

ANÁLISIS DE FALLA DE COMPONENTES DE INGENIERÍA

Gustavo Tovar S.

Profesor Investigador
Depto Ingeniería Mecánica
Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico (CITEC)
Universidad de Los Andes

La palabra Falla es un término general que se utiliza para designar que un componente, equipo ó máquina ha fallado en servicio. Se considera que una pieza, máquina ó equipo ha fallado cuando ocurre una de las siguientes condiciones:

- I. Cuando se vuelve completamente inoperable. Por ejemplo, cuando el eje que mueve las llantas de un automotor se rompe (“descachado”), el automotor se vuelve completamente inoperable y generalmente, se requiere solicitar una grúa para transportar el vehículo al taller para cambiar el componente que falló.
- II. Cuando el componente aún es operable pero no es capaz de cumplir la función para la cual fue concebido, diseñado y manufacturado. Siguiendo con el ejemplo de los vehículos automotores, cuando se pierden las tolerancias entre el cilindro y los anillos del pistón en un motor de combustión interna, por efecto de la fricción y de la corrosión, por los gases calientes de la combustión, el automotor pierde potencia y se incrementa el consumo de combustible y de aceite. En este caso, el vehículo todavía es operable pero no cumple su función satisfactoriamente.
- III. Cuando el deterioro del componente ha llegado a una condición seria que lo hace inconfiable ó inseguro para continuar su utilización. Por ejemplo, cuando el deterioro del sistema de freno (pastillas, discos, etc.), de un

automotor llega a una condición de deterioro tal que la operación del vehículo se vuelve insegura y se requiere reparar y cambiar los componentes que han fallado.

Las fuentes fundamentales de falla se han identificado a través del tiempo y son principalmente las siguientes:

A. DISEÑO

En 1950 cuando se inició la construcción de los primeros aviones comerciales de reacción (jet), se presentaron fallas catastróficas en vuelo de varias aeronaves Comets de fabricación Inglesa. La causa fue asociada a un defecto de diseño, debido a los altos esfuerzos alrededor de las ventanas, causados por las esquinas agudas, en las cuales se iniciaron grietas pequeñas que se propagaron y condujeron a la fractura y a la explosión de las naves en pleno vuelo.

B. SELECCIÓN INADECUADA DE MATERIAL

En la década de 1960 a 1970, se presentaron fallas catastróficas en los aviones de combate F-111 de la Fuerza Aérea Americana (USAF), en la unión de las alas al fuselaje, las cuales se debieron a la selección de un material muy frágil para la unión.

C. TRATAMIENTO TÉRMICO DEFECTUOSO

Los tratamientos térmicos deficientes pueden generar microgrietas y fractura de los componentes después del tratamiento ó al poco tiempo de servicio. En el caso del componente de unión de las alas al fuselaje de los aviones F-111, en el transcurso de la investigación se concluyó que no solamente la selección deficiente del material frágil fue la determinante de la falla, sino que contribuyó además el procedimiento de tratamiento térmico del acero de alta resistencia D6 AC, el cual produjo una microestructura desuniforme en la pieza de la unión.

D. MANUFACTURA DEFECTUOSA

Por ejemplo en las piezas de fundición, la presencia de porosidad en zonas de esfuerzos, puede producir concentraciones de esfuerzo en los poros, generar iniciación de grietas en éstos defectos y conducir a la ruptura de los componentes. Otro tanto sucede con las uniones soldadas en las cuales defectos de agrietamiento, inclusiones de escoria, etc., pueden producir la ruptura de la unión.

E. MECANIZADO DEFECTUOSO

La presencia de marcas de mecanizado en componentes sometidos a esfuerzos cíclicos repetidos puede acortar la vida de fatiga de estas piezas. Los ángulos muy agudos en los cuñeros producen concentraciones de esfuerzo en la raíz de estos ángulos, en los cuales se pueden generar grietas y ruptura en los componentes sometidos a esfuerzos cíclicos repetidos.

F. MONTAJE DEFECTUOSO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEFICIENTES

El autor tuvo conocimiento de la falla del eje de un motor de una máquina pasteurizadora. La investigación sobre la composición y la estructura del material de construcción del eje, reveló que se había empleado el material correcto y que

había defectos de manufactura. Sin embargo, al inspeccionar el montaje del eje del motor al eje del reductor, se encontró que los soportes de los dos componentes estaban desalineados. Esta situación produjo una condición de esfuerzos anormales en el eje que provocaron la ruptura de este componente.

