

# Estudio de confiabilidad operacional como soporte al mantenimiento aeronáutico en Cuba

Armando Díaz Concepción<sup>A</sup>, Julio Abril Romero García<sup>B</sup>,  
Jesús Cabrera Gómez<sup>A</sup>, Néstor Viego Ariet<sup>B</sup>,

<sup>A</sup> Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento.

Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (ISPJAE).

Campus CUJAE, Marianao, La Habana, Cuba.

<sup>B</sup> Empresa de Aviación ECA. Corporación de la Aviación Cubana (CACSA).

Boyeros, La Habana, Cuba

adiaz@ceim.cujae.edu.cu

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se caracteriza la actividad de mantenimiento en una empresa de aviación en Cuba. Se evalúan los indicadores de cada elemento integrante de la Confiabilidad Operacional para el sistema de acondicionamiento de aire de las aeronaves IL – 96 – 300, mediante el uso de análisis de Weibull, modelo de Ajuste a la Distribución y cálculo de Disponibilidad, como soporte al mejoramiento del proceso de toma de decisiones. Los resultados del estudio demuestran la baja confiabilidad de este sistema y sus agregados y que las bases de datos no tienen la información para la aplicación de todas las herramientas y modelos.

## **PALABRAS CLAVE**

Mantenimiento, industria aeronáutica, confiabilidad operacional, toma de decisiones.

## **ABSTRACT**

In this work the maintenance activity at Cuba's airline is characterized. All factors integrating each element of Operational Reliability for Environmental Control System in aircraft type IL – 96 – 300 are evaluated using Weibull analysis, Adjust of Distribution model and Availability calculations, for supporting decision-making process. The results of study show the low reliability of this system and its components, and also, data bases don't have necessary information to apply all the tools and models.

## **KEYWORDS**

Maintenance, aeronautical industry, operational reliability, decision making.

## **INTRODUCCIÓN**

El Mantenimiento ha variado más que cualquier otra disciplina durante los últimos años, respondiendo a expectativas cambiantes y a una óptica de

nuevos métodos, diseños cada vez más complejos y responsabilidades enfocadas al negocio y la satisfacción de los clientes como meta fundamental. Se requiere por tanto, un conjunto de estrategias, políticas y actitudes sistemáticas para asegurar que un sistema o componente pueda ser operado cuando se necesita. El Mantenimiento, al asegurar un menor índice de fallo, mayor explotación y elevada confiabilidad produce un bien real, que puede resumirse en capacidad de producir con calidad, seguridad y rentabilidad.<sup>1,4</sup>

Dentro de la filosofía de la confiabilidad, un sistema integrado de Confiabilidad Operacional es la unión de metodologías de inspección y análisis de mantenimiento con el cual se generan los mejores planes de inspección y mantenimiento, mediante una perspectiva que enlaza una serie de elementos técnicos, de negocios y filosóficos en una estrategia global, cuyo objetivo es lograr una serie de efectos positivos que ayuden a posicionar a cualquier empresa en la categoría de Clase Mundial.<sup>5</sup>

En un sistema de Confiabilidad Operacional es necesario el análisis de sus cuatro parámetros operativos: Confiabilidad Humana, Confiabilidad de los Procesos, Mantenibilidad y Confiabilidad de los Equipos; sobre los cuales se debe actuar si se quiere un mejoramiento continuo y de largo plazo.<sup>6</sup>

En la figura 1 se muestran los elementos integrantes de la Confiabilidad Operacional.

La empresa de aviación en la que se realiza el estudio, es un operador aéreo donde el proceso de mantenimiento comprende todo el trabajo que se realiza para conservar la aeronave en condiciones de aeronavegabilidad, teniendo gran incidencia en la seguridad de las operaciones aéreas, por lo que

