

# Integrated System of Predictive Maintenance and Operation of Eletronorte Based on Expert System

A. Alvares, and R. Gudwin, *Member, IEEE*

**Abstract**—Maintenance based on condition and diagnosis technology has a relevant function in Power Electrical System's reliability. This paper proposes the methodological development and computational implementation of a system capable of failure diagnosis on electrical generation assets in order to aid the maintenance crew and the operation at the Coaracy Nunes hydropower plant, located in the Amapa state, in the decision making related with executions of operation and maintenance actions to minimize the incipient issues before they actually occur. The proposed methodology is based in the OSA-CBM (Open System Architecture for Condition-Based Maintenance) model to structure the system's knowledge base, in addition to implement fuzzy production rules to diagnosis of more complex failures. A case study was realized at the referred plant, showing in the results that the proposed system has a big potential on failure detection. Predictive maintenance and pattern recognition are technological enablers of Industry 4.0.

**Index Terms**—Condition Based Maintenance, Predictive Maintenance, Industry 4.0, OSA-CBM, Fuzzy Specialist System.

## I. INTRODUCCIÓN

DESDE la reestructuración del sector eléctrico en Brasil y en el mundo, las empresas de energía eléctrica básicamente experimentan un nuevo escenario competitivo en términos de relacionamiento, mercado, obsolescencia tecnológica y gerencial, calidad y seguridad del suministro de energía eléctrica al usuario final. Por otro lado, tal escenario impone un desafío cada vez mayor en relación al incremento de la confiabilidad de los sistemas y equipos de generación de energía eléctrica, siendo que, salvaguardar la integridad de los equipos pasó a ser una cuestión estratégica, teniendo en cuenta que actualmente una indisponibilidad operativa podría originar, en términos de costos, un mayor impacto en la empresa de lo que costaría reparar la propia falla [1].

Probablemente las áreas de mantenimiento y operación de toda concesionaria de energía eléctrica, experimentan mayores desafíos que cualquier otra área de gerenciamiento, ya que sus funciones principales están relacionadas al monitoreamiento de los equipos durante su funcionamiento y a la programación de eventuales tareas de mantenimiento de carácter correctivo y preventivo. Por lo tanto, se torna absolutamente necesario concebir estrategias de monitoreamiento de la condición y diagnóstico de fallas de los equipos en tiempo real, con la intención de auxiliar a los funcionarios de dichas áreas en el proceso de toma de decisiones, para mantener un suministro de energía eléctrica seguro y de alta calidad.

Por otro lado, en virtud de la complejidad cada vez más grande de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), en

términos de expansión física y uso de nuevas tecnologías, estos tienden a ser más vulnerables a fallas más complejas. Este problema de diagnóstico de fallas en SEPs es tratado aproximadamente hace más de tres décadas por la comunidad científica y empresarial a través del uso de sistemas inteligentes, siendo el mantenimiento predictivo y reconocimiento de patrones técnicos claves de la Industria 4.0 [2].

Dentro las principales contribuciones o *insights* que trae la propuesta metodológica el sistema SIMPO (Sistema Integrado de Mantenimiento Predictivo y Operación de Eletronorte) al estado del arte en diagnóstico de fallas/defectos en equipos de generación de energía eléctrica, se pueden sintetizar las siguientes:

- Una metodología genérica, independiente del contexto de aplicación, para generar una lista de diagnóstico de defectos/fallas además de un conjunto de actividades operacionales de mantenimiento/operación para mitigar esos defectos/fallas en equipos eléctricos usando una arquitectura cliente-servidor y tecnología *Applets/Webstart* o aplicación java, adherente a la Industria 4.0;
- El uso diferenciado de conceptos de lógica difusa (conjuntos difusos) para representar y lidiar con la incerteza contenida en las informaciones provenientes de los operadores y personal de mantenimiento, obtenidas a través de entrevistas que se valen de la tabla FMEA, respecto al diagnóstico de defectos/fallas basado en la condición del equipo que experimenta algún comportamiento anormal, siguiendo la filosofía de la MBC;
- A partir de la metodología propuesta, la implementación computacional de una base de conocimiento basada en reglas de producción no difusas desarrolladas utilizando [3], y un conjunto de reglas difusas utilizando [4], siguiendo la estructura del modelo OSA-CBM [5] y en sinergia con la Industria 4.0 [2].

## II. TRABAJOS RELACIONADOS

En la literatura se encontró que en los últimos cinco años ha sido abordado el problema en cuestión. Por ejemplo, la propuesta de sistema híbrido que reúne las ventajas de un sistema especialista y una red neural implementando el algoritmo de *backpropagation* para diagnóstico de fallas en SEPs, cuyos resultados experimentales con datos reales apuntan a que el sistema posee una gran precisión en la detección de fallas [6].

Otro trabajo propone una técnica híbrida para caracterización de defectos en la calidad de la energía eléctrica basada en el filtro lineal de Kalman y un sistema especialista difuso, el cual concluye con resultados de simulación basados en datos

reales, que la técnica propuesta posee un gran potencial para identificar de manera precisa los defectos en la calidad de la energía eléctrica [7].

Uno de los equipos eléctricos más estudiados dentro de la línea de investigación de diagnóstico de fallas, es el transformador de potencia. [8] proponen un abordaje basado en el diseño y aplicación de un sistema especialista difuso, cuyas principales conclusiones apuntan a que el sistema propuesto mejora la viabilidad y precisión del proceso de diagnóstico de fallas en transformadores de potencia además de proponer una nueva representación del conocimiento del especialista.

Dentro de los sistemas de plantas hidroeléctricas más investigados para el proceso de diagnóstico de fallas, se destaca el sistema generador. [9] proponen una metodología que aborda el problema de diagnóstico de falla por aislamiento del sistema generador en tiempo real, a través del uso de una técnica de monitoreo basada en métodos de radio frecuencia, inferencia difusa y Mantenimiento Basado en la Condición (MBC). Los resultados de este trabajo demuestran la efectividad del sistema en la detección de síntomas de descargas parciales causadas por la degradación del aislamiento del sistema generador estudiado.

Además del proceso de diagnóstico de fallas, existe una necesidad de auxiliar a los operadores de plantas hidroeléctricas en el proceso de monitoreo de la condición de los equipos en tiempo real para la programación de mantenimientos correctivos. Con el objetivo de satisfacer esa necesidad, fue concebido el Mantenimiento Basado en la Condición (MBC), siendo una estrategia para la toma de decisiones en el diagnóstico de fallas incipientes en tiempo real y el pronóstico del estado de funcionamiento de los equipos a futuro, donde la decisión para desempeñar el mantenimiento es alcanzada mediante la observación de la condición del sistema y sus equipos [10].

Dentro de las metodologías de mantenimiento, además del MBC, se tiene el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC) que puede ser definido como el proceso utilizado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo físico en el contexto de su operación. Así mismo el MCC usa herramientas de confiabilidad como la tabla FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) o análisis de modo y efectos de falla [11].

Referencias [5] y [12] presentan una recolección de métodos modernos de detección y diagnóstico de fallas y supervisión automática de procesos.

Además del MBC, fue desarrollado el modelo OSA-CBM, el cual reúne un conjunto de especificaciones de una arquitectura normalizada para la manipulación de información en sistemas de MBC. Estas especificaciones proponen desarrollar un sistema de MBC establecido por siete capas/módulos funcionales los cuales poseen una interfaz bien definida entre sí; tales módulos son: adquisición de datos, procesamiento de señales, monitoreo de la condición, diagnóstico, pronóstico, toma de decisiones y presentación [1], [13], [14], [15], [16].

No obstante, el modelo OSA-CBM posee varias limitaciones. Básicamente este modelo no especifica cómo debe ser implementado cada módulo en términos de las tecnologías y

algoritmos a ser desarrollados, tampoco especifica los detalles sobre el tratamiento de las informaciones, solo define los tipos de datos recibidos en la entrada y producidos en la salida de cada módulo funcional y su forma de transmisión, de modo que provee independencia entre módulos [1].

### III. FALLAS EN LA PLANTA DE COARACY NUNES

El objetivo del SIMPO es auxiliar al operador del sistema en la toma de decisiones, ya que este sólo cuenta con el sistema de supervisión SCADA, en el caso de WinCC de Siemens, para monitoreo del sistema. Dicho de otra forma, las reglas desarrolladas tienen por objetivo auxiliar al operador del sistema supervisor WinCC, generando diagnósticos de lo que está aconteciendo con los equipos tanto en la visión de operación como de mantenimiento. De esta manera, es posible presentar una toma de decisiones y son mostrar las tendencias que puedan llevar a un determinado modo de falla en el diagnóstico Fuzzy y toma de decisión basadas en fronteras de operación asociadas a las líneas de Operación Normal, Operación en Alerta, Operación con Alarmas y Trip, basado en reglas de producción y diagnóstico SiEntonces.