Existen también muchas fallas que se deben a operación incorrecta del equipo, por fuera de las especificaciones de operación y/o diseño. Por ejemplo, el aumento de 15° C en la operación de una planta de procesamiento para lograr mayor producción, produjo la destrucción del equipo en tres meses. En este caso al sobrepasar la máxima temperatura de diseño del equipo, se aumentó exponencialmente la rata de corrosión y condujo al deterioro de los materiales de construcción del mismo.

También el mantenimiento del equipo puede ocasionar falla en los componentes. El autor recuerda el reclamo de los operarios sobre el desgaste prematuro del eje de los tambores de una etiquetadora. Al inspeccionar el equipo se encontró que las graseras de lubricación de los ejes estaban completamente taponadas. La falta de lubricación adecuada estaba produciendo el desgaste prematuro de estos componentes, con las consecuentes paradas de producción para cambiar los ejes desgastados.

Una falla específica se puede atribuir a alguno de los factores mencionados anteriormente que actuaron independientemente ó a la interacción de varios de ellos.

La causa exacta de una falla no es fácil de descubrir y el problema puede resolverse después de una investigación intensiva.

Los análisis detallados de falla de los componentes constituyen herramientas valiosas de análisis en muchos aspectos de la Ingeniería, entre los cuales enumeramos los siguientes:

- a) Para prevenir fallas en el futuro.
- b) Para establecer la validez de los diseños y de la selección de los materiales.
- c) Para descubrir defectos en el procesamiento de los materiales por intermedio de la caracterización de los defectos.

- d) Para revelar problemas introducidos durante la manufactura ó la fabricación de los componentes.

El proceso de la investigación de las fallas

Para el analista de fallas, el principio ocurre cuando se le llama y se le presenta el caso. Sin embargo, se debe considerar que el componente se concibió, se diseñó y se manufacturó durante un período previo que puede ser de horas ó de varios años de servicio. Esto significa que es importante estudiar el significado de determinar la historia previa a la falla y programar el curso de acción subsiguiente.

Las etapas del análisis de falla

Aun cuando la secuencia de un análisis puede variar dependiendo de la naturaleza específica de la falla, las principales etapas que comprenden la investigación y el análisis de falla son:

1. Evidencia documental

Es necesario recolectar información relacionada con la evidencia documental tales como certificado de ensayo de los fabricantes ó vendedores, especificaciones, planos que indiquen la forma y las dimensiones del equipo ó del componente, las garantías y los aspectos legales.

2. Condiciones de servicio

Recopilar información relacionada con la operación actual del equipo ó del componente. Datos sobre niveles de temperatura, presión, velocidad de operación, para compararla con las especificaciones. Datos sobre el mantenimiento del equipo, sobre las condiciones ambientales, fluidos que lo rodean, datos sobre humedad, contaminación, condiciones de limpieza, etc.

3. Entrevistas

Ninguna investigación es completa sin el testimonio de las personas que tienen información sobre la falla. El investigador deberá utilizar esta información como herramienta de análisis y no enfatizar irrazonablemente la información reco-

lectada en las entrevistas sin analizarlas juiciosamente.

4. Examen preliminar del componente o del equipo que falló

Inspección visual de las superficies de fractura y trayectoria de las grietas. Presencia de desgastes severos. Sobre estas inspecciones se deberá realizar la documentación fotográfica pertinente.

5. Selección de las muestras para ensayo

El investigador deberá seleccionar las localizaciones de las muestras que se van a someter a los ensayos, indicando la forma y el tamaño de las muestras. Asimismo se debe especificar el procedimiento para tomar las muestras.

6. Ensayos no destructivos

Son muy útiles en la investigación de la falla, particularmente las inspecciones con líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido, corrientes de Eddy, para detectar grietas y discontinuidades superficiales. También la radiografía y la gammagrafía para el examen interno.

7. Ensayos mecánicos

De acuerdo a la carga predominante de servicio y al tipo de material, pueden requerirse probetas para el Ensayo de Tensión, compresión, flexión ó impacto. Los Ensayos de Dureza son muy útiles y económicos.

8. Selección, preservación y limpieza de las superficies de fractura

La selección adecuada, la preservación y la limpieza de las superficies de fractura, son importantes para impedir que se destruyan ó se oscurezcan detalles y evidencias importantes para el análisis de la falla.

