



Alberto GRANDA DE MARTOS es Físico. En INITEC, de 1977 a 1991, trabajó en diseño, seguridad, protección radiológica y licenciamiento de proyectos nucleares, y dirigió proyectos de ingeniería de explotación de centrales nucleares y programas de I+D de diseño de centrales nucleares avanzadas. Desde 1991 en REE dirige proyectos de I+D para ayuda a la explotación del sistema eléctrico.

PROYECTOS DE I+D PARA AYUDA A LA EXPLOTACION EN REE

A. GRANDA

Seguridad, fiabilidad y calidad del suministro de energía eléctrica, minimizando costes de generación y transporte constituyen los objetivos básicos de la estrategia de explotación del sistema eléctrico, por lo que las empresas explotadoras dedican numerosos recursos y esfuerzos a su cumplimiento, identificando las causas que lo comprometen, y diseñando estrategias, procedimientos, y herramientas que lo faciliten.

La demanda nacional de energía eléctrica ha crecido un 35% en los últimos 8 años, hasta situarse en 146.600 GWh en 1991, con la consiguiente extensión del sistema eléctrico nacional. En consecuencia han aumentado considerablemente la captación y transmisión de información de estados y medidas de los elementos de la red, y la automatización de los sistemas de control de energía encargados de su análisis y operación, que permiten telemandar la gran mayoría de los elementos desde centros de control centralizados, y la informatización de los mecanismos de cálculo que permiten diagnosticar el estado de la red y predecir su evolución a corto plazo.

La operación de la red eléctrica exige

que, de modo prácticamente continuo, los operadores dispongan de la información que caracteriza el estado de red, realicen un correcto diagnóstico de la situación que tal información representa, y seleccionen las operaciones adecuadas para configurar la red en su estado óptimo de explotación. Para cumplir estas funciones, los operadores disponen de sistemas de control de energía que consisten esencialmente en un mecanismo de captación y transmisión de datos de elementos de la red que incorpora el telemando de muchos de ellos, y en un conjunto de herramientas de cálculo que, utilizando modelos de red, calculan y presentan a los operadores las variables que permiten evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos y criterios establecidos para la explotación, y deducir las maniobras más adecuadas para mejorarlo.

El desarrollo y puesta en servicio de herramientas automáticas e informáticas que complementen las prestaciones de los sistemas de control de energía y ayuden al operador en la toma de decisiones, realizando de forma rápida y fiable los procesos de asimilación, diag-

nóstico, y selección, previos a cualquier actuación sobre elementos de la red, constituye un aspecto de atención y dedicación constante en las empresas eléctricas.

INVESTIGACION Y DESARROLLO EN SISTEMAS EXPERTOS

La habilidad del hombre para reaccionar correcta y rápidamente en situaciones complejas y resolver con éxito los problemas asociados consiste en muchos casos en su capacidad de relacionar la situación con eventos similares vividos, reconocer y abstraer los patrones que la caracterizan como similar a otras, y aplicar la experiencia obtenida en la solución de éstas. Incluso en ciertos casos puede reducirse a la aplicación de procesos algorítmicos en el nivel de abstracción superior que permiten el conocimiento y la experiencia mediante procesos de síntesis, detección de grupos y relación de información.

Desde que en 1956 se utilizó el término "inteligencia artificial" para designar procedimientos y algoritmos, realizados por un ordenador que simulaban el proceso de razonamiento humano, el desarrollo de metodologías y técnicas de tratamiento de la información y deducción de conclusiones, ha sido constante. Una de sus principales y más experimentadas ramas es la que se ocupa de sistemas basados en el conocimiento humano o sistemas expertos.

La metodología de sistemas expertos resulta aplicable a procesos de evaluación que ayuden a los operadores de redes eléctricas en su toma de decisiones, ya que los problemas que éstos han de resolver presentan características en las que tal metodología se ha demostrado más eficaz:

- Tratamiento de gran volumen de información que puede ser incompleta y contradictoria, por lo que su asimilación precisa un largo proceso de filtrado y verificación.
- Diagnóstico de la situación basado en la información, la experiencia, y en conocimientos susceptibles de cierta sistematización.
- Búsqueda de solución a problemas de optimización en que pueden existir muchas soluciones algorítmicas, el cálculo de cuyo óptimo precisa tiempos de cálculo excesivos, y debe, por tanto, acudir a procesos experimentados de selección y combinación de soluciones aceptables.
- Velocidad de respuesta compatible con las exigencias de la operación de la red en tiempo real.