La tabla I presenta la cantidad de fallas de los equipos por sistema ocurridas en la planta de Coaracy Nunes hasta diciembre de 2015. Ésta tabla muestra la criticidad en función del histórico de fallas de cada equipo para cada una de las tres unidades generadoras. En función de estas fallas, fueron identificados y mapeados todos los modos de falla que ocurren en la operación, y posteriormente documentados a través de un FMEA de operación para cada uno de los sistemas.

TABLA I  
CANTIDAD DE FALLAS OCURRIDAS EN LAS UNIDADES GENERADORAS DE COARACY NUNES POR SISTEMA HASTA DICIEMBRE DE 2015

Sistema	Número de Fallas UGH 1	Número de Fallas UGH 2	Número de Fallas UGH 3
Sistema de la Turbina Sistema	50	57	39
Regulador de Velocidad Sistema del Generador	11	80	93
Sistema de Aducción y Descarga	40	46	33
Sistemas Auxiliares	15	11	3
	8	3	7

Con base en los históricos de modos de fallas, fue determinado el tiempo medio hasta la primera falla de los sistemas (MTTF), el cual es presentado en la tabla II.

La tendencia de ocurrencia de falla para cada sistema fue modelada a través de una distribución de probabilidad de Weibull, presentada en forma de un gráfico logarítmico –  $\ln(\text{número de fallas acumuladas}) \times \ln(\text{tiempo en horas})$  –, mostrando el comportamiento del número de fallas a lo largo del tiempo. Para la elaboración de este gráfico, fueron utilizados los registros de apagado e intervalos de tiempos de parada de las unidades generadoras hidráulicas de la planta de Coaracy Nunes, registrados en el sistema de gestión

TABLA II  
MTTF - TIEMPO MEDIO HASTA LA PRIMERA FALLA DEL SISTEMA EN HORAS

Equipo superior	Componentes con fallas frecuentes	Tiempo medio hasta la primera falla del sistema (MTTF)
Turbina hidráulica	Cabezote kaplan	337,36
	Cubierta Pala Volante	
Sistema de sellamiento del eje	Sello mecánico	138,78
Mancal guía de la turbina	Mancal guía de la turbina	706,97
Sistema del distribuidor	Pin	397,56

corporativa *SAPR3* e *Info\_opr*. Curvas semejantes, Weibull, fueron construidas para cada sistema utilizando la herramienta computacional *Weibull++* de la *Reliasoft*. Siendo así, los resultados fueron utilizados para determinar la criticidad de cada sistema e incluirlos en la base de conocimiento que soporta la toma de decisión [16].

Este análisis de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad es el primer paso a ser dado para levantar todos los modos de falla del sistema, y a partir de este levantamiento iniciar la construcción de la base de conocimiento en lenguaje *Clips* para la máquina de inferencia basada en *Jess* y *FuzzyJess* [3], [17].

#### IV. PROPUESTA METODOLÓGICA

Debido a la naturaleza de la representación del conocimiento se optó por utilizar lógica difusa debido a sus características conceptuales y matemáticas, para tratar con las incertezas y subjetividades intrínsecas en el lenguaje usado por el personal técnico en procesos industriales.

Como resultado de esta propuesta y procurando auxiliar el personal técnico en relación a la toma rápida de decisiones en lo que respecta al diagnóstico/reparación de fallas/defectos en equipos eléctricos, se usó y se actualizó la infraestructura de software ofrecido por SIMPREBAL (Sistema de Manutenção Preditiva de Balbina) [16], [14], que posee una arquitectura cliente-servidor y una interfaz hombre-máquina usando tecnología *Java Applets*, convirtiendo el sistema SIMPO más robusto y genérico en relación a su antecesor, reflejando las características metodológicas propuestas en este artículo.

Para dar soporte y credibilidad a la metodología y desarrollo computacional (base de conocimiento), se utilizó la tabla FMEA para mapear y estructurar las entrevistas hechas al personal técnico de la Planta Hidroeléctrica de Coaracy Nunes (PHCN). Por otro lado, fue estructurada la base de conocimiento (base de reglas de producción difusas y no difusas) siguiendo la estructura de capas del modelo OSA-CBM, o sea, Procesamiento de Señales, Monitoreamiento de la Condición, Evaluación del estado y Toma de Decisión.

Para una mejor visualización de la propuesta metodológica, en la figura 1 se presenta una estructura en diagrama de bloques mostrando el flujo de la información.

Siendo la figura 1 auto explicativa, cabe mencionar que la región en amarillo contiene los bloques conceptuales de la propuesta metodológica, mientras que la región en rojo refleja la interacción del sistema SIMPO, instalado en un computador a través de una interfaz hombre-máquina, desarrollada a través de la tecnología de *Java Applets*, con el personal técnico de la planta (operadores y personal de mantenimiento).

En las siguientes subsecciones serán abordadas las fases metodológicas destacando la adquisición, representación e interpretación del conocimiento especialista del personal técnico de la PHCN en lo que respecta al raciocinio envuelto en el diagnóstico de defectos/fallas en equipos de generación de energía hidroeléctrica.

#### A. FASE I: Proceso de Colecta y Estructuración de los Datos

Como en cualquier sistema eléctrico de potencia, en sus procesos industriales, existen equipos jerarquizados según las características técnicas de generación, seguridad, calidad y normas internas de mantenimiento y operación que varían en cada planta hidroeléctrica. En el caso de la PHCN, para el Sistema del Generador Eléctrico (SGE), la tabla III muestra la jerarquía de los equipos solamente para el Sistema de Enfriamiento del Generador Eléctrico (SEGE).

Teniendo presente una jerarquía completa de los equipos para un sistema en particular, como el ejemplo mostrado en la tabla III, se puede mapear un histórico de fallas del sistema en estudio, a través del uso de la tabla FMEA como se muestra en la tabla IV. En la tabla IV, se presenta un ejemplo para fines ilustrativos, de las entrevistas hechas a los operadores en relación al SEGE.

TABLA III  
JERARQUÍA DE EQUIPOS PARA EL SEGE

Equipo Superior	Equipo	Sistema	Componente
Sistema del Generador Eléctrico	Generador Eléctrico	Sistema de Enfriamiento del Generador Eléctrico	Radiadores Tuberías y Válvulas

En el caso de estudio (sección VI) fueron usados datos reales de las magnitudes físicas del SEGE con el fin de probar el concepto de la metodología. Para llenar la tabla FMEA, primero se establece la jerarquía del sistema en estudio (ver tabla III), segundo, se hace una auditoría a través de entrevistas a los especialistas de la planta (operadores/personal de mantenimiento), relacionando el componente en estudio con su histórico de fallas (identificando su modo-efecto-causa) y toma de decisiones para mitigar parcialmente o totalmente dicha falla. Cabe mencionar que para nuevas fallas mapeadas por los especialistas, la tabla FMEA debe ser actualizada.

Una vez construidas las FMEAs, para todos los equipos que componen las UGHs (Unidad Gerenciadora Hidráulica) en relación al histórico de falla/defecto del sistema en estudio, la fase siguiente es codificar ese conocimiento a través de un sistema basado en reglas de producción usando conceptos de lógica difusa para lidiar con el tema de la subjetividad en la información como se describe en subsección IV-B.

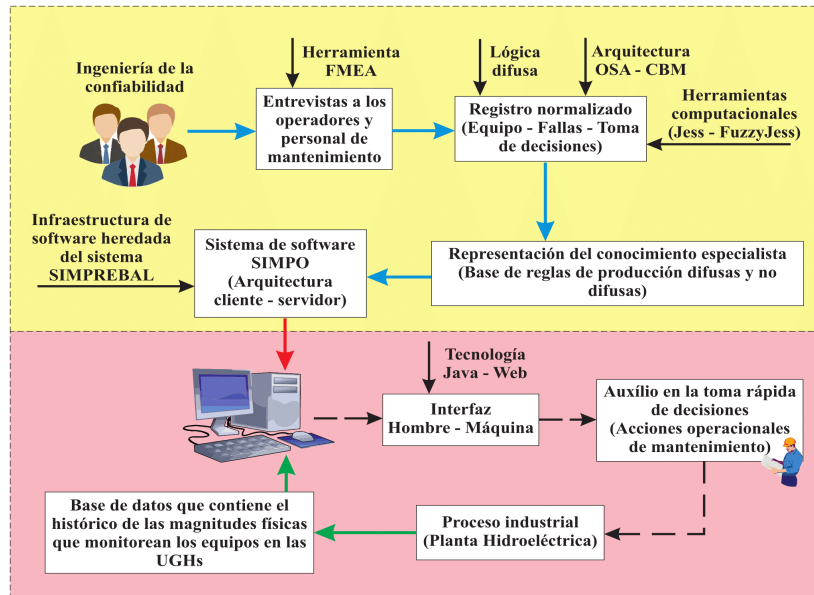


Fig. 1. Diagrama de bloques relacionado al flujo de información de la metodología e interacción con el usuario final (operador)

### B. FASE II: Creación y Asociación de la Base de Conocimiento usando Conceptos de Lógica Difusa

Una vez completa la tabla FMEA, se puede codificar dicho conocimiento en un formato de reglas de producción usando las herramientas computacionales JESS y FuzzyJess. La secuencia general para la creación de la base de reglas difusas y no difusas para diagnóstico de fallas/defectos en equipos eléctricos se muestra en la tabla V.