9. Examen y análisis macroscópico

De las superficies de la fractura, presencia de grietas secundarias y otros fenómenos superficiales tales como corrosión, desgaste, erosión, etc. Este examen se realiza con ayuda del estereomicroscopio, pero puede emplearse también Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

10. Examen microscópico de la estructura

Para este examen se puede utilizar el Microscopio Óptico, el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) ó el Microscopio Electrónico de Transmisión (TEM). Es necesario seleccionar las muestras y seguir los procedimientos convencionales de corte, montaje, pulido en papeles de esmeril de grado decreciente y pulido final con Alúmina o con pasta de diamante. Finalmente el ataque con reactivos específicos dependiendo del material.

11. Determinación del tipo de fractura (fractografía)

Es importante para el análisis determinar el tipo y las características de la fractura (frágil, dúctil, combinada, morfología de fatiga, torsión, etc.).

12. Análisis de composición

Con el fin de verificar que el material corresponde al especificado ó al adecuado, es necesario realizar el análisis de composición del material del componente que presentó la falla. En fallas por corrosión es importante el análisis de los productos de corrosión. Para tal fin se pueden emplear Métodos Espectrográficos, de Espectrofotometría de absorción atómica, colorimetría, fluorescencia de Rayos X, difractómetro de Rayos X ó métodos gravimétricos ó volumétricos de análisis químico convencional.

13. Ensayos simulados de servicio

En las etapas finales de una investigación, se puede requerir la realización de ensayos que simulen las condiciones que produjeron la ocurrencia de la falla. Por ejemplo, probetas de corrosión para uso en planta con el fin de monitorear el ataque corrosivo.

14. Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones

La etapa final de toda investigación sobre análisis de falla, termina con un informe en el cual se formulan los análisis de toda la información recolectada en las etapas y ensayos anteriores y se consignan las conclusiones sobre la causa de la falla. Además se acostumbra formular las reco-

mendaciones pertinentes para evitar que en el futuro se presente nuevamente el mismo tipo de falla.

Ejemplo ilustrativo

Para complementar esta introducción al Análisis de Falla de componentes de Ingeniería, se presenta a continuación un resumen de uno de los casos de Análisis de Falla realizados en el Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Facultad de Ingeniería (CITEC), de la Universidad de Los Andes.

El caso que se presenta como ejemplo, se refiere a la perforación de las placas de Acero Inoxidable de un intercambiador de calor utilizadas para una de las etapas del proceso de pasteurización de un producto alimenticio.

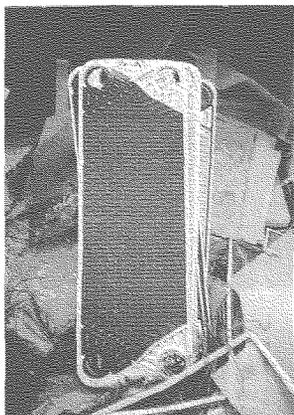
El intercambiador de calor tiene tres sectores definidos que cumplen las siguientes funciones:

- Un sector de PRECALENTAMIENTO constituido por 121 placas, en el cual el producto se precalienta hasta 80° C. El producto circula por un lado de la placa y por el otro circula agua caliente para efectuar el intercambio térmico a través de las placas.
- Un sector ASEPTICO constituido por 61 placas, en el cual el producto pasteurizado se enfría desde 80° C hasta 15° C.
- Un sector de siete placas de Regeneración en el cual se recircula el producto que no se alcanza a empacar en el equipo de envase respectivo.

Después de tres años de servicio del Intercambiador, se detectó contaminación del producto con el agua de enfriamiento en el sector Aséptico, es decir en la zona de enfriamiento de 80° C a 15° C. Al abrir el equipo para inspeccionarlo, se encontraron cuatro placas con perforaciones en los puntos de contacto de las corrugaciones en el lado de circulación de agua. Se observa que la hermeticidad de las placas de intercambio, se logra por intermedio de empaques de caucho sintético especial, los cuales se alojan en unos canales diseñados para tal fin en el contorno de las placas.

La fotografía No. 1, muestra la geometría y la apariencia de las placas por el lado de circula-

ción de agua. Se observa la presencia de una película adherente de color café, debida probablemente a los sólidos en suspensión del agua de enfriamiento.



Fotografía No. 1.

Geometría y apariencia de las placas que presentaron falla en el intercambiador de calor por el lado de circulación del agua. Obsérvese la presencia de una película adherente de color café.