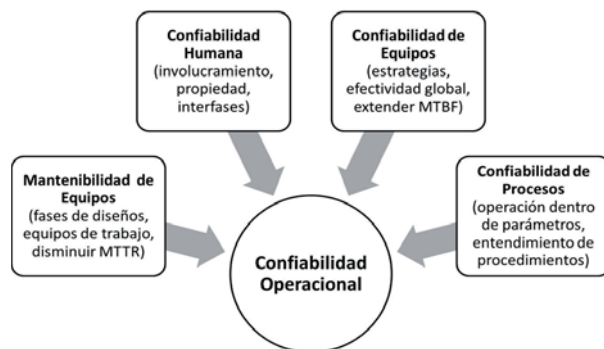


Fig. 1. Elementos integrantes de la Confiabilidad Operacional.

es una alta prioridad para la máxima dirección de la organización.<sup>7</sup>

La empresa tiene diseñado un Programa de Confiabilidad para mejorar el mantenimiento de las aeronaves y controlar sus costos, con el objetivo de cumplir los requerimientos propios de sus operaciones, el cual es desarrollado, tomando en consideración las recomendaciones de la Dirección de Ingeniería y Aeronavegabilidad (DIA) del Instituto de la Aeronáutica Civil de Cuba (IACC) y los Fabricantes, así como la experiencia de explotación y el nivel de utilización de las aeronaves, siguiendo el orden que se establece en las Regulaciones Aeronáuticas Cubanas (RAC).

De acuerdo con lo anterior, el presente trabajo se orienta a estudiar el mejoramiento del programa de mantenimiento de las aeronaves basado en un análisis de Confiabilidad Operacional, para facilitar la toma de decisiones y optimizar la gestión del mantenimiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio basado en los indicadores de Confiabilidad Operacional se realiza para el sistema de acondicionamiento de aire (ECS) de las aeronaves tipo IL – 96 – 300, teniendo en cuenta que durante el período de explotación de estas aeronaves, este sistema ha venido presentando un incremento en el número de fallos, lo que ha provocado un grupo de consecuencias operacionales y por tanto, una pérdida en la calidad de los servicios que prestan.

El análisis de los agregados del sistema se basa en los reportes de tripulación y mantenimiento e incluye remociones, fallas, chequeos funcionales e inspecciones, demoras y cancelaciones técnicas, interrupciones de vuelo e incidentes técnicos. La información es recopilada y extraída de programas especializados para el almacenamiento de esta información y que sirven como fuente primaria para el procesamiento y elaboración de informes que permitan establecer criterios objetivos de evaluación para tomar acciones de mantenimiento.<sup>6</sup>

En la tabla I se precisa una relación de los activos con mayor cantidad de incidencias en los fallos del ECS y su influencia cuantitativa en esta contribución.

Tabla I. Relación de fallos por agregados respecto al total del ECS.

Agregados	%
Válvula 3449	39.3
Válvula 3409	29.9
Válvula 3408	8.4
Válvula 3415	8.4
Válvula 3173A	7.5
Turbina de enfriamiento (6671)	6.5

Partiendo de las propuestas de diferentes autores y haciendo un análisis de la influencia de los parámetros y de las consultas a especialistas y personal técnico experimentados en la materia, se obtiene información actualizada para estimar los cuatro elementos de la Confiabilidad Operacional y seleccionar modelos matemáticos para ser estudiados y evaluar su impacto en el binomio operación – mantenimiento, mediante herramientas y el procesamiento estadístico de los datos históricos se evalúa el comportamiento del activo a fin de poder determinar el nivel de operabilidad, la magnitud del riesgo y las acciones de mitigación y de mantenimiento que requiere el mismo para asegurar la continuidad operacional.

La confiabilidad en los Procesos y Sistemas contempla la comprensión del proceso, los procedimientos y las operaciones comprendidas dentro del diseño establecido. Inicialmente para determinar la distribución de probabilidad que modela el conjunto de datos se realiza una Prueba de Bondad de Ajuste utilizando el programa de análisis StatGraphics versión 5.1, comprobando que estos siguen una distribución de Weibull en todos los casos,<sup>8</sup> por lo que para la valoración de la función de supervivencia se utiliza la ecuación:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (1)$$

Donde:

$\alpha$ : Escala de Weibull

$\beta$ : Forma o pendiente de Weibull

$t$ : Parámetro tiempo.