La tabla V, presenta parte del conjunto de reglas de producción (difusas y no difusas) para el SEGE siguiendo las fases del OSA-CBM. Por otro lado, vale resaltar que la fase de Toma de Decisión está implícita en las salidas de las reglas de producción, por ejemplo, el código: (Printout gui11 "GITaerFuzzyAlarme##"), escrito en lenguaje Jess, indica una salida gráfica y textual en la GUI (Interfaz Gráfica de Usuario) del sistema SIMPO exponiendo las principales informaciones mapeadas en las tablas FMEA para el SEGE en particular (ver tabla IV).

De manera resumida, la lógica difusa fue usada en esta metodología con el objetivo de fuzzificar (crear conjuntos difusos adecuados) los rangos de operación (por ejemplo, NORMAL (101-105°C), ALTO (105-110°C), etc.) de las magnitudes físicas que se monitorean en un determinado equipo eléctrico como se muestra en la figura 2. Vale recordar que la lectura de cualquier sensor es fuzzificada con una función *singleton* y los rangos de operación con funciones triangulares y trapezoidales respectivamente, tal como se muestra en la figura 2.

A través de las lecturas de la instrumentación relacionada a un equipo eléctrico específicamente, como en el caso del SEGE, el operador deduce algún tipo de defecto/falla que pueda presentar dicho equipo. Por lo tanto surgió la noción de fuzzificar los rangos de operación de las magnitudes físicas y relacionarlas según el raciocinio desarrollado por los operadores (en forma de reglas de producción SI-ENTONCES,

ver tabla V) que se ve reflejado en algún tipo de diagnóstico del equipo eléctrico.

Sin embargo, se pueden crear reglas más complejas a través del uso de lógica difusa relacionando varias magnitudes físicas para un determinado equipo, como es el caso de la regla difusa de cinco antecedentes para el SEGE que es presentada en la tabla V.

Por otro lado, según la literatura, existe una tendencia en los sistemas basados en reglas difusas en desempeñar tres fases metodológicas: fuzzificación, inferencia y defuzzificación; con la intención de generar algún valor numérico que sea interpretable en términos de control de alguna magnitud física cuya naturaleza sea mensurable, por ejemplo, abrir o cerrar cierto porcentaje de una válvula en un proceso de control en particular.

El proceso anterior es válido generalmente en el contexto de control de alguna variable física de salida para controlar algún proceso industrial en particular, sin embargo, en el contexto de diagnóstico de defectos/fallas ese raciocinio ya no es tan viable, por el hecho que en el área de mantenimiento es requerido saber primero cuales son las condiciones de los equipos (en que rangos oscilan los valores de sus magnitudes físicas de monitoreo) y a partir de eso, se realiza una inferencia por parte de los operadores para obtener una lista con los posibles modos, causas y efectos de falla, que a su vez generan un conjunto de posibles acciones operacionales de mantenimiento/operación para mitigar esos defectos/fallas que experimentan equipos en condiciones de funcionamiento anormales. Por lo tanto no fueron implementados los procesos de inferencia y defuzzificación.

Así, la propuesta metodológica está basada en el raciocinio lingüístico tomando apenas como referencias numéricas los rangos de las magnitudes físicas que se monitorean en los equipos de las UGHs a través de sensores/transductores. El proceso de asociación de reglas del sistema SIMPO es hecho

TABLA IV  
CONTENIDO PARCIAL DEL FMEA PARA EL SEGE

SISTEMA DEL GENERADOR ELÉCTRICO					
Generador Eléctrico - Sistema de Enfriamiento del Generador Eléctrico					
Función: mantener el Generador Eléctrico a una temperatura operable					
COMPONENTE	FUNCIÓN DEL COMPONENTE	MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA	CAUSA DE FALLA	TOMADA DE DECISIÓN
Radiadores	Elementos del tipo intercambiador de calor que ayudan a enfriar el aire caliente de salida producido por el generador eléctrico	Posible obstrucción en las tuberías o calentamiento en los radiadores	Señalización de ALERTA en el sistema SIMPO	Posible suciedad en las tuberías o residuos en los radiadores	Verificar el estado de las tuberías e/o radiadores (no emitir CA)
Tuberías y Válvulas	Conjunto de piezas que canalizan el flujo de agua para el enfriamiento de los radiadores	Posible fuga de agua en las tuberías	Señalización de ALARME en el sistema SIMPO	Posibles agujeros o desgaste en las tuberías	Cambiar la zona de tuberías con fuga (emitir CA)

TABLA V  
ESTRUCTURA DE LAS REGLAS DIFUSAS Y NO DIFUSAS PARA EL SEGE

Capas OSA-CBM	Tipo de Regla	Estructura de la Regla de Producción	Observaciones
Procesamiento de Señal	No difusa	SI (0 < T1 & T1 < 200°C) ENTONCES(Signal-GOOD) SI NO(Signal-BAD)	T1: Temperatura del aire de entrada de los radiadores.
Monitoreamiento de la condición	No difusa	SI (65 <= T1 & T1 < 73°C) ENTONCES (Condition -NORMAL) SE (73 <= T1 & T1 < 75°C) ENTONCES (Condition -ALTO) SI (75 <= T1) ENTONCES (Condition-ALARMA)	T2: Temperatura del aire de salida de los radiadores. T3: Temperatura máxima de los bobinados del estator.
Evaluación de estado	Difusa (1 antecedente)	SI T1 es ALTOv1 ENTONCES (Printout gui11 "G1TaerFuzzyAlto##") SI T1 es ALARMAv1 ENTONCES (Printout gui11 "G1TaerFuzzyAlarme##")	V1: Salida de agua de los radiadores. P1: Potencia reactiva del generador eléctrico. *T1, ..., P1: fueron representadas como funciones singleton.
	Difusa (5 antecedentes)	SI T1 es NORMALv1 y T2 es ALTO y T3 es NORMAL y V1 es NORMAL y P1 es ALTO ENTONCES (Printout gui11 "Ga 1DiagFuzzyRule1##")	*ALTOv1, ALARMEv1, NORMALv1: Variables lingüísticas representadas por funciones trapezoidales y triangulares.

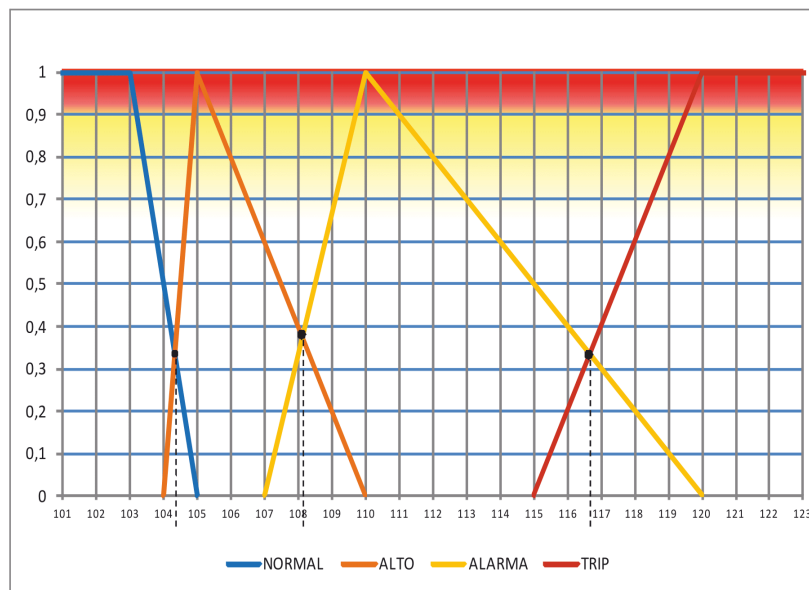


Fig. 2. Fuzzificación de las temperaturas de los bobinados pertenecientes al SEGE

usando el motor de inferencia de las herramientas JESS y FuzzyJess. La salida de ese proceso es básicamente una lista de actividades operacionales de mantenimiento, además de información relacionada al modo y causa de la falla mapeada en la tabla FMEA (ver tabla IV) que a su vez sirve de auxilio

para la toma rápida de decisiones sobre el equipo eléctrico que experimenta algún tipo de comportamiento anormal, dejando solamente al operador que interactúe con la interfaz hombre-máquina para decidir qué opción, dentro de las ofrecidas por el sistema, se adapta mejor al equipo en cuestión, considerando

las características de un escenario en particular.

