidos como diesel y gasolinas, considerados como materiales peligrosos. Debido a los cambios de dirección y de velocidad, a niveles de llenado parcial se genera oleaje en la superficie libre del líquido transportado. El movimiento del oleaje interactúa con las paredes del contenedor, pudiendo alterar la estabilidad del vehículo y, con ello, la pérdida de control direccional.

Para contrarrestar el oleaje longitudinal se utilizan barreras transversales, llamadas rompeolas, a lo largo del tanque. Estos rompeolas han sido utilizados de manera tradicional desde los primeros diseños de autotankes. Sin embargo, existe poca o nula información relacionada con su efectividad en la atenuación del oleaje, así como del número adecuado dentro del tonel.

Con el propósito de evaluar la efectividad de los rompeolas tradicionales, así como de algunas variantes en su geometría, se desarrolló un estudio experimental, aplicando técnicas de diseño de experimentos y de análisis estadístico de los resultados. Para ello, se utilizó un tonel a escala geométrica 10:1, representando un tanque de sección transversal elíptica con capacidad de 20 m³, del tipo utilizado en autotankes para transporte de combustibles líquidos. Los factores de prueba fueron número de rompeolas, geometría de rompeolas, nivel de llenado y velocidad de desplazamiento para generar oleaje, mientras que la variable de respuesta fue la fuerza de oleaje en la dirección longitudinal.

Desde el punto de vista estadístico, los resultados obtenidos del análisis de varianza mostraron que los cuatro factores, así como las combinaciones entre sus niveles, son significantes en un 95% de confiabilidad. No obstante, el factor de mayor efecto sobre la magnitud de la fuerza de oleaje longitudinal fue el nivel de llenado, seguido por el tipo de rompeolas empleado. El nivel de llenado del 94% promovió los menores valores de fuerza de oleaje, mientras que el nivel del 50% produjo los mayores. Las comparaciones múltiples entre las medias mostraron que, sin importar el tipo de rompeolas, es indistinto el uso de 3 ó 5 rompeolas, aunque las variantes de la geometría distintas a la tradicional promovieron menores magnitudes de la fuerza de oleaje.

Desde el punto de vista mecánico, el nivel de llenado al 94% mostró menor repercusión sobre la magnitud de la fuerza de oleaje, comparado con el 50% y el 75%. Los resultados señalan que niveles de llenado parciales incrementan la fuerza de oleaje, por lo que se deben atender estas condiciones de operación de los tanques. Así mismo, las variantes geométricas presentaron la menor magnitud de la fuerza de oleaje, por debajo del promedio general, mientras que el tradicional estuvo por arriba del promedio. De manera similar y con respecto al diseño del tanque, el uso de uno o dos rompeolas incrementaron la magnitud de la fuerza de oleaje, mientras que más de dos favorece su disminución.

Con base en los resultados se desprende que el oleaje puede ser atenuado con igual o mayor efectividad mediante variantes de geometría de rompeolas. Por tanto, una modificación en autotanques puede aplicarse disminuyendo la sección de los rompeolas actuales. Sin embargo, resultados de mayor alcance requieren de experimentación más detallada, incrementando el número de variables y una mayor discretización en los niveles de cada factor, así como aspectos refinados de la mecánica de fluidos, para conocer el comportamiento del fluido dentro del tonel.

Introducción

La seguridad de los vehículos pesados durante su tránsito por carretera constituye una de las principales preocupaciones de las empresas transportistas. No obstante se ha presentado una evolución considerable en el diseño de vehículos y los esquemas de capacitación de los conductores, las características del movimiento de los vehículos son factores que en muchas ocasiones no han sido considerados con la importancia adecuada. La creciente necesidad de contar con transportes más seguros y con mejor desempeño ha requerido que las investigaciones asociadas a su estabilidad cobren una mayor importancia. Particular énfasis se ha dado a la relación entre la seguridad y las características del desempeño dinámico de vehículos pesados, [1, 2, 3, 4, 5].

Dentro del contexto de esta relación, se ha demostrado que el tipo y la magnitud de la carga transportada repercuten en la definición del comportamiento de estos vehículos, cuyo efecto dinámico puede encaminar a situaciones potencialmente desastrosas. Esta potencialidad puede incrementarse drásticamente cuando se transportan materiales y sustancias clasificadas como peligrosas, tales como ácidos, combustibles y gases a presión, entre otros.

Un caso especial de atención en la seguridad de tránsito es el relacionado con el transporte de líquidos, algunos de los cuales deben ser transportados a niveles parciales de llenado por la necesidad de conservar un volumen disponible para absorber los cambios generados por la expansión térmica, [3], o por la logística misma del transporte. Consecuente a esta condición de carga y por los cambios en el movimiento del vehículo, al haber una superficie libre y un espacio disponible, se presenta un movimiento de oleaje que puede afectar su comportamiento dinámico, [2]. Esto puede observarse durante cambios bruscos en la velocidad de desplazamiento, como en el frenado o en los arranques, en los que los efectos inerciales del líquido se manifiestan en un oleaje longitudinal, cuya fuerza de empuje en las paredes del contenedor puede conducir incluso a la pérdida del control de la unidad.

Para disminuir los riesgos ante tales situaciones, en algunos tipos de contenedores se colocan elementos destinados a trabajar como barreras mecánicas que se contrapongan al movimiento longitudinal del líquido. Estas barreras, conocidas comúnmente como rompeolas, se ubican transversalmente dentro del contenedor, fabricadas normalmente del mismo material que éste, siendo el acero un material común. La masa de los rompeolas puede representar una proporción significativa del peso total del vehículo, incrementando, además, la altura global de su centro de masa, [3, 6], lo cual afecta la estabilidad. Adicionalmente, el peso de los rompeolas disminuye la capacidad efectiva de carga, promoviendo el riesgo de rebasar los valores permitidos del peso vehicular en carreteras, [3].

Desde principios del siglo pasado, diversos investigadores dedicaron esfuerzos para el estudio del comportamiento de los fluidos dentro de contenedores cerrados, principalmente durante las primeras aplicaciones a vehículos aéreos y espaciales [7, 8, 9]. En el transporte por carretera de cargas líquidas se ha presentado un interés progresivo, particularmente debido a la creciente demanda de transporte de materiales peligrosos y al riesgo inherente asociado a accidentes de tránsito de autotanques. Aunque la explicación simplista del origen de estos accidentes se relaciona con características de operación del vehículo como excesos de velocidad y malfuncionamiento de sistemas como el de frenos y de la dirección, las observaciones derivadas de la respuesta dinámica han llevado a nuevas consideraciones sobre el diseño de los contenedores para carga líquida, cuestionando las formas de los tanques y la necesidad de utilizar los rompeolas en las configuraciones tradicionales.

Como parte de la argumentación de la efectividad de los rompeolas en la atenuación del oleaje y, por tanto, como parte de los elementos que permitan incrementar la seguridad en tránsito de los autotanques con carga líquida a niveles de llenado parcial, se desarrolló el presente proyecto. En éste se considera el estudio de diversas variables sobre la generación y magnitud de la fuerza de oleaje, desde una perspectiva experimental, aplicando técnicas del diseño estadístico de experimentos.

Por tanto, el desarrollo del estudio involucra la aplicación de un diseño experimental multifactorial para identificar el efecto de algunas variables relativas a la operación y al diseño de toneles para autotanques, que inciden sobre la magnitud de la fuerza de oleaje longitudinal. Para ello, se hace uso de un prototipo de contenedor elíptico a escala, diseñado para estudiar en laboratorio el oleaje durante el transporte de carga líquida, [10], cuyos resultados puedan ser aplicados al diseño de autotanques con mayores niveles de seguridad en tránsito.

La organización del escrito comprende diversos capítulos. El primero describe los aspectos particulares del desarrollo de los estudios del oleaje en recipientes y las particularidades de diseños de rompeolas en contenedores, autotanques de referencia y la necesidad de efectuar un estudio del efecto del movimiento de fluidos mediante un modelo a escala reducida. El capítulo dos expone el estado del arte respecto de las técnicas estadísticas existentes y la planeación del diseño experimental; presenta además de manera general, el vocabulario que se emplea en términos del diseño estadístico de experimentos. El capítulo tres describe, con base en la metodología de planteamiento del diseño experimental, el proceso de planificación y ejecución de pruebas experimentales para la generación y atenuación del oleaje. En el capítulo cuatro se describe la medición del oleaje y se presentan los resultados de la fuerza de oleaje obtenidas de las pruebas. En el capítulo 5 se efectúa el análisis estadístico de los datos, los resultados del análisis de varianza y las primeras conclusiones del desarrollo estadístico del estudio. Finalmente, como sección de cierre, se presentan las conclusiones a las que se llegaron como resultado del desarrollo del proyecto.

1 Antecedentes

1.1 Movimiento de fluidos en contenedores

El oleaje se define como el movimiento periódico en la superficie libre de un líquido en un tanque o contenedor parcialmente lleno. El ejemplo más importante en cuanto a estudios del movimiento de fluidos en contenedores, es el desarrollado por la NASA (National Aeronautics and Space Administration), sobre las causas de la inestabilidad en el aire de sus prototipos de naves espaciales, [7] figura 1.1. Al respecto, se le dio especial importancia al efecto del movimiento no deseado del líquido en sus tanques de combustible durante y después del lanzamiento, debidos a los cambios de aceleración de las naves y que daban origen al oleaje en los tanques. Este problema fue resuelto en algunos casos mediante el empleo de combustibles sólidos, [8].



Figura 1.1

Los primeros estudios en contenedores en movimiento con líquidos se presentaron en los diseños de las primeras naves espaciales.

Si el líquido tiene libertad de movimiento en su superficie, produce fuerzas que originan aceleraciones adicionales en el vehículo. Los elementos de control y guía son sensibles a estas aceleraciones, cuya respuesta es una acción de corrección formando un lazo cerrado que puede llevar a la inestabilidad; esto es, por el movimiento del vehículo se genera oleaje y su fuerza genera movimiento sobre el vehículo, lo que a su vez produce oleaje nuevamente, repitiéndose sucesivamente este comportamiento, [7].

La inestabilidad inducida por oleaje puede llevar a fallas estructurales del vehículo y fallas prematuras de motores y otros mecanismos. En el movimiento de un tanque parcialmente lleno, el oleaje se presenta como una onda formada en la superficie del líquido, Figura 1.2.

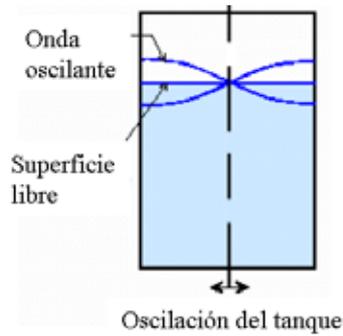


Figura 1.2

Ejemplo del movimiento del líquido en su superficie en un recipiente con oscilación horizontal.

El movimiento de la onda tiene una frecuencia natural que depende de la forma del tanque, de la aceleración de la gravedad o de la aceleración axial del tanque. El principal efecto dinámico del oleaje es una oscilación del centro de masa del líquido relativo al contenedor, [8].

La base generalizada de los estudios de oleaje en contenedores parcialmente llenos es el uso de modelos matemáticos y modelos mecánicos (péndulos y resortes). Para simplificar los análisis, en esas investigaciones se supone que el tanque es rígido, el líquido ideal y que no tiene viscosidad. Estas suposiciones permiten una teoría clásica de flujo con un movimiento de onda lineal, [7]. El movimiento de onda lineal o una respuesta lineal del líquido significa que la amplitud de la onda y el movimiento del líquido son linealmente proporcionales a la amplitud del movimiento al que se somete el tanque, además de que la frecuencia natural en la onda de oleaje no es una función de la amplitud de onda, Figura 1.3.

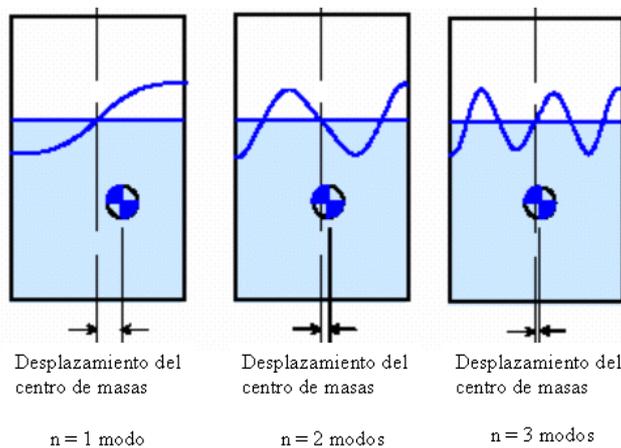


Figura 1.3

Desplazamiento del centro de masa en los modos de oscilación 1, 2 y 3.

De las figuras 1.2 y 1.3, cuando $n = 1$, la onda tiene una cresta de onda positiva en una de las paredes del contenedor y una cresta negativa en la otra pared; ésta es una onda fundamental no simétrica. Si $n > 1$, existen crestas intermedias y el número de crestas incrementan conforme n se incrementa. En la figura 1.3 se

observa que el cambio de posición del centro de masas para el modo fundamental $n = 1$ es substancialmente más grande que un número más grande de n para la misma amplitud de onda máxima. La oscilación del centro de masas es la fuente de origen de las fuerzas inducidas por el oleaje y los pares; el primer modo de onda, $n=1$ produce una fuerza y un par más grandes que cualquier otro modo, [7].

En los modelos matemáticos también se asume, por simplicidad, que el movimiento del tanque es armónico, esto es, que varía con el tiempo de manera sinusoidal. Sin embargo, esta suposición introduce cierta complejidad a los modelos que representan el oleaje, por lo que de la manera más simple, se analiza en general únicamente el primer modo de oscilación suponiendo que la superficie se mueve como un perfecto plano uniforme.

1.2 Transporte de líquidos por carretera

Los vehículos de carretera constituyen uno de los sistemas de transporte más utilizados para el traslado de carga y de pasajeros. Estos vehículos han evolucionado de tal manera, que su empleo se ha constituido en una parte fundamental del desarrollo económico de la sociedad. Como parte de esa evolución conjunta, se ha requerido de una especialización del transporte de acuerdo a los diversos tipos de carga, ya sea ésta sólida, a granel o fluida. Los estudios de la relación carga-vehículo son diversos, sobresaliendo aquellos que enfatizan el efecto de la carga líquida en el comportamiento dinámico de los vehículos, sobre todo cuando ésta se transporta a niveles parciales de llenado, [2].

La estabilidad direccional de los autotankes, vehículos especializados en el transporte de carga líquida, es afectada considerablemente por dos grupos de parámetros, asociados unos al vehículo y otros al tanque o contenedor, [1]. Entre los parámetros relacionados al vehículo se incluyen la configuración vehicular, el tipo y características de la suspensión y de los neumáticos, la rigidez torsional de la estructura, la ubicación y arreglo de los ejes de carga, etc.; los referentes al tanque contemplan la geometría, el nivel de llenado, la densidad de la carga y la forma en que se posiciona en el tanque, entre otros. El perfeccionamiento de la estabilidad direccional y de balanceo lateral de camiones con tanque requiere de estudios de principios sistemáticos de todos los factores de operación y diseño.

Una de las líneas de investigación conducentes a mejorar la estabilidad de autotankes es a través de la optimización de la geometría del tanque. Los autotankes muestran gran diversidad de formas, entre los que se encuentran los mostrados en la Figura 1.4.



Figura 1.4

Diversas formas de tanque empleados en autotanques.

En su mayoría, los vehículos para carga líquida emplean tanques de sección transversal circular, de sección elíptica u ovalada modificada, Figuras 1.5 y 1.6. De éstos, los más comunes son de sección elíptica, [1].

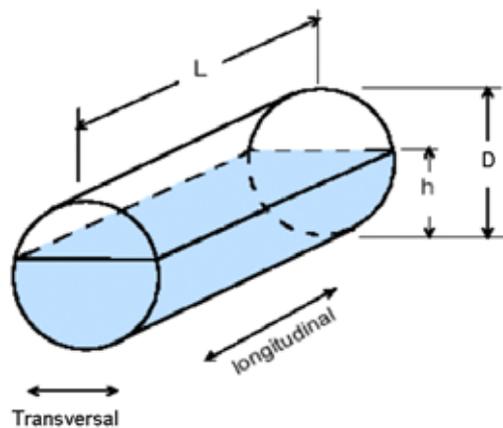


Figura 1.5

Representación esquemática de un tanque de sección transversal circular.

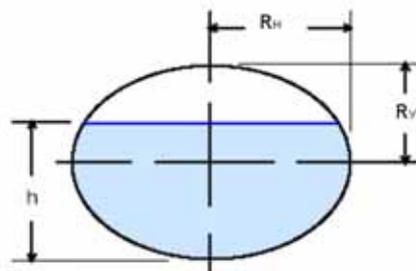


Figura 1.6

Representación esquemática de un tanque de sección transversal elíptica.

En el tanque de sección transversal circular, L , h y D son la longitud del tanque, la altura del nivel del líquido medida desde la base del círculo y el diámetro del círculo, respectivamente. En el de sección transversal elíptica, además de la longitud y la altura del nivel del líquido, la geometría requiere además los “radios” horizontal y vertical de la elipse, R_H y R_V respectivamente.

La estabilidad lateral de los vehículos se compromete con la altura del centro de gravedad. Los tanques de sección transversal redonda, principalmente empleados para propósitos generales en el transporte de químicos y productos alimenticios líquidos, se diseñan con grandes volúmenes para reforzar la eficacia de transporte de productos más ligeros. Estos diseños bajan los límites de estabilidad direccional por sus centros de gravedad altos. Además, para facilitar la limpieza algunos tanques no emplean mamparas o compartimentos y a menudo se llenan a niveles parciales debido a las limitantes reguladoras de las cargas sobre los ejes y las variaciones en la densidad de peso de diversos productos, [1, 2].

Con el propósito de obtener alturas menores, los contenedores, también llamados toneles, son usualmente diseñados con una sección transversal elíptica. En estas secciones el espacio libre para la expansión de los gases en el caso del transporte de materiales volátiles incrementa la superficie libre del fluido, comparado con secciones circulares, lo cual influye en la generación de oleaje, Figura 1.7, [3].

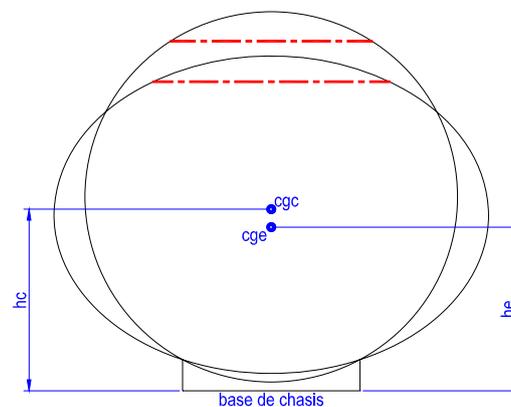


Figura 1.7
Comparación entre secciones circular y elíptica.

1.3 Oleaje en autotanques

Uno de los principales aspectos sobre la estabilidad de autotanques parcialmente llenos, es el efecto del oleaje durante el tránsito por carretera, [11]. Debido al movimiento del vehículo con sus consecuentes cambios de velocidad y de dirección, particularmente en maniobras repentinas, en la superficie del líquido se generan movimientos de oscilación. El oleaje produce fuerzas longitudinales y laterales que, bajo ciertas condiciones, pueden llegar a un estado crítico que conlleve a la inestabilidad, llegando incluso a la pérdida de control del vehículo o a la volcadura, [2, 3].

En los vehículos de carga sólida el centro de masa global puede considerarse fijo. En contraparte, en los de carga líquida con niveles de llenado parcial, por las diversas maniobras ejecutadas en carretera, el movimiento del fluido altera constantemente la posición del centro de masa. El efecto de un centro de masa móvil y la necesidad de transportar fluidos a niveles parciales de llenado, son

características que influyen fuertemente en el comportamiento dinámico del autotanque.

Este efecto tiene mayor relevancia cuando la carga la constituye un material clasificado como peligroso, como es el caso de líquidos refinados del petróleo. Debido a sus propiedades térmicas y volumétricas, se requiere un volumen libre que satisfaga las necesidades de expansión térmica ocasionada por el movimiento del fluido y los cambios de temperatura durante su traslado, [12]. En contraparte, promovido por el movimiento del vehículo, se generan olas sobre la superficie libre del líquido y con ello interacciones dinámicas entre el líquido y el recipiente contenedor. Sin embargo, son pocos los estudios que se han realizado en torno a la caracterización de vehículos para el transporte de fluidos peligrosos que consideren el efecto del volumen de llenado y del tipo de líquido transportado, teniendo, por tanto, poca repercusión en el diseño de vehículos de este tipo, [11]. La Figura 1.8 muestra vehículos típicos de 20 mil litros de capacidad utilizados para el transporte de combustibles líquidos.



Figura 1.8

Autotanques empleados para el transporte de combustibles refinados del petróleo.

Debido a la potencialidad de desastres en accidentes de este tipo de vehículos, se ha evidenciado una preocupación importante por incrementar los niveles de seguridad durante el tránsito de autotanques empleados para materiales líquidos peligrosos. Para el caso de refinados del petróleo, el llenado parcial agrega una condición crítica que puede reducir drásticamente los límites de estabilidad y de manejabilidad del vehículo, [3, 6]. Según datos de accidentes en los que incluía la configuración vehicular de mayor participación y los factores primarios que originaron el accidente, se identificó que el de mayor incidencia en este aspecto era el autotanque C3, camión unitario de carga de tres ejes, con una capacidad de carga volumétrica de 20 mil litros, [11].

1.4 Elementos de atenuación del oleaje

Con el propósito de atenuar el efecto dinámico de la carga líquida en autotanques se han empleado diversos dispositivos de omisión o supresión del oleaje, que en cierto grado han producido un incremento en el “amortiguamiento” del líquido. Dentro de la gama de dispositivos utilizados, muchos de ellos han sido sujetos a pruebas de desarrollo y han sufrido cambios que les permite ser usados en otras aplicaciones similares relacionadas con el oleaje en un contenedor.

Con el interés surgido en los primeros estudios de oleaje en prototipos de naves especiales, se realizaron en éstos también los primeros experimentos. Posteriormente, estas aplicaciones fueron dirigidas hacia los vehículos de transporte terrestres, [7, 8, 9]. Los primeros dispositivos desarrollados incluyeron rompeolas de anillo rígido de diversas geometrías y orientaciones, rompeolas de forma cruzada, desviadores o deflectores, rompeolas de anillo plano y flexible, cubos flotantes, bolsas de expulsión positiva y diafragmas de membrana, algunos de los cuales se muestran en las Figuras 1.9 y 1.10. También se han aplicado algunos tipos de gel, fibras empacadas y espumas en aplicaciones no espaciales.

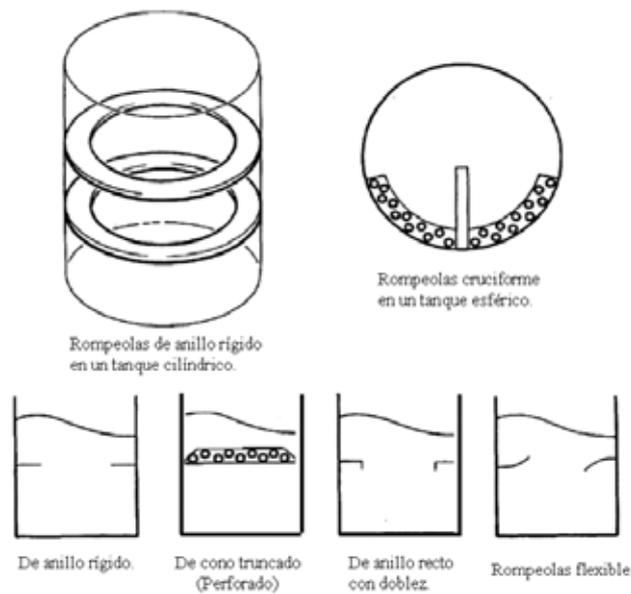


Figura 1.9

Tipos de rompeolas empleados en los primeros proyectos de investigación del oleaje en recipientes cilíndricos.

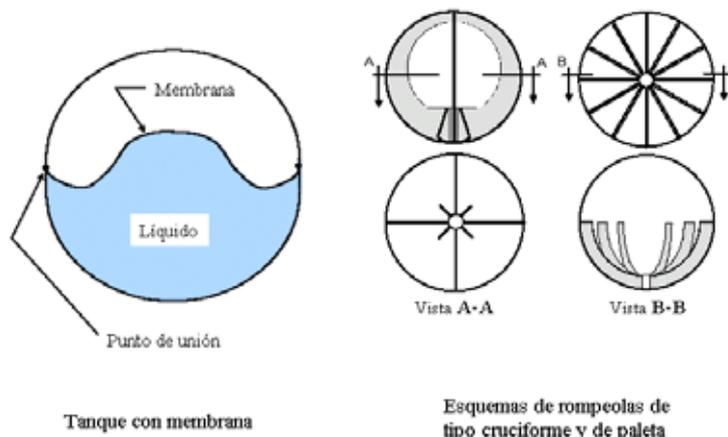


Figura 1.10

Tipos de rompeolas empleados en los tanques de combustible de algunos prototipos espaciales.

El empleo de los diafragmas y las bolsas de expulsión positiva se han incrementado como dispositivos de manejo o administración del líquido en dispositivos de sistemas de control y soporte en condiciones de baja gravedad. Sin embargo, los diafragmas y las bolsas no se han empleado en tanques grandes de propulsión típicos de los vehículos de despegue o de lanzamiento aeroespacial. Generalmente, la razón de amortiguamiento aumenta con el incremento en el grosor del diafragma y con la amplitud de excitación, lo que origina el decremento del diámetro del tanque, [8]. La efectividad de cualquier dispositivo de supresión de oleaje se expresa generalmente mediante un parámetro llamado factor de amortiguamiento. Este parámetro se utiliza en algunos modelos matemáticos que tienen la intención de simular las cargas del oleaje.

La selección y diseño de los sistemas de reducción del oleaje requiere conocimientos de las características mismas del oleaje. Entre los parámetros importantes de influencia en el diseño de los dispositivos de amortiguamiento del oleaje están el tipo y condiciones de la trayectoria del vehículo, los requerimientos de amortiguamiento para un tipo específico de tanque o el tipo de amplitudes de movimiento de oleaje de acuerdo al nivel de llenado; las características físicas del tanque como su geometría, deformación elástica y aislamiento; las características funcionales del sistema del líquido como los requerimientos de llenado y drenado y los requerimientos de calentamiento del líquido; las propiedades físicas y químicas del líquido; la manufactura, manejo e instalación de los dispositivos amortiguadores del oleaje, así como las cargas de impacto que deberán sufrir los dispositivos, su peso y las propiedades del material de fabricación, [13].

1.5 Uso de rompeolas en autotanques

Algunos de los tanques utilizados para el transporte terrestre de fluidos contienen compartimentos interiores longitudinales para reducir las masas líquidas en movimiento. Las paredes de estos compartimentos reducen además las frecuencias resonantes del líquido en un cierto intervalo, amortiguando de esta manera el efecto del líquido. Estas paredes se denominan rompeolas que, en muchos de los casos, tienen perforaciones para reducir el peso, para comunicar los compartimentos entre sí y para facilitar las labores de limpieza interior.