Estas circunstancias y la posibilidad de

recopilar, ordenar y almacenar la experiencia y el conocimiento de sus expertos, y combinarlos con métodos de cálculo de probada eficacia, decidió a REE emprender un programa de investigación y desarrollo dirigido a la aplicación de estas metodologías en proyectos de diseño de sistemas que asistan al operador en el diagnóstico del estado de red, y en la selección de las medidas correctoras adecuadas para conducirla a configuraciones que garanticen el cumplimiento de los objetivos de seguridad, fiabilidad, y calidad del suministro al mínimo coste.

Los proyectos se realizan en su mayoría en colaboración con otras empresas eléctricas en las áreas de interés común, y en muchos casos están financiados con los fondos que el sector eléctrico dedica a la investigación a través del Programa de Investigación Electrotécnica, por lo que se someten a la evaluación, aprobación, y control y seguimiento de la Oficina de Coordinación de Investigación y Desarrollo Electrotécnico.

La experiencia adquirida en estos proyectos ha sido muy positiva y demostrado que para garantizar el éxito deben abordarse problemas reales de explotación que se presenten con frecuencia, con el objetivo de conseguir en un plazo razonable un producto final eficaz y versátil, aunque a veces limitado, pero que suministre resultados fiables y viables, en lugar de pretender largos programas de investigación de resultados inciertos. Sólo un sistema aceptado y sancionado por el uso, independientemente de quienes lo concibieron y desarrollaron, y utilizable por todos los usuarios afectados por el problema, constituirá un producto final útil en la explotación, y susceptible de amplia difusión.

Los sistemas basados en estas tecnologías deben contar tanto con métodos de cálculo robustos y de probada eficacia, como con una formulación objetiva, completa, y precisa del conocimiento y la pericia de los expertos humanos. Mientras que no resulta difícil disponer de los primeros para un problema fácilmente modelizable desde el punto de vista matemático, y que responde a leyes suficientemente conocidas y formuladas como son los sistemas eléctricos, la objetivación y archivo del conocimiento resultan más complejos. Por un lado, el conocimiento que se pretende explicitar y formular de modo implantable en una máquina lógica, es en muchos casos impreciso, escasamente determinista, y está asociado a cierta incertidumbre, por lo que su aplicación práctica exige ciertos procesos de razonamiento, y por otro, el experto humano es en muchos casos incapaz de explicitarlo y transmitirlo de manera sencilla. Además la formulación del conocimiento ha de ser clara y accesible para que el usuario pueda comprobar las deducciones realizadas

por el sistema, que deberá presentar justificaciones de la secuencia lógica utilizada en la obtención de resultados. Resulta, por tanto, imprescindible planificar un cuidadoso proceso de extracción y adquisición del conocimiento de los expertos, fomentando reuniones de discusión y solución de problemas, aporte de diferentes puntos de vista, examen de experiencias anteriores, y descripción precisa de los acuerdos y conclusiones. En ocasiones, los resultados obtenidos en este proceso de objetivación y explicitación del conocimiento de los expertos compensa la inversión y esfuerzo dedicados a este tipo de proyectos, al constituir una recopilación y documentación del capital de conocimientos de la empresa, muy accesible al prepararse para su incorporación en bases de datos, y de gran calidad al incluir la conclusión de las discusiones y contrastes de las diferentes opiniones.

La metodología de desarrollo aplicada en los proyectos consiste en definir dos fases sucesivas: una primera de diseño, desarrollo y pruebas de un prototipo de alcance limitado para probar la viabilidad del diseño, la respuesta de los algoritmos, y la formulación del conocimiento incluido, y una segunda de definición funcional, criterios y especificación de diseño, y desarrollo, implantación y pruebas del sistema final. Esta metodología se ha mostrado sumamente útil al permitir someter el diseño del prototipo al juicio, evaluación y pruebas de los expertos que participaron en su diseño y de sus usuarios finales, proceso que ha demostrado su eficacia en la detección de errores, enriquecimiento del conocimiento incorporado, y definición precisa de los objetivos y funciones más útiles para el sistema final.