## V. MODELAMIENTO FUNCIONAL DEL SIMPO BASADO EN IDEF0

La figura 3 muestra el diagrama A1 del modelamiento funcional en IDEF0 para el desarrollo del SIMPO, dejando ver todas las entradas, salidas, controles y mecanismos implementados en el SIMPO referente a sus dos módulos principales: Ikernel y Cliente Web; concebidos con una arquitectura cliente/servidor.

El módulo Ikernel (fig. 3) realiza el procesamiento de los seis niveles del modelo OSA/CBM, siendo el servidor de la arquitectura del SIMPO. Este módulo convierte las magnitudes adquiridas por los sistemas de adquisición de datos (Instrumentación con protocolo Modbus, OPC, SQL, otros protocolos) en información para el monitoreamiento on-line de la condición de los componentes, sistemas y subsistemas supervisados, con la finalidad de auxiliar en la toma de decisión, basado en políticas de mantenimiento predictivo, de condición y/o de confiabilidad.

Por otra parte, el módulo Cliente Web es el nivel de presentación del modelo OSA-CBM, siendo responsable por la presentación de la toma de decisión en las Interfaces Gráficas del Cliente (GUI) desarrolladas en Java y PHP/HTML.

En la figura 4 se desglosa el contenido del nivel A1 (módulo I-kernel). Este módulo comprende el tratamiento de datos e información de mantenimiento, basados en el flujo de información de los niveles de adquisición de datos, procesamiento de señal, monitoreamiento de la condición, evaluación de estado y toma de decisión, del modelo OSA-CBM; siendo estos sub-módulos funcionales del módulo I-kernel. Estos son los niveles funcionales del tratamiento de información que el sistema especialista utilizará para su funcionamiento y auxilio en la toma de decisión en el módulo Cliente-Web. Los últimos dos sub-módulos de éste nivel son para el almacenamiento de información y comunicaciones Cliente Servidor, los cuales son necesarios para complementar las funcionalidades del sistema especialista.

A continuación serán descritos cada uno de los sub-módulos funcionales anteriormente mencionados, pertenecientes al nivel A1 (Figura 4), relacionados con la metodología de concepción del sistema SIMPO:

- **Adquisición de Datos:** Es representado por la actividad A11, la función es recolectar los datos necesarios para el funcionamiento del SIMPO. La colecta es realizada a través de sistemas centralizados de señales, como: CLP, Instrumentación inteligente, entre otros. Estos sistemas centralizados necesitan del sistema OPC-Server para traducir los datos de diferentes lenguajes de programación (*Siemens, Allen Brandley, Foxboro, Smar*) que utilizan diferentes protocolos de comunicación (*Modbus, Profibus, Fieldbus, ethernet*) en datos comunes de lenguaje WINDOWS. La adquisición de datos es realizada mediante un mapeamiento de la dirección de los dispositivos de monitoreamiento;
- **Procesamiento de Señal:** La actividad A12 representa este sub-módulo, su función es conferir que las magnitudes

inseridas en el sistema estén dentro de los parámetros de calidad determinados por los instrumentos de adquisición de datos o dentro de los rangos de valores configurados en los dispositivos de adquisición de datos;

- **Monitoreamiento de Condición:** Este sub-módulo es representado por la actividad A13, la función es determinar el estado de funcionamiento de un componente, equipo o sistema. Este sub-módulo está programado para la realización del tratamiento de información que determine los estados exactos o *fuzzy* de la condición de funcionamiento de los componentes, dependiendo de la necesidad del sistema a ser monitoreado;
- **Evaluación del Estado:** Este sub-módulo es representado en la actividad A14 y realiza los diagnósticos de los defectos de falla en los equipos o sistemas. En este sub-módulo son programadas las reglas de producción y las reglas de producción *fuzzy*, representando la base de conocimiento para el tratamiento de informaciones inseridas en el sistema;
- **Toma de Decisión:** El sub-módulo es representado con la actividad A15, su función es la de generar sugerencias de actividades de mantenimiento para mantener el proceso de producción;
- **Almacenamiento de Información:** La actividad A16 del esquema, corresponde a este sub-módulo y su función es almacenar históricos de ocurrencias de anomalías, auxilios de la toma de decisión y magnitudes de las variables de proceso, eso con la finalidad de posteriores análisis de comportamiento;
- **Módulo de Comunicación Servidor-Cliente:** Este sub-módulo es el último del procesamiento de información del módulo I-kernel y corresponde a la actividad A17. Está relacionado a la interface de comunicación entre el módulo I-kernel y el módulo de Cliente-Web. Su función es interactuar con el usuario final a través del módulo Cliente-Web para la entrega de información solicitada por éste y disponibilizar las funcionalidades del sistema.

La figura 5 presenta el nivel A142 que está relacionado a los componentes básicos de la funcionalidad reglas *fuzzy*: la Fase de Codificación *fuzzy*, Fase de Inferencia *fuzzy* y Fase de Diagnóstico Fuzzy. A continuación son descritos los componentes de la funcionalidad reglas *fuzzy*:

- **Fase de Codificación Fuzzy:** es representada con la actividad A1421 del modelamiento IDEF0 y su actividad es fuzzificar los valores de entrada a través de funciones de pertinencia, que son determinadas dependiendo de la necesidad de procesamiento. En la selección de la función de pertinencia para la fuzzificación de los valores de entrada es importante promover un equilibrio entre el costo de procesamiento digital y la precisión de procesamiento, pues algunas funciones requieren de un excesivo procesamiento digital, siendo las funciones de pertinencia lineales las más recomendadas en la implementación de las reglas de producción *fuzzy*, pues su procesamiento digital es bajo;
- **Fase de Inferencia Fuzzy:** esta fase es representada con la actividad A1422 y su función está relacionada con