En el diseño de los tanques de sección elíptica utilizados en el transporte de combustibles derivados del petróleo se incluyen rompeolas con las características anteriores, [11]. Los rompeolas ofrecen resistencia definida al oleaje de la carga bajo maniobras de frenado, pero no son capaces de soportar el oleaje lateral de la carga líquida. La condición de llenado parcial acoplada con el diseño de una sección transversal más amplia origina un cambio lateral excesivo de la carga bajo maniobras de dirección y, de este modo, reduce los límites de estabilidad. Bajos niveles de llenado pueden incluso promover menores límites de estabilidad que altos niveles. Una geometría de tanque con un centro de gravedad bajo y propiedades de transferencia de cargas laterales relativamente más bajas, resultan benéficas para mejorar los límites de estabilidad lateral, [4, 5]. Sin

embargo, las formas populares de tanques no contemplan el uso de rompeolas de oleaje lateral.

En el caso de los autotanques de 20 mil litros de capacidad, como el mostrado en la Figura 1.11, de sección transversal elíptica, contiene 5 rompeolas ubicados transversalmente y distribuidos a lo largo de la longitud interna del tanque, dispuestos como en la Figura 1.12.

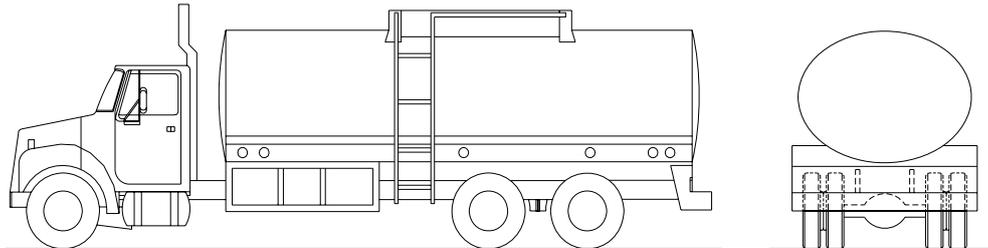


Figura 1.11

Esquema de autotanque de tres ejes típico, de 20 000 l de capacidad en el tanque.

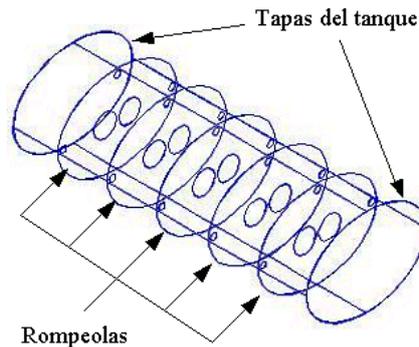


Figura 1.12

Disposición de los 5 rompeolas y tapas del tanque elíptico de 20 000 l.

Este tipo de vehículos son de amplio uso en el transporte de combustibles refinados del petróleo, como diesel y gasolina. Debido a restricciones de seguridad, los tanques deben llenarse parcialmente a un nivel máximo del 94 % de su capacidad total para permitir que el volumen libre pueda absorber la expansión de gases propia de este tipo de combustibles, [12]. El material de fabricación, tanto del tanque como de los rompeolas, es de un acero de bajo carbono, comúnmente SAE 1010, representando los rompeolas aproximadamente el 10% de la masa total del contenedor, [11]. De acuerdo con la ubicación de la masa relativa a estos elementos, la ubicación del centro de gravedad se ve afectada en un sentido negativo para la estabilidad del vehículo, repercutiendo en las características de manejabilidad y estabilidad lateral. Adicionalmente, la información disponible no muestra una clara contundencia para la utilización de un número determinado de los rompeolas actuales, siendo la selección de 5 elementos, hasta cierto punto arbitraria.

1.6 Necesidades de estudio

Es indiscutible que el oleaje de cargas fluidas afecta la estabilidad de los autotanques. Algunos estudios han mostrado que en tanques elípticos las cargas críticas atribuidas al oleaje longitudinal se presentan a niveles de llenado cercanos al 75%. Por otro lado, en el caso de oleaje transversal en tanques de sección transversal circular, se estima que las cargas críticas se presentan a niveles alrededor del 60%, figura 1.13.



Figura 1.13

Volcadura de autotanque cuya causa fue inestabilidad producida por cargas laterales del líquido transportado en el tanque.

Debido a que la magnitud de las cargas en la dirección longitudinal supera en gran medida a aquéllas actuantes en la dirección transversal, el uso de elementos atenuadores de oleaje se ha caracterizado por su implementación para la restricción de movimiento de la carga en la dirección longitudinal.

Aunque en México no se tienen registros sobre la falla por resistencia de los elementos rompeolas, tampoco hay evidencia de una adecuada selección del número y forma adecuada a las características del tanque y del líquido transportado. Tampoco se cuenta con información sobre las fuerzas reales generadas por el oleaje longitudinal que actúan sobre los rompeolas, a pesar de ser un diseño generalizado en la fabricación de autotanques para el transporte de combustibles, [11]. Esta situación ha conducido a incertidumbres sobre el adecuado diseño de tanques y rompeolas, incluyendo además la condición probable de uso de material innecesario en tanque y rompeolas que limiten su capacidad de carga efectiva y perjudiquen la distribución de la masa en el vehículo.

Para el caso de oleaje lateral, algunos investigadores han propuesto distintas medidas para minimizar el movimiento del fluido en esta dirección, [8, 9]. Entre las medidas se cuenta la implementación de rompeolas de principio semejante a los que se usan para minimizar el oleaje longitudinal, aunque la magnitud de las ventajas no está aún confirmada. No obstante, como desventaja se presenta la adición de material, generalmente en la región superior del tonel, lo cual incrementa proporcionalmente la altura del centro de gravedad y modifica la distribución de masa.

Recientemente, en el Instituto Mexicano del Transporte se llevó a cabo una investigación para determinar los niveles de estabilidad de vehículos típicos para

el transporte de combustibles, tomando en cuenta diversas características de los vehículos tales como el sistema de suspensión, cantidad de carga, distancia entre ejes, etc. [11]. Es importante mencionar que dicha investigación constituye una de las más completas realizadas en el tema y desarrolladas completamente en México. Además, tal investigación constituye el inicio formal del estudio de este tipo de fenómenos en el país.

El vehículo que actualmente se emplea para el transporte de refinados del petróleo es un autotanque de tres ejes y como elementos atenuadores emplea cinco rompeolas para minimizar el efecto del oleaje que se genera a lo largo del tanque. El empleo actual de estos dispositivos atenuadores del oleaje longitudinal no tiene una base teórica sustentable que justifique su uso; esto es, los diseñadores de tanques no manejan argumentaciones sólidas que expliquen el uso de este tipo de elementos atenuadores por su geometría actual, por el acero como material de fabricación y por el número de rompeolas que se emplean. Por lo mismo, el transporte de fluidos en autotanques requiere mayor atención para análisis enfocados al estudio en el desempeño de rompeolas de atenuación de oleaje longitudinal, que determinen las características óptimas en cuanto a geometría, forma y número.

La falta de estudios en el movimiento de fluidos en tanques a niveles parciales de llenado, el encontrar la configuración óptima en número y forma en los rompeolas y eliminar masa al cuerpo del tanque, son prioridades muy importantes en el comportamiento dinámico de un autotanque. Estas características repercuten en la estabilidad del vehículo y a su vez está fuertemente ligado con la seguridad tanto para el conductor de la unidad como para el medio ambiente por donde circula el autotanque.

1.7 Definición del problema

No se cuenta con información técnica del diseño base de tanques empleados por los autotanques que transportan líquidos, particularmente los empleados en el transporte de materiales peligrosos, como gasolinas y diesel. Los autotanques de mayor uso son aquéllos con una capacidad de carga en volumen de 20 mil litros, pero debido a los requerimientos físicos de la carga, se deben transportar a niveles parciales de llenado. El diseño común de este tipo de tanques incluye rompeolas transversales utilizados con el propósito de atenuar el oleaje longitudinal. Sin embargo, no hay información clara sobre los requerimientos del número y arreglo que contrarresten con mayor eficiencia el oleaje generado en niveles parciales de llenado, ni la magnitud del efecto de los factores que promuevan o atenúen el oleaje dentro del contenedor producido por el movimiento del vehículo durante el transporte.

Aunque las mejores condiciones para estudios del oleaje y sus factores incluirían ejecutar pruebas en un autotanque a escala natural, la factibilidad de realizarlo es extremadamente baja, debido a los instrumentos e instalaciones necesarias para su desarrollo. No obstante, para tener una aproximación sobre los factores de

generación del oleaje, se proyecta utilizar un tanque a escala reducida con agua como carga fluida, que sea manejable e instrumentable a nivel de laboratorio y sujeto a un esquema de pruebas que proporcione confiabilidad estadística en los resultados obtenidos. Se contempla el uso de agua como material de carga debido a los riesgos inherentes al manejo de combustibles y otros materiales peligrosos.

Con esa aplicación, se pretende dar respuesta a si es posible encontrar una combinación de cantidad y forma de elementos atenuadores de oleaje (rompeolas) en un tanque a escala reducida de sección transversal elíptica, que presenten mayor atenuación de la fuerza de oleaje longitudinal. Lo anterior, conforme a niveles parciales de llenado y a distintas velocidades de operación para la generación del oleaje. Por tal, este cuestionamiento conduciría a una hipótesis del tipo de “el empleo de otras combinaciones de rompeolas presenta menores niveles de fuerza de oleaje con respecto al uso común de 5 rompeolas en un tanque de sección elíptica a escala reducida, a distintos niveles de llenado y bajo distintas velocidades de prueba”.

Conocer ese tipo de información puede ser utilizada para incrementar los niveles de seguridad de los autotanques durante el tránsito por carretera.

1.8 Objetivo principal

De acuerdo con la identificación del problema de estudio en este proyecto, se establece como objetivo el de “estimar el efecto de la modificación de la geometría y la configuración de los rompeolas para reducir el oleaje longitudinal en toneles de sección elíptica para el transporte de refinados, con base a un modelo a escala reducida del tanque elíptico”.

De manera secundaria, se derivan los siguientes objetivos:

1. Proponer las características de un diseño experimental y adecuarlo para su aplicación en un modelo de tonel a escala.
2. Determinar, mediante el diseño experimental, el efecto longitudinal del nivel de llenado, de la velocidad de avance, del número y del tipo de rompeolas sobre el oleaje del líquido (fuerza de oleaje).

2 Diseño estadístico de experimentos

2.1 Conceptos generales

2.1.1 Historia del diseño estadístico de experimentos

Eras del diseño experimental

El desarrollo moderno del diseño experimental estadístico ha pasado por cuatro etapas o eras, que se identifican de acuerdo con las principales aplicaciones y mejoras de los métodos y procedimientos. Estas etapas son la era agrícola, la era industrial, la era de la calidad industrial y la de mejoramiento y desarrollo de métodos novedosos, [14].

La era agrícola tuvo su origen en los trabajos de Sir Ronald A. Fisher en el primer tercio del siglo XX. Trabajando en la aplicación estadística en cultivos agrícolas, Fisher fundamentó los tres principios básicos del diseño experimental, es decir, proporcionó las bases de los conceptos de aleatorización, de repetición de eventos y la formación de bloques de acuerdo a condiciones específicas de prueba. Así mismo, incorporó de manera sistemática el pensamiento y los principios estadísticos en el diseño de las investigaciones experimentales, incluyendo el concepto de diseño factorial y el análisis de varianza.

La era industrial fue la continuación de los trabajos de Fisher, iniciando en la década de los 30's con la aplicación de diseños experimentales en ambientes industriales. Esta era se identifica por el desarrollo de la metodología de superficies de respuesta por parte de Box y Wilson, quienes se percataron y explotaron el hecho de que muchos experimentos industriales son fundamentalmente diferentes de sus contrapartes agrícolas en dos sentidos: 1) La variable de respuesta puede observarse casi de inmediato –inmediatez- y 2) El experimentador puede obtener información crucial de un grupo de corridas, en periodos de tiempo muy cortos, que puede usarse para planear el siguiente experimento –secuencialidad-.

La tercera era, del mejoramiento de la calidad en la industria, empezó a fines de la década de los 70's con el trabajo de Genichi Taguchi. Taguchi propugnaba por el uso de experimentos con un diseño paramétrico robusto [15, 16, 17], considerando lo siguiente:

1. Hacer procesos insensibles a los factores ambientales o de otra índole que son difíciles de controlar.
2. Fabricar productos insensibles a la variación transmitida por los componentes.

3. Encontrar los niveles de las variables del proceso que obliguen a la media de un valor deseado mientras que al mismo tiempo se reduzca la variabilidad en torno a este valor.

Taguchi propuso diseños factoriales altamente fraccionados y otros arreglos ortogonales junto con algunos métodos estadísticos nuevos para resolver estos problemas, cuya metodología generó muchas discusiones y controversias.

Como resultado de tales controversias, se dio origen a la cuarta era, en la que de manera generalizada se extendió el uso de los experimentos diseñados a otras áreas de la industria, renovando el interés en el ejercicio del diseño estadístico y en la integración del diseño experimental en los programas de estudio de universidades.

El diseño de experimentos

Investigadores de prácticamente todos los campos de estudio llevan a cabo experimentos para descubrir algo acerca de un proceso o sistema particular. En un sentido literal, un experimento es una prueba. En una perspectiva más formal, un experimento puede definirse como una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida, [14, 18, 19, 20].

Los experimentos se usan para estudiar el desempeño de procesos o sistemas, el proceso o sistema puede representarse con el modelo ilustrado en la figura 2.1.

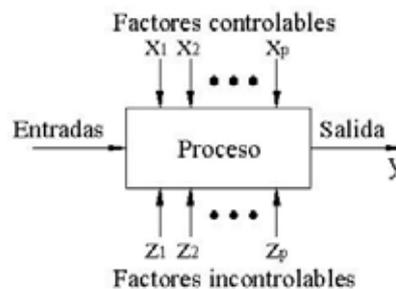


Figura 2.1

Representación esquemática de un proceso para el diseño de experimentos.

El proceso por lo general puede visualizarse como una combinación de máquinas, métodos, personas u otros recursos que transforman cierta entrada en una salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas variables del proceso x_1, x_2, \dots, x_p son controlables, mientras que otras z_1, z_2, \dots, z_p son no controlables (Aunque puedan serlo para los fines de una prueba).

2.1.2 Terminología del diseño experimental

Error experimental: Variabilidad no explicada en un experimento; normalmente es recomendable tener como máximo una variabilidad no explicada del 10

%: Pueden existir casos donde dependiendo del proceso de experimentación y las condiciones en las que se ejecutan las pruebas sea permitido hasta un 20 % en el error no explicado.

Respuesta: Resultado de un experimento y que puede ser cuantitativo o cualitativo.

Factor: Es una variable experimental controlable que se piensa influye sobre la respuesta, es una variable experimental que está siendo investigada para determinar su efecto sobre una respuesta. Un factor se considera controlable por el experimentador.

Nivel: Valor específico de un factor, puede ser cuantitativo o cualitativo.

Región experimental: Espacio del factor, todas las combinaciones posibles factor-nivel para las cuales es posible la experimentación. Consiste de todos los posibles niveles de los factores que son candidatos para incluirse en el diseño. Para factores cuantitativos se define por los límites inferior y superior de cada factor.

Corrida de prueba: Combinación sencilla de niveles del factor que produce una observación sobre la respuesta.

Pruebas repetidas: Dos o más observaciones que tienen los mismos niveles para todos los factores, son conducidas bajo idénticas condiciones experimentales tanto como sea posible, pero no necesariamente se obtienen como corridas de prueba consecutivas.

Replicación: Repetición de un experimento completo o una parte de él bajo dos o más conjuntos de condiciones.

Unidad (artículo): Entidad sobre la cual se hace una medición o una observación; algunas veces se refiere a la medición actual u observación.

Unidad experimental: Medición o material sobre el cual se hace la medición.

Unidades experimentales homogéneas: Unidades que son tan uniformes como sea posible sobre todas las características que puedan afectar la respuesta. Puesto que existe una variación aleatoria inherente en todas las unidades experimentales, la habilidad para detectar efectos importantes del factor y estimar estos efectos con precisión satisfactoria depende del grado de homogeneidad entre las unidades experimentales.

Interacción: Existencia de efectos conjuntos, en la cual el efecto de cada factor depende de los niveles de los otros factores.

Confusión: Uno o más efectos que no pueden atribuirse sin ambigüedad a un solo factor o interacción.

Efecto: Cambio en la respuesta promedio entre dos combinaciones factor-nivel o entre dos condiciones experimentales. En su forma más simple, el efecto de un solo factor en dos niveles sobre una respuesta se mide como la diferencia en la respuesta promedio para los dos niveles del factor. Efecto del factor = (Respuesta promedio en el nivel uno) - (Respuesta promedio

en el nivel dos). El efecto del factor mide la influencia de los niveles diferentes de un factor sobre el valor de la respuesta. Efectos de factores individuales y conjuntos se tratan en los experimentos factoriales.

Bloque: Grupo de unidades experimentales homogéneas. Su aplicación puede generar pruebas repetidas y la replicación. El bloqueo divide al total de las unidades experimentales en dos o más grupos o bloques de unidades experimentales homogéneas, de tal manera que las unidades en cada bloque son más homogéneas que las unidades en bloques diferentes.

Diseño (esquema): Especificación global de las corridas de prueba experimental incluyendo aleatorización y si es necesario bloqueo, pruebas repetidas y replicación; así como la asignación de las combinaciones factor-nivel para las unidades experimentales.

Covariable: Una variable incontrolable que influye en la respuesta pero que no es afectada por otros factores experimentales. No es una respuesta adicional, sus valores no son afectados por los factores en el experimento. Covariables y factores experimentales influyen conjuntamente sobre la respuesta.

2.1.3 Aplicaciones típicas del diseño experimental

Los métodos del diseño experimental tienen aplicación en diversas disciplinas; de hecho, la experimentación puede considerarse parte del proceso científico y uno de los medios para conocer el funcionamiento de procesos y sistemas. En general, el aprendizaje ocurre a través de una serie de actividades en las que se hacen conjeturas acerca del proceso, se llevan a cabo experimentos para generar datos del proceso y después se usa la información del experimento para establecer nuevas conjeturas, lo que lleva a nuevos experimentos, y así sucesivamente.

El uso del diseño experimental en estas áreas puede redundar en productos cuya fabricación sea más sencilla, en productos que tengan un desempeño y confiabilidad de campos mejorados, en costos de producción más bajos y en tiempos más cortos para el diseño y desarrollo del producto.

2.2 Diversidad de esquemas experimentales

Los experimentos incluyen muchas veces varios factores. El objetivo de la persona que realiza un experimento, llamada experimentador, es determinar la influencia de estos factores sobre la respuesta de salida del sistema. Al enfoque general para planear y llevar a cabo el experimento se le llama estrategia de experimentación. Existen varias estrategias que podría usar un experimentador, entre las que se cuentan:

El enfoque de la mejor conjetura

El enfoque de un factor a la vez

El enfoque de experimento factorial

La metodología de Taguchi

La estrategia de la mejor conjetura es común entre ingenieros y científicos. Esta estrategia funciona de manera adecuada si los experimentadores cuentan con una gran cantidad de conocimientos técnicos del sistema bajo estudio, así como amplia experiencia práctica. Sin embargo, este enfoque presenta dos serias desventajas: la primera relacionada cuando se parte de la suposición de que la mejor conjetura inicial no produce los resultados deseados; por tanto, el experimentador tiene que hacer otra conjetura acerca de la combinación correcta de los niveles de los factores. Esto podría continuar por mucho tiempo, sin garantía alguna de éxito. La segunda desventaja estriba en la suposición de que la mejor conjetura inicial produce un resultado satisfactorio; entonces, el experimentador se ve tentado a suspender las pruebas, aun cuando no hay ninguna garantía de que se ha encontrado la mejor solución.

La estrategia de experimentación de un factor a la vez consiste en seleccionar un punto de partida o línea base de los niveles para cada factor y posteriormente variar sucesivamente cada factor en su intervalo, manteniendo constantes los factores restantes en el nivel base. La desventaja principal de esta estrategia es que no puede tomar en consideración cualquier posible interacción entre los factores; esto es, cuando uno de los factores no produce el mismo efecto en la respuesta con niveles diferentes de otro factor. Las interacciones entre factores son muy comunes y, en caso de existir, la estrategia de un factor a la vez casi siempre producirá resultados deficientes. A pesar de ello, los experimentos de un factor a la vez son comunes en la práctica debido a que los investigadores no perciben las interacciones entre factores. En general, se tiene la percepción que esta estrategia se relaciona con el método científico o que es un principio sólido de ingeniería, aunque los experimentos de un factor a la vez siempre son menos eficientes que otros métodos basados en un enfoque estadístico del diseño experimental.

Las desventajas de las estrategias anteriores son superadas por los métodos de diseño experimental bajo el enfoque factorial. En esta estrategia los factores se hacen variar en conjunto, en lugar de uno a la vez. Los diseños factoriales hacen un uso más eficiente de los datos experimentales, lo cual es una característica importante y útil de estos métodos.

La metodología de Taguchi se basa en mejorar la calidad y la reducción de costos de productos en base a diseños robustos. El diseño robusto de Taguchi se fundamenta en gran parte en las ideas del diseño estadístico de experimentos derivado del trabajo de Fisher. Estos diseños robustos dan respuesta a aspectos como el de reducir la variación del rendimiento de los productos al momento que el cliente los usa y el de realizar procesos de manufactura óptimos y mantenerlos por ese camino.

De acuerdo con las estrategias mencionadas líneas arriba, los diseños experimentales existentes se pueden resumir en forma general de acuerdo a como se muestran en la figura 2.2.

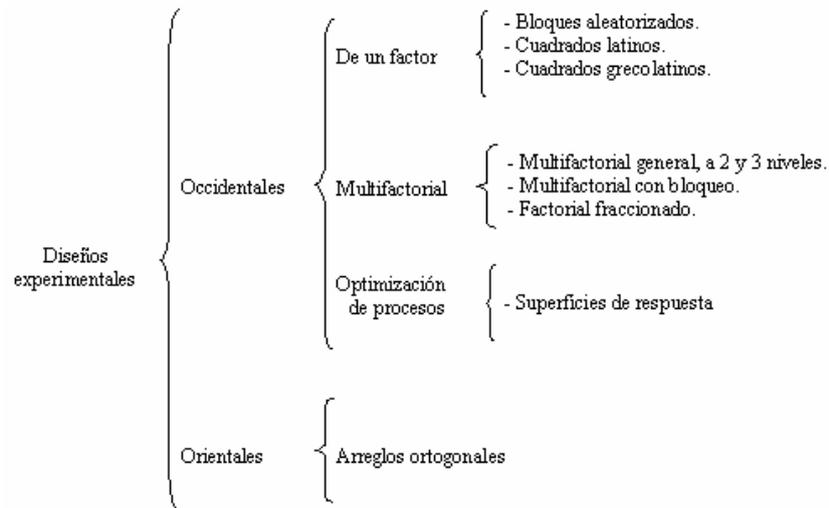


Figura 2.2
Clasificación esquemática general de los diseños experimentales.

La decisión de empleo de un diseño experimental depende básicamente de si el experimentador cuenta con la experiencia y conocimientos técnicos y de ingeniería relacionados con el campo al que pertenece el problema que requiere solución. La metodología de Taguchi propone la ejecución de sólo algunas corridas de prueba, así como incluir en el experimento únicamente las interacciones de interés entre algunos de los factores involucrados en el estudio.

Por esta razón es importante que el experimentador cuente con amplios conocimientos del tema, de tal forma que sea posible establecer los niveles de los factores con los que se tiene la certeza de encontrar la mejor respuesta de salida. Esto implica que en la metodología de Taguchi se requiere identificar los factores de influencia y plantear una estructura de los arreglos ortogonales de los diseños experimentales, bajo ese enfoque oriental. Por otra parte, los diseños experimentales occidentales permiten obtener la mejor respuesta gracias a que se ejecutan todas las pruebas posibles; por ende, requieren más tiempo para llegar a una conclusión sobre los factores que intervienen en el experimento.

2.3 Principios básicos del diseño estadístico

El diseño estadístico de experimentos se refiere al proceso de planeación de los experimentos, de tal forma que se recaben datos adecuados que puedan analizarse con métodos estadísticos que conduzcan a conclusiones válidas y objetivas. Cuando el problema incluye datos sujetos a errores experimentales, la metodología estadística es el único enfoque objetivo de análisis. Por lo tanto, cualquier problema experimental incluye estos dos aspectos: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos, aspectos íntimamente

relacionados, pues el método de análisis depende directamente del diseño empleado.

Los tres principios básicos del diseño experimental son: la realización de réplicas, la aleatorización y la formación de bloques. Por realización de réplicas se entiende la ejecución del experimento básico realizado el número de veces establecidas en la planeación previa del diseño estadístico de experimentos. Esto es, una réplica es la ejecución del experimento de tal forma que se puedan reproducir las mismas condiciones para uno y el resto de los eventos de los cuales está formado el número total de pruebas a realizar en el experimento.

La realización de réplicas posee dos prioridades importantes: primera, permite al experimentador obtener una estimación del error experimental, que se convierte en una unidad de medición básica para determinar si las diferencias observadas en los datos son en realidad estadísticamente diferentes. La segunda, si se usa la media muestral (por ejemplo \bar{y}) para estimar el efecto de un factor en el experimento, la realización de réplicas permite al experimentador obtener una estimación más precisa de este efecto. Por ejemplo, si σ^2 es la varianza de una observación individual y hay n réplicas, la varianza de la media muestral es:

$$\sigma_{\bar{y}}^2 = \frac{\sigma^2}{n} \quad (2.1)$$

La consecuencia práctica de lo anterior es que si se hicieron $n=1$ réplicas y se observó $y_1=145$ y $y_2=147$, probablemente no podrán hacerse inferencias satisfactorias acerca de la característica que se esté estudiando; es decir, la diferencia observada podría ser el resultado del error experimental. Por otra parte, si n fue razonablemente grande y el error experimental fue lo suficientemente pequeño y se observó $\bar{y}_1 < \bar{y}_2$, podría concluirse con una certeza razonable que el efecto en \bar{y}_2 produce una mejor respuesta (si se estuviera buscando el maximizar cierto efecto en un experimento).

Hay una diferencia importante entre réplicas y mediciones repetidas. Las mediciones repetidas son el número de respuestas requeridas que se obtienen de un mismo ambiente experimental; es decir, obtenidas de un mismo sistema o de una misma probeta de experimentación. La variabilidad observada en las mediciones repetidas es un reflejo directo de la variabilidad inherente del sistema o del instrumento de medición. Respecto a la réplica, las mediciones son obtenidas de distintas probetas, esto es, el número de respuestas de salida obtenidas representa el número de probetas empleadas en la experimentación, además, la variabilidad observada es el resultado de la variabilidad del sistema de medición y de la variabilidad presente en las características físicas y químicas de cada una de las probetas.

La aleatorización es la piedra angular en la que se fundamenta el uso de los métodos estadísticos en el diseño experimental. Por aleatorización se entiende

que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizarán los ensayos individuales del experimento se determinan al azar. Uno de los requisitos de los métodos estadísticos es que las observaciones, o los errores, sean variables aleatorias con distribuciones independientes. La aleatorización hace por lo general que este supuesto sea válido. La aleatorización correcta del experimento ayuda también a “sacar del promedio” los efectos de factores extraños que pudieran estar presentes.

La formación de bloques es una técnica de diseño que se utiliza para mejorar la precisión de las comparaciones que se hacen entre los factores de interés. Muchas veces la formación de bloques se emplea para reducir o eliminar la variabilidad transmitida por los factores perturbadores; es decir aquellos factores que pueden influir en la respuesta experimental pero en los que no hay un interés específico. En general, un bloque es un conjunto de condiciones experimentales relativamente homogéneas. Los tres principios básicos del diseño experimental, la aleatorización, la realización de réplicas y la formación de bloques son parte de cada uno de los experimentos [14, 18, 19, 20].