El Tiempo Medio entre Fallos (MTBF) o tiempo de vida promedio de un activo según una distribución de Weibull se obtiene según la ecuación:

$$MTBF = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2)$$

Donde:

$\Gamma$ : Función Gamma.

La mantenibilidad es uno de los indicadores utilizados para caracterizar la actividad de Mantenimiento. El cálculo de esta magnitud se efectúa utilizando los tiempos para reparar (TTR) de cada uno de los activos durante el período, a los datos se le aplicó una Prueba de Bondad de Ajuste utilizando el programa estadístico StatGraphics versión 5.1 con la guía de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y Anderson – Darling. Luego de ser analizados se comprobó que los TTR seguían una distribución de tipo Weibull por lo que para la estimación de la mantenibilidad se utilizó el Método de Ajuste a la Distribución.<sup>9,10,11</sup>

El cálculo de la disponibilidad<sup>8,14,15</sup> está basado en la distribución de fallas y la distribución de tiempo de reparación y muestra la probabilidad de que el equipo esté operando satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación y puede ser calculada mediante la ecuación:

$$R_{ei} = \frac{t_{ee}}{t_{et}} \quad (3)$$

Donde:

$R_{ei}$ : Disponibilidad del activo.

$t_{ee}$ : Tiempo de trabajo efectivo.

$t_{et}$ : Tiempo total de trabajo previsto.

El Programa de Control de la Confiabilidad implementado actualmente en la empresa de aviación para evaluar la efectividad de los programas de mantenimiento de las aeronaves, está dirigido solamente hacia los activos, sin tener en cuenta otros factores que influyen en las causas de las fallas y que afectan los procesos críticos y la rentabilidad de la empresa, limitando sus resultados dentro de la organización, al enfocar la confiabilidad únicamente desde la perspectiva del mantenimiento.<sup>12</sup> La propuesta de Confiabilidad Operacional,<sup>13</sup> ofrece ventajas en cuanto a la integración y el trabajo de equipo para la toma de decisiones, mediante una serie de procesos de mejora continua, que incorporan en forma sistemática, herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión del mantenimiento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se requiere analizar cada uno de los parámetros de la Confiabilidad Operacional, para optimizar las características operacionales de los activos más críticos, reducir los costos y garantizar un mejoramiento continuo y de largo plazo.

### CONFIABILIDAD EN LOS PROCESOS Y SISTEMAS

Los índices de confiabilidad se determinan mediante las ecuaciones 1 y 2, los valores obtenidos para cada activo se presentan en la tabla II.

Se puede observar en la tabla II que los valores de  $\beta$  ( $\beta > 2$ ) son típicos para activos con una probabilidad de fallo creciente. Los valores de confiabilidad obtenidos para cada activo son aproximadamente de un 50 %, lo que está por debajo de los estándares que se exige en la industria aeronáutica. El agregado de menor confiabilidad fue la válvula 3409 con 49.7 % y el de mayor confiabilidad fue la válvula 3408 con 53.6 %.

Tabla II. Parámetros de confiabilidad de cada activo.

Agregados	Parámetro $\beta$	Parámetro $\alpha$	MTBF (horas)	R(t)	R(t) %
Turbina 6671	6.40984	11692.2	10871	0.534	53.4
Válvula 3449	3.49362	10157.4	9132	0.502	50.2
Válvula 3409	3.30843	10117.2	9080	0.497	49.7
Válvula 3408	8.1174	6078.22	5735	0.536	53.6
Válvula 3415	3.34192	11175.9	10030	0.498	49.8
Válvula 3173A	4.55963	11893.7	10860	0.517	51.7

En la estimación de la confiabilidad del sistema se tiene en cuenta la forma en que están interconectados los componentes y subsistemas. En el caso del ECS la configuración de sus subsistemas es en serie, pero en cada subsistema, los agregados se encuentran instalados en una configuración serie, paralelo o mixta, por lo que la disposición del sistema es una configuración mixta.

En la tabla III se muestra los resultados de la confiabilidad del sistema tomando en cuenta la de sus subsistemas y agregados.