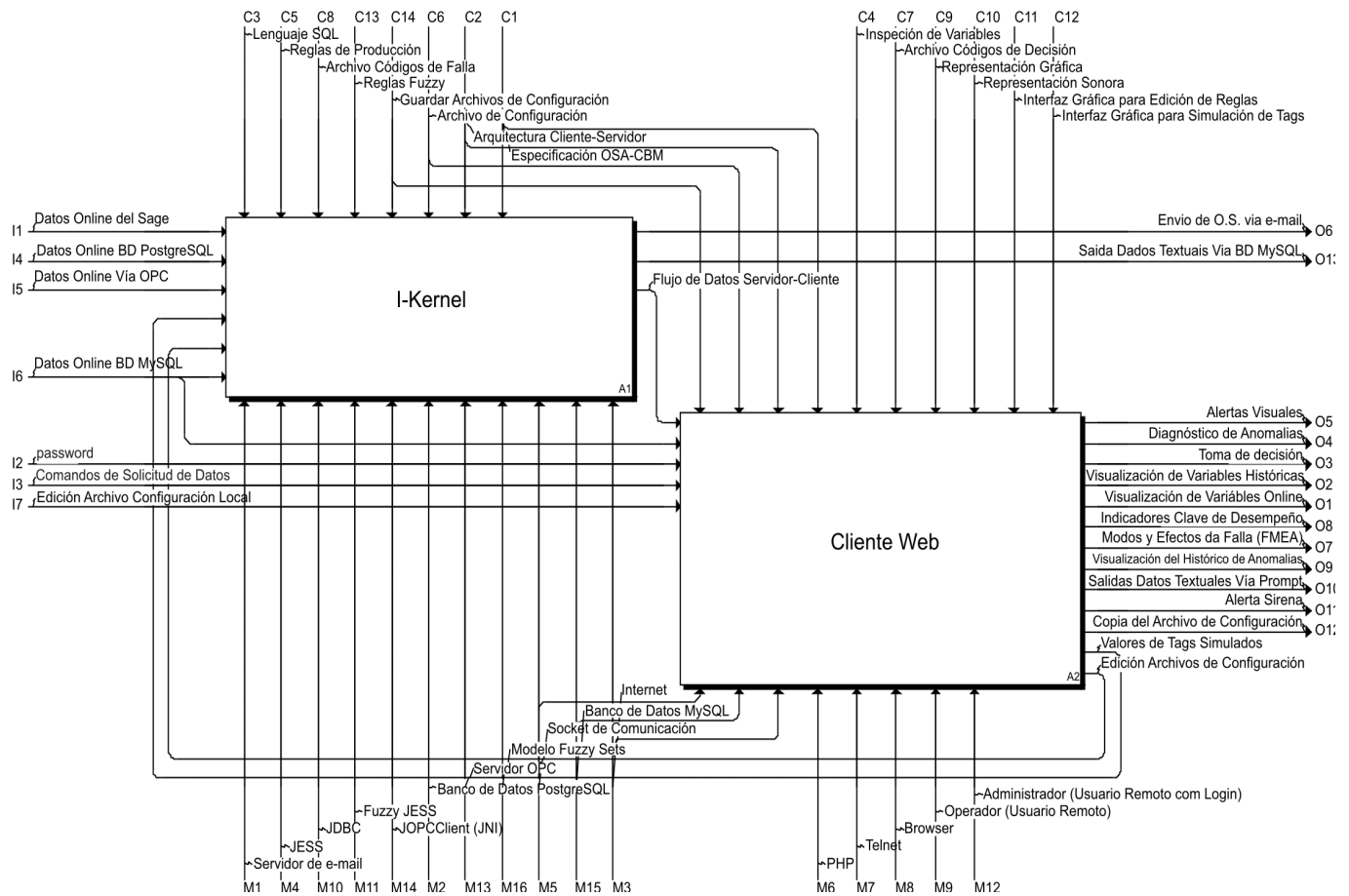


Fig. 3. Diagrama A1 e A2 del modelamiento IDEF0 del SIMPO

la realización del casamiento de los valores fuzzificados de la fase de codificación con la base de reglas de conocimiento, para disparar o ejecutar las reglas que poseen algún grado de sobre-posición establecido. En esta fase es posible aplicar dos tipos de métodos de inferencia *fuzzy*: el de estilo *Mandami* y el de estilo *Larse*. Esta fase también entrega el diagnóstico para auxiliar en la toma de decisión;

- Fase de Diagnóstico *fuzzy*: la actividad A1423 representa la fase de diagnóstico *fuzzy*, que transforma los resultados de la fase anterior, o sea, los conjuntos *fuzzy* resultantes en un número real. Este valor representa una inferencia física del estado de la condición dependiendo del método de desfuzzificación implementado en la regla. La biblioteca JESS tiene la disponibilidad de aplicar diferentes métodos de desfuzzificación como: el método de centro de gravedad, centro de área, media de peso, media de máximos, entre otros. El método a ser escogido dependerá del objetivo de la regla implementada.

La Figura 3 muestra el diagrama hijo A2 del modelamiento IDEF0 del SIMPO, representando los componentes del módulo Cliente-Web. Este módulo está relacionado al nivel de presentación del modelo OSA-CBM, siendo la interface gráfica del sistema computacional especialista para la entrega de solicitudes al usuario final.

La interface gráfica coloca a disponibilidad del usuario las

funcionalidades del SIMPO, como visualización de ocurrencias de anomalías presentes en los componentes, equipos o sistemas. Esta interface incluye opciones de menú que torna amigable el uso del sistema computacional. Tales opciones están relacionadas a la presentación de datos históricos, curvas de tendencia de comportamiento, inspección de variables, visor de alarmas presentes en el sistema, ejecución de modos de funcionamiento del SIMPO (on-line, Simulation, Play-Back), edición, creación de reglas de conocimiento, entre otras.

### VI. CASO DE ESTUDIO: SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL GENERADOR ELÉCTRICO DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA DE COARACY NUNES

De acuerdo con la tabla III, se puede señalar que los principales componentes del equipo Generador Eléctrico (GE) son los bobinados, los cuales son elementos claves en el monitoreamiento del Sistema Generador Eléctrico (SGE). Siendo así, los operarios deberían poseer una buena experticia para lidiar con escenarios de falla de forma eficaz para garantizar la disponibilidad y confiabilidad del funcionamiento del SGE. Por otro lado, el SEGE perteneciente al GE, tiene como función principal mantener el GE a una temperatura operable ofreciendo una buena refrigeración de sus radiadores, tuberías y válvulas a través del monitoreamiento de sus magnitudes físicas como la temperatura del aire de entrada, de salida y de los bobinados.