2.4 Pautas generales para diseñar experimentos

Para aplicar el enfoque estadístico en el diseño y análisis del experimento, es necesario que todos los que participan en el mismo tengan desde el principio una idea clara de qué es exactamente lo que va a estudiarse, como van a colectarse los datos, y al menos una comprensión cualitativa de la forma en que van a analizarse los datos.

El procedimiento recomendado es el siguiente:

- Identificación y enunciación del problema
- Elección de los factores, los niveles y los rangos
- Selección de la variable de respuesta
- Elección del diseño experimental
- Realización del experimento
- Análisis estadístico de los datos
- Conclusiones y recomendaciones

Los pasos 1, 2 y 3 se refieren a la planeación previa al experimento; en la práctica los pasos 2 y 3 suelen hacerse simultáneamente o en el orden inverso.

Identificación y enunciación del problema

Este punto podría parecer muy obvio para el experimentador, pero es común que en la práctica no sea sencillo darse cuenta de que existe un problema que requiere experimentación, y tampoco es fácil desarrollar una enunciación clara, con la que todos estén de acuerdo en este problema. Es necesario desarrollar todas las ideas acerca de los objetivos del experimento. Generalmente, es

importante solicitar aportaciones de todas las áreas involucradas: ingeniería, aseguramiento de la calidad, manufactura, mercadotecnia, administración, el cliente y el personal de operación. Por esta razón se recomienda un enfoque de equipo para diseñar experimentos.

Elección de factores, niveles y rangos

Cuando se consideran los factores que pueden influir en el desempeño de un proceso o sistema, el experimentador suele descubrir que estos factores pueden clasificarse como factores potenciales del diseño, o bien, como factores perturbadores.

Los factores potenciales del diseño son aquellos que el experimentador posiblemente quiera hacer variar en el experimento. Es frecuente encontrar que hay muchos factores potenciales del diseño, por lo que es conveniente contar con alguna clasificación adicional de los mismos. Algunas clasificaciones útiles son: factores del diseño, factores que se mantienen constantes y factores a los que se permite variar. Los factores del diseño son los que se seleccionan realmente para estudiarlos en el experimento. Los factores que se mantienen constantes son variables que pueden tener cierto efecto sobre la respuesta, pero que para fines del experimento en curso no son de interés, por lo que se mantendrán fijos en un nivel específico. Muchas veces se trabajará con el supuesto de que los efectos de los factores que se mantienen constantes y de los factores a los que se permite variar son relativamente pequeños.

Por otra parte, una fracción de los factores perturbadores puede tener efectos considerables que deben tomarse en consideración, a pesar de que no haya interés en ellos en el contexto del experimento en curso. Los factores perturbadores suelen clasificarse como factores controlables, no controlables o de ruido. Un factor perturbador controlable es aquel cuyos niveles pueden ajustarse por el experimentador. Si un factor perturbador no es controlable en el experimento, pero puede medirse, muchas veces puede usarse el procedimiento de análisis denominado análisis de covarianza para compensar este efecto. Cuando un factor que varía de manera natural y no controlable en el proceso puede controlarse para los fines del experimento, con frecuencia se le llama factor de ruido. En tales situaciones, es común que el objetivo sea encontrar los ajustes de los factores controlables del diseño que minimicen la variabilidad transmitida por los factores de ruido.

Selección de la variable de respuesta

Para seleccionar la variable de respuesta, el experimentador debe tener la certeza de que esta variable proporciona en realidad información útil acerca del proceso bajo estudio. En la mayoría de los casos, el promedio o la desviación estándar, o ambos, de la característica medida será la variable de respuesta. No son la excepción las respuestas múltiples. La eficiencia de los instrumentos de medición, o error de medición, también es un factor importante. Si la eficiencia de los instrumentos de medición es inadecuada, el experimentador sólo detectará los

efectos relativamente grandes de los factores, o quizá sean necesarias réplicas adicionales.

Elección del diseño experimental

La elección del diseño implica la consideración del tamaño de muestra, número de réplicas, la selección de un orden de corridas adecuado para los ensayos experimentales y la determinación de si entra en juego o no la formación de bloques u otras restricciones sobre la aleatorización. Al seleccionar el diseño es importante tener en mente los objetivos experimentales.

Realización del experimento

Antes de llevar a cabo el experimento es conveniente, en muchas ocasiones, realizar algunas corridas piloto o de prueba. Estas corridas proporcionan información acerca de la consistencia del material experimental, una comprobación del sistema de medición, una idea aproximada del error experimental y la oportunidad de poner en práctica la técnica experimental global. Cuando se lleva a cabo el experimento es vital monitorear con atención el proceso a fin de asegurarse de que todo se haga conforme a la planeación. Los errores en el procedimiento experimental en esta etapa destruirán por lo general la validez experimental. Poner en primer plano la planeación es crucial para el éxito.

Análisis estadístico de los datos.

Deben usarse métodos estadísticos para analizar los datos, de tal modo que los resultados y las conclusiones sean objetivos y no de carácter apreciativo. Si el experimento se ha diseñado correctamente y se ha llevado a cabo de acuerdo con el diseño, los métodos estadísticos necesarios no deben ser complicados [22, 23].

Los métodos estadísticos no pueden demostrar que un factor posee un efecto particular, sólo proporcionan pautas generales en cuanto a la confiabilidad y la validez de los resultados. Aplicados en forma correcta, los métodos estadísticos no permiten la demostración experimental de nada, pero sí sirven para medir el error posible en una conclusión o asignar un nivel de confianza a un enunciado. La ventaja principal de los métodos estadísticos es que agregan objetividad al proceso de toma de decisiones. Las técnicas estadísticas, aunadas a una buena ingeniería o conocimiento del proceso y el sentido común, llevarán por lo general a conclusiones sólidas.

Conclusiones y recomendaciones.

Una vez analizados los datos, el experimentador debe sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso de acción. Los métodos gráficos suelen ser útiles en esta etapa, en particular para presentar los resultados. También deberán realizarse corridas de seguimiento o pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento.

2.5 Hipótesis principales

Las pruebas estadísticas forman parte de la teoría de decisión. Una hipótesis estadística es un enunciado o afirmación, ya sea acerca de los parámetros de una distribución de probabilidad o de los parámetros de un modelo. Las hipótesis reflejan alguna conjetura acerca de la situación del problema [15, 22, 23].

En la práctica es necesaria la formulación de dos hipótesis estadísticas complementarias: La hipótesis nula H_0 y la hipótesis alternativa H_1 . La hipótesis nula se relaciona con una concepción parsimoniosa de la realidad. Corresponde al estado actual de conocimiento, por el cual, si no se hiciese el estudio, sería la que prevalecería. La hipótesis alternativa, por el contrario, se relaciona con el objetivo del estudio. Es la hipótesis que necesita la evidencia experimental y la recolección de evidencia para ser aceptada.

Para probar una hipótesis se proyecta un procedimiento de toma de una muestra aleatoria, calcular un estadístico de prueba apropiado para después rechazar o no estar en posición de rechazar la hipótesis nula H_0 . Parte de este procedimiento consiste en especificar el conjunto de valores del estadístico de prueba que llevan al rechazo de H_0 . A este conjunto de valores se le llama región crítica o región de rechazo de la prueba.

Pueden cometerse dos tipos de errores cuando se prueban hipótesis. Si la hipótesis nula se rechaza cuando es verdadera, ha ocurrido un error del tipo I. Si la hipótesis nula no se rechaza cuando es falsa, se ha cometido un error tipo II. Las probabilidades de estos errores se expresan con símbolos especiales:

$$\alpha = P(\text{Error tipo I}) = P(\text{Rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ es verdadera})$$

$$\beta = P(\text{Error tipo II}) = P(\text{Dejar de rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ es falsa})$$

El procedimiento general en la prueba de hipótesis es especificar un valor de la probabilidad α del error tipo I, llamado con frecuencia el nivel de significancia de la prueba, y después diseñar el procedimiento de prueba de tal modo que la probabilidad del error tipo II tenga un valor convenientemente pequeño.

2.6 Elección del tamaño de muestra

La elección de un tamaño de la muestra apropiado es uno de los aspectos más importantes de cualquier problema de diseño experimental. La elección del tamaño de la muestra y la probabilidad β del error tipo II guardan una estrecha relación. Si se supone que se están probando las hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

y que las medias no son iguales, por lo que $\mu_1 - \mu_2 = \delta$. Puesto que $H_0: \mu_1 = \mu_2$ no es verdadera, la preocupación principal es cometer la equivocación de no rechazar

H_0 . La probabilidad del error tipo II depende de la verdadera diferencia en las medias. El error β también es una función del tamaño de la muestra. En general, para un valor dado de δ , el error β se reduce cuando el tamaño de la muestra se incrementa. Es decir, es más fácil detectar una diferencia especificada en las medias para tamaños grandes de la muestra, que para los tamaños pequeños.

2.7 Intervalos de confianza

Aún cuando la prueba de hipótesis es un procedimiento útil, en ocasiones no cuenta la historia completa. Muchas veces es preferible proporcionar un intervalo dentro del cual cabría esperar que estuviera incluido el valor del parámetro o los parámetros en cuestión. A las declaraciones de estos intervalos se les llama intervalos de confianza. En muchos experimentos de ingeniería e industriales, el experimentador sabe de antemano que las medias μ_1 y μ_2 difieren; por consiguiente, la prueba de hipótesis $\mu_1 = \mu_2$ es de escaso interés. Por lo general el experimentador está más interesado en un intervalo de confianza para la diferencia de las medias $\mu_1 - \mu_2$.

Para definir un intervalo de confianza, se supondrá que θ es un parámetro desconocido. Para obtener una estimación del intervalo de θ , es necesario encontrar dos estadísticos L y U tales que la declaración de probabilidad:

$$P(L \leq \theta \leq U) = 1 - \alpha$$

sea verdadera. Al intervalo:

$$L \leq \theta \leq U$$

se le llama intervalo de confianza de $100(1-\alpha)$ por ciento para el parámetro θ . La interpretación de este intervalo es que si, en muestreos aleatorios repetidos, se construye un gran número de estos intervalos, $100(1-\alpha)$ por ciento de ellos contendrán el valor verdadero de θ . A los estadísticos L y U se les llama los límites de confianza inferior y superior, respectivamente, y a $1 - \alpha$ se le llama coeficiente de confianza. Si $\alpha = 0.05$, a la ecuación $L \leq \theta \leq U$ se le conoce como intervalo de confianza de 95 % para θ . Se observa que los intervalos de confianza tienen una interpretación de frecuencia; es decir, no se sabe si la declaración es verdadera para la muestra específica, pero sí se sabe que el método usado para generar el intervalo de confianza produce declaraciones correctas en $100(1-\alpha)$ por ciento de las veces.

2.8 Comparaciones múltiples de promedios

Si al hacer el análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula, esto significa que hay diferencias entre las medias de los niveles de los factores, pero no se especifica exactamente cuáles medias difieren. Son de mucha utilidad en esta situación las comparaciones y los análisis adicionales entre grupos de las medias de los niveles de los factores. Las comparaciones entre medias se hacen ya sea

en términos de los totales de los tratamientos o bien de los promedios de los tratamientos. Es común llamar a los procedimientos para hacer estas comparaciones como métodos de comparaciones múltiples.

Las comparaciones se efectúan tomando los niveles de cada factor individual y por cada una de las combinaciones de los factores; las combinaciones correspondientes a las interacciones de segundo, tercer, cuarto orden, etc. Las comparaciones múltiples de medias permiten examinar cuáles medias son diferentes y además estimar la proporción en que las medias son diferentes.

Existen diversos métodos para realizar las comparaciones múltiples, siendo los más empleados:

- El Método de Dunnett
- El Método de Bonferroni
- El Método de Duncan
- El Método de Tukey

Método de Tukey

De los métodos de comparaciones múltiples mencionados, el de Tukey se ilustra con facilidad; este método implica encontrar una diferencia significativa entre medias pareadas y permite la formación de intervalos de confianza de $100(1-\alpha)\%$ simultáneos para todas las comparaciones. El método se basa en la distribución del rango *studentizado*.

El método de Tukey emplea la siguiente ecuación para determinar el valor crítico de prueba T_α :

$$T_\alpha = Q_\alpha(p, f) \times \sqrt{\frac{MS_E}{2} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (2.2)$$

Donde:

Q: punto superior de α de la distribución del intervalo “studentizado” con parámetros de p y f.

α : nivel de significancia empleado en el análisis.

p : número de medias muestrales.

f : número de grados de libertad asociados con el cuadrado medio del error.

n_i, n_j : número de observaciones en el nivel “i” y “j”.

Con el cálculo de T_α se construye una serie de intervalos para $\mu_i - \mu_j$ de confianza de 100 (1- α) por ciento, para todos los pares de medias de la manera siguiente:

$$\bar{x}_i - \bar{x}_j - T_\alpha \leq \mu_i - \mu_j \leq \bar{x}_i - \bar{x}_j + T_\alpha$$

Como se mencionó, tanto los factores individuales como todas sus interacciones de segundo, tercer y cuarto orden, resultaron significativas en el análisis de varianza, se requirió hacer la prueba de comparaciones múltiples para determinar que medias son diferentes y con cuánto lo son.

2.9 Pruebas estadísticas adicionales

2.9.1 Prueba de normalidad

La verificación del supuesto de normalidad podría hacerse graficando un histograma de los residuales. Si se satisface el supuesto de NID ($0, \sigma^2$) para los errores, esta gráfica deberá aparecer como una muestra de una distribución normal con centro cero. Desafortunadamente, cuando se trabaja con muestras pequeñas suelen ocurrir fluctuaciones significativas, por lo que la aparición de una desviación moderada de la normalidad no implica necesariamente una violación seria de los supuestos. Las desviaciones marcadas de la normalidad son potencialmente serias y requieren análisis adicional.

Un procedimiento útil es construir una gráfica de probabilidad normal de los residuales. En el análisis de varianza, por lo tanto, es necesario hacer construir una gráfica de probabilidad normal con los residuales para verificar el supuesto de normalidad.

2.9.2 Análisis estadístico de varianza

Existen métodos estadísticos para analizar los datos, las respuestas de salida, a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivos y no de carácter apreciativo. Si el experimento se ha diseñado correctamente y si se ha llevado a cabo de acuerdo con el diseño, los métodos estadísticos necesarios no deben ser complicados. Los métodos gráficos simples desempeñan un papel importante en el análisis e interpretación de datos. Es muy útil presentar los resultados de los experimentos en términos de un modelo empírico matemático, es decir, mediante una ecuación derivada de los datos que expresa la relación entre la respuesta y los factores involucrados en el diseño. El análisis residual y la verificación de la adecuación del modelo son técnicas también muy importantes.

2.9.3 Estadístico de prueba P

Una manera de reportar los resultados de una prueba de hipótesis es estableciendo que la hipótesis nula fue rechazada o no para un valor de α o nivel de significancia específico. Sin embargo, esta enunciación de las conclusiones es con frecuencia inadecuada porque no ofrece idea alguna de si el valor calculado

del estadístico de prueba apenas rebasó la región de rechazo o si se adentró bastante en la misma. Además, al darse los resultados de esta manera, se les impone a otros usuarios de la información, el nivel de significancia predefinido.

Para evitar estas dificultades, en la práctica se ha adoptado extensivamente el enfoque del valor P. El valor P es la probabilidad de que el estadístico de prueba asuma un valor que sea al menos tan extremo como el observado del estadístico cuando la hipótesis nula H_0 es verdadera. Por lo tanto, un valor P transmite mucha información acerca del peso de la evidencia en contra de H_0 y, por consiguiente, se puede llegar a una conclusión con cualquier nivel de significancia especificado. En términos más formales, el valor P se define como el nivel de significancia menor que llevaría a rechazar la hipótesis nula H_0 .

El estadístico de prueba, y los datos, es significativo cuando se rechaza la hipótesis nula; por lo tanto, el valor P puede considerarse como el menor nivel α en el que los datos son significativos. Una vez que se conoce el valor de P se puede determinar la medida en que los datos son significativos sin que se imponga formalmente un nivel de significancia preseleccionado.

2.10 Programas de análisis estadístico

Existen muchos paquetes de software de estadística que cuentan con la capacidad para probar hipótesis estadísticas.

Los softwares permiten un ambiente de análisis de datos muy completo. En general, los archivos de los softwares estadísticos contienen los datos en una o múltiples hojas de trabajo, muy parecida a una hoja de cálculo de excell; contienen ventanas de sesiones donde se despliegan los resultados, gráficas de alta resolución, permiten observar el historial de los comandos empleados en una sesión, entre otras muchas otras tareas que los softwares estadísticos son capaces de ejecutar.

2.11 Aspectos globales de las técnicas estadísticas

Gran parte de la investigación en la ingeniería, las ciencias y la industria es empírica y hace uso extensivo de la experimentación. Los métodos estadísticos pueden incrementar en gran medida la eficiencia de estos experimentos y con frecuencia pueden fortalecer las conclusiones así obtenidas. El uso correcto de las técnicas estadísticas en la experimentación requiere que el experimentador tenga presentes los puntos siguientes:

1. Uso de conocimientos no estadísticos del problema. Los experimentadores suelen poseer amplios conocimientos de sus respectivos campos. En algunos campos existe un cuerpo enorme de teoría física en el cual indagar para explicar las relaciones entre los factores y las respuestas. Este tipo de conocimientos no estadísticos es invaluable para elegir los factores, determinar los niveles de los factores, decidir cuantas réplicas

correr, interpretar los resultados del análisis, etc. El uso de la estadística no es sustituto de la reflexión sobre el problema.

2. Mantener el diseño y el análisis tan simple como sea posible. Es necesario no exagerar en el uso de técnicas estadísticas complejas y sofisticadas. Los métodos de diseño y análisis relativamente simples son siempre los mejores.
3. Tener presente la diferencia entre significación práctica y significación estadística. Debido justamente a que dos condiciones experimentales producen respuestas medias que son estadísticamente diferentes, no existe ninguna seguridad de que esta diferencia sea de la magnitud suficiente como para tener algún valor práctico. Esto es, tal vez alguna característica que se esté midiendo puede ser estadísticamente significativa, pero también darse el caso que no sea factible desde el punto de vista de costos y podría ser no conveniente o no factible y que no posea algún valor práctico.

Los experimentos son generalmente iterativos. En la mayoría de las situaciones no es conveniente diseñar un experimento demasiado comprensivo al principio de un estudio. Un diseño exitoso requiere conocer los factores importantes, los rangos en los que los factores se harán variar, el número apropiado de niveles para cada factor y los métodos y las unidades de medición adecuados para cada factor y respuesta. En general, ningún experimentador está en posición de responder estas cuestiones al principio del experimento, sino que las respuestas aparecen sobre la marcha. Esto habla a favor del enfoque iterativo. Como regla general, la mayoría de los experimentos deberán ser iterativos. Por consiguiente, no deberá invertirse más del 25 % de los recursos para la experimentación inicial; corridas, presupuesto, tiempo, etc. Con frecuencia estos esfuerzos iniciales constituyen sólo experiencias de aprendizaje, y es necesario contar con recursos suficientes para alcanzar los objetivos finales del experimento.

3 Proceso de experimentación

3.1 Etapas del proceso experimental

3.1.1 Identificación del problema

A niveles parciales de llenado en un tonel o contenedor empleado para el transporte de refinados del petróleo, existe una superficie libre que permite la formación de oleaje por la aceleración y desaceleración propia del vehículo. Por lo tanto, se requiere una evaluación experimental para determinar el comportamiento y la magnitud de la fuerza del oleaje del fluido.

Por las dificultades técnicas y la disponibilidad de un autotanque para experimentar a escala real, se hace uso de un contenedor a escala reducida que pueda ser utilizado a nivel de laboratorio. La escala geométrica del tanque es 1:10; esto es, el contenedor es 10 veces menor en las dimensiones reales de un tonel de escala real.

3.1.2 Factores y elección de niveles

Considerando el oleaje debido al movimiento en la dirección longitudinal y por los aspectos relacionados al diseño y operación del contenedor, se identifican cuatro factores de experimentación. Dos de los factores se relacionan con la operación del tonel, que son la velocidad de prueba y el nivel de llenado; los dos factores restantes se relacionan con los mecanismos de atenuación del oleaje como son el tipo y el número de rompeolas.

Los niveles que se asociaron a cada factor se seleccionaron bajo las mismas condiciones de operación de los autotanques y las capacidades de los equipos e instrumentos de medición y control, disponibles en un laboratorio de vibraciones mecánicas donde se realizan actividades de investigación concernientes al sector transporte. El tipo de investigación que desarrolla el laboratorio en mención, se relaciona con estudios de vehículos para el transporte de carga pesada. En su contexto, se analizan las condiciones físicas y mecánicas, de tal forma que se busca mejorar los niveles de manejabilidad, seguridad y confort en vehículos de este tipo.

Para un autotanque en particular, la manejabilidad es una característica muy importante, porque representa los intervalos de control del vehículo durante maniobras en carretera, como aceleraciones o desaceleraciones en cambios de carril o al circular en curvas. La carga líquida transportada hace más complicadas estas maniobras respecto de los vehículos de carga sólida.

Un autotanque típico para el transporte de combustibles líquidos tiene una capacidad volumétrica de 20 mil litros, con tanque de sección transversal elíptica y con cinco rompeolas uniformemente distribuidos a lo largo del tanque. Por

requerimientos del combustible líquido transportado, el volumen de llenado es de aproximadamente el 94% del volumen total del tonel.

3.1.2.1 Número de rompeolas

Con el propósito de cuantificar el efecto del número de rompeolas en la generación y atenuación de la fuerza de oleaje longitudinal, se consideraron inicialmente los niveles de 0, 1, 2 y 3 rompeolas. Complementariamente, se incluyó un nivel adicional de 5 rompeolas, que corresponde al número de rompeolas utilizado en la práctica, figura 3.1.

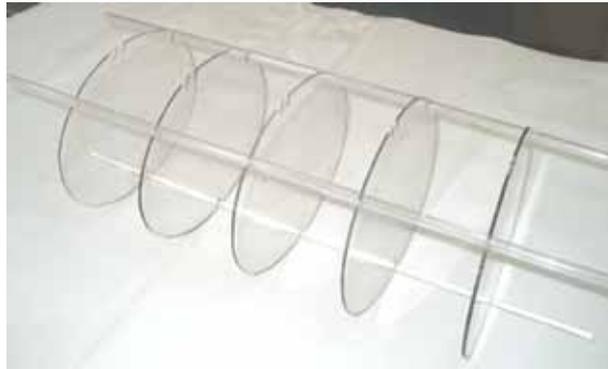


Figura 3.1

Sistema empleado para la experimentación con 0, 1, 2, 3 y 5 rompeolas en el tanque a escala.

De acuerdo con lo anterior, el intervalo de valores para el número de rompeolas cubre desde la ausencia de los mismos hasta el de los rompeolas empleados actualmente en autotanques. Por razones de la planeación inicial del proyecto, no se considera el uso de cuatro rompeolas. Sin embargo, se manejó que en caso de requerirse, el efecto del empleo de cuatro rompeolas pudiera estimarse a partir de los resultados del uso de los niveles propuestos.

3.1.2.2 Tipo de rompeolas

En la búsqueda de una estabilidad óptima deseable del autotanque y por la necesidad de disminuir el peso total del tanque e indirectamente promover la reducción de la altura del centro de gravedad del vehículo, se propuso evaluar dos propuestas de geometrías de rompeolas alternativos. Básicamente, dichas geometrías se derivan de la del rompeolas original (denominado tipo “r”), suprimiendo diversas porciones en la parte inferior del cuerpo, considerando que el movimiento del fluido en el oleaje se da de manera principal en la parte superior del volumen, [5, 6, 7, 8].

Las propuestas, definidas como rompeolas tipo “ r_a ” y rompeolas tipo “ r_b ”, figura 3.2, toman como referencia el diámetro menor de la elipse del rompeolas (altura del rompeolas). Con el “ r_a ” se elimina aproximadamente 50 % del material con el que se fabrica el rompeolas original, mientras que con el “ r_b ” se elimina aproximadamente el 75 %. Por tanto, el efecto de estos rompeolas alternativos es

en la parte superior del tonel. Con esta información, los niveles del factor tipo de rompeolas son tres, el nivel 1 corresponde al uso de rompeolas del tipo “r”, el nivel 2 para el rompeolas del tipo “r_a” y el nivel 3 es el rompeolas del tipo “r_b”.

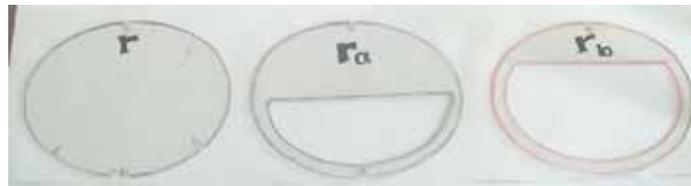


Figura 3.2
Tipos de rompeolas a considerar en el experimento.

3.1.2.3 Nivel de llenado

Partiendo del hecho que en el transporte de ciertos materiales líquidos peligrosos se transporta alrededor del 94 % del volumen disponible como volumen máximo de llenado, se establecieron tres diferentes niveles de llenado en el tonel a escala.

Los niveles para el factor nivel de llenado son: $N_1=50\%$, $N_2=75\%$ y $N_3=94\%$, que corresponden para el tonel a escala a volúmenes de 9,83 L, 14,75 L y 18,5 L, respectivamente. La capacidad total del tonel a escala es de 19,65 L, figura 3.3.



Figura 3.3
Verificación de los niveles reales de llenado del tanque a escala.

3.1.2.4 Velocidad

El movimiento del tonel es el factor de generación del oleaje. Conforme a las capacidades del equipo de accionamiento, de los instrumentos de medición y del espacio en laboratorio disponible para la ejecución de las pruebas, las velocidades nominales de prueba se establecieron en 0,1 m/s, 0,5 m/s y 1 m/s. Estas velocidades son representativas para efectos de la prueba en la obtención de una buena aproximación del efecto en la formación y atenuación del oleaje dentro del tonel a escala reducida.

Debido a las dificultades para obtener una velocidad estrictamente constante durante la ejecución de pruebas, se consideró aceptar valores con variaciones de $\pm 5\%$ de la velocidad generada. De esta manera, se especificaron los factores de estudio del oleaje en un prototipo de tonel en laboratorio, al igual que los niveles correspondientes a cada factor.

En la Tabla 3.1 se listan los factores con sus respectivos niveles.

Tabla 3.1
Factores de estudio y sus respectivos niveles.

Símbolo	Factor o variable	Niveles	Valores
Indicado por su valor (0, 1, 2, 3, 5)	Número de rompeolas	1	0
		2	1
		3	2
		4	3
		5	5
r	Tipo de rompeolas	1	R
		2	Ra
		3	Rb
N	Nivel de llenado	1	N1=50 %
		2	N2=75 %
		3	N3=94 %
v	Velocidad	1	v1=0,1 m/s
		2	v2=0,5 m/s
		3	v3=1,0 m/s

3.1.3 Respuesta de salida

La respuesta de salida en el proceso de experimentación es la fuerza de oleaje que el líquido ejerce sobre las paredes del tanque en su interior. La obtención de los valores de la fuerza de oleaje se llevó a cabo mediante el uso de equipos e instrumentos de medición disponibles en el laboratorio de vibraciones, con el empleo básico de dos transductores de fuerza.

Básicamente, los transductores de fuerza son dispositivos electrónicos que al ser sujetos a fuerzas de tensión y compresión producen un voltaje eléctrico proporcional a la magnitud de la fuerza. El factor de proporcionalidad se conoce como sensibilidad, que representa la relación de proporción entre los cambios de voltaje con los cambios en fuerza correspondientes, expresado como unidades de voltaje [V] entre unidades de fuerza, en este caso, Newtons [N].