Cabe destacar la importancia de una interfase de usuario sofisticada y amigable para trivializar la comunicación y superar el recelo de los usuarios hacia aplicaciones que pretenden simular su comportamiento.

APLICACIONES DESARROLLADAS Y EN CURSO

Las aplicaciones realizadas y en curso se han dirigido a las áreas principales de actuación para el cumplimiento de los objetivos de seguridad, fiabilidad y calidad del suministro con el mínimo coste.

SEGURIDAD DE LA RED

El criterio de seguridad establecido en la explotación de redes eléctricas consiste en garantizar que sus parámetros no se apartan de sus rangos admisibles en caso de fallo único, simple o complejo (contingencia) de cualquier elemento de

la red. Se denomina estado normal aquel en que se cumple tal criterio, estado de alerta, aquel en que no se cumple, pero los parámetros de red están en los rangos permitidos, y estado de emergencia, aquel en que alguno de los parámetros se encuentra fuera de los límites admisibles.

La verificación del cumplimiento de este criterio y la vigilancia de las transiciones entre los estados descritos, constituye uno de los programas básicos de vigilancia y evaluación continua por parte de los operadores.

Aunque existen numerosas aplicaciones para simulación, cálculo y predicción de las situaciones, a las que conducen los fallos de elementos de la red, son escasos los que realizan un control preventivo e identifican las acciones correctoras adecuadas para evitar que un fallo único conduzca la red a un estado de emergencia, es decir, que identifiquen las maniobras adecuadas para realizar la transición de un estado de alerta al estado normal, por lo que Iberdrola I y REE emprendieron el desarrollo de un sistema de tales características, con la colaboración de IDS como ingeniería de diseño.

El sistema "SEACON", ya implantado y operativo, supervisa y analiza el estado de red, evalúa el cumplimiento del criterio de seguridad, identifica y selecciona automáticamente las contingencias que pueden provocar que las cargas y tensiones en los nudos de la red queden fuera de límites, calcula el estado de red resultante, y aplicando técnicas algorítmicas y métodos heurísticos propone las acciones de control preventivo o correctivo que conduzcan la red a un estado normal o seguro. En definitiva, identifica y diagnostica, a partir de la información recibida en tiempo real del sistema de control de energía, los estados de alerta y emergencia, y propone al operador las maniobras que reconducen a un estado normal, contemplando reconfiguración topológica, reasignación de generación, cambios de tomas de transformadores, actuación sobre elementos de inyección de reactiva, y deslastre de cargas.

FIABILIDAD DEL SUMINISTRO

La mayoría de las actividades industriales y sociales dependen de un suministro estable e ininterrumpido de energía eléctrica, por lo que una interrupción del servicio lleva asociados un elevado coste económico y la paralización de multitud de actividades. En caso de disturbios y pérdidas de suministro extensas, la red accede a un estado muy lejano de sus condiciones normales de explotación, y se producen numerosas carencias de información como consecuencia del disturbio, por lo que los mecanismos habituales de los sistemas de control de

energía resultan de escasa aplicación, y quedan saturados por la llegada simultánea de multitud de alarmas y medidas. En estos casos es, por tanto, la experiencia de los operadores en situaciones similares la que, una vez localizada, diagnosticada, y aislada la causa iniciadora del disturbio, garantiza la selección y ejecución rápida de las maniobras más eficaces para alcanzar la reposición del servicio de forma rápida y segura.