En la tabla III se aprecia que la confiabilidad del sistema de acondicionamiento de aire de las aeronaves IL – 96 – 300 es de un 54.5 %. El subsistema de más baja confiabilidad fue el de distribución con 69 % y

Tabla III. Indicadores de confiabilidad del sistema de aire acondicionado.

Subsistemas	Agregados	R(t) Agregados	R(t) Subsistema	R(t) %
Extracción	Válvula 3449	0.5018	0.938	93.8
Croos-Feed	Válvula 3409	0.4969	0.882	88.2
	Válvula 3408	0.5356		
Enfriamiento	Turbina 6671	0.5341	0.953	95.3
Distribución	Válvula 3409	0.4969	0.69	69
	Válvula 3408	0.5356		
	Válvula 3415	0.4982		
	Válvula 3173A	0.5165		
Sistema		0.545		54.5

el de mayor confiabilidad fue el de enfriamiento de aire con 95.3 %.

El sistema de acondicionamiento de aire en las aeronaves es un sistema de confort, lo que implica que el fallo de uno de sus componentes o del sistema no afectaría la navegabilidad de la aeronave. La baja confiabilidad de este sistema afecta directamente

la calidad de los servicios y no atenta contra la seguridad del vuelo.

### MANTENIBILIDAD DEL EQUIPO

En la tabla IV se pueden observar los indicadores de mantenibilidad para cada uno de los activos, comprobándose que la válvula 3415 fue el activo de menor confiabilidad con 35.8 % y la probabilidad de que las tareas de mantenimiento no fueran cumplidas en 8 horas y si entre 8 y 12 fue de 33.9 %. En el indicador del cumplimiento de las tareas de mantenimiento se puede apreciar como el 90 % de las mismas fueron cumplidas en 21,9 horas. El activo de mayor confiabilidad en las acciones de mantenimiento fue la válvula 3173A con 94 %, el

Tabla IV. Indicadores de mantenibilidad para cada activo.

Agregado	Weibull (t1=8 horas; t2=12 horas)				
	M(t1)%	MTTR	M(t2)%	P(t1,t2)	TTR(0,90)
Válvula 3449	0.5398	7.73	0.993	0.985	10.1
Válvula 3409	0.86	6.75	0.999	0.993	8.17
Válvula 3408	0.86	6.75	0.999	0.993	8.17
Válvula 3415	0.358	11.76	0.576	0.339	21.9
Válvula 3173A	0.944	5.36	0.999	0.98	7.5

cual tiene una probabilidad de que sus tareas de mantenimiento sean cumplidas entre 8 y 12 horas de 98 %. El 90 % de las tareas de mantenimientos fueron cumplidas en 7.5 horas.

En el caso de la turbina de enfriamiento 6671 todos los agregados de este tipo que fallaron en el período, fueron reportados como no reparables debido al alto grado de degradación de sus componentes.

En la figura 2 se muestra la mantenibilidad del sistema según la disposición de sus agregados, y se puede apreciar que para el sistema durante el período analizado fue de un 96.76 %.

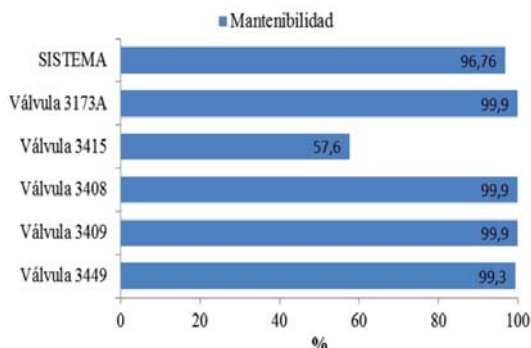


Fig. 2. Mantenibilidad de los activos y sistema de aire acondicionado.

### DISPONIBILIDAD

La figura 3 ilustra la disponibilidad de cada uno de los equipos, calculada según ecuación 3, e incluye la evaluación de la disponibilidad del sistema a partir de la disposición de los agregados en el mismo.

Puede comprobarse en la figura 3, como para el período en análisis, la disponibilidad del sistema fue de 99 %, siendo el activo de menor disponibilidad las válvulas 3449 con 95.7 %; mientras que los demás activos operaron con una disponibilidad superior al 99 %.