3.2 Tipo de diseño experimental

Cabe recordar que el autotanque real de 20 m^3 de capacidad emplea 5 rompeolas distribuidos a lo largo del tanque. No se tiene una base sustentable respecto a que el empleo de cinco rompeolas completos, tipificados en este proyecto como “r”, es la manera más efectiva de reducir el oleaje en un vehículo de este tipo. Debido a esto, la opción más razonable en cuanto al tipo de diseño experimental a emplear es el tipo multifactorial completo; es decir, un diseño factorial completo con cuatro factores.

El término completo se refiere a que este tipo de diseño considera las pruebas de todas las combinaciones posibles de los niveles de los cuatro factores, garantizando así que se obtendrán características que permitan la mejor respuesta de salida para los cuatro factores y sus respectivos niveles en mención. Esto implicaría que, ya sea uno o más factores individuales tienen influencia significativa en la respuesta de salida, o cualquiera de las combinaciones de dos, de tres o de los cuatro factores. La afirmación para cualquiera de estos casos solo se puede obtener del análisis de varianza de los datos de los resultados de las pruebas.

La figura 3.4 es una representación geométrica de todas las pruebas a realizar en el experimento, donde cada nodo es una prueba a ejecutar, siendo $(5) \times (3^3) = 135$ pruebas de repetición única. La figura representa los cuatro factores con sus respectivos niveles en todas sus combinaciones posibles y forman tres cuerpos hexaédricos; los cuatro factores involucrados en el estudio se representan con las letras A, B, C, y D, respectivamente número de rompeolas, tipo de rompeolas, nivel de llenado y velocidad de prueba.

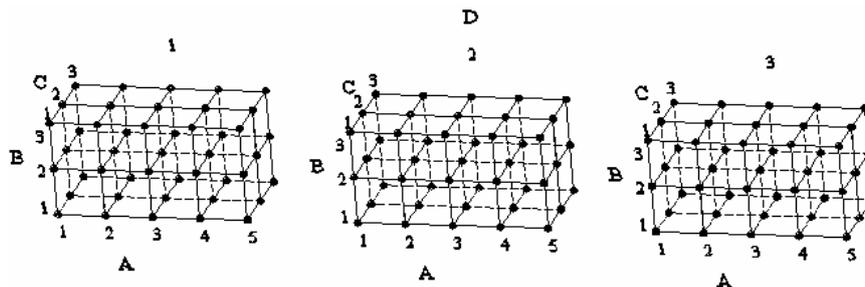


Figura 3.4
Representación geométrica de las pruebas o corridas a realizar,
correspondientes al experimento de factorial completo de cuatro factores.

La representación en la figura anterior contempla solamente una réplica por cada combinación de niveles de los cuatro factores. Considerando una secuencia definida no aleatoria, en la tabla 3.2 se observa, de manera alterna a la figura 3.3, el orden en que se ejecutarían las pruebas para réplica única. En la tabla, las letras A, B, C y D se refieren a los factores, mientras que la letra P indica el número de prueba a realizar. El número en cada columna de los factores indica el nivel correspondiente en el que la prueba se va a realizar, según la tabla 3.1.

Tabla 3.2
Corridas de pruebas sin aleatorizar para el diseño experimental de los cuatro factores en cuestión, caso de réplica única.

P	A	B	C	D	P	A	B	C	D	P	A	B	C	D	P	A	B	C	D	P	A	B	C	D
1	1	1	1	1	28	3	3	2	1	55	5	2	1	2	82	2	2	3	2	109	4	1	2	3
2	2	1	1	1	29	4	3	2	1	56	1	3	1	2	83	3	2	3	2	110	5	1	2	3
3	3	1	1	1	30	5	3	2	1	57	2	3	1	2	84	4	2	3	2	111	1	2	2	3
4	4	1	1	1	31	1	1	3	1	58	3	3	1	2	85	5	2	3	2	112	2	2	2	3
5	5	1	1	1	32	2	1	3	1	59	4	3	1	2	86	1	3	3	2	113	3	2	2	3
6	1	2	1	1	33	3	1	3	1	60	5	3	1	2	87	2	3	3	2	114	4	2	2	3
7	2	2	1	1	34	4	1	3	1	61	1	1	2	2	88	3	3	3	2	115	5	2	2	3
8	3	2	1	1	35	5	1	3	1	62	2	1	2	2	89	4	3	3	2	116	1	3	2	3
9	4	2	1	1	36	1	2	3	1	63	3	1	2	2	90	5	3	3	2	117	2	3	2	3
10	5	2	1	1	37	2	2	3	1	64	4	1	2	2	91	1	1	1	3	118	3	3	2	3
11	1	3	1	1	38	3	2	3	1	65	5	1	2	2	92	2	1	1	3	119	4	3	2	3
12	2	3	1	1	39	4	2	3	1	66	1	2	2	2	93	3	1	1	3	120	5	3	2	3
13	3	3	1	1	40	5	2	3	1	67	2	2	2	2	94	4	1	1	3	121	1	1	3	3
14	4	3	1	1	41	1	3	3	1	68	3	2	2	2	95	5	1	1	3	122	2	1	3	3
15	5	3	1	1	42	2	3	3	1	69	4	2	2	2	96	1	2	1	3	123	3	1	3	3
16	1	1	2	1	43	3	3	3	1	70	5	2	2	2	97	2	2	1	3	124	4	1	3	3
17	2	1	2	1	44	4	3	3	1	71	1	3	2	2	98	3	2	1	3	125	5	1	3	3
18	3	1	2	1	45	5	3	3	1	72	2	3	2	2	99	4	2	1	3	126	1	2	3	3
19	4	1	2	1	46	1	1	1	2	73	3	3	2	2	100	5	2	1	3	127	2	2	3	3
20	5	1	2	1	47	2	1	1	2	74	4	3	2	2	101	1	3	1	3	128	3	2	3	3
21	1	2	2	1	48	3	1	1	2	75	5	3	2	2	102	2	3	1	3	129	4	2	3	3
22	2	2	2	1	49	4	1	1	2	76	1	1	3	2	103	3	3	1	3	130	5	2	3	3
23	3	2	2	1	50	5	1	1	2	77	2	1	3	2	104	4	3	1	3	131	1	3	3	3
24	4	2	2	1	51	1	2	1	2	78	3	1	3	2	105	5	3	1	3	132	2	3	3	3
25	5	2	2	1	52	2	2	1	2	79	4	1	3	2	106	1	1	2	3	133	3	3	3	3
26	1	3	2	1	53	3	2	1	2	80	5	1	3	2	107	2	1	2	3	134	4	3	3	3
27	2	3	2	1	54	4	2	1	2	81	1	2	3	2	108	3	1	2	3	135	5	3	3	3

Por razones de financiamiento del proyecto, de disponibilidad de materiales y de fabricación, sólo fue posible contar con un tanque a escala reducida. Por lo tanto, como es necesario ejecutar todas las pruebas con el único tanque disponible, el término réplica no aplica para efectos del presente estudio. De esta manera, el tamaño de la muestra por cada prueba se estableció en tres repeticiones, dando lugar a un total de 405 pruebas a ejecutar. El orden de ejecución práctica de estas 405 pruebas se establecería aleatoriamente.

3.2.1 Modelo lineal estadístico asociado

Con frecuencia los resultados de un experimento se describen con un modelo matemático. El modelo lineal estadístico asociado a este proceso es:

$$y_{ijklm} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \chi_k + \delta_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\chi)_{ik} + (\alpha\delta)_{il} + (\beta\chi)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\chi\delta)_{kl} + (\alpha\beta\chi)_{ijk} + (\alpha\beta\delta)_{ijl} + (\alpha\chi\delta)_{ikl} + (\beta\chi\delta)_{jkl} + (\alpha\beta\chi\delta)_{ijkl} + \varepsilon_{ijklm} \quad (3.1)$$

Donde:

- i = 1, ..., a
- j = 1, ..., b
- k = 1, ..., c

$l = 1, \dots, d$

$m = 1, \dots, n$ (n = número de repeticiones).

y_{ijklm} = m -ésima observación tomada bajo los i -ésimo, j -ésimo, k -ésimo y l -ésimo tratamientos.

μ = parámetro común a todos los tratamientos llamado media global.

α_i = efecto del i -ésimo nivel del factor llamado número de rompeolas.

β_j = efecto del j -ésimo nivel del factor llamado tipo de rompeolas.

χ_k = efecto del k -ésimo nivel del factor llamado nivel de llenado.

δ_l = efecto del l -ésimo nivel del factor llamado velocidad de prueba.

$\alpha\beta_{ij}$ = efecto de la interacción doble entre α y β , cuando α está en el i -ésimo nivel y β está en el j -ésimo nivel. (Esta explicación aplica para el resto de las interacciones dobles con el resto de los factores).

$\alpha\beta\chi_{ijk}$ = efecto de la interacción triple entre α , β y χ cuando α está en el i -ésimo nivel, β está en el j -ésimo nivel y χ está en el k -ésimo nivel. (Esta explicación aplica para el resto de las interacciones triples con el resto de los factores).

$\alpha\beta\chi\delta_{ijkl}$ = efecto de la interacción cuádruple entre α , β , χ y δ cuando α está en el i -ésimo nivel, β está en el j -ésimo nivel, χ está en el k -ésimo nivel y δ está en el l -ésimo nivel.

ε_{ijklm} = componente aleatoria del error.

$N = (a) \times (b) \times (c) \times (d) \times (n)$, total de observaciones.

El error aleatorio incorpora todas las fuentes de variabilidad del experimento, incluyendo las mediciones, la variabilidad que surge de factores no controlados, las diferencias entre las unidades experimentales, materiales de prueba, a las que se aplican los tratamientos y el ruido de fondo general en el proceso (ya sean la variabilidad con el tiempo, los efectos de variables ambientales, etc.). Es conveniente considerar que los errores tienen media cero, de tal modo que $E(y_{ijkl}) = \mu$.

A la ec. 3.1 se le llama por lo general modelo de los efectos. En este caso, es un modelo estadístico lineal en el que la variable de respuesta, y_{ijklm} , es una función lineal de los parámetros del modelo. Tiene cierto atractivo intuitivo por cuanto μ es una constante y los efectos de los tratamientos (α , β , χ y δ) representan desviaciones de esta constante cuando se aplican los tratamientos específicos. Los objetivos serán probar las hipótesis apropiadas acerca de las medias de los tratamientos y estimarlas.

Para probar las hipótesis se supone que los errores del modelo son variables aleatorias que siguen una distribución normal e independiente con media cero y varianza σ^2 . Se supone asimismo que la varianza σ^2 es constante para todos los niveles de cada factor. Esto implica que las observaciones son mutuamente dependientes, cumpliendo con lo siguiente:

$$y_{ij} \sim N \left\{ \begin{bmatrix} \mu + \alpha_i + \beta_j + \chi_k + \delta_l + \\ (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\chi)_{ik} + (\alpha\delta)_{il} + (\beta\chi)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\chi\delta)_{kl} + \\ (\alpha\beta\chi)_{ijk} + (\alpha\beta\delta)_{ijl} + (\alpha\chi\delta)_{ikl} + (\beta\chi\delta)_{jkl} + (\alpha\beta\chi\delta)_{ijkl} \end{bmatrix}, \sigma^2 \right\} \quad (3.2)$$

El modelo estadístico (ec. 3.1) describe dos situaciones diferentes con respecto a los efectos de los tratamientos. Por un lado, los α , β , χ y δ tratamientos pudieron ser elegidos expresamente por el experimentador. En esta situación quieren probarse hipótesis acerca de las medias de los tratamientos, y las conclusiones se aplicarán únicamente a los niveles de los factores contemplados en el análisis. Las conclusiones no pueden extenderse a tratamientos similares que no fueron considerados explícitamente.

Por otro lado, también se podría querer estimar los parámetros del modelo (μ , α , β , χ , δ , σ^2), siendo el caso denominado modelo con efectos fijos. De manera alternativa los α , β , χ y δ tratamientos podrían ser una muestra aleatoria de una población más grande de tratamientos. En esta situación sería deseable poder extender las conclusiones (las cuales se basan en las muestras de los tratamientos) a la totalidad de los tratamientos de la población, sea que se hayan incluido explícitamente en el análisis o no. Aquí las α_i , β_j , χ_k , δ_l son variables aleatorias, y el conocimiento de las α_i , β_j , χ_k , δ_l particulares que se investigaron es relativamente útil. Más bien, se prueban hipótesis acerca de la variabilidad de las α_i , β_j , χ_k , δ_l y se intenta estimar su variabilidad. A éste se le llama modelo con efectos aleatorios o modelo de los componentes de varianza.

3.2.2 Hipótesis

A continuación se presentan las hipótesis que se plantean para el experimento, en donde se evaluarán los efectos de los cuatro factores que se involucraron en la experimentación mediante el análisis estadístico de varianza. Específicamente, el interés se encuentra en probar las hipótesis acerca de la igualdad de los efectos de los tratamientos o niveles de los factores. Las hipótesis son las siguientes:

$$H_{0 [1]}: \alpha_1, \dots, \alpha_a = 0$$

$$H_{1 [1]}: \text{al menos una } \alpha_i \neq 0$$

$$H_{0 [2]}: \beta_1, \dots, \beta_b = 0$$

$$H_{1 [2]}: \text{al menos una } \beta_j \neq 0$$

- $H_{0 [3]}: \chi_1, \dots, \chi_c = 0$
 $H_{1 [3]}: \text{al menos una } \chi_k \neq 0$
 $H_{0 [4]}: \delta_1, \dots, \delta_d = 0$
 $H_{1 [4]}: \text{al menos una } \delta_l \neq 0$
 $H_{0 [5]}: (\alpha\beta)_{ij} = 0 \text{ para todas las } i, j$
 $H_{1 [5]}: \text{al menos una } (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$
 $H_{0 [6]}: (\alpha\chi)_{ik} = 0 \text{ para todas las } i, k$
 $H_{1 [6]}: \text{al menos una } (\alpha\chi)_{ik} \neq 0$
 $H_{0 [7]}: (\alpha\delta)_{il} = 0 \text{ para todas las } i, l$
 $H_{1 [7]}: \text{al menos una } (\alpha\delta)_{il} \neq 0$
 $H_{0 [8]}: (\beta\chi)_{jk} = 0 \text{ para todas las } j, k$
 $H_{1 [8]}: \text{al menos una } (\beta\chi)_{jk} \neq 0$
 $H_{0 [9]}: (\beta\delta)_{jl} = 0 \text{ para todas las } j, l$
 $H_{1 [9]}: \text{al menos una } (\beta\delta)_{jl} \neq 0$
 $H_{0 [10]}: (\chi\delta)_{kl} = 0 \text{ para todas las } k, l$
 $H_{1 [10]}: \text{al menos una } (\chi\delta)_{kl} \neq 0$
 $H_{0 [11]}: (\alpha\beta\chi)_{ijk} = 0 \text{ para todas las } i, j, k$
 $H_{1 [11]}: \text{al menos una } (\alpha\beta\chi)_{ijk} \neq 0$
 $H_{0 [12]}: (\alpha\beta\delta)_{ijl} = 0 \text{ para todas las } i, j, l$
 $H_{1 [12]}: \text{al menos una } (\alpha\beta\delta)_{ijl} \neq 0$
 $H_{0 [13]}: (\alpha\chi\delta)_{ikl} = 0 \text{ para todas las } i, k, l$
 $H_{1 [13]}: \text{al menos una } (\alpha\chi\delta)_{ikl} \neq 0$
 $H_{0 [14]}: (\beta\chi\delta)_{jkl} = 0 \text{ para todas las } j, k, l$
 $H_{1 [14]}: \text{al menos una } (\beta\chi\delta)_{jkl} \neq 0$
 $H_{0 [15]}: (\alpha\beta\chi\delta)_{ijkl} = 0 \text{ para todas las } i, j, k, l$
 $H_{1 [15]}: \text{al menos una } (\alpha\beta\chi\delta)_{ijkl} \neq 0$

3.2.3 Análisis estadístico de varianza

La tabla 3.3 presenta las ecuaciones requeridas para calcular el estadístico F y su respectivo valor de probabilidad P.

Tabla 3.3
Ecuaciones requeridas para el análisis de varianza.

Tratamiento	SC	GDL	CM	F	P
A	SC_A	$(a-1)$	$CM_A = \frac{SC_A}{a-1}$	$\frac{CM_A}{CM_E}$	P_A
B	SC_B	$(b-1)$	$CM_B = \frac{SC_B}{b-1}$	$\frac{CM_B}{CM_E}$	P_B
C	SC_C	$(c-1)$	$CM_C = \frac{SC_C}{c-1}$	$\frac{CM_C}{CM_E}$	P_C
D	SC_D	$(d-1)$	$CM_D = \frac{SC_D}{d-1}$	$\frac{CM_D}{CM_E}$	P_D
AB	SC_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$CM_{AB} = \frac{SC_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{CM_{AB}}{CM_E}$	P_{AB}
↓	↓	↓	↓	↓	↓
CD	SC_{CD}	$(c-1)(d-1)$	$CM_{CD} = \frac{SC_{CD}}{(c-1)(d-1)}$	$\frac{CM_{CD}}{CM_E}$	P_{CD}
ABC	SC_{ABC}	$(a-1)(b-1)(c-1)$	$CM_{ABC} = \frac{SC_{ABC}}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	$\frac{CM_{ABC}}{CM_E}$	P_{ABC}
↓	↓	↓	↓	↓	↓
BCD	SC_{BCD}	$(b-1)(c-1)(d-1)$	$CM_{BCD} = \frac{SC_{BCD}}{(b-1)(c-1)(d-1)}$	$\frac{CM_{BCD}}{CM_E}$	P_{BCD}
ABCD	SC_{ABCD}	$(a-1)(b-1)(c-1)(d-1)$	$CM_{ABCD} = \frac{SC_{ABCD}}{(a-1)(b-1)(c-1)(d-1)}$	$\frac{CM_{ABCD}}{CM_E}$	P_{ABCD}
Error	SC_{error}	$abcd(n-1)$	$CM_E = \frac{SC_{error}}{abcd(n-1)}$		
Total	SC_{Total}	$abcdn-1$			

En la tabla 3.3, SC corresponde a la Suma de cuadrados, GDL son los grados de libertad para el tratamiento en cuestión, CM es la media de la suma de cuadrados, F es el estadístico de prueba y P es la probabilidad correspondiente al valor dado de F.

El cálculo de P puede realizarse como la probabilidad de una variable aleatoria siguiendo una distribución F. No siempre es fácil calcular el valor exacto de P de una prueba. Sin embargo, la mayoría de los programas computacionales de análisis estadísticos reportan valores P. Para estimar el valor de P para el respectivo tratamiento de la tabla 3.3, se requiere conocer el valor de F, los grados de libertad del tratamiento en cuestión y los grados de libertad del error.

El criterio de aceptación o rechazo de las hipótesis para los efectos de los tratamientos de la tabla 3.3, es el siguiente:

Por medio del estadístico F, H_0 se acepta si:

$$F_a; GDL_1, GDL_{error} > F$$

Donde:

$F_{a; GDL1, GDL\ error}$: estadístico F obtenido por medio del nivel de significancia con el que efectuó el análisis de varianza de los datos, con los grados de libertad del tratamiento 1 y los grados de libertad del error estadístico asociado.

F: valor estadístico obtenido de la tabla 3.3

H_0 se rechaza si:

$$F_{a; GDL\ 1, GDL\ error} < F$$

Por medio del valor de probabilidad P, H_0 se acepta si:

$$a < P$$

Donde:

A: nivel de significancia establecido para el análisis de varianza de los datos.

P: probabilidad asociada al estadístico F y obtenido de la tabla 3.3.

H_0 se rechaza si:

$$a > P$$

3.2.4 Programa estadístico de computadora

Los programas computacionales para el análisis estadístico de los datos son una herramienta muy importante cuando se dispone de una gran cantidad de datos y se quiere obtener resultados a la brevedad posible. Sólo es necesario introducir las respuestas de salida de un proceso experimental o de un grupo de datos e indicar las instrucciones correspondientes al software, para que entonces el programa realice los cálculos correspondientes al análisis estadístico en cuestión.

Uno de estos programas es el software estadístico Minitab, [23]. Este programa es capaz de realizar análisis de varianza, determinar el tipo de distribución que presenta un conjunto de datos, análisis de covarianza, pruebas de normalidad, análisis de regresión, gráficos, etc.

3.3 Tonel de escala reducida

3.3.1 Descripción del tonel de prueba

Por la dificultad de disponer de un tonel a escala real (1:1), para la evaluación de la generación y atenuación de la fuerza de oleaje, se dispuso de un modelo de tanque elíptico a escala reducida. La referencia geométrica del tonel a escala es el tanque de 20 m³ de capacidad que emplean la mayoría de las compañías dedicadas al transporte de productos refinados del petróleo, como diesel y gasolinas. Este tonel se monta sobre el chasis de un camión unitario de tres ejes,

tipificado como C3. La escala geométrica del modelo es de una décima parte del tonel elíptico real, debido a limitantes en la capacidad de instrumentos de medición. La capacidad del tonel a escala reducida es de 19,65 litros, preparado para ubicar distintas configuraciones en número y forma de atenuadores de oleaje (rompeolas) longitudinal.

Básicamente, el tonel de prueba consta de dos partes: propiamente el tonel de acrílico y la base metálica de soporte. La base de soporte es el acople de dos estructuras metálicas, figura 3.4. Dentro de la estructura de la base metálica 1 se introduce el tanque elíptico. La base metálica 2, que soporta a la base metálica 1 con el tonel en su interior, permite el movimiento de traslación del tonel a lo largo de la trayectoria definida por dos rieles paralelos. La función de la base metálica es mantener en posición estable al tonel cuando éste se hace mover sobre rieles horizontales fijos al piso. Ayuda también a proteger el tonel y a soportar los impactos durante las pruebas.

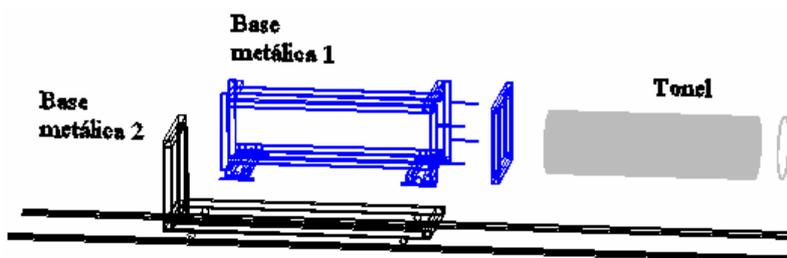


Figura 3.5
Conjunto tonel y base metálica.

El tonel y los rompeolas se fabricaron de material de acrílico transparente de 3 mm de espesor. El tanque es de sección transversal elíptica, con diámetro menor de 18cm, mayor de 24 cm y longitud de 60 cm. El tonel cuenta con dos tapas en sus extremos, también de acrílico; una fija al cuerpo del tanque y perfectamente sellada y la otra removible para facilitar la introducción de elementos al tonel, como los rompeolas de prueba. El vaciado y llenado se realiza por medio de dos orificios ubicados en el cuerpo del tonel y cercanos al extremo donde se encuentra la tapa removible; el orificio de llenado se sitúa en la parte superior y el de vaciado en la parte inferior.

Al igual que el tonel, los rompeolas de prueba se fabricaron de acrílico. Como ya se mencionó, los tipo "r" fueron elípticos, similares a los que comúnmente emplean los autotanques que transportan gasolinas o diesel; los del tipo "r_a" representaban aproximadamente el 50% del área expuesta por los primeros, mientras que los del tipo "r_b" tan sólo el 25 %. Por la geometría que se propone de los rompeolas tipo "r_a" y "r_b" estos forman compartimentos que se comunican entre si. Los dos últimos tipos de rompeolas son propuestas de mejora en el empleo de este sistema de atenuación del oleaje, siendo parte de un proceso de investigación en el que se

busca modificar la geometría y reducir el empleo de material para la fabricación de los rompeolas que actualmente emplean los autotanques.

3.3.2 Estructura de soporte

En los autotanques tipo C3, el tanque se ubica en la parte posterior del vehículo y su peso es soportado por medio del chasis y demás elementos mecánicos que le proporcionan la fijación, de tal manera que el tonel es parte del cuerpo del vehículo. La situación para el modelo a escala fue similar. En el modelo de prueba se emplearon perfiles tubulares cuadrados y PTR para permitir que el modelo tenga una base que lo soporte y permanezca siempre en una posición estable. Además, permite al tanque desplazarse longitudinalmente sobre dos rieles colocados sobre una superficie plana, correspondiente al piso del laboratorio. El conjunto resultante permite una aproximación real en la reproducción del efecto de empuje horizontal que se produce entre el líquido y las paredes del tonel. Esta característica es suficiente en la evaluación del efecto de la fuerza de oleaje longitudinal en el interior del contenedor.

3.3.3 Ensamble general y operación

El conjunto tonel de acrílico y base metálica se acopla como se muestra en la figura 3.5. La estructura metálica 1 cuenta en su base con cuatro pequeñas ruedas que se apoyan sobre pequeños rieles fijos a la estructura metálica 2. Los pequeños rieles obligan únicamente a que, en caso, de presentarse, la estructura 1 sólo tenga movimiento longitudinal respecto a la estructura 2.

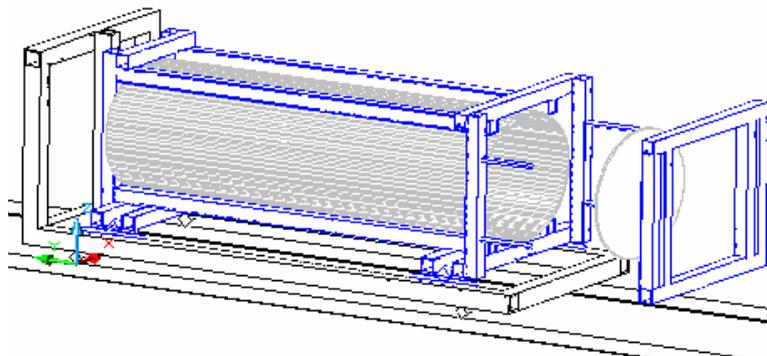


Figura 3.6
Conjunto tonel de acrílico y base metálica.

La base metálica que contiene al tonel se fija a la base metálica 2 por medio de los transductores de fuerza, cumpliendo la doble función de acopladores de las dos bases y de medición de la fuerza transmitida. Todos los elementos del tonel fueron fabricados en el taller de máquinas-herramienta del IMT. La Figura 3.6 muestra una vista general del tonel y sus accesorios.



Figura 3.7
Conjunto tonel de acrílico y base metálica.

3.3.4 Descripción de ejecución de pruebas

Básicamente, la ejecución de la prueba consiste en proporcionarle movimiento al tanque, desplazarlo a lo largo de una trayectoria recta sobre un plano horizontal y detenerlo repentinamente. La evaluación de la formación y atenuación del oleaje se efectúa precisamente después del paro repentino del tonel.