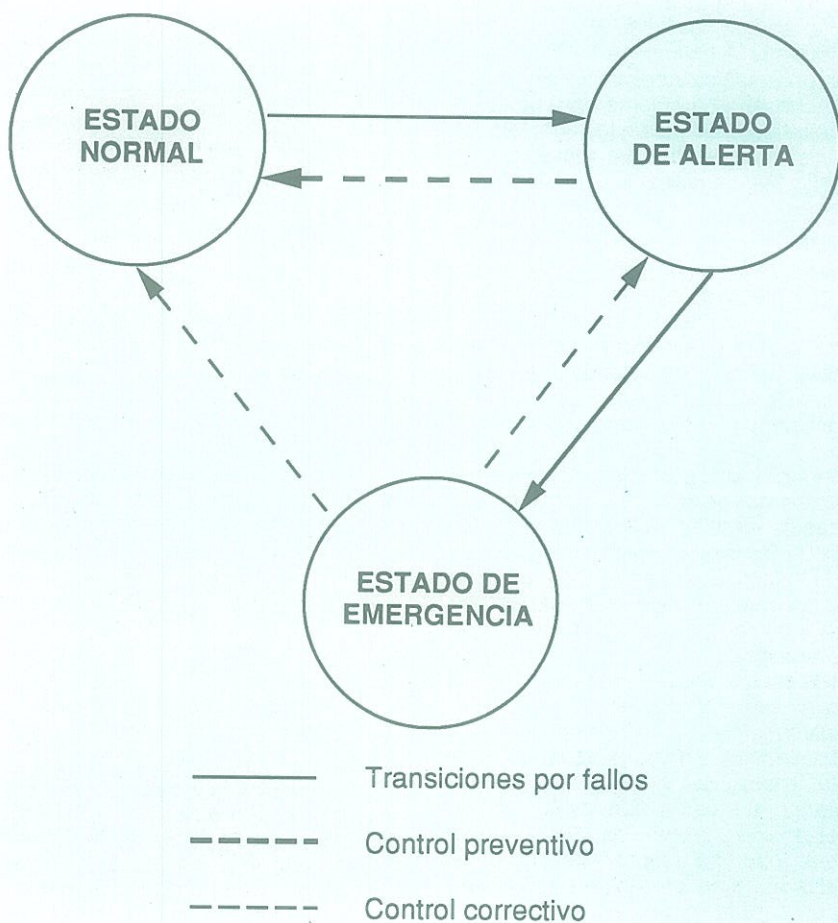
Sin embargo, el exceso de información que el operador debe interpretar, evaluar y asimilar correctamente para tomar una decisión adecuada, conduce a tiempos elevados de respuesta que prolongan las consecuencias del disturbio y, eventualmente, a errores de interpretación y evaluación que pueden desembocar en decisiones no adecuadas para la solución óptima del problema.

Para guiar a los operadores en estos procesos se han procedimentado planes de reposición de aplicación general que presentan la limitación de su naturaleza estática, y la dificultad de su puesta al día con el crecimiento y desarrollo de la red. Por otro lado, la robustez de las actuales redes eléctricas reduce la pro-

babilidad de ocurrencia de disturbios extensos y generalizados, lo que dificulta la adquisición de experiencia y entrenamiento en el manejo y solución de tales situaciones.

En consecuencia, FECSA, ENHER, HEC y REE, por un lado, con AIA/SNI como ingeniería, e Iberdrola I y REE por otro, con la participación de Labein, decidieron abordar con distintas metodologías el desarrollo de un sistema de reposición que, a partir de la información del estado de red recibida en tiempo real, asistiera a los operadores en las maniobras a ejecutar en caso de disturbios generando de forma automática planes que garanticen la reposición del suministro de forma rápida y segura. La reposición contemplaría estados intermedios estables, con métodos de cálculo en los que prime su rapidez y fiabilidad de aproximación a soluciones viables sobre su precisión en el resultado, y el sistema incluiría la capacidad de evaluación y comparación de los planes viables, y la recomendación al operador del más adecuado.

La complejidad y características del problema a resolver aconsejó que el



SISTEMA SEACON. Transiciones entre estados de red.