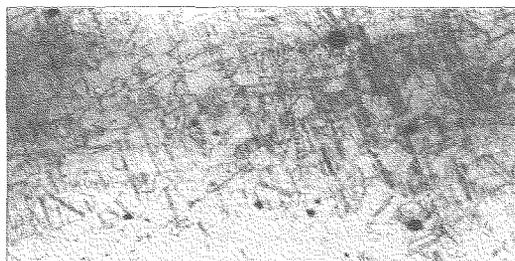
Las placas tienen un espesor nominal de 0.8 mm. El análisis de composición del acero de construcción de las placas dio los siguientes resultados en porcentaje en peso:

ELEMENTO	% PESO
Carbono	0,05
Silicio	0,41
Manganeso	1,58
Fósforo	0,025
Azufre	0,008
Cromo	16,88
Níquel	10,89
Molibdeno	2,13

Estos resultados corresponden a un Acero Inoxidable Austenítico tipo 316 AISI.

Las determinaciones de dureza dieron un promedio de 96,5 RF (carga de 60 Kgs, indentador de bola de Acero endurecido de 1/16 pulg de diámetro), lo cual equivale por conversión a una Resistencia a la Tensión aproximada de 62.000 psi.

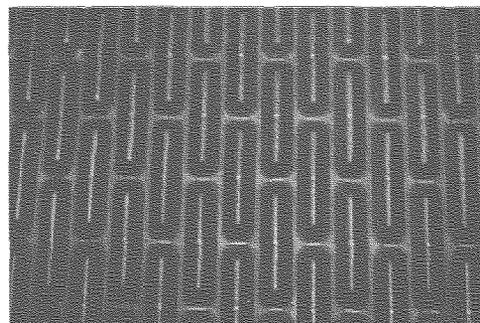
El análisis metalográfico indicó como lo muestra la fotografía No. 2, la estructura normal de granos Austeníticos equiaxiales correspondiente a un Acero Inoxidable. No se observaron deficiencias estructurales.



Fotografía No. 2.

Sección transversal. Microestructura del acero de las placas del intercambiador. Una sola fase, granos equiaxiales de Austenita, 200X. Ataque solución ácida de Cloruro Férrico en agua.

El examen macrográfico reveló que las placas del intercambiador de calor presenta numerosas deformaciones puntuales (depresiones) de forma circular, producidas por el contacto entre las placas, a medida que los empaques de sello van deformándose por la presión de operación del equipo. Estas depresiones se encuentran localizadas en las crestas de las corrugaciones de las placas, principalmente en el centro de estas corrugaciones, tal como se puede observar en la fotografía No. 3.



Fotografía No. 3.

Deformación puntual por contacto en las crestas de las corrugaciones de las placas de la sección de circulación del agua del intercambiador.

La fotografía No. 4, tomada con el estereomicroscopio a 28X (aumentos), muestra las picaduras (cráteres) por ataque corrosivo por resquicios que produjo la falla por perforación en las placas del intercambiador de calor. Una vez iniciado el ataque realizado en el resquicio (área cubierta por el contacto entre las placas), el proceso de disolución es autocatalítico, hasta producir la perforación de la lámina.

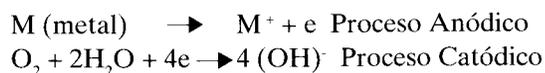


Fotografía No. 4.

El ataque por corrosión localizada en el resquicio producido por el contacto entre placas. Se observan los microcráteres generados por la disolución del metal. 28X.

El mecanismo que genera esta forma de corrosión se ha explicado en la siguiente forma:

- Debe existir el resquicio el cual es simplemente un área cubierta que puede ser de diseño, como en el caso de una junta remachada debajo de la cabeza del remache ó de una junta soldada por traslapo. También pueden existir resquicios debajo de empaquetaduras húmedas ó debajo de depósitos de mugre, costras, etc.
- Se necesita también un medio ó ambiente corrosivo. En el caso particular del Acero Inoxidable, este material es muy sensible al ataque corrosivo por soluciones aireadas que contengan cloruros, particularmente a altas temperaturas, lo cual resulta en una penetración rápida del material en áreas pequeñas. En este caso, el agua de enfriamiento tiene iones cloruro.
- En la iniciación del proceso ocurren las reacciones de disolución del metal (reacción anódica que genera electrones) y de reducción de Oxígeno (reacción catódica que consume electrones), las cuales se pueden representar en la siguiente forma:



Estas reacciones ocurren uniformemente sobre la superficie del metal, incluyendo el interior del resquicio. Pero con el tiempo, se agota el Oxígeno dentro del resquicio por condiciones de convección y por lo tanto, la reacción catódica

cesa en esta área. El agotamiento de Oxígeno en el resquicio tiene una influencia indirecta importante, porque la disolución del metal continúa y tiende a producir un exceso de carga positiva, lo cual obliga a la migración de los iones cloruro(Cl⁻) dentro del resquicio para compensar el exceso de carga positiva. Esto trae como consecuencia la formación de cloruros metálicos, los cuales se hidrolizan para producir Hidróxido de metal disuelto y Acido Clorhídrico de acuerdo a la reacción:

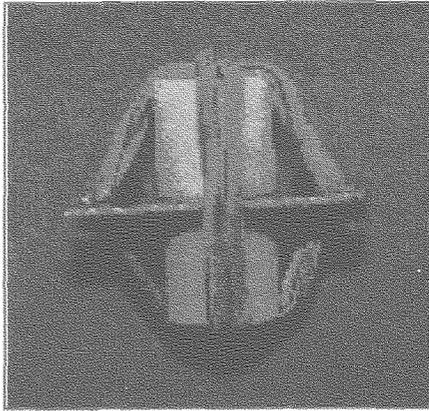


La presencia del Acido Clorhídrico dentro del resquicio, acelera la rata de corrosión dentro del mismo. En estudios realizados sobre el ataque corrosivo por resquicios se han encontrado dentro de él concentraciones de iones cloruro de 3 a 10 veces mayores que en la disolución acuosa fuera de este y además Ph definitivamente ácidos de 2 a 3 por la formación del HCl. Estos dos factores incrementan el ataque corrosivo localizado en el resquicio.

CONCLUSIONES

Los análisis y observaciones anteriores permiten concluir que la falla por perforación de las placas de Acero Inoxidable del intercambiador de calor, se debió a un proceso de corrosión por resquicios. Los resquicios se originaron cuando las placas se ponen en contacto a medida que los empaques de caucho de sello se deforman con el tiempo de servicio del intercambiador.

Para confirmar la susceptibilidad del Acero Inoxidable 316 de construcción de las placas al ataque por corrosión por resquicios, se realizó un Ensayo en el laboratorio de acuerdo a las especificaciones de la Norma ASTM G-48-76, "Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by the Use of Ferric Chloride Solution". Las dos muestras para este ensayo se tomaron de la zona plana de las placas que fallaron. Los resquicios se simularon con dos tapones cilíndricos de Nylon de ¹/₂ pulg de diámetro y ₁/₂ pulg de altura, los cuales se colocaron a lado y lado de la muestra y se fijaron con bandas de caucho en cruz. La fotografía No. 5, muestra la preparación de una de las muestras para el ensayo.

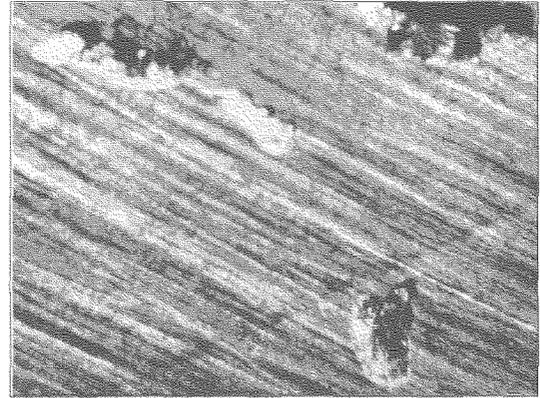


Fotografía No. 5.

Preparación de la muestra para el ensayo de susceptibilidad al ataque por corrosión por resquicios en el Acero Inoxidable de las placas del intercambiador. La muestra metálica, los tapones para simular el resquicio y las bandas de caucho para sujetarlos.

Estas muestras se sumergieron en una solución acuosa de Cloruro Férrico al 10% y se colocaron en una estufa a 70° C durante 84 horas.

La fotografía No. 6, muestra las picaduras producidas por el resquicio debajo del tapón de plástico. En las zonas adyacentes al resquicio, no se observa corrosión, lo cual prueba la naturaleza del ataque localizado de este tipo de corrosión. Estos resultados sustentan las conclusiones del estudio.



Fotografía No. 6.