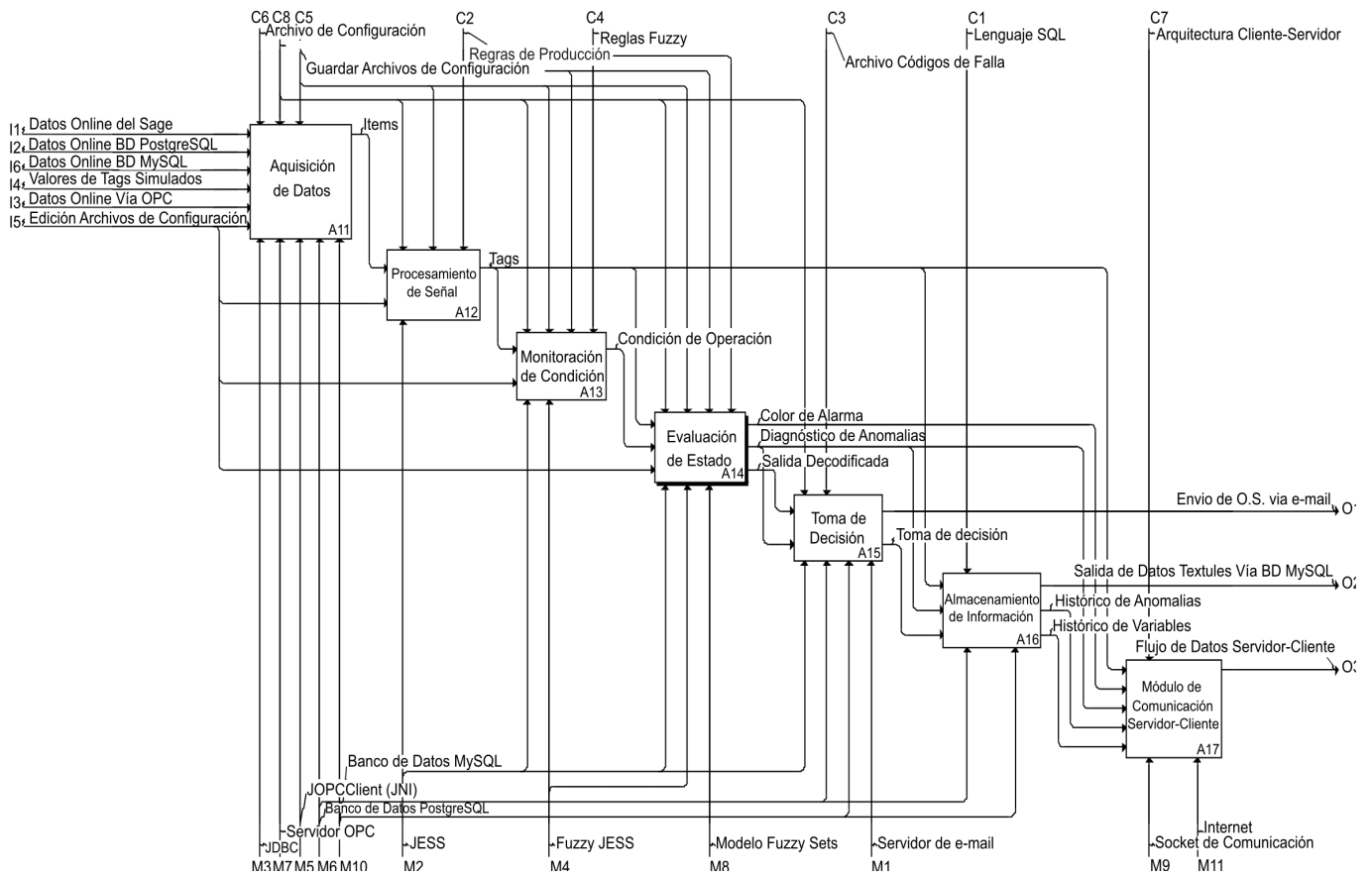


Fig. 4. Diagrama A11 - A17 del modelamiento en IDEF0 del SIMPO

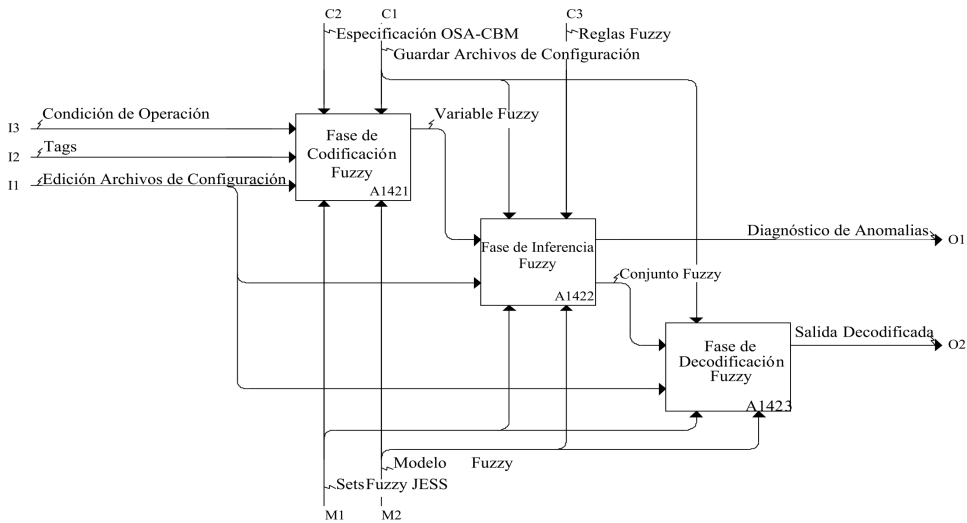


Fig. 5. Diagrama hijo A142 del modelamiento IDEF0 del SIMPO

Para validar la metodología y la base de conocimiento del sistema SIMPO, construida a partir de entrevistas con los operadores de la PHCN, como se menciona en [16], fue generada una base de datos para simulación, usando datos reales del comportamiento de las magnitudes físicas pertenecientes a todos los equipos superiores de la referida planta en cinco oportunidades, con el fin de validar la metodología y ajustar las

funciones de pertinencias difusas. Además de eso, también fue depurada la base de conocimiento directamente con el personal de operación y mantenimiento de la planta.

Cabe resaltar que la validación metodológica hecha en [16] fue establecida usando datos simulados de las magnitudes físicas, además del uso de una base de conocimiento aún no validada por el personal de operación y mantenimiento de



la PHCN. Siendo así, este trabajo posee el diferencial de la validación metodológica del SIMPO usando datos reales de las magnitudes físicas además de implementar una base de conocimientos validada.

## VII. RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO CON EL SISTEMA SIMPO ON-LINE

El SIMPO es una herramienta computacional automática que sirve de apoyo en la toma de decisiones para el personal de operación y mantenimiento de la PHCN. Su base de conocimiento se estructuró con la experiencia de los operadores y personal de mantenimiento de la empresa, obtenida mediante entrevistas y acompañamiento del personal durante sus funciones, con el objetivo de poner a disposición la información generada en el estudio.

En la figura 6 se muestra el resultado entregado por el sistema en la eventualidad del caso de estudio, y presenta información relacionada al diagnóstico del defecto/falla de un equipo o sistema en particular.

La figura 6 también presenta el diagnóstico de calentamiento anormal de los bobinados. La interfaz del SIMPO alerta preventivamente sobre una tendencia de calentamiento, la cual es presentada en el espacio de los mensajes fuzzy. Un segundo mensaje es emitido por el sistema informando sobre una posible suciedad en el radiador, este mensaje es presentado en el espacio de mensajes de lógica operacional.

El objetivo de estos mensajes es auxiliar al operario en la toma de decisiones frente a la presencia del defecto/falla, el sistema hace el seguimiento de una eventualidad y presenta en pantalla sólo lo que aún está aconteciendo. La interfaz muestra también un histórico de anomalías, que es registrado en una base de datos para verificar la ocurrencia de un evento anormal que no haya sido percibida por el operario. El sistema SIMPO posee un mecanismo auxiliar para la verificación de su propia base de conocimiento, a través de la confirmación por parte del operador, de que las sugerencias proporcionadas por el sistema son realmente adecuadas. Esta opción aparece disponible cuando el operador hace clic sobre el link de identificación de la condición y anomalía, abriéndose una ventana de aplicación web en el buscador, que permite la obtención de más información referente a la anomalía al mismo tiempo que se confirma la recomendación generada por el sistema.

Un ejemplo de la ventana puede ser visto en la figura 7. De esta manera el operador valida la información ofrecida por el SIMPO y el sistema puede calcular su confiabilidad de manera interactiva e incremental, lo que contribuye durante el análisis del comportamiento del sistema computacional por parte de un especialista, para ajustar y sintonizar la base de conocimiento, haciendo el sistema más confiable y eficiente.

El FMEA generado por el sistema ofrece información completa sobre diagnóstico de fallas y sugerencias de actividades operacionales de mantenimiento, en relación a un equipo en particular que experimenta alguna anomalía. El SIMPO permite la inclusión de nuevas reglas y la modificación de la base de conocimiento en caso necesario, lo cual hace del sistema más flexible y confiable.

La figura 8 presenta la función de “Visor de Alarmas” del SIMPO. Esta funcionalidad exhibe todas las alarmas que se activan durante el funcionamiento del SIMPO, ayudando al usuario a visualizar de modo global las posibles ocurrencias de fallas en las unidades generadoras. La visualización de las alarmas es similar a la presentada en la interfaz gráfica del SIMPO, o sea, rojas cuando la condición es crítica y amarillo en situaciones de alarma. En el campo Código es posible acceder la FMEA de la falla presentada, similarmente a los links de la interfaz gráfica.

Las alertas visualizadas en la ventana “Visor de Alarmas” están relacionadas a las condiciones fuzzy del estado de condición ALTO, cuando el grado de pertinencia prevalece en relación al estado anterior. La figura 8 también presenta recursos para auxiliar la toma de decisión relativa a los componentes del bobinado del estator con la temperatura alta (falla G20359EE1) y la potencia reactiva alta (falla G20355GE1), lo que determina una toma de decisión más específica en relación al generador eléctrico (falla G20357R18).

## VIII. CONCLUSIÓN

Las principales contribuciones de este trabajo de investigación son en el desarrollo metodológico e implementación de un sistema computacional, designado como SIMPO (Sistema Integrado de Mantenimiento Predictivo y Operación), capaz de generar diagnóstico de fallas en tiempo real, con la intención de auxiliar al personal de operación y mantenimiento en la toma de decisiones en relación a las acciones operacionales y de mantenimiento, buscando mitigar las fallas incipientes en los equipos de generación de energía hidroeléctrica. Eletronorte hizo el depósito de patente del método [18] y el depósito del software [19] en el INPI.

Este trabajo complementa el ya presentado en [16] y los registros de software y patente en el INPI [19] y [18]. En éste se promueve la validación de la metodología y de la base de conocimiento de reglas *fuzzy* y *no fuzzy* del sistema SIMPO, mediante el acompañamiento al funcionamiento del sistema en tiempo real durante aproximadamente un mes, por parte de los operadores y personal de mantenimiento de la PHCN, que sirvió de base para la implantación definitiva del SIMPO en Coaracy Nunes, realizada del 15 al 20 de Noviembre de 2015.

El SIMPO fue implantado en agosto de 2016 en la Planta de Coaracy Nunes y está ayudando en la toma de decisiones a los operadores y personal de mantenimiento de la Planta Hidroeléctrica. A través del modo de operación *on-line* los operadores y personal de mantenimiento reciben las sugerencias de diagnóstico de fallas y defectos, complementando la información del sistema *SCADA WinCC Siemens*, permitiendo una toma de decisión más segura por parte de los operadores, que cuentan con una herramienta computacional a disposición robusta para la toma de decisiones en tiempo real. Cada decisión tomada por un operador es publicada para todos los clientes de las interfaces gráficas conectadas, ya sea vía e-mail para la lista operadores con interés en aquella toma de decisión (mecánicas, instrumentación, eléctricos, gerencias, otras listas).

