

# Sistemas expertos para disminuir riesgos en emergencias aéreas

Un colombiano desarrolla *software* para asistir con información especializada y en tiempo real a los pilotos que enfrenten contingencias durante el vuelo. Algunos retos son para la computación en la nube.

**T**res horas después de que el vuelo 447 de Air France salió de Río de Janeiro hacia París cayó sobre el Atlántico. Ese primero de junio del 2009 murieron 228 personas. El accidente se podría haber evitado si la aeronave hubiese estado equipada con un programa como el que investiga el profesor de Ciencias de la Computación Carlos Varela, para que, en condiciones de emergencia, aporte más información cruzando datos redundantes de los diferentes dispositivos del aparato.

El siniestro se debió a una combinación de falla técnica con error humano. Los sensores de velocidad del aire (*Pitot tubes*) se congelaron y reportaban una velocidad de 180 nudos, aunque la real era de 480. A una marcha tan baja como la notificada, el avión puede entrar en un *stall* aerodinámico, es decir, dado que sus alas sobrepasan



Carlos Varela es profesor de *Computer Science* en el Rensselaer Polytechnic Institute RPI (Albany, Estados Unidos).

el ángulo crítico de ataque, el avión pierde la sustentación y cae. Entonces, lo indicado es bajar la “nariz” para disminuir el ángulo de ataque y ganar velocidad, pero el riesgo es perder altura. Ante la información contradictoria se desconectó el modo normal de vuelo (piloto automático) y entró a operar el modo alterno. Es decir, las maniobras quedaron en manos de uno de los pilotos, al parecer con poca experiencia, que decidió subir la “nariz” para no perder altura, una determinación correcta si el modo normal no se hubiera desconectado, pues el sistema no lo deja entrar en *stall*. Como los mandos del Airbus son asíncronos, los otros dos pilotos no se dieron cuenta del

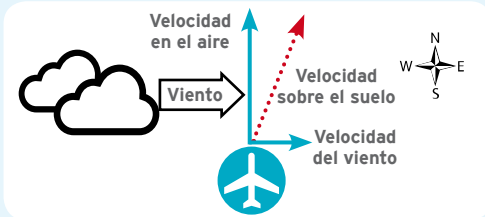
problema para intervenir a tiempo. El avión estaba a menos de 1000 pies sobre la superficie del mar cayendo a una velocidad de aproximadamente 10.000 pies por minuto.

Un par de años antes Carlos Varela, que además es piloto aficionado, conducía una aeronave entre Albany y Washington en Estados Unidos. La velocidad del aire empezó a caer en el instrumento y “mi reacción inmediata fue levantar los controles, pero antes de hacerlo decidí chequear los otros instrumentos y con un GPS personal me di cuenta de que había un error y que el sensor se debía haber congelado”. Le puso calor y cuando el *Pitot tube* volvió a funcionar el error se hizo evidente.

Las dos investigaciones que adelanta desde hace cuatro años este doctor en Ciencias de la Computación de la Universidad de Illinois, en Urbana-Champaign, buscan apoyar decisiones con información más precisa, en tiempo real, sobre lo que ocurre cuando hay un problema durante el vuelo. Uno de los trabajos tiene como fin utilizar datos redundantes para suplir algún instrumento que falla. En otro, emplea mecanismos computacionales para simular el éxito o fracaso de diferentes acciones propuestas por un programa experto ante una eventualidad, clasificadas para que los aviadores las usen como recomendaciones y si quieren, escojan una.

### Redundancia de datos

- Causa principal del accidente AF447: velocidad en el aire, incorrecta.
- La velocidad en el aire podría haber sido recalculada a partir de la velocidad sobre el piso y velocidad del viento
  - Aprovechar la redundancia de flujos de datos producidos independientemente



Velocidad sobre el suelo = Velocidad en el aire + Velocidad del viento

Relación entre velocidad del avión en el aire, sobre el piso, y velocidad del viento.

### Error signature

- Una *error signature* es un patrón de funciones matemáticas restringido, definido así:
 
$$S(\vec{K}, f(t), \vec{P}(\vec{K})) = \{f(t) | p_1(\vec{K}) \wedge \dots \wedge p_l(\vec{K})\}$$
 donde  $f$ : una función del tiempo  
 $\vec{K} = \langle k_1, \dots, k_m \rangle$ : un vector de constantes  
 $\vec{P} = \{p_1(\vec{K}), \dots, p_l(\vec{K})\}$  un conjunto de predicados de restricción

- Una muestra de *error signature* es una función particular del *error signature*

$$s(t, \vec{K}) = f(t) \text{ s.t. } s(t, \vec{K}) \in S(\vec{K}, f(t), \vec{P}(\vec{K}))$$