Se debe señalar que a pesar de que la confiabilidad del sistema se comportó al 54.5 % la disponibilidad del

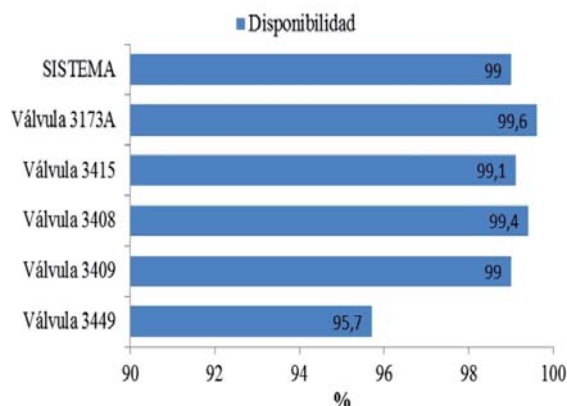


Fig. 3. Disponibilidad de los activos y sistema de aire acondicionado.

mismo fue de un 99 %. Esto se debe a la redundancia que presenta la ubicación de los activos y a la función que cumplen los mismos dentro del sistema.

### CONFIABILIDAD HUMANA

La Confiabilidad Humana es un factor fundamental y determinante de la Confiabilidad Operacional, pues impacta fuertemente en los demás componentes. La herramienta más conocida y aplicada para el análisis de Confiabilidad Humana es la Técnica para la Predicción de la Tasa de Error Humano, debido a la complejidad de su análisis y la carencia de una base de datos que permitan la realización del mismo, en el presente estudio se decidió no incluirlo y complementar el análisis de Confiabilidad Operacional incorporando los indicadores de Confiabilidad Humana después que se implemente una base de datos que contenga la información necesaria para aplicar esta herramienta.

El alcance del estudio de Confiabilidad Operacional permite identificar la eficiencia de los procesos de aseguramiento en las condiciones de explotación de los activos analizados y de los



elementos que intervienen en el ECS, pero al no poder incorporar elementos relacionados con las personas, es insuficiente para poder elaborar una propuesta integral, sin embargo, posee un impacto directo en la calidad, superior al Programa de Control de la Confiabilidad utilizado en la empresa de aviación, al incorporar los cálculos de mantenibilidad y confiabilidad en los procesos, ofreciendo una visión más completa para la toma de decisiones.