A continuación se describe a detalle la prueba:

1. Se colocan los rompeolas en el tonel. Gracias a la planeación del orden de ejecución de las pruebas, en este punto se tiene conocimiento del tipo de combinación entre los niveles de los factores que corresponde a la prueba a ejecutar. La combinación se aplica de acuerdo a los niveles de los factores, como son: tipo y número de rompeolas, al nivel de llenado y a la velocidad a la que se ejecutará la prueba. El proceso de la aleatorización del orden de ejecución según el diseño de experimentos, indica la secuencia desde la prueba 1 hasta la 405.
2. Se introduce agua como material de carga al tonel, conforme al nivel de llenado correspondiente a la prueba en cuestión.
3. Se coloca el tonel sobre los rieles paralelos al inicio de la trayectoria de prueba. El movimiento de avance es suministrado por medio de un cable unido a la estructura metálica 2, cuyo otro extremo se enrolla a una polea que gira a velocidad constante. Para admitir la prueba como válida, el registro de velocidad debe indicar una diferencia menor al 5% de la velocidad nominal de prueba.
4. Al final de la trayectoria de prueba, el tonel es obligado a detenerse de manera repentina. El paro súbito se lleva a cabo por contacto entre la estructura metálica 2 y un obstáculo sujeto al piso. Al presentarse el choque, el motor que genera el movimiento del cable se apaga automáticamente y la estructura 2 se detiene. La base que produce el paro repentino está fabricada de madera y de esponja de poliuretano para evitar dañar el tonel y su estructura.
5. El final de la prueba se establece cuando el líquido se estabiliza y su movimiento es casi nulo; esto ocurre aproximadamente 10 s después del

paro repentino. Los datos de prueba son adquiridos desde antes del choque y hasta 35 s después del paro repentino, en periodos de duración de 40 s. Este amplio periodo de adquisición tiene el propósito de garantizar la completa adquisición del oleaje generado hasta su completo atenuamiento.

La figura 3.6 muestra parte del laboratorio donde se desarrollaron las pruebas. Comúnmente, se requirió de la participación de cuatro personas. Dos de ellas se encargaron de controlar el movimiento del tonel y mantenerlo lo más cercano posible a una velocidad de prueba constante, $\pm 5\%$ de error. Una tercera persona estuvo a cargo del manejo del equipo de adquisición y almacenamiento de datos en tiempo real, mientras que la cuarta tomó video y fotografías de las pruebas.



Figura 3.8

Personal y equipo de trabajo que hizo factible la ejecución de las pruebas experimentales.

3.4 Instrumentación

La parte de la instrumentación es un punto clave en el proceso de experimentación, ya que la adecuada selección y aplicación determinan la generación de los datos requeridos para el análisis experimental. El proceso de instrumentación del tonel consistió en colocar los instrumentos para la medición y registro de la fuerza del oleaje en el interior del tonel, figura 3.7. Los instrumentos principales son dos transductores de fuerza y las correspondientes conexiones a dispositivos que permiten enviar las respuestas de salida a un sistema de adquisición de datos para su almacenamiento y posterior procesamiento y análisis.



Figura 3.9
Instrumentación del conjunto tonel con base metálica.

Los dispositivos electrónicos se muestran en un esquema general en la figura 3.8. Básicamente, el esquema consta de dos transductores de fuerza con sus respectivos preamplificadores de su señal de salida, un osciloscopio, un block de conexiones y equipo de cómputo para el almacenamiento de los datos.

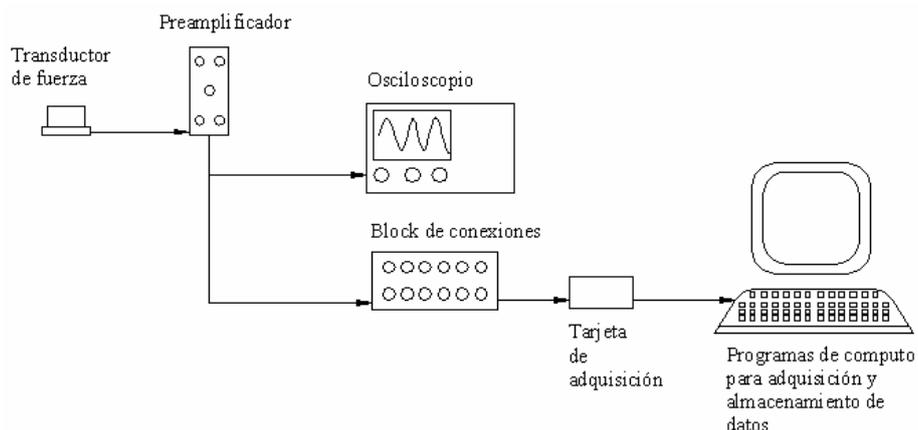


Figura 3.10
Diagrama general de conexión del equipo de adquisición de la fuerza de oleaje longitudinal.

Parámetros de adquisición

Los parámetros de adquisición fueron los siguientes: la velocidad del tonel en m/s y la respuesta de salida dados en unidades de voltaje. Estos parámetros se midieron en tiempo real.

Un ejemplo de la señal o respuesta de salida obtenida mediante los transductores de fuerza, así como un ejemplo de los datos procesados, se presentan en la figura 3.9. La línea tenue corresponde al transductor de fuerza superior y la más oscura al inferior. Los picos más grandes representan el momento del impacto; sin embargo y para efecto del presente estudio, interesa lo que sucede inmediatamente después del impacto.

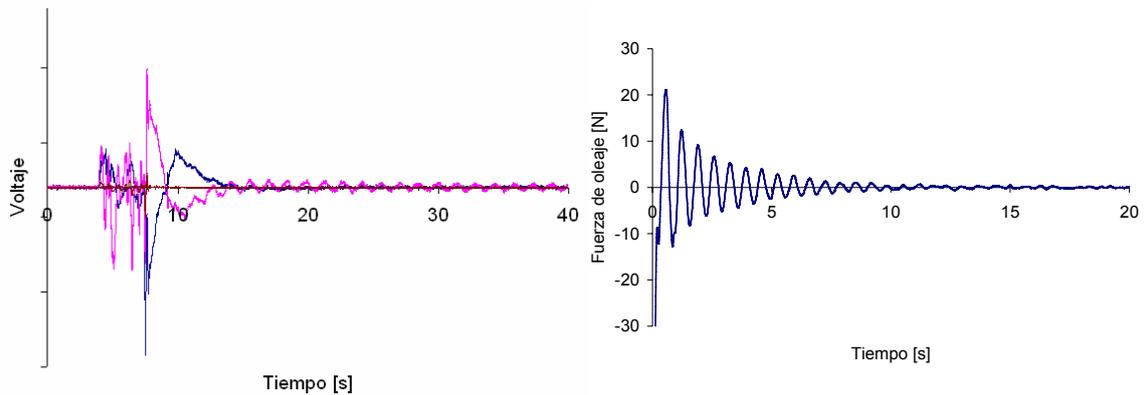


Figura 3.11
Señal de salida de los transductores de fuerza graficada en tiempo contra voltaje.

Las respuestas obtenidas por los transductores de fuerza, F_s y F_i , superior e inferior respectivamente, permiten conocer la fuerza que el fluido ejerce sobre el tanque, indicada como F_0 . Mediante un diagrama de cuerpo libre del tanque como el mostrado en la figura 3.10 y la ec. 3.3, es posible conocer el valor real de F_0 .

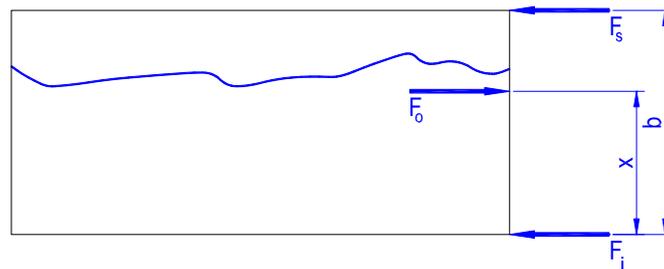


Figura 3.12
Fuerza de oleaje equivalente calculada mediante F_s y F_i .

$$F_0 = F_s + F_i \quad (3.3)$$

3.5 Plan de ejecución de pruebas

El orden de ejecución de las pruebas se determinó por medio de un programa estadístico. Para evitar tendencias en los resultados de las pruebas se aleatorizó el orden de realización de las 405 pruebas. Algunos aspectos de la ejecución de las pruebas se presentan en la Figura 3.13.



Figura 3.13
Ejecución de las pruebas de oleaje con el tanque a escala.

3.6 Resultados de prueba

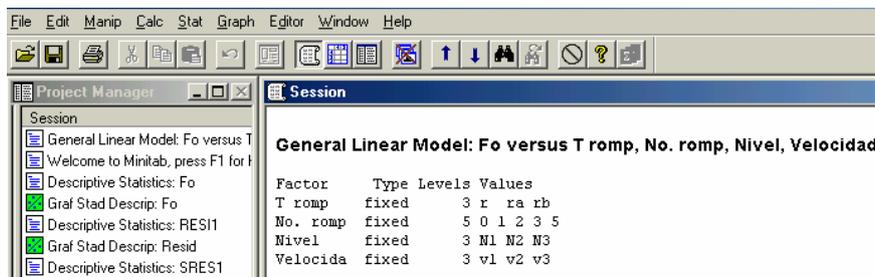
La tabla VI del apéndice muestra los resultados de F_0 , fuerza de oleaje, para cada una de las 405 pruebas generadas de la combinación de los niveles de los factores tipo de rompeolas, número de rompeolas, nivel de llenado y velocidad de prueba.

4 Análisis de datos

4.1 Empleo del programa computacional

A continuación se enumeran las instrucciones introducidas en el programa computacional, de acuerdo con el orden y secuencia seguido en el programa:

1. Se especifica el tipo de diseño experimental a efectuar y el número de factores involucrados en el proceso de experimentación.
2. Se asigna un nombre a cada factor, se indica el número de niveles por factor y el número de réplicas a efectuar; en la presente experimentación se efectuaron repeticiones en lugar de réplicas.
3. Se asigna un nombre a los niveles de los factores.
4. Se indica al programa que aleatorice el orden de ejecución de las pruebas. Una vez realizado este punto se le indica al programa que procese la información introducida.
5. Posterior al procesamiento, el programa despliega tres carpetas. En una carpeta almacena una hoja de cálculo que muestra el orden en que se deben ejecutar las pruebas; otra muestra una hoja de sesiones y la última almacena las gráficas que se van generando durante el análisis. Hasta este punto la hoja de sesión indica la información introducida en los puntos previos, figura 4.1.



Factor	Type	Levels	Values
T romp	fixed	3	r ra rb
No. romp	fixed	5	0 1 2 3 5
Nivel	fixed	3	N1 N2 N3
Velocida	fixed	3	v1 v2 v3

Figura 4.1

Información proporcionada en la hoja sesión previa al análisis de varianza.

6. Se procede a efectuar las 405 pruebas de acuerdo con el orden aleatorio especificado por el programa computacional.
7. Se introducen los 405 datos de fuerza de oleaje, F_o , en la hoja de cálculo que despliega el programa estadístico.
8. Se indica al programa el tipo de gráficas deseadas para visualización, así como instrucciones para ejecutar el análisis de varianza correspondiente.
9. El programa despliega las tres carpetas mencionadas con los resultados del análisis: en la hoja sesión despliega los resultados del análisis de

varianza, figura 4.2. La hoja de cálculo presenta los valores ajustados para F_0 , los residuales para cada prueba y en la carpeta de gráficos se almacenan los gráficos que se indicó al programa a ejecutar.

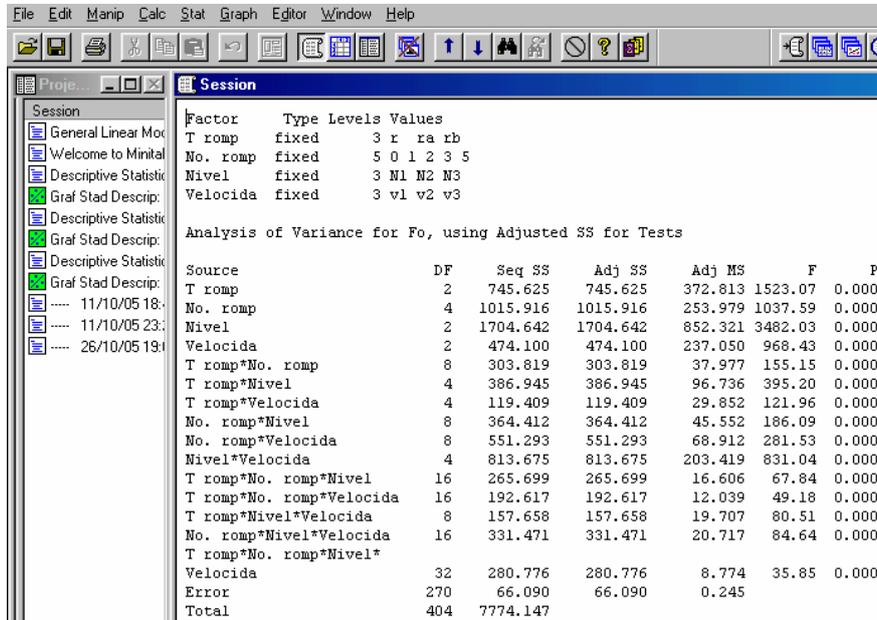


Figura 4.2

Hoja sesión con los resultados del análisis de varianza.

La tabla 4.1 se elaboró con base en los datos que la hoja de sesión del programa estadístico presentó. La información contenida en esta tabla es la nomenclatura que emplea el programa estadístico para diferenciar los niveles de los cuatro factores.

Tabla 4.1

Descripción de la nomenclatura que el programa estadístico despliega en los resultados.

Factor	Niveles	Valores
Tipo de rompeola	3	"r" "ra" "rb"
Número de rompeolas	5	"0" "1" "2" "3" "5"
Nivel de llenado	3	"N1" "N2" "N3"
Velocidad de prueba	3	"v1" "v2" "v3"

Donde:

- "r": rompeolas completo, esto es, rompeolas que abarca toda la sección transversal interna del tanque elíptico.
- "ra": rompeolas cuya geometría es la mitad del rompeolas "r", abarca la mitad superior interna de la sección transversal del tanque.
- "rb": rompeolas cuya geometría es un cuarto del rompeolas "r", ubicado en la parte superior interna y transversal al tanque.

“0”, “1”, “2”, “3” y “5”: número de rompeolas empleados en las pruebas.

“N1”: nivel de llenado del tanque cuando se llena al 50 % de su capacidad total.

“N2”: nivel de llenado del tanque cuando se llena al 75 % de su capacidad total.

“N3”: nivel de llenado del tanque cuando se llena al 94 % de su capacidad total.

“v1”: velocidad de prueba a 0,1 m/s.

“v2”: velocidad de prueba a 0,5 m/s.

“v3”: velocidad de prueba a 1,0 m/s.

4.2 Verificación de la validez del modelo

Aunque la razón F que se obtiene del procedimiento de análisis de varianza es insensible a desviaciones de la suposición de varianzas iguales para las muestras normales cuando éstas son de tamaño igual, se prefiere tener precaución y realizar una prueba preliminar para la homogeneidad de las varianzas.

Además del uso de gráficas residuales para diagnosticar la desigualdad de la varianza, se han propuesto también varias pruebas estadísticas. Éstas pueden considerarse como pruebas formales de las hipótesis:

$$H_0 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_a^2$$

H_1 : El enunciado anterior no es verdadero para al menos una σ_i^2 distinta.

Las pruebas más comunes para validar la homogeneidad de varianzas son la prueba de Bartlett, cuando los datos en todos sus niveles se comportan como una normal, y la prueba de Levene, cuando al menos en un nivel los datos no se comportan como una normal.

El programa computacional calcula y despliega los valores de prueba de Levene, L, y de Bartlett, B, así como también los valores de probabilidad para p-value L y p-value B, para las pruebas de Levene y de Bartlett respectivamente. Se rechaza la hipótesis de igualdad de varianzas si:

$$p\text{-value}_B < 0,05$$

$$p\text{-value}_L < 0,05$$

Los resultados que se obtienen del programa estadístico son:

Prueba de Bartlett (distribución normal)

Estadístico de prueba: 1,996

P-Value : 0,000

Prueba de Levene (cualquier distribución)

Estadístico de prueba: 0,866

P-Value: 0,826

Por lo tanto, por medio de la prueba de Bartlett se rechaza la hipótesis de igualdad de varianzas y por la prueba de Levene se acepta la hipótesis de homogeneidad de varianzas. El método de Levene considera las distancias de las observaciones desde su mediana de la muestra en lugar de la media de la muestra. Empleando la mediana en lugar de la media se hace la prueba más robusta para muestras pequeñas.

4.3 Prueba de bondad y ajuste

La verificación de la validez del modelo se realiza mediante una prueba analítica, con la cual se verifica si los residuos de los datos se distribuyen como una normal. La prueba analítica implica realizar una prueba de bondad de ajuste; algunas de ellas son Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov, Ryan-Joiner, Shapiro-Wilk, Cramer-Von Mises y Chi-Cuadrada.

La figura 5.3 muestra gráficamente la prueba de normalidad Anderson-Darling, en la que se observa el comportamiento de los residuales de F_0 .

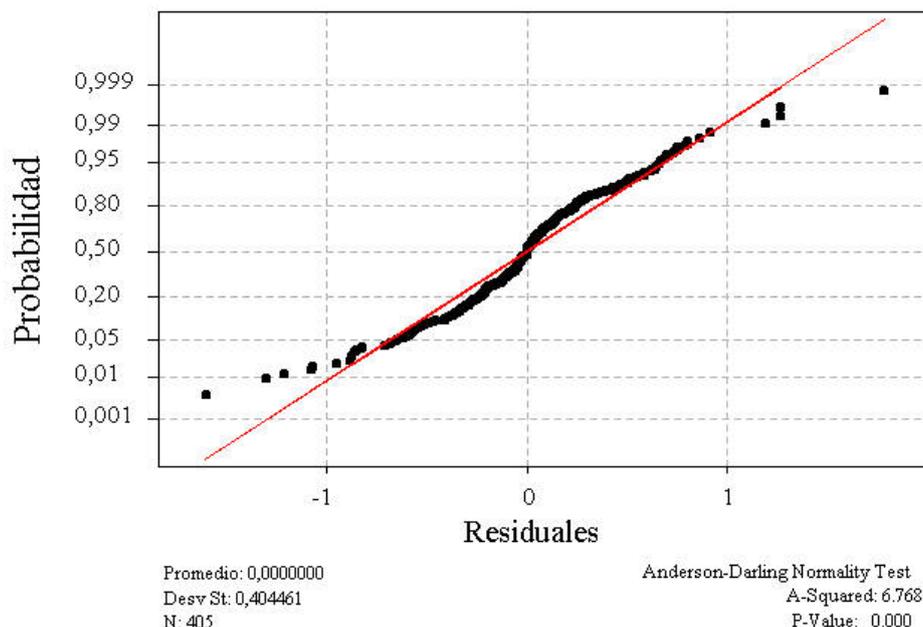


Figura 4.3
Prueba de normalidad Andreson-Darling.

Aunque los datos no presentan un comportamiento normal, se observa una distribución a la que se aproximaron los datos. El “P-value = 0,000” (valor de probabilidad = 0,000) mostrado en la figura 4.3 indica numéricamente que los datos mostrados no tienen un comportamiento con distribución normal. Por tanto, para que suceda lo contrario “P-value” debe ser mayor a la significancia empleada en la experimentación, P-value > 0,05. En la gráfica también se indica el número

total de datos empleados para la construcción de esta gráfica, así como la media y la desviación estándar de los residuales.

4.4 Gráficas de promedios de datos

4.4.1 Gráfica de efectos principales

Un primer análisis se sugiere se aplique al promedio de los datos. El análisis de efectos principales se presenta en una gráfica de los promedios de cada nivel para los factores considerados en el estudio. Este tipo de gráfico muestra el promedio de los datos por nivel de cada uno de los factores y el promedio global o media de medias, en el que se pueden observar los efectos individuales de cada factor. Un efecto principal ocurre cuando la respuesta media cambia a través de los niveles de un factor.

Los efectos principales presentes para los niveles de los factores involucrados (tipo de rompeolas, número de rompeolas, nivel de llenado y velocidad) se muestran en la figura 4.4. La media de medias o la media global correspondiente a los 405 datos se representa por la línea punteada de color rojo. En la gráfica se observa un cambio en el promedio de la respuesta de salida a través de los niveles de los cuatro factores.

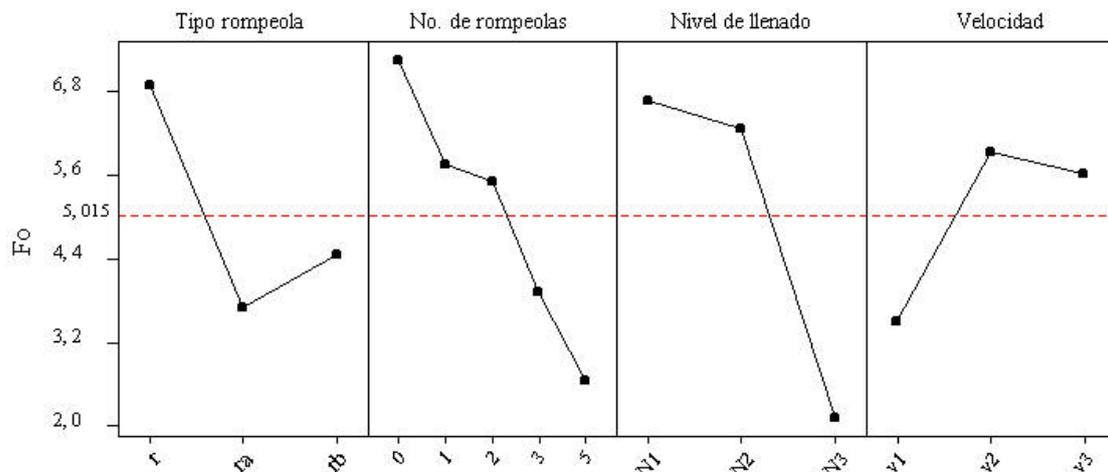


Figura 4.4
Gráfica de efectos principales.

De la gráfica de efectos principales resalta lo siguiente:

Para el factor tipo de rompeolas, los niveles “ra” y “rb” presentan un cambio considerable respecto al promedio que presenta el rompeolas tipo “r”. Los rompeolas tipo “ra” y “rb” muestran valores de fuerza de oleaje inferiores al promedio global y a los correspondientes al rompeolas tipo “r”.

Para el factor número de rompeolas es de esperarse un cambio en la respuesta media cuando el tanque no tiene rompeolas y se compara respecto al resto de los

niveles que si cuentan con al menos un rompeola. Entre “1” y “2” rompeolas no existe un cambio considerable en la respuesta de salida media. La respuesta media para niveles de “3” y “5” presenta valores inferiores a la media de medias de los datos, además de que estos dos niveles respecto a los demás tienen un cambio considerable en la respuesta de salida media.

Para el factor nivel de llenado, entre los niveles “N1” y “N2” no se observa un cambio considerable. Para “N3” respecto a “N1” y “N2” sí existe un cambio relevante en la respuesta de salida media, además que el promedio de “N3” está por debajo de la media global los datos.

Para el factor velocidad de prueba, la velocidad “V2” fue la más crítica por presentar la respuesta promedio más alta en comparación con las dos velocidades de prueba restantes.

4.4.2 Gráfica de interacciones

Una gráfica de interacciones es una gráfica de promedios para cada nivel de un factor con el nivel de un segundo factor tomado como constante. Una interacción entre factores ocurre cuando el cambio en la respuesta del nivel bajo al nivel alto de un factor no es el mismo respecto al cambio en respuesta de los mismos dos niveles de un segundo factor.

En la figura 4.5 se muestra la interacción entre los niveles de los cuatro factores, en la que cada una de las pequeñas gráficas o pequeños cuadros corresponde a la comparación entre factores tomados de dos en dos. De acuerdo con la explicación dada líneas arriba, se determina si existe interacción entre los niveles de los factores en cuestión.

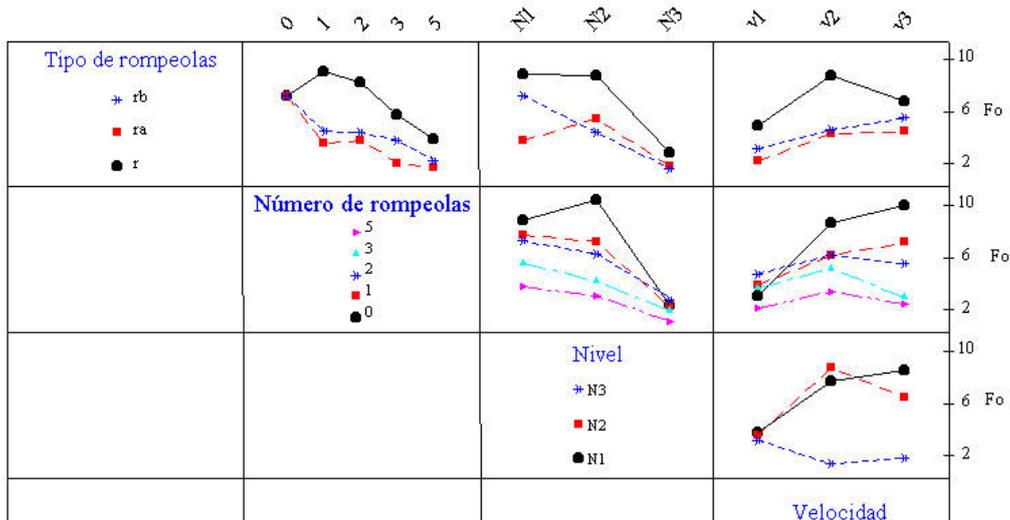


Figura 4.5
Gráfica de interacciones.

De la figura 4.5 y conforme la comparación efectuada por parejas de factores, se observa que entre:

- “Tr” y “Nr”: no hay interacción entre “ra” y “rb”. Pero “r” respecto a “ra” y “rb” si presenta un cambio relevante en el comportamiento de la respuesta de salida promedio entre los niveles correspondientes al factor “Nr”.
- “Tr” y “N”: no existe interacción entre los niveles de estos dos factores, sin embargo el valor numérico de las respuestas de salida correspondientes a “ra” y “rb” son muy similares y son menores a las obtenidas con “r”.
- “Tr” y “v”: no existe alguna interacción relevante entre los niveles de estos dos factores, no obstante el valor numérico de las respuestas de salida correspondientes a “ra” y “rb” son muy similares y son menores a las obtenidas con “r”.
- “Nr” y “N”: no existe interacción importante entre los niveles de estos factores, excepto para el nivel donde se emplean dos rompeolas, factor número de rompeolas “Nr”, que es donde se presenta un cambio diferente en la respuesta de salida promedio del nivel “N2” al “N3” del nivel de llenado.
- “Nr” y “v”: como era de esperarse, todos los niveles de “Nr” donde si se emplean rompeolas presentan una marcada interacción con el nivel donde no se hace uso de rompeolas.
- “N” y “v”: en esta comparación es donde surge la interacción más importante dentro de este análisis.

4.4.3 Conclusiones respecto a gráficas de promedios

1. Es importante el empleo de rompeolas en la atenuación del oleaje.
2. El empleo de los rompeolas alternativos “ra” y “rb” presenta mejores resultados de amortiguamiento del oleaje longitudinal respecto al empleo del rompeolas tipo “r”.
3. No es recomendable el empleo de dos rompeolas, independientemente del tipo de rompeolas usado, por el hecho de que se incrementa el valor numérico de la respuesta de salida o el valor de F_0 .
4. El nivel de llenado induce en gran medida al incremento o disminución del valor numérico de la fuerza de oleaje F_0 . A niveles parciales de llenado bajos, a 50 y 75 %, la magnitud de la fuerza de oleaje es grande; al nivel de llenado correspondiente al 94 % del tanque se registran magnitudes de fuerza de oleaje bajas. Este es un dato que tiene lógica, incluso hasta antes de haber realizado los experimentos, lo importante es que con la experimentación efectuada en laboratorio es posible cuantificar este efecto de atenuación o disminución del oleaje.