- Calcular la distancia entre un error medido  $e$  y una firma  $S_i$

$$\delta_i(t) = \min_{\vec{K}} \int_{t-\omega}^t |e(t) - s_i(t, \vec{K})| dt.$$

- Calcular el *mode likelihood vector*

$L(t) = \langle l_0(t), l_1(t), \dots, l_n(t) \rangle$  donde cada  $l_i(t)$  es definido como:

$$l_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{si } \delta_i(t) = 0 \\ \frac{\min\{\delta_0(t), \dots, \delta_n(t)\}}{\delta_i(t)}, & \text{de otra manera} \end{cases}$$

Si el segundo mayor elemento de  $L$  es mayor que el umbral  $\tau$  de importancia, el error es desconocido, de lo contrario, el más grande elemento de  $L$  determina el modo actual de error.

$\tau = 0.70$   
 $L = \langle 0.3, 0.75, 1.0, 0.05 \rangle$   
 modo error = desconocido

$\tau = 0.80$   
 $L = \langle 0.3, 0.75, 1.0, 0.05 \rangle$   
 modo error = 2

Definiciones matemáticas de "error signatures" y "mode likelihood vectors".

El diseño de los sistemas tiene un componente matemático que permite correlacionar, por ejemplo, los datos que envían diferentes sensores de la aeronave.

Estas labores, que podrían continuar durante otros tres años, cuentan con financiación de la oficina de Investigación de la Fuerza Aérea de Estados Unidos, la Fundación Nacional para la Ciencia de ese país e IBM. En ellas intervienen alumnos doctorales, de maestría y de pregrado de Ciencias de la Computación del Rensselaer Polytechnic Institute (Albany, Estados Unidos), donde Carlos Varela es profesor asociado. El experto en computación en la nube, que cursó sus primeros años de pregrado en Los Andes, visitó la universidad bogotana luego de participar como uno de los organizadores en el XVI IEEE/ACM CCGrid que tuvo lugar en Cartagena del 16 al 19 de mayo del 2016 (ver página 44).

La computación en la nube es necesaria para responder a este tipo de problemas, pues se requieren muchos análisis de datos preprocesados para generar modelos que se evalúan de manera incremental. Los sistemas propuestos por el doctor Varela son de múltiples fidelidades (es decir, unos más exactos que otros), de tal manera que si se usan los computadores del avión aportan soluciones más rápidas pero menos precisas, mientras que si los datos se envían a una infraestructura de *cloud computing* (en tierra), con mayor capacidad de procesamiento, el modelo será más completo, pero potencialmente más lento por la latencia en la comunicación. "Hay muchos retos sobre la utilización de la computación en la nube para procedimientos en tiempo real, es muy complejo y no hay respuestas obvias".

Como lo menciona el científico, este es un campo de investigación abierto. Mientras se diseñan las soluciones pertinentes, ha avanzado en otras materias relacionadas, como los nuevos conceptos matemáticos asociados al lenguaje de programación *PILOTS (Programming Language for spatio-Temporal data Streaming)*, para facilitar el desarrollo de estos sistemas y sus nociones.

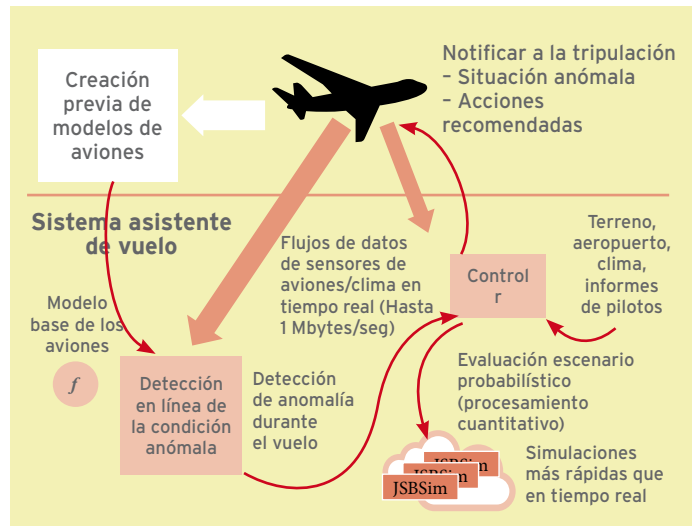
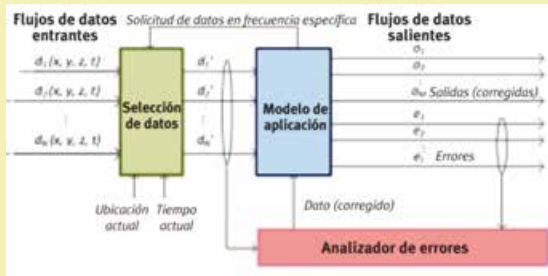
"*PILOTS* permite especificar a muy alto nivel, de manera declarativa, las relaciones entre los flujos de datos de entrada y de salida, crear funciones de error y *error signatures* para detectar ciertas condiciones anómalas y escribir código para corregir los datos cuando hay suficiente redundancia".