El sistema SIMPO tiene un índice de acierto alrededor del 90% en la toma de decisiones, asociado a cuatrocientos

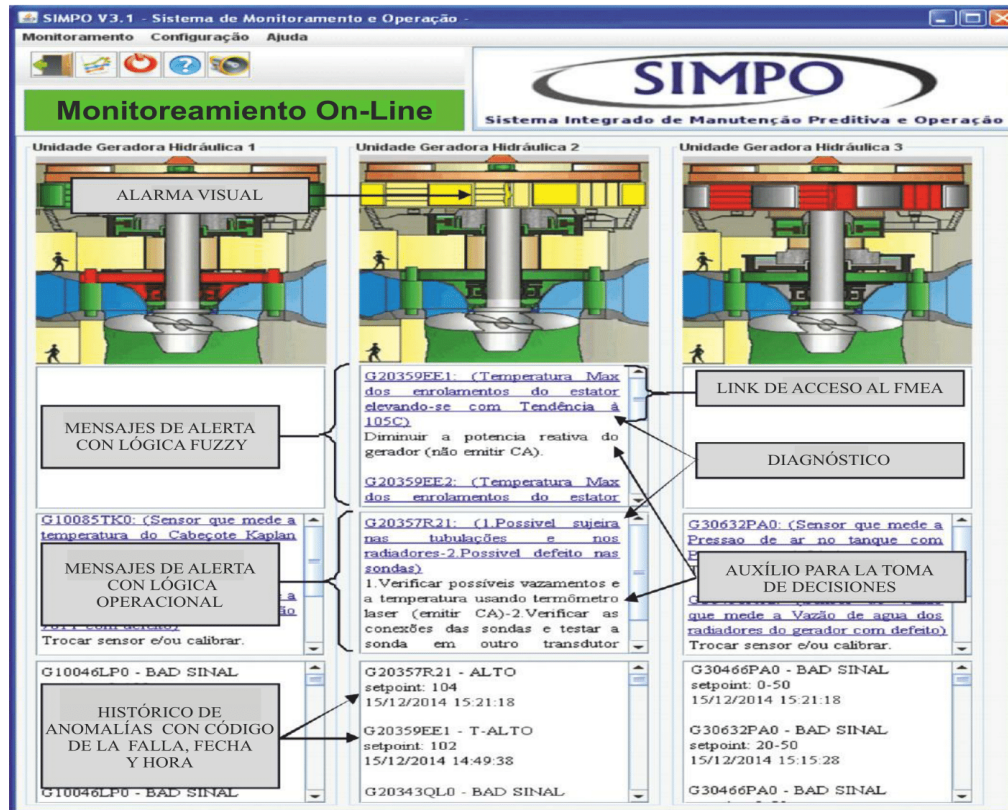


Fig. 6. Interfaz hombre-máquina del sistema SIMPO para el auxilio en la toma de decisiones en el diagnóstico de fallas

códigos de fallas y defectos, mapeados e indexados en una base de conocimiento con reglas de producción y reglas *fuzzy* relativas a la instrumentación usada en la planta, el sistema del generador, el sistema de la turbina y el sistema de regulación de velocidad. Estos son los principales sistemas de una unidad generadora hidráulica (turbina tipo *Kaplan*), los cuales concentran el 95% de los defectos y fallas que ocurren en una unidad generadora.

A través del modo de operación *playback* el sistema permite el entrenamiento de los operadores y la visualización de todas las tomadas de decisión generadas por el SIMPO a partir de una data definida, además de almacenar los valores de los Tags (magnitudes monitoreadas) del proceso, teniendo por finalidad el refinamiento de las reglas y de las fronteras de definición de los valores de las magnitudes de proceso especificadas en la base de conocimiento en lenguaje *Clips Jess*.

Ya el modo de simulación permite la prueba de reglas incluidas o alteradas a través de la modificación manual de los Tags, simulando valores de magnitudes del proceso, con lo que se busca el disparo y validación de las reglas, así como la actualización de la base de conocimiento.

El SIMPO permite el entrenamiento y reciclaje del personal técnico envuelto en las actividades de operación y mantenimiento de la Planta, contribuyendo de forma significativa en la calidad de la toma de decisiones, pues algunos eventos de modo de falladefecto detectados, pueden aparecer por primera vez para el operador del sistema, y el diagnóstico del SIMPO permite una tomada más segura por parte de operadores y

personal de mantenimiento con menos experiencia. Un caso de ejemplo ocurrido en la Planta referenciada en marzo de 2015, donde una gotera en el techo de una unidad generadora, disparó un sensor de humo para detección de incendio y en seguida disparó una sirena alarma de incendio, lo que fue identificado por el SIMPO como una falla del sensor, corto debido a la gota de agua, y no un principio de incendio, mostrando al operador de la planta donde estaba el problema, lo cual impidió la desactivación de la unidad generadora. En caso que el sistema SIMPO no estuviese presente, el operador apagaría la unidad generadora pues el sistema supervisor WinCC (SCADA) no hace este tipo de toma de decisión. En seguida se haría la inspección presencial y verificación de la existencia o no de incendio.

El SIMPO es un sistema corporativo usado por Eletronorte, que ha sido concebido usando conceptos de la Industria 4.0, como computación en las nubes, Internet de las Cosas Industrial (IIoT), Sistemas Cyber-Físicos y Mantenimiento Predictivo. El sistema SIMPO fue implantado en una máquina / servidor virtual en Brasilia accediendo a la red de comunicación local de la instrumentación de Coaracy Nunes, piso de fábrica, vía Intranet en fibra óptica, obteniendo las magnitudes de operación del proceso, tags de la instrumentación, almacenando en base de datos de SIMPO y procesando las reglas de la base de conocimiento SIMPO usando el sistema experto *Jess / FuzzyJess* y generando la toma de decisión de diagnóstico y pronóstico *fuzzy*, y publicándolo a través de Emails y pantallas del sistema, sinóptico SIMPO..

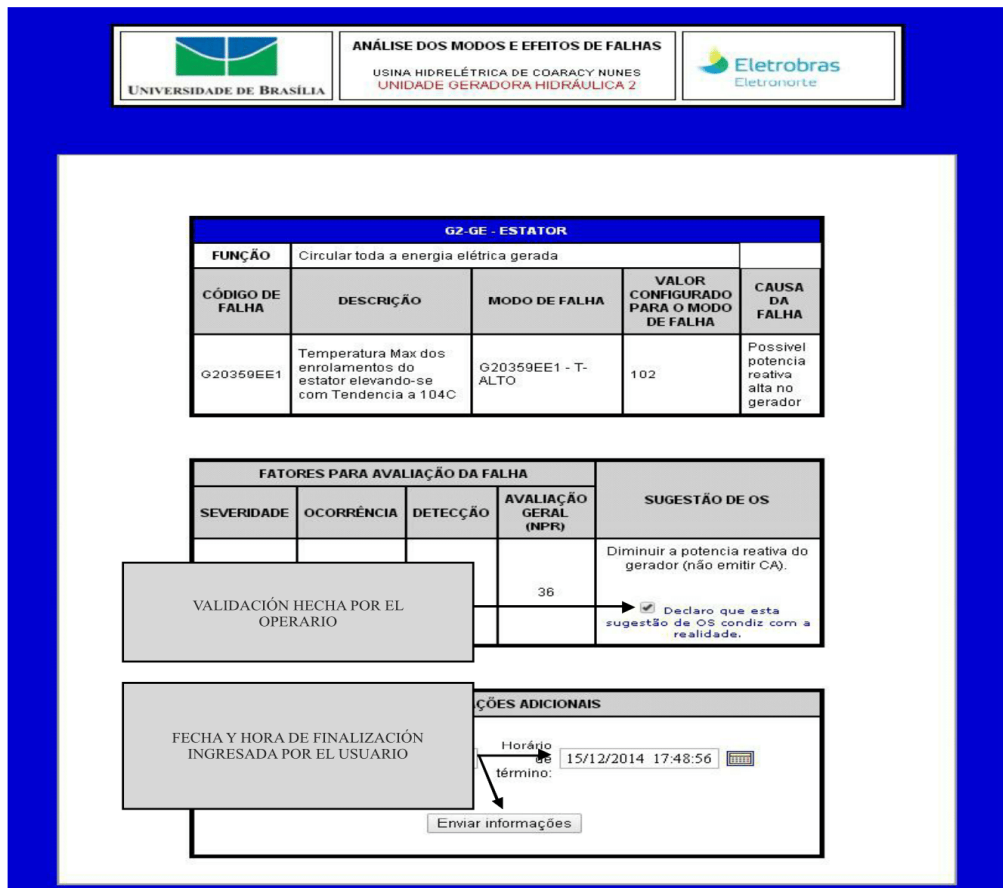


Fig. 7. Tabla FMEA generada por el sistema computacional SIMPO y validación de la información registrada por el operador