## CONCLUSIONES

- Se analizaron las características actuales del mantenimiento en la Industria Aeronáutica cubana, concluyéndose que las herramientas vinculadas con los análisis de confiabilidad y particularmente las de Confiabilidad Operacional, son poco utilizadas como parte integral del sistema de mantenimiento.
- En el proceso de obtención de datos se obtuvo que las bases de datos no cuentan con toda la información necesaria para la aplicación de todas las herramientas y modelos, en específico los relacionados con la Confiabilidad Humana.
- Se realizó un análisis de la confiabilidad detallado por activo y el sistema de aire acondicionado en su integralidad; donde se determinó que respecto a la Confiabilidad de Equipo, el activo con menor confiabilidad es la válvula 3409, el subsistema de distribución es el de mayor incidencias y en lo que se refiere a la Mantenibilidad, el activo de menor confiabilidad fue la válvula 3415.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Cabrera Gómez, J. 2003. Plataforma básica para un enfoque del mantenimiento centrado en la confiabilidad. Edición Primera. La Habana: Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento. Instituto superior Politécnico José Antonio Echeverría.
2. Castellanos, G M. 2000. Estimación de parámetros de confiabilidad y mantenibilidad en sistemas industriales. Caracas : Centro de Altos Estudios Gerenciales. Instituto Superior de Investigación y Desarrollo. [En línea] <https://es.scribd.com/doc/56232958/Libro-Gerencia-en-Mantenimiento>.
3. Dhillon, B S. 2009. Human Reliability, Error, and Human Factor in Engineering Maintenance. New York : CRC Press Taylor & Francis Group. ISBN-13: 978-1-4398-0383-7. [En línea] [www.link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-04019-6\\_1.pdf](http://www.link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-04019-6_1.pdf)
4. —. 2006. Maintainability, Maintenance and Reliability for Engineers. New York : CRC Press Taylor & Francis Group. ISBN 0-8493-7243-7. [En línea] [www.link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-1-84800-288-3.pdf](http://www.link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-1-84800-288-3.pdf)
5. —. 2014. Manual Integrado de Gestión Empresarial. La Habana: Imprenta Instituto Aeronáutica Civil de Cuba.
6. González Rojas, R M. 2006. Diseño estrategia operación centrada en confiabilidad para Minera Spence S.A. Santiago de Chile: Universidad de Chile. [En línea] [www.tesis.uchile.cl/handle/2250/102824](http://www.tesis.uchile.cl/handle/2250/102824)
7. —. 2014. Manual Integrado de Gestión Empresarial. La Habana: Imprenta Instituto Aeronáutica Civil de Cuba.
8. Martínez, Fernández L. 2011. Métodos de inferencia para la aplicación de la distribución de Weibull: aplicación en fiabilidad industrial. Vigo: Universidad de Vigo. [En línea] <https://eio.usc>.
9. —. 2014. Manual Integrado de Gestión Empresarial. La Habana: Imprenta Instituto Aeronáutica Civil de Cuba.
10. —. 2014. Manual Integrado de Gestión Empresarial. La Habana: Imprenta Instituto Aeronáutica Civil de Cuba.
11. Enrico, Z. 2009. Computational Methods for Reliability and Risks Analysis. Springer : Word Scientific Publishing Company. Volumen 14. ISBN-10 9812839011, ISBN-13 978-9812839015. [En línea] [www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/7190?](http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/7190?)
12. Marko, E. 2011. Assessment of Power System Reliability: Methods and Applications. Edición Primera. Springer: Word Scientific Publishing Company. ISBN-10: 0857296870. ISBN-13 978-0857296870. [En línea] [www.link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-0-85729-688-7%2F1.pdf](http://www.link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-0-85729-688-7%2F1.pdf)
13. Díaz Concepción, Armando, Cabrera Gómez, Jesús y Romero García, Julio Abril. 2015. El análisis de Confiabilidad Operacional. Un caso de estudio. 1, Enero - Febrero de 2015, Mantenimiento en Latino América, Volumen 7. ISSN 2357-6840. [En línea] <http://www.mantenimientoenlatinoamerica.com/>

- es/pub/mte/descargas/Proyecto\_613.pdf
9. Nakagawa, T. 2005. Maintenance Theory of Reliability. Londres: Springer – Verlag. ISBN 1-85233-939-X. [En línea] [www.link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-0-85729-274-2%2F1.pdf](http://www.link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-0-85729-274-2%2F1.pdf)
  10. Toro Osorio, J.C. 2001. Metodología para medir confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en mantenimiento. Universidad EAFIT. Bogotá, Colombia. [En línea] [www.imc-peru.com/articulos/Metodologia\\_para\\_medir\\_Confiabilidad.pdf](http://www.imc-peru.com/articulos/Metodologia_para_medir_Confiabilidad.pdf)



## IMPI'S 49<sup>TH</sup> ANNUAL MICROWAVE POWER SYMPOSIUM

The Premier Industry-Wide Microwave Power Event

# 2015 CALL FOR PAPERS

The International Microwave Power Institute invites scientists, engineers, managers and users to submit papers in all areas of research, development, manufacture, engineering, specification and use of microwave and radio frequency energy systems for non-communication applications, including food technology, chemical and material processing, and new emerging technologies.

Presented by the

**INTERNATIONAL MICROWAVE POWER INSTITUTE**

PO Box 1140, Mechanicsville, VA 23111  
Phone: +1 (804) 559 6667 • E-mail: [info@impi.org](mailto:info@impi.org)

[WWW.IMPI.ORG](http://WWW.IMPI.ORG)

**June 16-18, 2015**

Kona Kai Resort  
San Diego, California, USA

**Submission Deadline:  
EXTENDED to  
February 16, 2015**