Este fue el punto de partida para un *software* que localizó el error en la velocidad del aire del Air France 447 y lo corrigió, con los datos de la caja negra recuperada dos años después del accidente. "Esencialmente usamos la redundancia en la información: la velocidad en el aire del avión, como vector, se relaciona con la velocidad sobre el piso —determinada por GPS— y la velocidad del viento, proporcionada por modelos meteorológicos. Si la velocidad sobre el piso es de 480 nudos y la del viento es de 10, la del aire no puede ser 180".

El desarrollo funciona con base en el concepto que llamaron *error signature*. "Son patrones de funciones matemáticas con restricciones que permiten determinar cómo se comporta una función de error bajo diferentes fallas en diversos sensores con distintos perfiles de error".

## Arquitectura de PILOTS

- Modelo de la aplicación
  - Calcular las salidas y errores periódicamente
- Selección de datos: de datos heterogéneos a datos homogéneos
  - Operaciones de selección para aproximar datos como un espacio contiguo
- Analizador de error: la detección y corrección de errores



Plan de trabajo futuro con simulaciones en tiempo real en la nube.

Además, los investigadores trabajaron en otro concepto llamado *mode likelihood vector*. “Es un vector que, en un espacio n-dimensional, permite determinar, en tiempo real, cuál es el modo más probable en el que está un avión, por ejemplo, gracias al flujo de datos”. Con este modelo, el vuelo Air France 447 habría indicado al piloto que la velocidad del avión en el aire de 180 nudos tal vez se debía a que el *Pitot tube* se había congelado. Se recomputaría la información a partir de la velocidad del avión sobre el piso y la velocidad del viento y seguiría funcionando en piloto automático sin considerar la entrada incorrecta.

PILOTS ha sido probado en otros accidentes aéreos, tal como el ocurrido con un vuelo que iba de Italia a Túnez, que se quedó sin gasolina en la mitad del trayecto. Al aparato le habían colocado un indicador de combustible de otro modelo y los pilotos creían que tenían 2000 kilogramos más. “En este caso, es posible correlacionar la cantidad de combustible y el peso, con la velocidad del avión para una configuración determinada de los motores, con lo cual se detecta ese problema con 100 % de acierto”.

Ahora trabaja en la creación de un sistema experto para la cabina —tal como era *Deep Blue* en ajedrez—, capaz de dar un consejo en una situación de emergencia. IBM también apoya este proyecto,

“ Los intereses de investigación de Carlos Varela incluyen computación basada en la web/internet, *middleware* para sistemas distribuidos, y modelos y lenguajes de programación concurrente”.

Carlos Varela\*

pues está interesada en la computación cognitiva. “El accidente que estoy considerando para desarrollarlo es el de un avión que aterrizó en el río Hudson porque una bandada de pájaros, a 2500 pies de altura, dañó sus motores. No hubo pérdida de vidas, pero la maniobra habría podido salir muy mal si la aeronave se estrelló contra el George Washington Bridge que está muy cerca”.

Carlos Varela cuenta que, en una contingencia como esta, una persona necesita un mínimo de 30 segundos para entender lo que pasó, muy poco tiempo en términos humanos, pero mucho para cálculos computacionales. “Yo quisiera un sistema que presentara la opción más adecuada en esos primeros 30 segundos: devolverse de nuevo al aeropuerto La Guardia o aterrizar en otro cercano o en el río. Con los datos reales de los sensores del avión, me gustaría crear una lista de opciones ordenadas según la perspectiva de éxito para que el piloto la evalúe y tome una decisión”. Si

opta por una diferente, el programa recalculará y mostrará cómo las posibilidades van disminuyendo, es decir, cómo cambia la probabilidad de éxito de cada plan con el tiempo.

Aunque las funciones inmediatas de estos programas son aeronáuticas, el doctor Varela les encuentra utilidad en muchos otros campos. “Trabajamos en conceptos fundamentales, por ejemplo en establecer cuáles son los métodos lógicos y formales para argumentar que este plan sí es válido y cómo se combina la parte simbólica de los probadores de teoremas con la cuantitativa, que es lo empleado en un simulador para saber si es exitoso o no: es una combinación de elementos simbólicos con numéricos. Esto podría aplicarse en campos como la medicina, porque se le pueden poner al cuerpo también sensores para indicar situaciones anómalas”, concluye. ■

\*Carlos Varela es autor del libro *Programming Distributed Computer Systems: A Foundational Approach*, MIT Press, 2013.