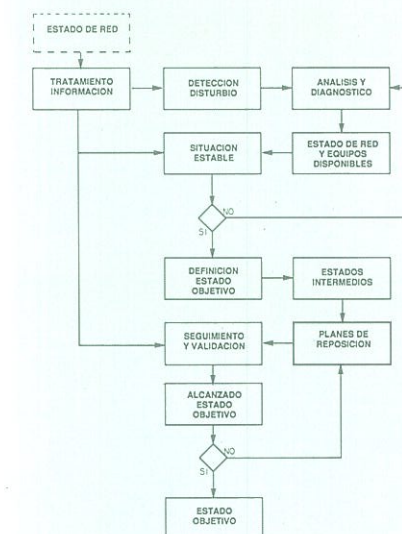
sistema incorporara técnicas de inteligencia artificial para combinar convenientemente la aplicación de algoritmos con las normas dictadas por los expertos. De hecho, en el problema de reposición se presentan muchas de las características y circunstancias que rentabilizan y recomiendan la utilización de estas técnicas:

- Gran volumen de información generada muy rápidamente, redundante en algunos casos y con importantes lagunas e inconsistencias en otros, cuya asimilación exige procesos de reconstrucción y filtrado para realizar un diagnóstico preciso de la situación.
- Situación que evoluciona rápidamente como consecuencia de nuevos sucesos encadenados con el disturbio iniciador, que no permite la utilización de técnicas estáticas, y que exige una continua actualización del estado real de red para abordar el proceso de reposición.
- Necesidad de respuesta rápida que minimice los costes asociados al disturbio.
- Existencia de numerosas secuencias de reposición viables que pueden variar a medida que evoluciona la extensión y profundidad del disturbio, que a su vez puede dejar indisponibles parte de los elementos necesarios para la reposición, y la información fiable acerca de su estado y disponibilidad, exigiendo una constante y rápida comprobación de la información recibida en tiempo real.

Los sistemas "SAR" y "SRS", actualmente en curso, reciben los datos de red en tiempo real, y tras el proceso de análisis y tratamiento de la información, identifican si se ha producido un disturbio, en cuyo caso analizan la información recibida, localizan la extensión de la perturbación, y establecen la situación de red alcanzada y los elementos que quedan disponibles para el proceso de reposición. Una vez comprobado que la situación es estable y no evoluciona debido a nuevos sucesos, se elabora un plan de reposición mediante estados intermedios alcanzables sucesivamente y estables, que se propone al operador. Realiza un seguimiento del plan comprobando que la información recibida en tiempo real es la esperada como resultado de las actuaciones del operador y que los nuevos sucesos no invalidan el plan elaborado, hasta alcanzar un estado de red en que se haya recuperado el suministro perdido.

CALIDAD DEL SUMINISTRO

El parámetro de más significativa incidencia en la calidad del servicio sumi-



SISTEMAS SAR Y SRS. Diagrama Lógico.

nistrado es el nivel de tensión, que es también el más sensible a la configuración topológica, a los diferentes estados de red que se producen en la operación normal, y a las operaciones de ajuste de generación, transporte y distribución, a la evolución diaria y estacional de la demanda. El control de tensión es además una exigencia de la optimización económica de la explotación de la red, dirigida a minimizar el transporte de energía reactiva, acercando los puntos de generación a los de consumo y conservando los niveles de tensión dentro de rangos compatibles con los criterios de calidad del servicio establecidos para cada carga.

El control adecuado de tensión constituye pues un objetivo al que se dedican procedimientos y reglas de operación, y desarrollo de herramientas de cálculo y evaluación que ayuden al operador en la toma de decisiones. El objetivo, más que alcanzar la configuración óptima, calculable con los códigos disponibles, pero inviable en muchos casos, consiste en aproximarse a ella tanto como resulte razonablemente posible sin recurrir a largos procesos de cálculo, ni a excesivo número de maniobras en la red que modifiquen sustancialmente sus condiciones de operación.

Para asistir a los operadores en la toma de decisiones y compatibilizar ambos objetivos de calidad y coste, CSE y REE, con Isotrol como ingeniería, y la participación de ERIA, de la Sociedad Andaluza para el Desarrollo de la Informática, y del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Sevilla, abordaron el diseño de un sistema híbrido experto/algorítmico que operando en

tiempo real, suministrara al operador las consignas de actuación necesarias sobre los medios de control disponibles para conseguir y mantener un perfil de tensiones que minimice las pérdidas por circulación de energía reactiva, y satisfaga los criterios de seguridad en cada situación de carga y generación, identificando situaciones no admisibles, y proponiendo las acciones correctoras más adecuadas.