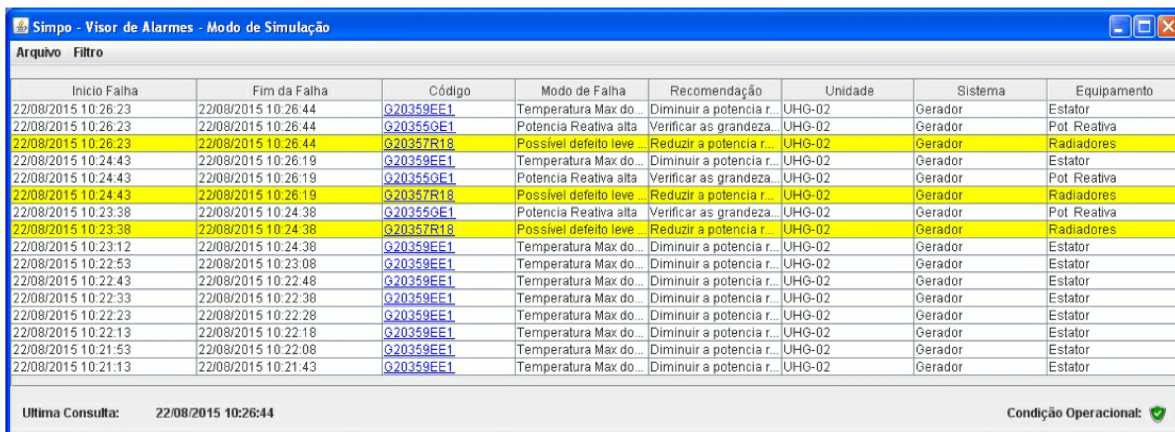


Fig. 8. Visor de alarmas activas en la UGH2 en el modo de Simulación

Eletronorte está actualmente implantando el SIMPO en otras plantas de generación, en especial será desarrollada una nueva base de conocimiento para mantenimiento, operación, supervisión y monitoreamiento remoto de un Parque Eólico en Rio Grande do Norte - Brasil, donde la supervisión actualmente, es realizada de forma remota, por una empresa Española contratada en la implantación del Parque Eólico en 2014, que hace la operación remota de la planta vía Internet y genera documentación gerencial diaria para Eletronorte, el cual no

tiene acceso al sistema de supervisión y gestión de activos implantado en Parque Eólico.

El diagnóstico de fallas y análisis de confiabilidad de los equipos propuestos en la metodología, están siendo validados después de la implantación en Coaracy, siendo así que hasta el momento las reglas desarrolladas han tenido un alto índice de suceso en la detección de anomalías, con un acierto de aproximadamente el 90%.

Las falsas alarmas que el sistema podría generar son mini-

mizadas a través del ajuste y sintonía de las reglas. Para cada falsa alarma detectada se hace una sintonía en la regla que lo generó, alterando las fronteras de los valores que generan las alarmas y alertas en el sistema.

De esta manera, Eletronorte, posee con SIMPO una herramienta de diagnóstico de fallas en tiempo real, que podrá ser utilizada en la mayoría de sus activos de generación y transmisión, dado que el sistema SIMPO por ser totalmente reconfigurable, puede monitorear cualquier equipo que ponga a disponibilidad sus magnitudes de proceso (temperatura, presión, tensión, potencia, vibración, corriente, densidad, entre otras) a través de protocolos OPC y SQL, mostrando que el SIMPO puede contribuir de forma significativa en la gestión de activos de Eletronorte.

Cabe resaltar el desarrollo de una GUI genérica alternativa, denominada Visor de Alarmas, la cual permite al cliente visualizar sólo las sugerencias generadas por el sistema para la toma de decisiones a través de un formulario dinámico, relacionadas con el monitoreamiento de cualquier equipo o planta industrial.

La base de conocimiento del SIMPO contiene actualmente 408 Reglas de Producción Se/Entonces y 152 Reglas Fuzzy mapeando una toma de decisión con 400 códigos de fallas asociados a la toma de decisión de diagnóstico de detección de tendencia de defectos y fallas en la instrumentación (sensores de presión, temperatura, vibración, densidad, potencia, voltaje, rotación y corriente) y en los sistemas del generador, sistema de la turbina y del sistema regulador de velocidad. El detallamiento de esta base de conocimiento puede ser consultado en [17] donde son presentados los códigos de falla del SIMPO. Una versión académica del sistema SIMPO es accesible en la URL <http://simpo.graco.unb.br>.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a Eletronorte por la información permitida de su sistema además del apoyo financiero a través del proyecto ANEEL-Eletronorte, 1260 (N. Aneel 003/2010).

## REFERENCIAS

- [1] A. J. Álvares, E. Amaya, R. Souza, R. Tonaco, and A. A. Lima, "Sistema inteligente de manutenção baseada em condição para usina hidrelétrica de balbina," in *Anais do V congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica-V CITENEL, Belém/PA*, vol. 22, 2009.
- [2] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman, "Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review," *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 616 – 630, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917307130>
- [3] E. Friedman, *Jess in action: rule-based systems in java*. Manning Publications Co., 2003.
- [4] R. Ochar, "Nrc fuzzyj toolkit for the javatm platform user' guide version 1.10a," *Institute of Information Technology National Research Council of Canada*, 2006.
- [5] G. Vachtsevanos, F. L. Lewis, M. Roemer, A. Hess, and B. Wu, *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems*. John Wiley & Sons, 2006.
- [6] D. Ma, Y. Liang, X. Zhao, R. Guan, and X. Shi, "Multi-bp expert system for fault diagnosis of powersystem," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, no. 3, pp. 937–944, 2013.

- [7] A. A. Abdelsalam, A. A. Eldesouky, and A. A. Sallam, "Characterization of power quality disturbances using hybrid technique of linear kalman filter and fuzzy-expert system," *Electric power systems Research*, vol. 83, no. 1, pp. 41–50, 2012.
- [8] K. Wu, S. An, G. Ma, and Y. Tao, "Research and application of fuzzy expert system on transformer fault diagnosis," in *Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), 2012 International Conference on*, vol. 1. IEEE, 2012, pp. 378–382.
- [9] Q. Sun, Z. Zhou, and W. Guo, "An approach of insulation state online monitoring and fault diagnosis for generator and its application," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*. IEEE, 2010, pp. 1–6.
- [10] Y. Peng, M. Dong, and M. J. Zuo, "Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 50, no. 1-4, pp. 297–313, 2010.
- [11] J. Moubray, *Reliability centered maintenance*. Industrial Press, 1997.
- [12] C. Verde, S. Gentil, and R. M. menéndez, *Monitoreo Y Diagnóstico Automático de falhas En Sistemas Dinâmicos*. Editorial Trillas, 2013.
- [13] OSA-CBM, "Open system architecture for condition based maintenance," Available on: <http://www.mimosa.org>, 2015.
- [14] I. P. M. Marcos, A. J. Álvares, and L. F. A. Realpe, "Methodology for the building of a fuzzy expert system for predictive maintenance of hydroelectric power plants," in *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, vol. 5, 2012, pp. 617–626.
- [15] I. P. Moreno, "Metodologia para monitoramento inteligente de condição de máquina: Uma abordagem usando funções de pertinência fuzzy," Master's thesis, Universidade de Brasília, 2012.
- [16] I. P. M. Marcos, A. J. Álvares, and M. R. U. Abadia, "Metodologia para diagnóstico de falhas em unidades geradoras hidráulicas usando conceitos de lógica difusa (conem2014-1337)," in *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 2014.
- [17] M. R. U. Abadia, "Desenvolvimento de uma base de conhecimento com regras fuzzy e produção visando monitoramento baseado em condição de uma usina hidrelétrica," Master's thesis, Universidade de Brasília, 2015.
- [18] A. J. Alvares and R. Gudwin, "Método para monitoramento e diagnóstico de modos de falha de equipamentos em usinas hidrelétricas baseado em sistema especialista," May05 2018, INPI BR 10 2016 023297 0 A2. [Online]. Available: <http://www.inpi.gov.br>
- [19] A. J. Alvares, "Sistema integrado de manutenção preditiva e operação simpo," Jan.05 2018, INPI BR 51 2018 000030 4. [Online]. Available: <http://www.inpi.gov.br>



**Alberto J. Alvares** é professor associado da Universidade de Brasília atuando em Engenharia Mecatrônica. Obteve graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Brasília (1986), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1990) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2005) e Pós-Doutorado pela Universidade de Jaume (2017).



**Ricardo Gudwin** é professor associado no Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial, da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, da Universidade Estadual de Campinas - DCA/FEEC/UNICAMP, atuando na área de sistemas inteligentes. Obteve sua graduação em Engenharia Elétrica (1989), Mestrado em Engenharia Elétrica (1992), Doutorado em Engenharia Elétrica (1996), e Livre Docência em Engenharia de Computação (2003).