Las picaduras debajo de los resquicios producidas por los tapones y por las bandas de caucho de fijación. Se observa que en las zonas adyacentes a estos resquicios no hay o hay muy poco ataque. 10X.

Por las consideraciones anteriores, se recomienda mantener los empaques de las placas en buenas condiciones, con el fin de que no se produzcan los puntos de contacto entre las placas, los cuales propician la generación de los resquicios y el mecanismo de corrosión descrito anteriormente. Los empaques se deben cambiar en el momento en que se inicia el primer contacto entre las corrugaciones de las placas. Se sugiere establecer una medida de referencia que permita verificar externamente la iniciación del contacto para programar el cambio de los empaques.

FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMAS DE POSGRADO

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA

Programa de formación académica e investigativa, que requiere una dedicación de tiempo completo. Es un programa líder en la generación y renovación de conocimiento de tecnologías de punta, que permiten a la empresa colombiana crear ventajas competitivas que contribuyan al progreso del país y a las universidades formar sus docentes en el más alto nivel académico.

Informes: dirposg@uniandes.edu.co

PROGRAMAS DE MAGÍSTER

Programas de formación académica e investigativa, que requieren una dedicación mínima de medio tiempo. Se preparan profesionales con alto nivel de formación en ingeniería y en algunos casos, como en el Programa Universidad-Empresa, formación concertada en las áreas de interés de la empresa.

Inscripciones para el segundo semestre de 1999: abril 12 - junio 18.

Magíster en Ingeniería Civil

Áreas de profundización: Ingeniería ambiental, Estructuras, Ingeniería y gerencia de la construcción, Geotecnia, Recursos hídricos, Infraestructura vial y transportes, Sísmica.

Informes: magcivil@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2810, 3026.

Magíster en Ingeniería Industrial

Áreas de profundización: Investigación de operaciones y estadística, Sistemas de producción, Dirección y gestión organizacional, Organización industrial.

Informes: magindus@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2880, 2879.

Magíster en Ingeniería Eléctrica y Magíster en Ingeniería Electrónica y de Computadores

Áreas de profundización: Comunicaciones, Sistemas electrónicos y de computación, Microelectrónica y diseño electrónico, Señales – imagen – visión, Control robótica y automatización, Ingeniería Biomédica, Potencia eléctrica, Planeamiento energético.

Informes: magie@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2830, 2841.

Magíster en Ingeniería Mecánica

Áreas de profundización: Conversión de energía, Mantenimiento y control de calidad, Procesamiento de polímeros, Bioingeniería.

Informes: magmecan@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2900, 2903.

Magíster en Ingeniería de Sistemas y Computación

Áreas de profundización: Construcción de software, Informática gráfica en ingeniería, Informática educativa, Informática organizacional, Ingeniería de información, Redes, Sistemas distribuidos y paralelismo.

Informes: magsist@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2860, 3054.

PROGRAMA UNIVERSIDAD - EMPRESA

Como apoyo a los programas de magíster se creó el programa UE. Su objetivo es permitir que los mejores ingenieros recién egresados de todas las facultades de ingeniería de Colombia y de países vecinos puedan desarrollar estudios a nivel de Magíster, aprovechando la unión entre la Empresa y la Universidad de los Andes.

Informes: progue@uniandes.edu.co. Teléfonos: 2866164, 28669211, 2439518. Ext.: 2800, 2806.

FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMAS DE POSGRADO

PROGRAMAS DE ESPECIALIZACIÓN

Programas de profundización en un área específica y requieren dedicación parcial de acuerdo con los compromisos laborales de los participantes. Las especializaciones corporativas son diseñadas conjuntamente con la empresa.

Especialización en manejo integrado del medio ambiente

Informes: espec@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2810.

Especialización en evaluación de riesgos y prevención de desastres

Informes: espedic@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2810.

Especialización en sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica

Informes: esptdee@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2830, 2832.

Especialización en telemática

Informes: esptele@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2860.

Especialización en automatización de procesos industriales

Informes: espapin@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2830.

Especialización en ingeniería hospitalaria

Informes: espinho@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2830.

Especialización en sistemas de control organizacional y de gestión

Informes: esico@zeus.uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2880, 3873.

Especialización en sistemas de información en la organización

Informes: esio@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2880, 3873.

Especialización en software para redes

Informes: esored@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2860, 2864.

Especialización en construcción de software

Informes: ecos@uniandes.edu.co. Teléfonos: 28669211, 2849911, 3520466. Ext.: 2860, 2875.