El sistema "SETRE", en la actualidad próximo a su finalización, identifica y selecciona los nudos en que la tensión se encuentra fuera de límites, calcula mediante técnicas de vectores dispersos la sensibilidad del nudo más crítico frente a las actuaciones sobre los elementos de control, calcula los coeficientes de eficacia de las maniobras en los elementos de control sobre la tensión del nudo más crítico, y determina la amplitud de la actuación sobre los elementos más eficaces para situar la tensión de tal nudo en el rango admisible.

La recomendación de soluciones tiene en cuenta factores heurísticos propios de cada control, la acción combinada y óptima de todos ellos, la tendencia de la demanda, y la seguridad del sistema cuando la acción de control puede alterar las condiciones existentes.

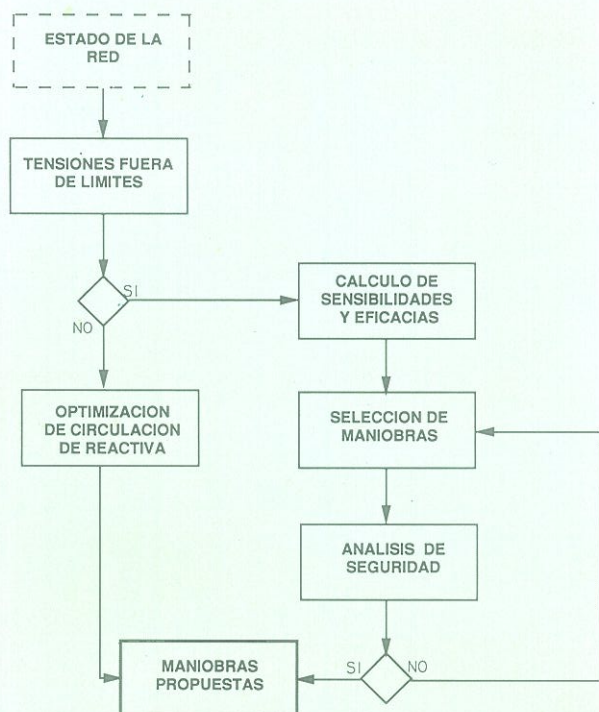
Adicionalmente, si el estado de la red no es mejorable, el sistema suministra las consignas de actuación de manera que se minimicen las pérdidas por circulación de energía reactiva.

PROGRAMACION DE INTERVENCIONES EN ELEMENTOS DE LA RED

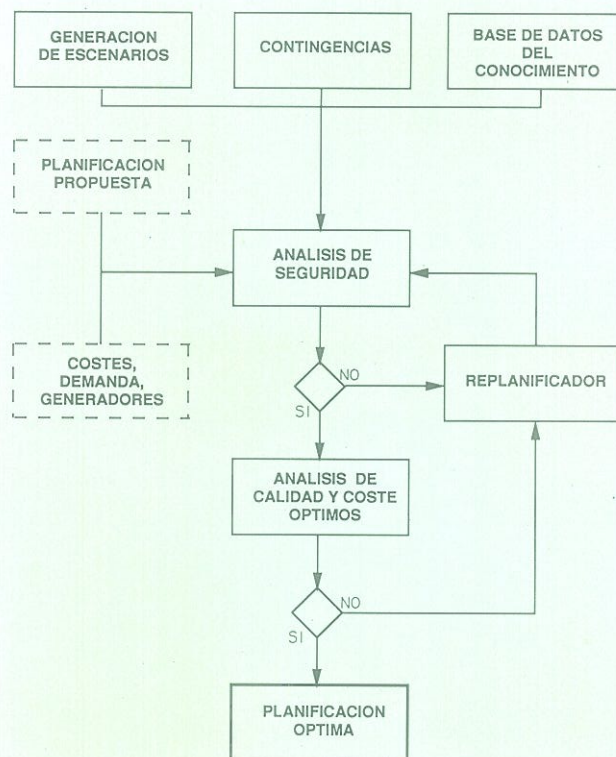
Los elementos de la red eléctrica están sujetos a intervenciones de mantenimiento preventivo y correctivo (descargos), que los pueden dejar indisponibles durante cierto tiempo, y que, por tanto, requieren una cuidadosa planificación que tenga en cuenta las características específicas de cada operación. Al tratarse de operaciones programadas e inherentes a la explotación normal del sistema eléctrico, las intervenciones han de realizarse garantizando la ininterrumpibilidad del servicio, la calidad del suministro y el cumplimiento del criterio de seguridad ante el fallo único de cualquier elemento de la red.