Las conclusiones importantes se obtendrán por medio del análisis de varianza de los datos. Es importante señalar que las conclusiones obtenidas mediante el promedio de los datos son la base para generar un criterio preliminar; criterio que

ayudará a realizar una mejor interpretación de los resultados obtenidos del análisis de varianza.

4.5 Análisis estadístico de varianza

En la tabla 4.2 se muestra la forma típica en que se despliegan los resultados del análisis estadístico de varianza. Se incluye una columna extra donde se presenta el porcentaje en contribución, calculado con las sumas de cuadrados de cada fuente y tomado como referencia la suma total de cuadrados.

El análisis estadístico de varianza se efectuó con un porcentaje en confiabilidad del 95 %.

Tabla 4.2
Resultados del análisis de varianza.

Fuente	gdl	Sum Cuad	Contrib (%)	Suma Cuadra Media	F	P
Tr	2	745,625	9,591	372,813	1523,065	8, 888x10-148
Nr	4	1015,916	13,068	253,979	1037,590	1, 598x10-162
N	2	1704,642	21,927	852,321	3482,020	1, 650x10-193
v	2	474,100	6,098	237,050	968,429	6, 676x10-124
Tr*Nr	8	303,819	3,908	37,977	155,150	2, 530x10-96
Tr*N	4	386,945	4,977	96,736	395,200	1, 607x10-111
Tr*v	4	119,409	1,536	29,852	121,957	2, 730x10-59
Nr*N	8	364,412	4,687	45,552	186,093	3, 533x10-105
Nr*v	8	551,293	7,091	68,912	281,527	3, 013x10-126
N*v	4	813,675	10,466	203,419	831,034	2, 131x10-150
Tr*Nr*N	16	265,699	3,418	16,606	67,842	1, 073x10-84
Tr*Nr*v	16	192,617	2,478	12,039	49,182	2, 503x10-70
Tr*N*v	8	157,658	2,028	19,707	80,511	4, 794x10-67
Nr*N*v	16	331,471	4,264	20,717	84,636	3, 539x10-95
Tr*Nr*N*v	32	280,776	3,612	8,774	35,846	4, 379x10-79
error	270	66,090	0,850	0,245		
Total	404	7774,147	100,000			

F 0,05; 2, 270 =	0,051
F 0,05; 4, 270 =	0,177
F 0,05; 8, 270 =	0,339
F 0,05; 16, 270 =	0,493
F 0,05; 32, 270 =	0,616

De los resultados del análisis estadístico de varianza de la tabla 4.2, se puede observar que los cuatro factores con todas sus combinaciones o interacciones, de segundo, tercero y cuarto grado, son significantes al nivel de significancia del 5 %.

De acuerdo con la columna del porcentaje de contribución, el factor que más contribuye en la generación y atenuación de la fuerza de oleaje en el tonel a escala es el nivel de llenado "N" con el 22 %. Le sigue el número de rompeolas "Nr" con el 13 %, la combinación de segundo orden entre el nivel de llenado y la velocidad de prueba "N * v" con el 10 % y el tipo de rompeolas "Tr" con el 9,6 %.

En ese orden son las cuatro fuentes más importantes que contribuyen a la generación o atenuación del oleaje.

Los resultados del análisis estadístico de varianza muestran también que 25 de las 405 observaciones se catalogaron como atípicas, tabla 4.3. De las 25 observaciones atípicas 8 de ellas presentan un residual estandarizado no permitido y mayor de 3 y menor de -3 ; en estas observaciones se requiere revisar las condiciones en que se efectuaron las pruebas. Sin embargo, en general se puede aseverar que las condiciones en las que se ejecutaron las 405 pruebas fueron homogéneas, de ahí que solo el 2 % del total de las respuestas de salida resultaron atípicas.

Tabla 4.3
Observaciones atípicas de F_0 respecto del residuo estandarizado.

Número de observación atípica	Observación	Fo [N]	Fo Ajustado [N]	Residual	Residual estandarizado
1	12	5,402	6,7087	-1,3067	-3,23 R
2	39	4,73	3,5363	1,1937	2,95 R
3	40	3,8980	4,7250	-0,8270	-2,05 R
4	47	9,0910	8,2287	0,8623	2,13 R
5	80	7,1460	8,2287	-1,0827	-2,68 R
6	83	3,0740	1,8073	1,2667	3,14 R
7	92	6,3500	7,2040	-0,8540	-2,11 R
8	120	2,3560	3,2340	-0,8780	-2,17 R
9	131	0,8510	1,8073	-0,9563	-2,37 R
10	175	7,9810	6,7087	1,2723	3,15 R
11	177	1,3930	2,2233	-0,8303	-2,06 R
12	197	0,9850	2,0617	-1,0767	-2,67 R
13	231	5,8760	7,0940	-1,2180	-3,02 R
14	233	2,3560	3,2340	-0,8780	-2,17 R
15	261	16,6060	17,4897	-0,8837	-2,19 R
16	269	8,2950	9,9030	-1,6080	-3,98 R
17	270	3,1940	4,0557	-0,8617	-2,13 R
18	281	2,3560	3,2340	-0,8780	-2,17 R
19	291	8,2950	9,9030	-1,6080	-3,98 R
20	309	8,2950	9,9030	-1,6080	-3,98 R
21	312	3,8530	2,0617	1,7913	4,43 R
22	354	10,8210	9,9030	0,9180	2,27 R
23	362	10,8210	9,9030	0,9180	2,27 R
24	389	8,2930	7,4847	0,8083	2,00 R
25	390	10,8210	9,9030	0,9180	2,27 R

Nota: R Denota una observación con un residuo estandarizado grande.

4.6 Comparaciones múltiples. Método de Tukey

Debido a que los cuatro factores en todas sus combinaciones de segundo, tercer y cuarto orden resultaron significativos en el análisis estadístico de varianza, se

requiere examinar cuáles medias son significativamente diferentes del total de medias existentes en el modelo.

Las comparaciones múltiples de medias, permiten examinar qué medias son diferentes y estimar por cuánto lo son. Cuando son factores múltiples, se pueden obtener comparaciones múltiples de medias a través del modelo lineal general del software estadístico y por medio del método de Tukey.

El programa estadístico realiza la comparación entre medias de la siguiente manera:

1. Comparaciones entre los datos de las 135 medias existentes en este proyecto, anexo I. La mecánica del procedimiento es la siguiente: compara las medias únicamente entre niveles de cada factor. Comienza comparando las medias entre los niveles del factor tipo de rompeolas y finaliza comparando los niveles del último factor, en este caso, la velocidad de prueba. El total de comparaciones correspondientes a los niveles de los cuatro factores es de 19
2. El proceso de comparación de pares de medias continúa entre las medias de las 72 interacciones de segundo orden que se forman de los niveles de los cuatro factores.

El anexo III del apéndice muestra una tabla con todas las interacciones formadas con los niveles de los cuatro factores. El proceso de comparar medias comienza comparando "r 0" contra el resto de las interacciones, "r 1" contra el resto y así sucesivamente hasta llegar a la última comparación que corresponde a "N3 v2" comparado contra "N3 v3". El total de comparaciones entre las interacciones de segundo orden es de 423.

3. El programa estadístico continúa el análisis y efectúa las comparaciones entre las medias de las 162 interacciones de tercer orden, formadas con los niveles de los cuatro factores.

El anexo IV del apéndice muestra todas las interacciones de tercer orden formadas del análisis estadístico. El proceso de comparación es similar al empleado en las comparaciones entre los niveles por factor y en las interacciones de segundo orden; comienza comparando "r 0 N1" contra el resto de las interacciones y finaliza comparando "5 N3 v2" contra "5 N3 V3". El número total de comparaciones entre las interacciones de tercer orden es de 3321.

- 4.- La última parte del análisis estadístico corresponde a la comparación entre las medias de las 135 interacciones de cuarto orden, que se formaron de los niveles de los cuatro factores.

En el anexo V del apéndice se muestra una tabla con todas interacciones de cuarto orden. El proceso de comparación es el mismo al descrito en los puntos previos. Éste comienza al comparar "r 0 N1 v1" contra el resto de las interacciones y finaliza al comparar "rb 5 N3 v2" contra "rb 5 N3 V3". El

total de comparaciones entre las interacciones de cuarto orden es de 9045.

El programa estadístico despliega los resultados en la forma como se muestra en la figura 4.6.

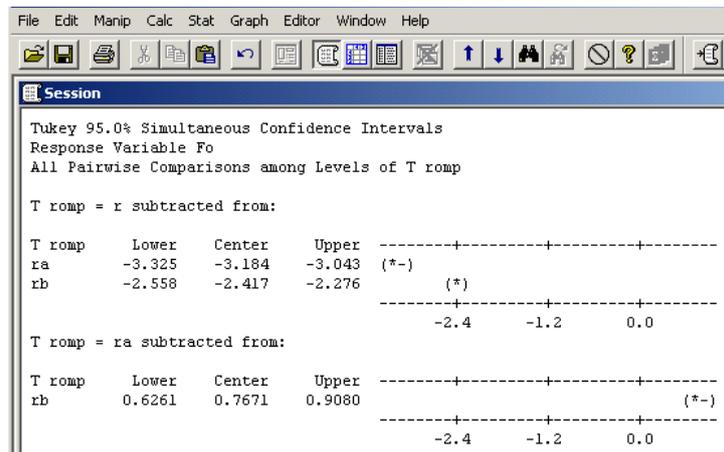


Figura 4.6
Resultados de las comparaciones entre medias, directos del programa estadístico.

El criterio de decisión fijado por el método de Tukey establece que si el cero está contenido dentro del intervalo de confianza calculado para el par de medias en cuestión, entonces la hipótesis de igualdad de medias se acepta. Caso contrario, si el cero no está dentro del intervalo de confianza, no existe igualdad de medias. La figura 4.6 muestra los resultados de comparar las medias entre los tipos de rompeolas, en la figura se puede observar que las medias son muy diferentes y es necesario rechazar la hipótesis de igualdad de medias.

En total se efectuaron 12808 comparaciones entre pares de medias. A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos de tales comparaciones entre medias, en las que la hipótesis de igualdad de medias no fue rechazada.

Como ejemplo de las comparaciones entre niveles de los factores se presentan un rompeolas comparado contra dos en la Tabla 4.4, así como interacciones de segundo orden en la Tabla 4.5. Otras comparaciones se incluyen en el Anexo VII.

Tabla 4.4
Ejemplo de comparación de interacciones de primer orden, entre niveles de factores.

Número de rompeolas.	
1	Comparado contra 2

Tabla 4.5
Comparaciones entre interacciones de segundo orden.

Tipo de rompeolas * No. de rompeolas.		
r 0	Comparado contra	ra 0 y rb 0
r 5	Comparado contra	ra 1, ra 2 y rb 3
ra 0	Comparado contra	rb 0
ra 1	Comparado contra	ra 2 y rb 3
ra 2	Comparado contra	rb 3
ra 3	Comparado contra	ra 5 y rb 5
rb 1	Comparado contra	rb 2
Tipo de rompeolas * Nivel de llenado		
r N1	Comparado contra	r N2
ra N3	Comparado contra	rb N3
Tipo de rompeolas * Velocidad		
ra V2	Comparado contra	ra V3 y rb V2
ra V3	Comparado contra	rb V2
No. de rompeolas * Nivel de llenado		
0 N3	Comparado contra	1 N3 y 3 N3
1 N2	Comparado contra	2 N1
1 N3	Comparado contra	3 N3
2 N3	Comparado contra	5 N2
3 N2	Comparado contra	5 N1
No. de rompeolas * Velocidad		
0 V1	Comparado contra	3 V3 y 5 V2
1 V1	Comparado contra	3 V1
1 V2	Comparado contra	2 V2
2 V1	Comparado contra	3 V2
2 V3	Comparado contra	3 V2
3 V1	Comparado contra	5 V2
5 V1	Comparado contra	5 V3
Nivel de llenado* Velocidad		
N1 V1	Comparado contra	N2 V1
N1 V3	Comparado contra	N2 V2

Conclusiones y recomendaciones

El análisis de los resultados y la observación del desarrollo global de la investigación permiten desglosar las conclusiones desde dos distintas perspectivas. La primera corresponde a los resultados del análisis estadístico, mientras que la segunda se refiere a aspectos mecánicos de los rompeolas y el fenómeno de oleaje.

Conclusiones estadísticas

De acuerdo con el análisis de varianza, los cuatro factores (velocidad, nivel de llenado, tipo y número de rompeolas), así como las combinaciones entre sus niveles, son significantes a un 95% de confiabilidad. No obstante, el factor de mayor efecto sobre la magnitud de la fuerza de oleaje longitudinal es el factor nivel de llenado, seguido por el tipo de rompeolas empleado.

Los datos generados en el proceso de prueba permitieron realizar 12808 comparaciones de medias, de las cuales solamente 803 (el 6.3 %) resultaron no significativas con respecto a un nivel de significancia de 5%. Por tanto, se considera que las mediciones en el experimento son adecuadas para deducir el efecto de las variables sobre la magnitud de la fuerza de oleaje longitudinal, con muy poca perturbación externa.

El nivel de llenado 3, correspondiente al 94% de la capacidad del tonel, promovió los menores valores de la fuerza de oleaje longitudinal, mientras que el nivel 1 produjo los mayores. Sin embargo, este efecto no es lineal con respecto al valor de la magnitud de la fuerza de oleaje.

Las comparaciones múltiples entre las medias muestran que, sin importar el tipo de rompeolas empleado, es indistinto el uso de 3 ó 5 rompeolas. Así mismo, el rompeolas tipo "ra" promueve menores magnitudes de esa fuerza de oleaje, a los tipo "r" y "rb", independientemente del factor velocidad. Con base en el análisis de varianza y de las comparaciones múltiples, para el tanque a escala reducida es aconsejable estadísticamente el empleo de 3 rompeolas tipo "ra", porque produce efecto similar en la fuerza de oleaje que si se emplearan 5 del tipo "rb", 5 del tipo "r" e incluso 5 del tipo "ra".

Conclusiones mecánicas

Aunque la mayor velocidad de impacto producía la mayor fuerza de oleaje inicial, ésta se debía al cambio inercial de la masa. Por cuestiones prácticas, el intervalo de velocidades utilizado en las pruebas con el tonel a escala reducida fue menor al aplicado en el transporte por carretera, por lo que deben realizarse estudios que muestren con mayor precisión el efecto de velocidades altas, así como considerar con mayor detalle aspectos de similitud.

Respecto a los niveles de llenado evaluados, el 94% mostró menor repercusión sobre la magnitud de la fuerza de oleaje, comparado con el 50% y el 75%. Los resultados muestran que niveles de llenado parciales incrementan la fuerza de oleaje, por lo que se deben atender estas condiciones de operación de los tanques.

Los rompeolas de sección parcial (r_a y r_b) presentaron la menor magnitud de la fuerza de oleaje, por debajo del promedio general, mientras que el tradicional (r) está por arriba del promedio. De manera similar y con respecto al diseño del tanque, el uso de uno o dos rompeolas incrementaron la magnitud de la fuerza de oleaje, mientras que más de dos favorece su disminución. Por lo tanto, una buena combinación es el empleo de tres rompeolas tipo “ r_a ” a un nivel de llenado del 94%.

No obstante que el nivel de llenado del 94% produce pequeños valores de fuerza de oleaje longitudinal, el número de rompeolas a este nivel no presenta marcadas diferencias. Por tanto, en los autotanques actuales puede aplicarse una modificación consistente en disminuir la sección de los rompeolas actuales, en tanto que en el diseño de nuevos autotanques se puede considerar el uso de un menor número de rompeolas con materiales alternativos.

No se aprecia una linealidad entre los factores contemplados en el estudio y el valor de la fuerza de oleaje. Por tanto, es necesario realizar mayor experimentación con casos en los que se maneje un menor número de variables y mayor discretización (incremento de los niveles de los factores).

Recomendaciones y sugerencias de estudio

Se recomienda considerar en estudios futuros aspectos de mecánica de fluidos, para conocer el comportamiento del fluido dentro del tonel.

Es necesario llevar a cabo estudios de similitud y escalamiento en el análisis del fenómeno de oleaje, con el propósito de extrapolar con mayor sustento técnico-científico los resultados obtenidos con el caso de autotanques a escala natural (20 mil litros de capacidad).

Se requiere estudiar también la efectividad de los rompeolas en el amortiguamiento del oleaje; es decir, considerando la historia posterior al inicio del oleaje. En el presente estudio se determinó la magnitud de la fuerza de oleaje a partir del primer ciclo, sin considerar los ciclos de oleaje posteriores.

Se sugiere revisar los diseños actuales de autotanques con respecto al material utilizado en los rompeolas. Puesto que la masa de los mismos afecta la estabilidad del comportamiento dinámico, se debe explorar el uso de otros materiales alternativos que, combinados con las geometrías propuestas y otras variantes, representen una mejor distribución y una menor masa.

Referencias

1. Fabela Gallegos, Manuel J.; Vázquez Vega, David; Hernández Guzmán, Andrés; Hernández Jiménez, Ricardo; Orozco Orozco, Rodrigo P., 2004, “*Aspectos generales sobre la caracterización mecánica de vehículos terrestres*”. Base de una publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte.
2. Instituto Mexicano del Transporte, 2003, “*Análisis y Evaluación del Comportamiento Dinámico de Vehículos Autotanque*”, Base de una publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte IF-EE 01/03, Instituto Mexicano del Transporte, San Fandila, Querétaro, México.
3. Instituto Mexicano del Transporte, 2003, “*Caracterización Experimental del Oleaje en Tanques*”, Base de una publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte ISSN 0188-7297, Instituto Mexicano del Transporte, San Fandila, Querétaro, México.
4. Crolla, D. A.; Firth, G.; Horton, D. “*An Introduction to Vehicle Dynamics*”, Department of Mechanical Engineering, University of Leeds, UK.
5. Dodge, T. Franklin, 2000, “*The New Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers*”, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, USA.
6. Mucino, V.H., 2000, “*Parameters of Trammel Pendulums to Simulate Lateral Sloshing in Partially Filled Elliptical Road Tankers*”, Department of Mechanical and Aerospace Engineering College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, University, Morgantown, WV, USA.
7. Abramson, H.N., 1966, “*The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers*”, NASA SP-106.
8. Anon, 1968, “*Propellant Slosh Loads*”, NASA Space Vehicle Design Criteria (structures), NASA SP-8009.
9. Celebi, M. Serdar, “*Nonlinear Modeling of Liquid Sloshing in a Moving Rectangular Tank*”, NASA Space Vehicle Design Criteria (structures), Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Maslak, Istanbul-Turkey.
10. SAE Technical paper series, “*Experimental Assessment of Baffles and Their Effect on the Longitudinal Sloshing Force in a Scaled Elliptical Tank*”, 2005-01-3577, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA.
11. Fabela Gallegos, Manuel de Jesús; Vázquez Vega, David; Hernández Jiménez, José Ricardo; Orozco Orozco, Pablo Rodrigo; Martínez Madrid, Miguel; Favela Gallegos, Carlos Adrián; Ramírez Valencia, Andrés; Flores Centeno, Oscar; Hernández Pérez, Javier. 2003. “*Medición experimental de parámetros del comportamiento dinámico de dos autotanques unitarios tipo C3*”.

- Informe Técnico Parcial No. ET-79-01/P05 del 3 de noviembre de 2003. Coordinación de Equipamiento para el Transporte, Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro.
12. Organización Internacional de Metrología Legal. “*Recomendación Internacional OIML R-80. Autotanques y Carrotanques*”. Edición 1989 (E), desarrollada por el Secretariado de Reporte SP 5S-Sr 9 “*Autotanques y Carrotanques*” y el Secretariado Piloto SP 5S “*Medición estática de cantidades de líquidos*”. Sancionada por la Conferencia Internacional de Metrología Legal en 1989.
 13. Dieter, George E., 1991, “*Engineering design: A materials and processing approach*”, 2nd ed., Mc. Graw Hill International editions.
 14. Montgomery, Douglas C., 1991, “*Diseño y Análisis de Experimentos*”, Grupo editorial Iberoamericana.
 15. Roy, Ranjit, 1990, “*A Primer on the Taguchi Method*”, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, U. S. A.
 16. Cesatrone, John, 2001, “*The Power of Taguchi*”, IIE Solutions.
 17. Sudhakar, P. R., “*An Introduction to Quality Improvement Through Taguchi Methods*”, Ministry of Defense, India.
 18. Kelton, David W., 2003, “*Experimental Design For Simulation*”, Department of Quantitative Analysis and Operation Management University of Cincinnati, OH, U.S.A.
 19. Diamond, William J., 2001, “*Practical Experiment Designs, For Engineers and Scientists*”, John Wiley & Sons, Inc.
 20. CEDEI, 1999, “*Diseño de Experimentos*”, Curso de capacitación impartido por el Centro de Desarrollo Industrial, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.
 21. Walpole, Ronald E., 1998, “*Probabilidad y Estadística para Ingenieros*”, 6ª ed., Prentice Hall.
 22. Miller, Irwin R., 1992, “*Probabilidad y Estadística para Ingenieros*”, 4ª ed., Prentice Hall.
 23. Minitab Release 13.30.
 24. Brüel & Kjær, 1985, “*Instruction Manual, Force Transducers Types 8200 and 8201*”, 6ª ed., Nærum, Denmark, revision march.

Anexos

ANEXO I
Matriz de promedios de F_0 .

		Cero rompeolas			Un rompeolas			Dos rompeolas			Tres rompeolas			Cinco rompeolas		
		v1	v2	v3	v1	v2	v3	v1	v2	v3	v1	v2	v3	v1	v2	v3
Rompeolas tipo "r"	n1	3.234	9.903	13.625	4.411	13.247	16.571	4.754	13.802	17.490	4.932	12.596	3.537	4.278	10.051	1.882
	n2	3.895	14.102	13.405	6.958	16.914	15.011	7.485	15.315	4.056	7.094	12.477	2.062	4.846	4.917	3.733
	n3	1.952	1.932	3.188	5.724	1.653	1.807	6.808	2.356	2.223	5.660	1.797	2.372	3.140	1.358	1.152
Rompeolas tipo "ra"	n1	3.234	9.903	13.625	1.427	2.735	6.081	1.222	3.173	3.446	1.427	2.531	3.309	0.873	2.063	1.789
	n2	3.895	14.102	13.405	1.684	6.504	7.085	3.398	9.836	6.708	2.027	4.739	0.728	3.081	3.812	1.463
	n3	1.952	1.932	3.188	3.886	0.951	1.760	3.802	0.918	2.079	1.286	0.942	1.855	0.679	0.818	1.073
Rompeolas tipo "rb"	n1	3.234	9.903	13.625	7.268	7.204	11.006	7.268	6.270	8.229	7.268	7.268	7.268	1.041	4.906	7.258
	n2	3.895	14.102	13.405	1.365	4.902	4.725	1.753	3.548	4.670	1.564	3.573	3.747	0.646	2.208	2.483
	n3	1.952	1.932	3.188	2.301	1.549	0.494	6.468	0.786	0.782	1.791	0.484	1.511	0.483	0.739	0.925

Nota: El valor en cada una de las 135 celdas de la tabla del presente anexo, representa el valor de la media de las tres repeticiones.

ANEXO II

Valores promedio de F_0 ordenados de menor a mayor.

Dato No.	Combinación	F_0 promedio (N)	Dato No.	Combinación	F_0 promedio (N)	Dato No.	Combinación	F_0 promedio (N)
1	rb5n3v1=	0.433	46	r3n2v3=	2.062	91	r3n1v1=	4.932
2	rb3n3v2=	0.484	47	ra5n1v2=	2.063	92	r3n3v1=	5.660
3	rb1n3v3=	0.494	48	ra2n3v3=	2.079	93	r1n3v1=	5.724
4	rb5n2v1=	0.646	49	rb5n2v2=	2.208	94	ra1n1v3=	6.081
5	ra5n3v1=	0.679	50	r2n3v3=	2.223	95	rb2n1v2=	6.270
6	ra3n2v3=	0.728	51	rb1n3v1=	2.301	96	rb2n3v1=	6.468
7	rb5n3v2=	0.739	52	r2n3v2=	2.356	97	ra1n2v2=	6.504
8	rb2n3v3=	0.782	53	r3n3v3=	2.372	98	ra2n2v3=	6.708
9	rb2n3v2=	0.786	54	rb5n2v3=	2.483	99	r2n3v1=	6.808
10	ra5n3v2=	0.818	55	ra3n1v2=	2.531	100	r1n2v1=	6.958
11	ra5n1v1=	0.873	56	ra1n1v2=	2.735	101	ra1n2v3=	7.085
12	ra2n3v2=	0.918	57	ra5n2v1=	3.081	102	r3n2v1=	7.094
13	rb5n3v3=	0.925	58	r5n3v1=	3.140	103	rb1n1v2=	7.204
14	ra3n3v2=	0.942	59	ra2n1v2=	3.173	104	rb5n1v3=	7.258
15	ra1n3v2=	0.951	60	r0n3v3=	3.188	105	rb1n1v1=	7.268
16	rb5n1v1=	1.041	61	ra0n3v3=	3.188	106	rb2n1v1=	7.268
17	ra5n3v3=	1.073	62	rb0n3v3=	3.188	107	rb3n1v1=	7.268
18	r5n3v3=	1.152	63	r0n1v1=	3.234	108	rb3n1v2=	7.268
19	ra2n1v1=	1.222	64	ra0n1v1=	3.234	109	rb3n1v3=	7.268
20	ra3n3v1=	1.286	65	rb0n1v1=	3.234	110	r2n2v1=	7.485
21	r5n3v2=	1.358	66	ra3n1v3=	3.309	111	rb2n1v3=	8.229
22	rb1n2v1=	1.365	67	ra2n2v1=	3.398	112	ra2n2v2=	9.836
23	ra1n1v1=	1.427	68	ra2n1v3=	3.445	113	r0n1v2=	9.903
24	ra3n1v1=	1.427	69	r3n1v3=	3.537	114	ra0n1v2=	9.903
25	ra5n2v3=	1.463	70	rb2n2v2=	3.548	115	rb0n1v2=	9.903
26	rb3n3v3=	1.511	71	rb3n2v2=	3.573	116	r5n1v2=	10.051
27	rb1n3v2=	1.549	72	r5n2v3=	3.733	117	rb1n1v3=	11.006
28	rb3n2v1=	1.564	73	rb3n2v3=	3.747	118	r3n2v2=	12.477
29	r1n3v2=	1.653	74	ra2n3v1=	3.802	119	r3n1v2=	12.596
30	ra1n2v1=	1.684	75	ra5n2v2=	3.812	120	r1n1v2=	13.247
31	rb2n2v1=	1.753	76	ra1n3v1=	3.886	121	r0n2v3=	13.405
32	ra1n3v3=	1.760	77	r0n2v1=	3.895	122	ra0n2v3=	13.405
33	ra5n1v3=	1.789	78	ra0n2v1=	3.895	123	rb0n2v3=	13.405
34	rb3n3v1=	1.791	79	rb0n2v1=	3.895	124	r0n1v3=	13.625
35	r3n3v2=	1.797	80	r2n2v3=	4.056	125	ra0n1v3=	13.625
36	r1n3v3=	1.807	81	r5n1v1=	4.278	126	rb0n1v3=	13.625
37	ra3n3v3=	1.855	82	r1n1v1=	4.411	127	r2n1v2=	13.802
38	r5n1v3=	1.882	83	rb2n2v3=	4.670	128	r0n2v2=	14.102
39	r0n3v2=	1.932	84	rb1n2v3=	4.725	129	ra0n2v2=	14.102
40	ra0n3v2=	1.932	85	ra3n2v2=	4.739	130	rb0n2v2=	14.102
41	rb0n3v2=	1.932	86	r2n1v1=	4.754	131	r1n2v3=	15.011
42	r0n3v1=	1.952	87	r5n2v1=	4.846	132	r2n2v2=	15.315
43	ra0n3v1=	1.952	88	rb1n2v2=	4.902	133	r1n1v3=	16.571
44	rb0n3v1=	1.952	89	rb5n1v2=	4.906	134	r1n2v2=	16.914
45	ra3n2v1=	2.027	90	r5n2v2=	4.917	135	r2n1v3=	17.490

ANEXO III
Interacciones de segundo orden.