Existen además condicionantes de disponibilidad limitada de recursos para realizar las tareas de mantenimiento, y requisitos de optimización de costes asociados a la explotación de la red con elementos en descargo y, por tanto, en situación no óptima respecto a los costes de generación y transporte.

Para combinar eficazmente todas estas restricciones se realiza una planificación con horizonte anual que precisa una



SISTEMA SETRE. Diagrama Lógico.



SISTEMA SEPDES. Diagrama Lógico

predicción de la situación de la red para cada día del año, y que se somete a los descargos programados. La planificación se modifica dentro de los márgenes de movimiento de cada intervención, de modo que se cumplan los objetivos y criterios establecidos.

Además de las operaciones planificadas existen elementos que fallan y cuya reparación es prioritaria por lo que la planificación debe dejar margen para tales imprevistos. La ejecución de una intervención urgente requiere en ocasiones modificar la planificación del resto del año, si resulta incompatible con las operaciones programadas simultáneamente.

Se realiza por último una planificación semanal detallada en la que la predicción del estado de red, las soluciones, estudios de seguridad, y cumplimiento de criterios han de ser mucho más precisos, y en la que se incorporan las intervenciones urgentes surgidas.

Ante la complejidad del problema, REE, abordó, con la participación de IDS como ingeniería, el diseño de un sistema para asistir a los responsables de planificación de la explotación en los procesos de programación del mantenimiento de elementos de la red, que contemplara criterios de seguridad, calidad del servicio, y costes de explotación, mediante una herramienta inteligente.

El sistema "SEPDES", actualmente en curso y del que recientemente se ha finalizado un prototipo, dispone de un módulo generador de escenarios que recaba información de los escenarios de red sobre los que planificar los descargos e intervenciones, y de planificador anual y semanal que analiza las planificaciones propuestas. Propone alternativas optimizando la seguridad de la red mediante técnicas basadas en las matrices de sensibilidad, la calidad del servicio aproximado las variables de estado de la red a sus valores de consigna, y los costes de explotación minimizando el coste de generación adicional que puede requerir un grupo de descargos, y las pérdidas por transporte.

CONCLUSIONES

La aplicación conjunta de metodologías algorítmicas y de sistemas expertos ha demostrado su eficacia en el diseño de herramientas de asistencia a la operación y la planificación de la explotación de la red eléctrica en el cumplimiento de sus objetivos básicos de seguridad, fiabilidad y calidad al mínimo coste, y su capacidad para objetivar y recopilar el conocimiento y la experiencia acumulados por los expertos.

La correcta y precisa especificación del problema a resolver y el establecimiento de objetivos alcanzables en plazos razonables, combinados con una extensa participación de expertos y usuarios, garantizan la obtención de un producto final útil y difundible.

La estrategia futura contempla a corto plazo actividades relativas a las aplicaciones desarrolladas consistentes en la familiarización de los usuarios, el perfeccionamiento mediante su uso masivo, y la conexión con los simuladores para explotar sus capacidades de formación y entrenamiento en la medida en que incorporan de modo accesible el conocimiento de los más expertos.

Como posible línea de desarrollo a medio plazo se identifica la incorporación de nuevas tecnologías como la construcción de sistemas capaces de "aprender" ampliando su base de datos heurísticos mediante la incorporación de las valoraciones que los expertos realicen sobre sus resultados y recomendaciones.

Los algoritmos genéticos para resolver problemas de optimización y las redes neuronales que pretenden reproducir el proceso de razonamiento humano, constituyen el horizonte de tecnologías avanzadas de inteligencia artificial hacia el que probablemente tiendan en el futuro este tipo de técnicas.