Tr*Nr	Tr*N	Tr*V	Nr*N	Nr*V	N*V
r 0	r N1	r v1	0 N1	0 v1	N1 v1
r 1	r N2	r v2	0 N2	0 v2	N1 v2
r 2	r N3	r v3	0 N3	0 v3	N1 v3
r 3	ra N1	ra v1	1 N1	1 v1	N2 v1
r 5	ra N2	ra v2	1 N2	1 v2	N2 v2
ra 0	ra N3	ra v3	1 N3	1 v3	N2 v3
ra 1	rb N1	rb v1	2 N1	2 v1	N3 v1
ra 2	rb N2	rb v2	2 N2	2 v2	N3 v2
ra 3	rb N3	rb v3	2 N3	2 v3	N3 v3
ra 5			3 N1	3 v1	
rb 0			3 N2	3 v2	
rb 1			3 N3	3 v3	
rb 2			5 N1	5 v1	
rb 3			5 N2	5 v2	
rb 5			5 N3	5 v3	

ANEXO IV
Interacciones de tercer orden.

Tr*Nr*N	Tr*Nr*V	Tr*N*V	Nr*N*V
r 0 N1	r 0 v1	r N1 V1	0 N1 v1
r 0 N2	r 0 v2	r N1 v2	0 N1 v2
r 0 N3	r 0 v3	r N1 v3	0 N1 v3
r 1 N1	r 1 v1	r N2 v1	0 N2 v1
r 1 N2	r 1 v2	r N2 v2	0 N2 v2
r 1 N3	r 1 v3	r N2 v3	0 N2 v3
r 2 N1	r 2 v1	r N3 v1	0 N3 v1
r 2 N2	r 2 v2	r N3 v2	0 N3 v2
r 2 N3	r 2 v3	r N3 v3	0 N3 v3
r 3 N1	r 3 v1	ra N1 v1	1 N1 v1
r 3 N2	r 3 v2	ra N1 v2	1 N1 v2
r 3 N3	r 3 v3	ra N1 v3	1 N1 v3
r 5 N1	r 5 v1	ra N2 v1	1 N2 v1
r 5 N2	r 5 v2	ra N2 v2	1 N2 v2
r 5 N3	r 5 v3	ra N2 v3	1 N2 v3
ra 0 N1	ra 0 v1	ra N3 v1	1 N3 v1
ra 0 N2	ra 0 v2	ra N3 v2	1 N3 v2
ra 0 N3	ra 0 v3	ra N3 v3	1 N3 v3
ra 1 N1	ra 1 v1	rb N1 v1	2 N1 v1
ra 1 N2	ra 1 v2	rb N1 v2	2 N1 v2
ra 1 N3	ra 1 v3	rb N1 v3	2 N1 v3
ra 2 N1	ra 2 v1	rb N2 v1	2 N2 v1
ra 2 N2	ra 2 v2	rb N2 v2	2 N2 v2
ra 2 N3	ra 2 v3	rb N2 v3	2 N2 v3
ra 3 N1	ra 3 v1	rb N3 v1	2 N3 v1
ra 3 N2	ra 3 v2	rb N3 v2	2 N3 v2
ra 3 N3	ra 3 v3	rb N3 v3	2 N3 v3
ra 5 N1	ra 5 v1		3 N1 v1
ra 5 N2	ra 5 v2		3 N1 v2
ra 5 N3	ra 5 v3		3 N1 v3
rb 0 N1	rb 0 v1		3 N2 v1
rb 0 N2	rb 0 v2		3 N2 v2
rb 0 N3	rb 0 v3		3 N2 v3
rb 1 N1	rb 1 v1		3 N3 v1
rb 1 N2	rb 1 v2		3 N3 v2
rb 1 N3	rb 1 v3		3 N3 v3
rb 2 N1	rb 2 v1		5 N1 v1
rb 2 N2	rb 2 v2		5 N1 v2
rb 2 N3	rb 2 v3		5 N1 v3
rb 3 N1	rb 3 v1		5 N2 v1
rb 3 N2	rb 3 v2		5 N2 v2
rb 3 N3	rb 3 v3		5 N2 v3
rb 5 N1	rb 5 v1		5 N3 v1
rb 5 N2	rb 5 v2		5 N3 v2
rb 5 N3	rb 5 v3		5 N3 v3

ANEXO V
Interacciones cuarto orden.

Tr*Nr*N*V											
r	0	N1	v1	ra	0	N1	v1	rb	0	N1	v1
r	0	N1	v2	ra	0	N1	v2	rb	0	N1	v2
r	0	N1	v3	ra	0	N1	v3	rb	0	N1	v3
r	0	N2	v1	ra	0	N2	v1	rb	0	N2	v1
r	0	N2	v2	ra	0	N2	v2	rb	0	N2	v2
r	0	N2	v3	ra	0	N2	v3	rb	0	N2	v3
r	0	N3	v1	ra	0	N3	v1	rb	0	N3	v1
r	0	N3	v2	ra	0	N3	v2	rb	0	N3	v2
r	0	N3	v3	ra	0	N3	v3	rb	0	N3	v3
r	1	N1	v1	ra	1	N1	v1	rb	1	N1	v1
r	1	N1	v2	ra	1	N1	v2	rb	1	N1	v2
r	1	N1	v3	ra	1	N1	v3	rb	1	N1	v3
r	1	N2	v1	ra	1	N2	v1	rb	1	N2	v1
r	1	N2	v2	ra	1	N2	v2	rb	1	N2	v2
r	1	N2	v3	ra	1	N2	v3	rb	1	N2	v3
r	1	N3	v1	ra	1	N3	v1	rb	1	N3	v1
r	1	N3	v2	ra	1	N3	v2	rb	1	N3	v2
r	1	N3	v3	ra	1	N3	v3	rb	1	N3	v3
r	2	N1	v1	ra	2	N1	v1	rb	2	N1	v1
r	2	N1	v2	ra	2	N1	v2	rb	2	N1	v2
r	2	N1	v3	ra	2	N1	v3	rb	2	N1	v3
r	2	N2	v1	ra	2	N2	v1	rb	2	N2	v1
r	2	N2	v2	ra	2	N2	v2	rb	2	N2	v2
r	2	N2	v3	ra	2	N2	v3	rb	2	N2	v3
r	2	N3	v1	ra	2	N3	v1	rb	2	N3	v1
r	2	N3	v2	ra	2	N3	v2	rb	2	N3	v2
r	2	N3	v3	ra	2	N3	v3	rb	2	N3	v3
r	3	N1	v1	ra	3	N1	v1	rb	3	N1	v1
r	3	N1	v2	ra	3	N1	v2	rb	3	N1	v2
r	3	N1	v3	ra	3	N1	v3	rb	3	N1	v3
r	3	N2	v1	ra	3	N2	v1	rb	3	N2	v1
r	3	N2	v2	ra	3	N2	v2	rb	3	N2	v2
r	3	N2	v3	ra	3	N2	v3	rb	3	N2	v3
r	3	N3	v1	ra	3	N3	v1	rb	3	N3	v1
r	3	N3	v2	ra	3	N3	v2	rb	3	N3	v2
r	3	N3	v3	ra	3	N3	v3	rb	3	N3	v3
r	5	N1	v1	ra	5	N1	v1	rb	5	N1	v1
r	5	N1	v2	ra	5	N1	v2	rb	5	N1	v2
r	5	N1	v3	ra	5	N1	v3	rb	5	N1	v3
r	5	N2	v1	ra	5	N2	v1	rb	5	N2	v1
r	5	N2	v2	ra	5	N2	v2	rb	5	N2	v2
r	5	N2	v3	ra	5	N2	v3	rb	5	N2	v3
r	5	N3	v1	ra	5	N3	v1	rb	5	N3	v1
r	5	N3	v2	ra	5	N3	v2	rb	5	N3	v2
r	5	N3	v3	ra	5	N3	v3	rb	5	N3	v3

ANEXO VI

Orden de ejecución de las pruebas y resultados obtenidos.

Orden corrida	Orden estándar	Tipo Rompeola	No. Romp.	Nivel llenado	Velocidad de prueba	Fo (N)
1	245	rb	0	N3	v2	1.971
2	36	ra	0	N3	v3	2.779
3	53	ra	3	N3	v2	0.960
4	255	rb	2	N2	v3	5.020
5	146	ra	5	N2	v2	3.770
6	112	r	3	N3	v1	5.776
7	51	ra	3	N2	v3	0.740
8	7	r	1	N2	v1	7.386
9	21	r	3	N2	v3	1.347
10	20	r	3	N2	v2	12.989
11	52	ra	3	N3	v1	1.300
12	179	rb	5	N3	v2	0.820
13	45	ra	2	N2	v3	5.400
14	84	rb	3	N3	v3	1.310
15	261	rb	3	N2	v3	3.700
16	108	r	2	N3	v3	3.014
17	104	r	2	N2	v2	15.527
18	58	ra	5	N3	v1	0.650
19	131	ra	1	N3	v2	1.080
20	13	r	2	N2	v1	7.328
21	191	r	1	N3	v2	1.438
22	216	ra	0	N3	v3	2.949
23	128	ra	1	N2	v2	6.480
24	15	r	2	N2	v3	4.472
25	100	r	1	N3	v1	5.687
26	80	rb	3	N2	v2	3.620
27	163	rb	2	N2	v1	1.230
28	93	r	0	N2	v3	13.650
29	114	r	3	N3	v3	2.801
30	246	rb	0	N3	v3	2.779
31	12	r	1	N3	v3	3.074
32	164	rb	2	N2	v2	3.520
33	109	r	3	N2	v1	7.849
34	198	r	2	N3	v3	1.393
35	200	r	3	N2	v2	12.494
36	225	ra	2	N2	v3	7.980
37	33	ra	0	N2	v3	13.650
38	178	rb	5	N3	v1	0.410
39	242	rb	0	N2	v2	14.183
40	10	r	1	N3	v1	6.144
41	182	r	0	N2	v2	14.183
42	78	rb	2	N3	v3	0.650
43	157	rb	1	N2	v1	1.600
44	160	rb	1	N3	v1	2.430
45	263	rb	3	N3	v2	0.420

Orden de ejecución de las pruebas y resultados obtenidos (Continuación).

Orden corrida	Orden estándar	Tipo Rompeola	No. Romp.	Nivel llenado	Velocidad de prueba	Fo [N]
46	183	r	0	N2	v3	13.199
47	204	r	3	N3	v3	2.302
48	69	rb	1	N2	v3	3.900
49	230	ra	3	N2	v2	4.780
50	76	rb	2	N3	v1	6.450
51	106	r	2	N3	v1	7.548
52	92	r	0	N2	v2	14.245
53	3	r	0	N2	v3	13.365
54	30	r	5	N3	v3	1.154
55	103	r	2	N2	v1	6.833
56	120	r	5	N3	v3	1.127
57	38	ra	1	N2	v2	6.800
58	154	rb	0	N3	v1	1.952
59	181	r	0	N2	v1	3.578
60	205	r	5	N2	v1	4.799
61	228	ra	2	N3	v3	2.660
62	257	rb	2	N3	v2	0.830
63	238	ra	5	N3	v1	0.640
64	265	rb	5	N2	v1	0.590
65	123	ra	0	N2	v3	13.199
66	239	ra	5	N3	v2	1.000
67	23	r	3	N3	v2	1.955
68	89	rb	5	N3	v2	0.760
69	101	r	1	N3	v2	1.924
70	86	rb	5	N2	v2	2.120
71	129	ra	1	N2	v3	7.140
72	199	r	3	N2	v1	5.876
73	227	ra	2	N3	v2	0.890
74	201	r	3	N2	v3	0.985
75	166	rb	2	N3	v1	5.840
76	127	ra	1	N2	v1	1.470
77	94	r	0	N3	v1	1.952
78	59	ra	5	N3	v2	0.690
79	113	r	3	N3	v2	1.588
80	142	ra	3	N3	v1	1.270
81	42	ra	1	N3	v3	1.510
82	159	rb	1	N2	v3	5.390
83	98	r	1	N2	v2	16.855
84	218	ra	1	N2	v2	6.230
85	262	rb	3	N3	v1	1.690
86	229	ra	3	N2	v1	1.800
87	116	r	5	N2	v2	4.663
88	139	ra	3	N2	v1	2.180
89	110	r	3	N2	v2	11.948
90	48	ra	2	N3	v3	2.040

Orden de ejecución de las pruebas y resultados obtenidos (Continuación).

Orden corrida	Orden estándar	Tipo Rompeola	No. Romp.	Nivel llenado	Velocidad de prueba	Fo [N]
91	217	Ra	1	N2	v1	2.310
92	202	r	3	N3	v1	5.739
93	151	rb	0	N2	v1	3.578
94	240	ra	5	N3	v3	1.100
95	130	ra	1	N3	v1	4.440
96	208	r	5	N3	v1	2.566
97	105	r	2	N2	v3	4.501
98	188	r	1	N2	v2	16.957
99	44	ra	2	N2	v2	9.750
100	14	r	2	N2	v2	14.974
101	224	ra	2	N2	v2	10.000
102	167	rb	2	N3	v2	0.860
103	88	rb	5	N3	v1	0.430
104	99	r	1	N2	v3	14.637
105	65	rb	0	N3	v2	2.228
106	194	r	2	N2	v2	15.445
107	26	r	5	N2	v2	4.784
108	29	r	5	N3	v2	1.353
109	117	r	5	N2	v3	4.240
110	258	rb	2	N3	v3	0.970
111	87	rb	5	N2	v3	2.660
112	237	ra	5	N2	v3	1.590
113	66	rb	0	N3	v3	2.949
114	156	rb	0	N3	v3	3.836
115	259	rb	3	N2	v1	1.610
116	212	ra	0	N2	v2	14.183
117	140	ra	3	N2	v2	5.030
118	47	ra	2	N3	v2	0.800
119	170	rb	3	N2	v2	3.570
120	186	r	0	N3	v3	2.779
121	190	r	1	N3	v1	5.341
122	18	r	2	N3	v3	2.263
123	57	ra	5	N2	v3	1.260
124	17	r	2	N3	v2	2.061
125	187	r	1	N2	v1	7.067
126	126	ra	0	N3	v3	3.836
127	8	r	1	N2	v2	16.930
128	253	rb	2	N2	v1	2.020
129	185	r	0	N3	v2	1.971
130	102	r	1	N3	v3	0.851
131	82	rb	3	N3	v1	1.420
132	81	rb	3	N2	v3	4.250
133	67	rb	1	N2	v1	1.290
134	149	ra	5	N3	v2	0.770
135	32	ra	0	N2	v2	14.245

Orden de ejecución de las pruebas y resultados obtenidos (Continuación).

Orden corrida	Orden estándar	Tipo Rompeola	No. Romp.	Nivel llenado	Velocidad de prueba	Fo [N]
136	118	r	5	N3	v1	3.015
137	143	ra	3	N3	v2	0.820
138	132	ra	1	N3	v3	1.520
139	192	r	1	N3	v3	1.497
140	50	ra	3	N2	v2	4.420
141	260	rb	3	N2	v2	3.530
142	125	ra	0	N3	v2	1.971
143	97	r	1	N2	v1	6.423
144	16	r	2	N3	v1	6.677
145	232	ra	3	N3	v1	1.290
146	37	ra	1	N2	v1	1.270
147	119	r	5	N3	v2	1.408
148	111	r	3	N2	v3	3.853
149	234	ra	3	N3	v3	1.580
150	162	rb	1	N3	v3	0.430
151	176	rb	5	N2	v2	2.260
152	137	ra	2	N3	v2	1.060
153	256	rb	2	N3	v1	7.110
154	145	ra	5	N2	v1	2.520
155	155	rb	0	N3	v2	1.597
156	133	ra	2	N2	v1	3.420
157	150	ra	5	N3	v3	0.900
158	189	r	1	N2	v3	14.658
159	40	ra	1	N3	v1	3.420
160	171	rb	3	N2	v3	3.290
161	134	ra	2	N2	v2	9.760
162	196	r	2	N3	v1	6.200
163	213	ra	0	N2	v3	13.365
164	203	r	3	N3	v2	1.849
165	206	r	5	N2	v2	5.304
166	249	rb	1	N2	v3	4.890
167	251	rb	1	N3	v2	1.680
168	24	r	3	N3	v3	2.014
169	73	rb	2	N2	v1	2.010
170	210	r	5	N3	v3	1.176
171	43	ra	2	N2	v1	3.950
172	266	rb	5	N2	v2	2.240
173	70	rb	1	N3	v1	2.310
174	27	r	5	N2	v3	3.336
175	6	r	0	N3	v3	2.949
176	11	r	1	N3	v2	1.597
177	173	rb	3	N3	v2	0.750
178	148	ra	5	N3	v1	0.740
179	2	r	0	N2	v2	13.878
180	244	rb	0	N3	v1	2.538

Orden de ejecución de las pruebas y resultados obtenidos (Continuación).

Orden corrida	Orden estándar	Tipo Rompeola	No. Romp.	Nivel llenado	Velocidad de prueba	Fo [N]
181	75	rb	2	N2	v3	4.680
182	138	ra	2	N3	v3	1.530
183	180	rb	5	N3	v3	0.970
184	177	rb	5	N2	v3	2.200
185	221	ra	1	N3	v2	0.610
186	4	r	0	N3	v1	2.538
187	264	rb	3	N3	v3	1.220
188	144	ra	3	N3	v3	1.840
189	5	r	0	N3	v2	2.228
190	49	ra	3	N2	v1	2.100
191	71	rb	1	N3	v2	1.340
192	231	ra	3	N2	v3	0.690
193	211	ra	0	N2	v1	3.578
194	96	r	0	N3	v3	3.836
195	56	ra	5	N2	v2	3.700
196	247	rb	1	N2	v1	1.210
197	31	ra	0	N2	v1	4.141
198	39	ra	1	N2	v3	7.050
199	9	r	1	N2	v3	15.738
200	34	ra	0	N3	v1	1.952
201	161	rb	1	N3	v2	1.630
202	270	rb	5	N3	v3	1.100
203	233	ra	3	N3	v2	1.050
204	193	r	2	N2	v1	8.293
205	184	r	0	N3	v1	1.367
206	248	rb	1	N2	v2	4.360
207	95	r	0	N3	v2	1.597
208	1	r	0	N2	v1	4.141
209	107	r	2	N3	v2	2.816
210	207	r	5	N2	v3	3.625
211	64	rb	0	N3	v1	1.367
212	175	rb	5	N2	v1	0.580
213	174	rb	3	N3	v3	2.000
214	252	rb	1	N3	v3	0.390
215	121	ra	0	N2	v1	3.967
216	243	rb	0	N2	v3	13.650
217	28	r	5	N3	v1	3.840
218	25	r	5	N2	v1	4.983
219	115	r	5	N2	v1	4.757
220	61	rb	0	N2	v1	4.141
221	197	r	2	N3	v2	2.192
222	153	rb	0	N2	v3	13.199
223	62	rb	0	N2	v2	14.245
224	241	rb	0	N2	v1	3.967
225	60	ra	5	N3	v3	1.220

Orden de ejecución de las pruebas y resultados obtenidos (Continuación).

Orden corrida	Orden estándar	Tipo Rompeola	No. Romp.	Nivel llenado	Velocidad de prueba	Fo [N]
226	136	ra	2	N3	v1	3.230
227	83	rb	3	N3	v2	0.280
228	68	rb	1	N2	v2	5.430
229	147	ra	5	N2	v3	1.540
230	91	r	0	N2	v1	3.967
231	214	ra	0	N3	v1	2.538
232	22	r	3	N3	v1	5.464
233	19	r	3	N2	v1	7.557
234	152	rb	0	N2	v2	13.878
235	85	rb	5	N2	v1	0.770
236	168	rb	2	N3	v3	0.730
237	222	ra	1	N3	v3	2.260
238	235	ra	5	N2	v1	3.140
239	223	ra	2	N2	v1	2.830
240	124	ra	0	N3	v1	1.367
241	158	rb	1	N2	v2	4.910
242	35	ra	0	N3	v2	2.228
243	215	ra	0	N3	v2	1.597
244	209	r	5	N3	v2	1.313
245	46	ra	2	N3	v1	4.020
246	165	rb	2	N2	v3	4.300
247	169	rb	3	N2	v1	1.720
248	268	rb	5	N3	v1	0.460
249	79	rb	3	N2	v1	1.370
250	135	ra	2	N2	v3	6.740
251	63	rb	0	N2	v3	13.365
252	55	ra	5	N2	v1	3.590
253	74	rb	2	N2	v2	3.560
254	267	rb	5	N2	v3	2.580
255	41	ra	1	N3	v2	1.160
256	141	ra	3	N2	v3	0.750
257	195	r	2	N2	v3	3.194
258	54	ra	3	N3	v3	2.150
259	77	rb	2	N3	v2	0.670
260	254	rb	2	N2	v2	3.560
261	220	ra	1	N3	v1	3.800
262	236	ra	5	N2	v2	3.960
263	269	rb	5	N3	v2	0.640
264	219	ra	1	N2	v3	7.060
265	72	rb	1	N3	v3	0.660
266	250	rb	1	N3	v1	2.170
267	226	ra	2	N3	v1	4.160
268	122	ra	0	N2	v2	13.878
269	172	rb	3	N3	v1	2.260
270	90	rb	5	N3	v3	0.710

Orden de ejecución de las pruebas y resultados obtenidos (Continuación).

Orden corrida	Orden estándar	Tipo Rompeola	No. Romp.	Nivel llenado	Velocidad de prueba	Fo [N]
271	197	ra	1	N3	v2	1.159
272	282	r	1	N1	v3	16.476
273	104	rb	1	N2	v2	4.913
274	252	rb	2	N3	v3	0.967
275	382	rb	2	N2	v1	1.235
276	256	rb	3	N2	v1	1.367
277	169	r	3	N3	v1	5.464
278	369	rb	0	N3	v3	2.779
279	127	rb	5	N1	v1	1.001
280	254	rb	3	N1	v2	7.268
281	271	r	0	N1	v1	2.356
282	274	r	0	N2	v1	4.140
283	315	r	5	N3	v3	1.127
284	160	r	2	N3	v1	6.200
285	277	r	0	N3	v1	2.538
286	336	ra	2	N1	v3	3.656
287	155	r	2	N1	v2	13.811
288	148	r	1	N2	v1	6.423
289	39	r	5	N1	v3	1.671
290	116	rb	2	N3	v2	0.862
291	47	ra	0	N1	v2	8.295
292	123	rb	3	N2	v3	3.292
293	81	ra	3	N3	v3	1.843
294	279	r	0	N3	v3	2.779
295	35	r	3	N3	v2	1.849
296	96	rb	0	N2	v3	13.365
297	265	rb	5	N2	v1	0.773
298	173	r	5	N1	v2	9.825
299	309	r	5	N1	v3	1.291
300	144	r	0	N3	v3	2.949
301	270	rb	5	N3	v3	1.096
302	59	ra	1	N2	v2	6.233
303	131	rb	5	N2	v2	2.262
304	125	rb	3	N3	v2	0.420
305	212	ra	3	N2	v2	4.415
306	232	rb	0	N3	v1	2.538
307	74	ra	3	N1	v2	2.540
308	384	rb	2	N2	v3	4.302
309	92	rb	0	N1	v2	8.295
310	41	r	5	N2	v2	5.304
311	348	ra	3	N2	v3	0.752
312	168	r	3	N2	v3	3.853
313	357	ra	5	N2	v3	1.536
314	351	ra	3	N3	v3	2.148
315	180	r	5	N3	v3	1.176

Orden de ejecución de las pruebas y resultados obtenidos (Continuación).

Orden corrida	Orden estándar	Tipo Rompeola	No. Romp.	Nivel llenado	Velocidad de prueba	Fo [N]
316	181	ra	0	N1	v1	3.448
317	177	r	5	N2	v3	3.625
318	214	ra	3	N3	v1	1.290
319	396	rb	3	N3	v3	1.220
320	106	rb	1	N3	v1	2.167
321	278	r	0	N3	v2	2.228
322	142	r	0	N3	v1	1.367
323	51	ra	0	N2	v3	13.365
324	319	ra	0	N2	v1	3.967
325	308	r	5	N1	v2	9.929
326	133	rb	5	N3	v1	0.429
327	19	r	2	N1	v1	4.789
328	389	rb	3	N1	v2	7.268
329	175	r	5	N2	v1	4.757
330	146	r	1	N1	v2	12.915
331	124	rb	3	N3	v1	1.424
332	360	ra	5	N3	v3	1.215
333	352	ra	5	N1	v1	0.813
334	247	rb	2	N2	v1	2.017
335	172	r	5	N1	v1	4.598
336	97	rb	0	N3	v1	1.367
337	65	ra	2	N1	v2	3.151
338	219	ra	5	N1	v3	2.069
339	388	rb	3	N1	v1	7.268
340	344	ra	3	N1	v2	2.445
341	195	ra	1	N2	v3	7.059
342	28	r	3	N1	v1	4.816
343	280	r	1	N1	v1	4.919
344	110	rb	2	N1	v2	6.235
345	128	rb	5	N1	v2	4.630
346	401	rb	5	N2	v2	2.237
347	286	r	1	N3	v1	6.144
348	403	rb	5	N3	v1	0.458
349	380	rb	2	N1	v2	6.113
350	306	r	3	N3	v3	2.013
351	342	ra	2	N3	v3	1.532
352	26	r	2	N3	v2	2.816
353	387	rb	2	N3	v3	0.726
354	137	r	0	N1	v2	10.821
355	302	r	3	N2	v2	11.948
356	259	rb	3	N3	v1	2.258
357	12	r	1	N1	v3	16.324
358	193	ra	1	N2	v1	1.273
359	73	ra	3	N1	v1	1.254
360	192	ra	1	N1	v3	6.504

Orden de ejecución de las pruebas y resultados obtenidos (Continuación).

Orden corrida	Orden estándar	Tipo Rompeola	No. Romp.	Nivel llenado	Velocidad de prueba	Fo [N]
361	4	r	0	N2	v1	3.967
362	182	ra	0	N1	v2	10.821
363	115	rb	2	N3	v1	7.109
364	163	r	3	N1	v1	4.682
365	112	rb	2	N2	v1	2.008
366	230	rb	0	N2	v2	13.878
367	56	ra	1	N1	v2	2.501
368	10	r	1	N1	v1	3.751
369	174	r	5	N1	v3	2.684
370	235	rb	1	N1	v1	7.268
371	337	ra	2	N2	v1	2.827
372	395	rb	3	N3	v2	0.753
373	149	r	1	N2	v2	16.930
374	66	ra	2	N1	v3	3.352
375	85	ra	5	N2	v1	3.589
376	143	r	0	N3	v2	1.597
377	61	ra	1	N3	v1	3.798
378	354	ra	5	N1	v3	1.696
379	9	r	0	N3	v3	3.836
380	166	r	3	N2	v1	7.557
381	151	r	1	N3	v1	5.341
382	405	rb	5	N3	v3	0.714
383	64	ra	2	N1	v1	1.411
384	99	rb	0	N3	v3	2.949
385	157	r	2	N2	v1	6.833
386	244	rb	2	N1	v1	7.268
387	21	r	2	N1	v3	18.241
388	261	rb	3	N3	v3	2.003
389	292	r	2	N2	v1	8.293
390	362	rb	0	N1	v2	10.821
391	296	r	2	N3	v2	2.192
392	208	ra	3	N1	v1	1.587
393	251	rb	2	N3	v2	0.671
394	27	r	2	N3	v3	2.263
395	185	ra	0	N2	v2	13.878
396	20	r	2	N1	v2	13.771
397	310	r	5	N2	v1	4.799
398	1	r	0	N1	v1	3.448
399	44	r	5	N3	v2	1.313
400	234	rb	0	N3	v3	3.836
401	318	ra	0	N1	v3	13.583
402	236	rb	1	N1	v2	7.442
403	260	rb	3	N3	v2	0.280
404	147	r	1	N1	v3	16.913
405	335	ra	2	N1	v2	2.884

ANEXO VII

Comparaciones entre interacciones de tercer y cuarto orden.

T romp*No. romp*Nivel de llenado		
ra 3 N1	Comparado contra	ra 3 N2, ra 5 N1, ra 5 N2, rb 0 N3, rb 2 N2, rb 2 N3, rb 3 N2, rb 5 N2
ra 3 N2	Comparado contra	ra 5 N2, rb 0 N3, rb 2 N2, rb 2 N3, rb 3 N2, rb 5 N2
ra 3 N3	Comparado contra	ra 5 N1, ra 5 N3, rb 1 N3, rb 3 N3, rb 5 N2, rb 5 N3
ra 5 N1	Comparado contra	ra 5 N3, rb 0 N3, rb 1 N3, rb 3 N3, rb 5 N2, rb 5 N3
ra 5 N2	Comparado contra	rb 0 N3, rb 1 N2, rb 2 N2, rb 2 N3, rb 3 N2
ra 5 N3	Comparado contra	rb 1 N3, rb 3 N3, rb 5 N3
rb 0 N1	Comparado contra	rb 1 N1
rb 0 N3	Comparado contra	rb 1 N3, rb 2 N3, rb 3 N2, rb 5 N2
rb 1 N2	Comparado contra	rb 2 N2, rb 3 N2, rb 5 N1
rb 1 N3	Comparado contra	rb 3 N3, rb 5 N2, rb 5 N3
rb 2 N1	Comparado contra	rb 3 N1
rb 2 N2	Comparado contra	rb 2 N3, rb 3 N2
rb 2 N3	Comparado contra	rb 3 N2, rb 5 N2
rb 3 N3	Comparado contra	rb 5 N2, rb 5 N3
T romp*No. romp*Velocidad		
r 0 V1	Comparado contra	r 3 V3, r 5 V3, ra 0 V1, ra 1 V1, ra 1 V2, ra 2 V1, ra 3 V2, ra 5 V2, rb 0 V1, rb 1 V1, rb 2 V2, rb 3 V1, rb 3 V2, rb 5 V2, rb 5 V3
r 0 V2	Comparado contra	r 2 V3, r 3 V2, ra 0 V2, rb 0 V2
r 0 V3	Comparado contra	r 1 V3, r 2 V2, ra 0 V3, rb 0 V3
r 1 V1	Comparado contra	r 2 V1, r 3 V1, r 5 V2, ra 1 V3, rb 1 V3, rb 2 V1
r 1 V2	Comparado contra	r 1 V3, r 2 V2, ra 0 V3
r 1 V3	Comparado contra	r 2 V2
r 2 V1	Comparado contra	r 3 V1, r 5 V2
r 2 V2	Comparado contra	ra 0 V3
r 2 V3	Comparado contra	ra 0 V2, rb 0 V2
r 3 V1	Comparado contra	r 5 V2, ra 1 V3, rb 1 V3, rb 2 V1
r 3 V2	Comparado contra	ra 0 V2, rb 0 V2
r 3 V3	Comparado contra	r 5 V3, ra 0 V1, ra 1 V1, ra 1 V2, ra 2 V1, ra 3 V2, ra 3 V3, ra 5 V2, rb 0 V1, rb 2 V2, rb 3 V1, rb 5 V2, rb 5 V3
r 5 V1	Comparado contra	ra 1 V2, ra 1 V3, ra 2 V2, ra 2 V3, rb 1 V1, rb 1 V2, rb 2 V2, rb 2 V3, rb 3 V1, rb 3 V2, rb 3 V3, rb 5 V3
r 5 V2	Comparado contra	ra 1 V3, ra 2 V2, rb 1 V2, rb 1 V3, rb 2 V1, rb 2 V3
r 5 V3	Comparado contra	ra 0 V1, ra 1 V1, ra 2 V1, ra 3 V1, ra 3 V2, ra 3 V3, ra 5 V1, ra 5 V2, ra 5 V3, rb 0 V1, rb 5 V2
ra 0 V1	Comparado contra	ra 1 V1, ra 1 V2, ra 2 V1, ra 3 V2, ra 5 V2, rb 0 V1, rb 1 V1, rb 2 V2, rb 3 V1, rb 3 V2, rb 5 V2, rb 5 V3
ra 0 V2	Comparado contra	rb 0 V2
ra 0 V3	Comparado contra	rb 0 V3
ra 1 V1	Comparado contra	ra 2 V1, ra 3 V1, ra 3 V2, ra 3 V3, ra 5 V1, ra 5 V2, ra 5 V3, rb 0 V1, rb 5 V2
ra 1 V2	Comparado contra	ra 2 V1, ra 2 V3, ra 3 V2, rb 0 V1, rb 1 V1, rb 2 V2, rb 3 V1, rb 3 V2, rb 3 V3, rb 5 V2, rb 5 V3
ra 1 V3	Comparado contra	ra 2 V2, ra 2 V3, rb 1 V2, rb 1 V3, rb 2 V1, rb 2 V3, rb 3 V3
ra 2 V1	Comparado contra	ra 3 V2, ra 3 V3, ra 5 V2, rb 0 V1, rb 1 V1, rb 2 V2, rb 3 V1, rb 5 V2, rb 5 V3
ra 2 V2	Comparado contra	ra 2 V3, rb 1 V2, rb 1 V3, rb 2 V1, rb 2 V3, rb 3 V2, rb 3 V3
ra 2 V3	Comparado contra	rb 1 V1, rb 1 V2, rb 2 V2, rb 2 V3, rb 3 V1, rb 3 V2, rb 3 V3, rb 5 V3
ra 3 V1	Comparado contra	ra 3 V3, ra 5 V1, ra 5 V2, ra 5 V3, ra 5 V1
ra 3 V2	Comparado contra	ra 3 V3, ra 5 V2, rb 0 V1, rb 1 V1, rb 2 V2, rb 3 V1, rb 5 V2, rb 5 V3

Comparaciones entre interacciones de tercer y cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Velocidad		
ra 3 V3	Comparado contra	ra 5 V1, ra 5 V2, ra 5 V3, rb 5 V2
ra 5 V1	Comparado contra	ra 5 V2, ra 5 V3, rb 5 V1
ra 5 V2	Comparado contra	rb 0 V1, rb 5 V2
ra 5 V3	Comparado contra	rb 5 V1
rb 0V1	Comparado contra	rb 1 V1, rb 2 V2, rb 3 V1, rb 3 V2, rb 5 V2, rb 5 V3
rb 1 V1	Comparado contra	rb 1 V2, rb 2 V2, rb 2 V3, rb 3 V1, rb 3 V2, rb 3 V3, rb 5 V3
rb 1 V2	Comparado contra	rb 1 V3, rb 2 V1, rb 2 V3, rb 3 V2, rb 3 V3
rb 1 V3	Comparado contra	rb 2 V1, rb 2 V3
rb 2 V1	Comparado contra	rb 2 V3
rb 2 V2	Comparado contra	rb 3 V1, rb 3 V2, rb 3 V3, rb 5 V2, rb 5 V3
rb 2 V3	Comparado contra	rb 3 V2, rb 3 V3
rb 3 V1	Comparado contra	rb 3 V2, rb 3 V3, rb 5 V3
rb 3 V2	Comparado contra	rb 3 V3, rb 5 V3
rb 3 V3	Comparado contra	rb 5 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden.

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
r 0 N1 V1	Comparado contra	r 0 N2 V1, r 0 N3 V1, r 0 N3 V2, r 0 N3 V3, r 1 N1 V1, r 1 N3 V2, r 1 N3 V3, r 2 N1 V1, r 2 N2 V3, r 2 N3 V2, r 2 N3 V3, r 3 N1 V1, r 3 N1 V3, r 3 N2 V3, r 3 N3 V2, r 3 N3 V3, r 5 N1 V1, r 5 N1 V3, r 5 N2 V1, r 5 N2 V2, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, r 5 N3 V3, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V1, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
r 0 N1 V2	Comparado contra	r 5 N1 V2, ra 0 N1 V2, ra 2 N2 V2, rb 0 N1 V2, rb 1 N1 V3, rb 2 N1 V3
r 0 N1 V3	Comparado contra	r 0 N2 V2, r 0 N2 V3, r 1 N1 V2, r 1 N2 V3, r 2 N1 V2, r 2 N2 V2, r 3 N1 V2, r 3 N2 V2, ra 0 N1 V3, ra 0 N2 V2, ra 0 N2 V3, rb 0 N1 V3, rb 0 N2 V2, rb 0 N2 V3
r 0 N2 V1	Comparado contra	r 0 N3 V3, r 1 N1 V1, r 2 N1 V1, r 2 N2 V3, r 2 N3 V2, r 2 N3 V3, r 3 N1 V1, r 3 N1 V3, r 3 N3 V1, r 3 N3 V3, r 5 N1 V1, r 5 N2 V1, r 5 N2 V2, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V2, ra 1 N3 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V2, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
r 0 N2 V2	Comparado contra	r 0 N2 V3, r 1 N1 V2, r 1 N2 V3, r 2 N1 V2, r 2 N2 V2, r 3 N1 V2, r 3 N2 V2, ra 0 N1 V3, ra 0 N2 V2, ra 0 N2 V3, rb 0 N1 V3, rb 0 N2 V2, rb 0 N2 V3
r 0 N2 V3	Comparado contra	r 1 N1 V2, r 1 N2 V3, r 2 N1 V2, r 3 N1 V2, r 3 N2 V2, ra 0 N1 V3, ra 0 N2 V2, ra 0 N2 V3, rb 0 N1 V3, rb 0 N2 V2, rb 0 N2 V3
r 0 N3 V1	Comparado contra	r 0 N3 V2, r 0 N3 V3, r 1 N3 V2, r 1 N3 V3, r 2 N3 V2, r 2 N3 V3, r 3 N1 V3, r 3 N2 V3, r 3 N3 V2, r 3 N3 V3, r 5 N1 V3, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, r 5 N3 V2, r 5 N3 V3, ra 0 N1 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
r 0 N3 V2	Comparado contra	r 0 N3 V3, r 1 N3 V2, r 1 N3 V3, r 2 N3 V2, r 2 N3 V3, r 3 N1 V3, r 3 N2 V3, r 3 N3 V2, r 3 N3 V3, r 5 N1 V3, r 5 N3 V1, r 5 N3 V2, r 5 N3 V3, ra 0 N1 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
r 0 N3 V3	Comparado contra	r 1 N1 V1, r 1 N3 V2, r 1 N3 V3, r 2 N1 V1, r 2 N2 V3, r 2 N3 V2, r 2 N3 V3, r 3 N1 V1, r 3 N1 V3, r 3 N2 V3, r 3 N3 V2, r 3 N3 V3, r 5 N1 V1, r 5 N1 V3, r 5 N2 V1, r 5 N2 V2, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V1, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
r 1 N1 V1	Comparado contra	r 1 N3 V1, r 2 N1 V1, r 2 N2 V3, r 3 N1 V1, r 3 N1 V3, r 3 N3 V1, r 5 N1 V1, r 5 N2 V1, r 5 N2 V2, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V2, ra 1 N1 V3, ra 1 N3 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V2, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2
r 1 N1 V2	Comparado contra	r 1 N2 V3, r 2 N1 V2, r 3 N1 V2, r 3 N2 V2, ra 0 N1 V3, ra 0 N2 V2, ra 0 N2 V3, rb 0 N1 V3, rb 0 N2 V2, rb 0 N2 V3
r 1 N1 V3	Comparado contra	r 1 N2 V2, r 1 N2 V3, r 2 N1 V3, r 2 N2 V2
r 1 N2 V1	Comparado contra	r 1 N3 V1, r 2 N2 V1, r 3 N3 V1, r 3 N2 V1, r 3 N3 V1, ra 1 N1 V3, ra 1 N2 V2, ra 1 N2 V3, ra 2 N2 V3, rb 1 N1 V1, rb 1 N1 V2, rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N1 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
r 1 N2 V2	Comparado contra	r 2 N1 V3, r 2 N2 V2
r 1 N2 V3	Comparado contra	r 2 N1 V2, r 2 N2 V2, ra 0 N1 V3, ra 0 N2 V2, ra 0 N2 V3, rb 0 N1 V3, rb 0 N2 V2, rb 0 N2 V3
r 1 N3 V1	Comparado contra	r 2 N1 V1, r 2 N2 V1, r 2 N2 V3, r 2 N3 V1, r 3 N1 V1, r 3 N2 V1, r 3 N3 V1, r 5 N1 V1, r 5 N2 V1, r 5 N2 V2, ra 1 N1 V3, ra 1 N2 V2, ra 1 N2 V3, ra 2 N2 V3, ra 3 N2 V2, rb 1 N1 V1, rb 1 N1 V2, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N1 V3
r 1 N3 V2	Comparado contra	r 1 N3 V3, r 2 N3 V2, r 2 N3 V3, r 3 N2 V3, r 3 N3 V2, r 3 N3 V3, r 5 N1 V3, r 5 N3 V1, r 5 N3 V2, r 5 N3 V3, ra 0 N1 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
r 1 N3 V3	Comparado contra	r 2 N3 V2, r 2 N3 V3, r 3 N1 V3, r 3 N2 V3, r 3 N3 V2, r 3 N3 V3, r 5 N1 V3, r 5 N3 V1, r 5 N3 V2, r 5 N3 V3, ra 0 N1 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
r 2 N1 V1	Comparado contra	r 2 N2 V3, r 3 N1 V1, r 3 N1 V3, r 3 N3 V1, r 5 N1 V1, r 5 N2 V1, r 5 N2 V2, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V3, ra 1 N2 V2, ra 1 N3 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V2, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 2 N1 V2, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2
r 2 N1 V2	Comparado contra	r 2 N2 V1, r3 N1V2, r 3 N2 V2, ra 0 N1 V3, ra 0 N2 V2, ra 0 N2 V3, rb 0 N1 V3, rb 0 n2 v2, rb 0 N2 V3
r 2 N2 V1	Comparado contra	R 2 N3 V1, r 3 N2 V1, ra 1 N1 V3, ra 1 N2 V2, ra 1 N2 V3, ra 2 N2 V3, rb 1 N1 V1, rb 1 N1 V2, rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N1 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
r 2 N2 V2	Comparado contra	ra 0 N1 V3, ra 0 N2 V2, rb 0 N1 V3, rb 0 N2 V2
r 2 N2 V3	Comparado contra	R 2 N3 V2, r 3 N1 V1, r 3 N1 V3, r 3 N3 V1, r 3 N3 V3, r 5 N1 V1, r 5 N2 V1, r 5 N2 V2, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V2, ra 1 N3 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V2, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V3
r 2 N3 V1	Comparado contra	R 3 N2 V1, r 3 N3 V1, ra 1 N1 V3, ra 1 N2 V2, ra 1 N2 V3, ra 2 N2 V3, rb 1 N1 V1, rb 1 N1 V2, rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N1 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
r 2 N3 V2	Comparado contra	R 2 N3 V3, r 3 N1 V3, r 3 N2 V3, r 3 N3 V2, r 3 N3 V3, r 5 N1 V3, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, r 5 N3 V2, r 5 N3 V3, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
r 2 N3 V3	Comparado contra	R 3 N1 V3, r 3 N2 V3, r 3 N3 V2, r 3 N3 V3, r 5 N1 V3, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, r 5 N3 V2, r 5 N3 V3, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
r 3 N1 V1	Comparado contra	r 3 N1 V3, r 3 N3 V1, r 5 N1 V1, r 5 N2 V1, r 5 N2 V2, r 5 N2 V3, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V3, ra 1 N2 V2, ra 1 N3 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N2 V3, ra 2 N3 V1, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V2, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 2 N1 V2, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2
r 3 N1 V2	Comparado contra	r 3 N2 V2, ra 0 N1 V3, ra 0 N2 V2, ra 0 N2 V3, rb 0 N1 V3, rb 0 N2 V2, rb 0 N2 V3, rb 1 N1 V3
r 3 N1 V3	Comparado contra	r 3 N2 V3, r 3 N3 V2, r 3 N3 V3, r 5 N1 V1, r 5 N1 V3, r 5 N2 V1, r 5 N2 V2, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V2, ra 1 N3 V1, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
r 3 N2 V1	Comparado contra	r 3 N3 V1, ra 1 N1 V3, ra 1 N2 V2, ra 1 N2 V3, ra 2 N2 V3, rb 1 N1 V1, rb 1 N1 V2, rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N1 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
r 3 N2 V2	Comparado contra	ra 0 N1 V3, ra 0 N2 V2, ra 0 N2 V3, rb 0 N1 V3, rb 0 N2 V2, rb 0 N2 V3, rb 1 N1 V3
r 3 N2 V3	Comparado contra	r 3 N3 V2, r 3 N3 V3, r 5 N1 V3, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, r 5 N3 V2, r 5 N3 V3, ra 0 N1 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
r 3 N3 V1	Comparado contra	r 5 N1 V1, r 5 N2 V1, r 5 N2 V2, ra 0 N2 V1, ra 1 N1 V3, ra 1 N2 V2, ra 1 N2 V3, ra 1 N3 V1, ra 2 N2 V3, ra 3 N2 V2, rb 0 N2 V1, rb 1 N1 V1, rb 1 N1 V2, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N1 V3
r 3 N3 V2	Comparado contra	r 3 N3 V3, r 5 N1 V3, r 5 N3 V1, ra 0 N1 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
r 3 N3 V3	Comparado contra	r 5 N1 V3, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, r 5 N3 V2, r 5 N3 V3, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
r 5 N1 V1	Comparado contra	r 5 N2 V1, r 5 N2 V2, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V2, ra 1 N3 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V2, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2
r 5 N1 V2	Comparado contra	ra 0 N1 V2, ra 2 N2 V2, rb 0 N1 V2, rb 1 N1 V3
r 5 N1 V3	Comparado contra	r 5 N3 V1, r 5 N3 V2, r 5 N3 V3, ra 0 N1 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
r 5 N2 V1	Comparado contra	r 5 N2 V2, r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V3, ra 1 N2 V2, ra 1 N3 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V2, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 2 N1 V2, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2
r 5 N2 V2	Comparado contra	r 5 N2 V3, r 5 N3 V1, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V3, ra 1 N2 V2, ra 1 N3 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V2, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 2 N1 V2, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2
r 5 N2 V3	Comparado contra	r 5 N3 V1, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V2, ra 1 N3 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 5 N1 V2, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
r 5 N3 V1	Comparado contra	r 5 N3 V2, ra 0 N1 V1, ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V1, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N2 V1, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
r 5 N3 V2	Comparado contra	r 5 N3 V3, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
r 5 N3 V3	Comparado contra	ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
ra 0 N1 V1	Comparado contra	ra 0 N2 V1, ra 0 N3 V1, ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V1, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
ra 0 N1 V2	Comparado contra	ra 2 N2 V2, rb 0 N1 V2, rb 1 N1 V3, rb 2 N1 V3
ra 0 N1 V3	Comparado contra	ra 0 N2 V2, ra 0 N2 V3, rb 0 N1 V3, rb 0 N2 V2, rb 0 N2 V3
ra 0 N2 V1	Comparado contra	ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V2, ra 1 N3 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V2, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3,
ra 0 N2 V2	Comparado contra	ra 0 N2 V3, rb 0 N1 V3, rb 0 N2 V2, rb 0 N2 V3
ra 0 N2 V3	Comparado contra	rb 0 N1 V3, rb 0 N2 V2, rb 0 N2 V3
ra 0 N3 V1	Comparado contra	ra 0 N3 V2, ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 0 N3 V2	Comparado contra	ra 0 N3 V3, ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 0 N3 V3	Comparado contra	ra 1 N1 V1, ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V1, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
ra 1 N1 V1	Comparado contra	ra 1 N1 V2, ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 1 N1 V2	Comparado contra	ra 1 N2 V1, ra 1 N3 V1, ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
ra 1 N1 V3	Comparado contra	ra 1 N2 V2, ra 1 N2 V3, ra 2 N2 V3, ra 3 N2 V2, rb 1 N1 V1, rb 1 N1 V2, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N1 V3
ra 1 N2 V1	Comparado contra	ra 1 N3 V2, ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N1 V2, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 1 N2 V2	Comparado contra	ra 1 N2 V3, ra 2 N2 V3, ra 3 N2 V2, rb 1 N1 V1, rb 1 N1 V2, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N1 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N1 V3
ra 1 N2 V3	Comparado contra	ra 2 N2 V3, rb 1 N1 V1, rb 1 N1 V2, rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N1 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
ra 1 N3 V1	Comparado contra	ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V2, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
ra 1 N3 V2	Comparado contra	ra 1 N3 V3, ra 2 N1 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 1 N3 V3	Comparado contra	ra 2 N1 V1, ra 2 N1 V2, ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
ra 2 N1 V1	Comparado contra	ra 2 N3 V2, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 2 N1 V2	Comparado contra	ra 2 N1 V3, ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 3 N2 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
ra 2 N1 V3	Comparado contra	ra 2 N2 V1, ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 3 N2 V3, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
ra 2 N2 V1	Comparado contra	ra 2 N3 V1, ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
ra 2 N2 V2	Comparado contra	rb 0 N1 V2, rb 1 N1 V3, rb 2 N1 V3
ra 2 N2 V3	Comparado contra	rb 1 N1 V1, rb 1 N1 V2, rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N1 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
ra 2 N3 V1	Comparado contra	ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 5 N1 V2, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
ra 2 N3 V2	Comparado contra	ra 2 N3 V3, ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 2 N3 V3	Comparado contra	ra 3 N1 V1, ra 3 N1 V2, ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
ra 3 N1 V1	Comparado contra	ra 3 N1 V2, ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
a 3 N1 V2	Comparado contra	ra 3 N1 V3, ra 3 N2 V1, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V3
ra 3 N1 V3	Comparado contra	ra 3 N2 V1, ra 3 N2 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
ra 3 N2 V1	Comparado contra	ra 3 N2 V3, ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 3 N2 V2	Comparado contra	ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 2 N1 V2, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2
ra 3 N2 V3	Comparado contra	ra 3 N3 V1, ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N2 V2, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 3 N3 V1	Comparado contra	ra 3 N3 V2, ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 3 N3 V2	Comparado contra	ra 3 N3 V3, ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 3 N3 V3	Comparado contra	ra 5 N1 V1, ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
ra 5 N1 V1	Comparado contra	ra 5 N1 V2, ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 5 N1 V2	Comparado contra	ra 5 N1 V3, ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 5 N1 V3	Comparado contra	ra 5 N2 V1, ra 5 N2 V3, ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 5 N2 V1	Comparado contra	ra 5 N2 V2, ra 5 N2 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V3, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
ra 5 N2 V2	Comparado contra	rb 0 N1 V1, rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
ra 5 N2 V3	Comparado contra	ra 5 N3 V1, ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N1 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 5 N3 V1	Comparado contra	ra 5 N3 V2, ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 5 N3 V2	Comparado contra	ra 5 N3 V3, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
ra 5 N3 V3	Comparado contra	rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
rb 0 N1 V1	Comparado contra	rb 0 N2 V1, rb 0 N3 V1, rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
rb 0 N1 V2	Comparado contra	rb 1 N1 V3, rb 2 N1 V3
rb 0 N1 V3	Comparado contra	rb 0 N2 V2, rb 0 N2 V3
rb 0 N2 V1	Comparado contra	rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
rb 0 N2 V2	Comparado contra	rb 0 N2 V3
rb 0 N3 V1	Comparado contra	rb 0 N3 V2, rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 0 N3 V2	Comparado contra	rb 0 N3 V3, rb 1 N2 V1, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 0 N3 V3	Comparado contra	rb 1 N2 V2, rb 1 N2 V3, rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
rb 1 N1 V1	Comparado contra	rb 1 N1 V2, rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N1 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
rb 1 N1 V2	Comparado contra	rb 2 N1 V1, rb 2 N1 V2, rb 2 N1 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
rb 1 N2 V1	Comparado contra	rb 1 N3 V1, rb 1 N3 V2, rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 1 N2 V2	Comparado contra	rb 1 N2 V3, rb 2 N1 V2, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2
rb 1 N2 V3	Comparado contra	rb 2 N1 V2, rb 2 N2 V2, rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 5 N1 V2
rb 1 N3 V1	Comparado contra	rb 1 N3 V2, rb 2 N2 V1, rb 2 N2 V2, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3

Comparaciones entre interacciones de cuarto orden (Continuación).

T romp*No. romp*Nivel de llenado*Velocidad		
rb 1 N3 V2	Comparado contra	rb 1 N3 V3, rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 1 N3 V3	Comparado contra	rb 2 N2 V1, rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 2 N1 V1	Comparado contra	rb 2 N1 V2, rb 2 N1 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
rb 2 N1 V2	Comparado contra	rb 2 N2 V3, rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N1 V3
rb 2 N1 V3	Comparado contra	rb 2 N3 V1, rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
rb 2 N2 V1	Comparado contra	rb 2 N3 V2, rb 2 N3 V3, rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 2 N2 V2	Comparado contra	rb 2 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
rb 2 N2 V3	Comparado contra	rb 3 N2 V3, rb 3 N2 V2, rb 5 N1 V2
rb 2 N3 V1	Comparado contra	rb 3 N1 V1, rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N1 V3
rb 2 N3 V2	Comparado contra	rb 2 N3 V3, rb 3 N1 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 2 N3 V3	Comparado contra	rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 3 N1 V1	Comparado contra	rb 3 N1 V2, rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
rb 3 N1 V2	Comparado contra	rb 3 N1 V3, rb 5 N1 V3
rb 3 N1 V3	Comparado contra	rb 5 N1 V3
rb 3 N2 V1	Comparado contra	rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 3 N2 V2	Comparado contra	rb 3 N2 V1, rb 3 N3 V1, rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 3 N2 V3	Comparado contra	rb 3 N2 V3, rb 3 N3 V1, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N1 V2, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3
rb 3 N3 V1	Comparado contra	rb 3 N3 V2, rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 3 N3 V2	Comparado contra	rb 3 N3 V3, rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 3 N3 V3	Comparado contra	rb 5 N1 V1, rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 5 N1 V1	Comparado contra	rb 5 N2 V1, rb 5 N2 V2, rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 5 N2 V1	Comparado contra	rb 5 N2 V2, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 5 N2 V2	Comparado contra	rb 5 N2 V3, rb 5 N3 V1, rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 5 N2 V3	Comparado contra	rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 5 N3 V1	Comparado contra	rb 5 N3 V2, rb 5 N3 V3
rb 5 N3 V2	Comparado contra	rb 5 N3 V3



‡ Certificación ISO 9001:2000 según documento No 0109-2007-AQ-MEX-EMA,
vigente hasta el 24 de octubre de 2009 (www.imt.mx)

CIUDAD DE MÉXICO

Av Nuevo León 210, piso 2
Col Hipódromo Condesa
06100, México, D F
tel (55) 5265 3190
fax (55) 5265 3190 ext 4711

SANFANDILA

km 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx