

MODELOS CONCEPTUAL Y FORMAL DE LA MONITORIZACIÓN DE TÉCNICAS ANALÍTICAS DE LABORATORIO

**Julio Lima - Marina Angiorama - Fernando Roda - Miguel Patti
Carolina Ybalo - Romina Salvia***

RESUMEN: Este trabajo presenta la conceptualización y la representación formal de los conocimientos que utiliza un técnico experto en la monitorización del desarrollo de un protocolo químico experimental. Se obtuvieron los modelos conceptuales de los conocimientos que emplea el experto, se documentaron en forma gráfica y se obtuvo el Mapa de Conocimientos de la tarea que realiza el experto. La formalización del modelo conceptual de conocimientos se realizó mediante un modelo híbrido de marcos con sistemas de producción. En conclusión, la conceptualización de los conocimientos y la formalización logradas son bastante completas y profundas.

Palabras clave: sistema experto - protocolo químico experimental - conceptualización de conocimientos - formalización de conocimientos.

ABSTRACT: *Conceptual and Formal Models of the Monitoring of Laboratory Analytical Techniques*

This paper presents the conceptualization and the formal representation of the knowledge applied by a technical expert when monitoring the development of a chemical experimental protocol. The conceptual knowledge models applied by the expert were obtained and graphically documented. In addition, the Knowledge Map of the task performed by the expert was obtained. The formalization of the conceptual knowledge model was carried out by means of a hybrid model of frames and production-systems. In conclusion, the knowledge conceptualization and formalization achieved are quite detailed and thorough.

Keywords: expert system - chemical experimental protocol - knowledge conceptualization knowledge formalization

* *Julio Lima* es Ingeniero Químico (UBA), Licenciado en Sistemas de Información (UNLu) y Magister en Informática (UNLZ). Es docente en las Universidades Nacionales de Luján y del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires y docente e investigador en la Universidad del Centro Educativo Latinoamericano, donde es Director del Proyecto de Investigación ISI A301. E-mail: jlima@unnoba.edu.ar

Marina Angiorama es Ingeniera en Sistemas de Información (UTN-FRRo). Es docente e investigadora en la Universidad del Centro Educativo Latinoamericano y en la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rosario. En la UCEL, integra el grupo responsable del Proyecto de Investigación ISI A301. E-mail: mcangiorama@gmail.com

Fernando Roda es Ingeniero en Sistemas de Información (UTN-FRRo). Es becario del CONICET y docente e investigador en la Universidad del Centro Educativo Latinoamericano integrando el grupo responsable del Proyecto de Investigación ISI A301. E-mail: roda@cifasis-conicet.gov.ar

Carolina Ybalo es Ingeniera en Tecnología de Alimentos (UCEL). Es docente e investigadora en la Universidad del Centro Educativo Latinoamericano integrando el grupo responsable del Proyecto de Investigación ISI A301. E-mail: cybalo@ucel.edu.ar

Miguel Patti es Ingeniero en Sistemas de Información (UCEL) y Docente Universitario (UCEL). Es becario doctorando del CONICET y docente e investigador en la Universidad del Centro Educativo Latinoamericano integrando el grupo responsable del Proyecto de investigación ISI A301. E-mail: mpatti@gmail.com

Romina Salvia es Analista de Sistemas y alumna de la carrera de Ingeniería en Sistemas de Información (UCEL). Es Asistente de Investigación en la Universidad del Centro Educativo Latinoamericano integrando el grupo responsable del Proyecto de Investigación ISI A301. E-mail: rominasalvia@gmail.com

Introducción

Los sistemas expertos son sistemas computacionales basados en conocimientos organizados, propios de una determinada área específica de la experiencia humana. Se los desarrolla para la solución de problemas, capturando la destreza de operadores expertos (Hayes-Roth et al., 1983; Buchanan y Shortliffe, 1985). Como el término "experto" es sinónimo de competencia y especialización, el éxito de un sistema de este tipo se debe a que solamente trata un dominio limitado. En general, los sistemas expertos son programas informáticos basados en dos elementos: conocimientos especializados y la experiencia de los expertos humanos (Castillo y Álvarez, 1989). El aspecto fundamental para el éxito de un sistema de este tipo es la correcta conceptualización de la "experticia" del técnico en forma de un Modelo Conceptual. Dicho modelo puede transformarse en un Modelo Formal adecuado para su implementación en un paradigma de programación o una forma gráfica de presentación.

Los sistemas expertos se desarrollaron con mayor o menor éxito durante los últimos veinticinco años. En la actualidad suelen aplicarse a los sistemas industriales, comúnmente en conjunto con otras técnicas de inteligencia artificial, como las redes neuronales y los algoritmos genéticos. En muchos casos se integran a grandes sistemas de información industrial. Hay un importante número de aplicaciones para detección y diagnóstico de fallas, monitorización y control de procesos industriales. Son realmente elementos positivos cuando se los entiende como complementos de la tarea de los expertos humanos y no como reemplazantes de ellos (Nurminen, 2003). Se encuentran desarrollos de sistemas expertos de uso industrial para el diagnóstico de fallas en procesos químicos (Qian et al., 2003; Qian et al., 2005), para el control de procesos industriales continuos (Alonso et al., 2001; Musulin et al., 2013), de extracción de minerales (Wu et al., 1999; Zhang y Zhao, 1999), para el diagnóstico de fallas en plantas de generación de electricidad (Arroyo et al., 2000), para la monitorización del funcionamiento de equipos industriales (Silva et al., 2000; Lima y Massino, 2008), para la detección y el diagnóstico de fallas en sistemas de generación y de turbinas de vapor (Blanco et al., 2001; Ur'ev y Agapitova, 2001), en equipos de dragado de puertos (Tang y Wang, 2008), en líneas de procesamiento de minerales (Patan y Korbicz, 2006; Stein et al., 2003), en sistemas de producción de manufacturas (Riascos et al., 2004), en motores y máquinas sometidas a tensiones mecánicas (Ebersbach y Peng, 2008; Liu et al., 2008).

En las tareas de laboratorio, por lo general, los detalles de los procedimientos experimentales, el orden de tareas y los materiales y métodos son conocidos solo por un limitado grupo de personas con experiencia en su realización y/o desarrollo. También es habitual que dichas técnicas sean difundidas a través de reportes o publicaciones científicas, siendo accesibles a científicos con poca experiencia en el área. Con el aumento de la complejidad en los métodos experimentales, las especificaciones de las técnicas de laboratorio se vuelven más extensas e intrincadas. Es por ello que la forma en la cual los protocolos son descritos es decisiva para lograr reproducir con éxito los experimentos. Sin embargo, en ocasiones éstos se presentan en forma poco descriptiva y con escasa información. Si los expertos del proceso no están presentes, los laboratorios encuentran dificultades para realizar y/o monitorear el funcionamiento de las distintas operaciones que se realizan. Los conocimientos que domina un experto son de dos tipos; uno de tipo "público" como es el conocimiento de la tecnología y de los detalles técnicos de los equipos y el proceso, y otro "privado", generado por sus experiencias y que constituye la heurística de su tarea. Entre ellos, hay conceptos o elementos principales por donde gira toda su tarea y otros elementos secundarios ligados a los anteriores (Gómez et al., 1997). Recientemente se evidencia una creciente necesidad tecnológica de representar

los protocolos químicos en una forma no ambigua, eficiente y suficientemente detallada como para que agentes no expertos puedan replicar y supervisar las acciones originales. (véase por ejemplo el reporte Klingström et al., 2013). La Ingeniería de Conocimiento desempeña en este sentido un papel clave al ofrecer métodos y criterios para gestionar eficientemente el conocimiento de dominio (Studer et al., 2010).

Formulación del problema

Se estudió un protocolo de laboratorio destinado a la determinación analítica del contenido de azúcares en muestras agroindustriales. Para ello, se realizó el análisis y la obtención de los conocimientos puestos en juego por la experta a cargo del laboratorio de la Universidad para la monitorización de las tareas analíticas que se llevan a cabo en él. En base al relevamiento efectuado y a las reuniones realizadas con la jefatura del laboratorio y con la experta, se decidió definir el dominio de la aplicación sobre el proceso de determinación del contenido de azúcares.

La primera tarea de ese procedimiento consistía en la preparación de una muestra a partir del material inicial (en este caso jugo de zanahorias). Una vez preparada la muestra, a través de varios procedimientos químicos se la separó en dos partes, cada una de las cuales se procesó en forma distinta: una para determinar el contenido de azúcares reductores y la otra para poder determinar el contenido total de azúcares (azúcares reductores y no reductores en conjunto). Luego se sometieron ambas a reacción con el reactivo ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), lo que las preparó para permitir la determinación del contenido de azúcar a través del valor de su absorbencia en un espectrofotómetro. A la vez, para contrastar los resultados, se prepararon una mezcla de blanco de reactivo (sin azúcares) y una muestra testigo formada por un azúcar reductor puro (fructosa). Durante el procesamiento de las muestras se utilizaron elementos químicos manuales comunes y equipos como una balanza, un horno o estufa de laboratorio, un mezclador vórtex y un baño María, además del citado espectrofotómetro. El dominio incluyó todos estos elementos, los reactivos químicos, las operaciones que se realizan y los servicios de gas y electricidad.

Objetivos e hipótesis

El objetivo del estudio fue la obtención de los Modelos de Conocimientos (Conceptual y Formal) de la monitorización y seguimiento de un protocolo experimental. La obtención de dichos modelos se basó en la extracción del conocimiento adquirido puesto en juego por expertos especializados en dicha actividad cuando realizan su tarea.

Para lograrlo, se definieron las tareas analíticas de laboratorio significativas a la hora de extrapolar y reutilizar los conceptos modelados, se estableció un modelo efectivo de la monitorización de tareas analíticas de determinación de contenido de azúcares y se representaron los criterios y la metodología que utiliza un experto frente a los problemas emanados de su actividad, mediante técnicas de Ingeniería del Conocimiento (técnicas de adquisición, de conceptualización y de formalización de conocimientos).

La evaluación de la calidad de los Modelos de Conocimientos obtenidos se realizó contrastando las tareas realizadas por la experta con el seguimiento de las acciones representadas en el Modelo.

Metodología y consideraciones metodológicas

El proceso por el cual se construye un "proceso software basado en conocimientos", es, como todo "proceso software", una actividad de resolución de problemas (Alonso et al., 1996; Acuña et al., 1999). La solución de un problema es una actividad de modelado donde se desarrolla el Modelo Conceptual en el nivel del problema o la necesidad, el cual se corresponde con el punto de vista que los expertos tienen del problema. A dicho modelo se lo convierte en el Modelo Formal, en el nivel de la solución implementable sobre una computadora que se corresponde con la perspectiva que la máquina tiene de ese mismo problema (Ghezzi et al., 1991). Para el desarrollo del sistema basado en conocimientos se utilizó la metodología denominada I.D.E.A.L., apta para la generación de sistemas informáticos con requisitos abiertos y diversidad, reutilizables e integrables (Gómez et al., 1997). Se propone un ciclo de vida en espiral, cónico, en tres dimensiones, en donde cada fase del ciclo finaliza con el desarrollo de un prototipo (Alonso et al., 1995). La metodología plantea el desarrollo de estos sistemas a través de prototipos consecutivos (por lo menos cuatro), cada uno de los cuales se genera mediante el uso del anterior, perfeccionando con su uso (mantenimiento perfectivo) la calidad y la cantidad de los conocimientos extraídos a los expertos. El primer prototipo o prototipo de demostración tiene como objetivos permitir la visualización de la viabilidad de la aplicación y comprender mejor los requisitos de los usuarios y las especificaciones del sistema. Además, la metodología plantea en forma sistemática una serie de etapas a seguir para desarrollar cada prototipo. Las más importantes son la *adquisición*, la *conceptualización* y la *formalización* de los conocimientos que dominan los expertos y la *evaluación* de los conocimientos implementados como un sistema de información.

La tarea inicial fue lograr la identificación de los aspectos sobre los cuales debe realizarse la monitorización del protocolo experimental de acuerdo con el razonamiento de la experta, en el marco de una actividad avalada por los principios básicos de realización de las técnicas analíticas de tipo manual y siguiendo una metodología genérica de conceptualización propuesta por el ingeniero del conocimiento.

Se debieron complementar condicionamientos de tipo educativo durante la evaluación de la viabilidad del desarrollo del mismo: atendiendo a la necesidad que conlleva la formación de profesionales en la Ingeniería de los Alimentos, el trabajo tenía por objeto la capacitación de nuevos técnicos expertos en base a los conocimientos de la única experta disponible. Sería útil que las empresas de la región cuenten con técnicos capacitados en la temática y con sistemas informáticos que colaboren con ellos. Además, como en un laboratorio debe primar una posición "conservadora de la calidad", solamente se realizarían determinaciones con un alto grado de seguridad.

La *viabilidad* del proyecto se obtuvo utilizando la métrica de Maté y Pazos (Gómez et al., 1997). Para ello, se realizaron entrevistas con la dirección del laboratorio que permitieron analizar la viabilidad de desarrollar un sistema basado en conocimientos en forma de un manual de monitorización del seguimiento de la tarea en cuestión, capaz de reemplazar al experto o de colaborar con él en las actividades propias de la monitorización del proceso. La métrica obtiene un valor de la viabilidad utilizando como parámetros la plausibilidad, la adecuación, la justificación y la posibilidad de éxito del sistema a realizar.

Para la *adquisición* del conocimiento así como para precisar la definición del problema se adquirieron los conocimientos públicos acerca de las técnicas de elaboración usuales, se realizaron numerosas entrevistas con la técnica experta del laboratorio, se fotografiaron distintos aspectos de la secuencia de operaciones y se consultó la documentación técnica de las técnicas y de los equipos que se requirieron.

En la etapa de *conceptualización* se realizó un exhaustivo análisis del sistema, obteniendo los conocimientos estratégicos, tácticos y fácticos que maneja el experto cuando monitoriza la ejecución del protocolo. La conceptualización de la tarea realizada por el experto se concretó en un Modelo Conceptual que se corresponde con la estructura y la funcionalidad conceptual del sistema. Dicho modelo se plasmó en el Mapa de Conocimientos del comportamiento del experto en la detección de fallas producidas durante el procedimiento. El aspecto fundamental para el éxito de un sistema experto es lograr una buena conceptualización de la experticia del técnico, a quien puede reemplazar dicho sistema. Si esto se logra, para llegar a un buen producto solamente hace falta incorporar otros elementos, más simples, como una buena plataforma de trabajo computacional y una programación cuidadosa.

Para la *formalización* del Modelo Conceptual se utilizaron el Formalismo de Marcos para expresar los conocimientos declarativos del dominio (los conceptos), las propiedades de dichos conceptos y las dependencias entre ellos, y el Formalismo de Sistemas de Producción para expresar los otros conocimientos del dominio, como un conjunto de acciones básicas (usando reglas Si-Entonces). También se formalizaron los conocimientos de Control que utiliza el experto (mediante el Formalismo de Sistemas de Producción).

Resultados obtenidos

Como resultados, se presentan el Test de Viabilidad y los Modelos Conceptual y Formal logrados.

Test de Viabilidad

Mediante el Test de Viabilidad se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 1. Dado que el valor medio final de la viabilidad supera el 60%, se concluyó que era viable la realización de un sistema experto para monitorear el procedimiento de determinación analítica de azúcares.

Tabla1: Resultados del Test de Viabilidad

PROPIEDAD	0	1	1	0
Plausibilidad del proyecto	8.57	8.93	9.33	9.33
Adecuación del proyecto	3.64	4.69	5.78	6.61
Justificación del proyecto	3.16	3.57	4.29	4.72
Éxito del proyecto	5.03	5.46	5.98	6.14
Viabilidad del proyecto	5.51	6.12	6.82	7.18

El modelo conceptual

Luego de las primeras sesiones de adquisición de conocimientos, se comenzó a trazar el modelo conceptual de la tarea que desempeñaba la experta. Una vez identificado el dominio, se estructuraron los conocimientos adquiridos con la finalidad de modelar el comportamiento de la experta durante la monitorización del procedimiento analítico. La experta aportó una importante documentación de respaldo del conocimiento de cómo realiza su tarea, comentó situaciones que ejemplificaban su actividad, nos permitió observar sus tareas habituales e incluso participar en ellas. Sus exposiciones mostraron rápidamente su estructuración estratégica y táctica. La educación de conocimientos lograda permitió un rápido avance inicial de la conceptualización. Se recolectó información sobre los materiales, los reactivos y los pasos especificados para su desarrollo y se documentó la adquisición de conocimientos mediante la descripción paso a paso del procedimiento de determinación de azúcares.

La conceptualización quedó conformada por la identificación de los conocimientos, su clasificación en distintos tipos y su síntesis en modelos. Se obtuvieron dos modelos, uno estático y otro dinámico, los que, integrados en un Mapa de Conocimientos, conformaron el Modelo Conceptual del Sistema, uno de los principales objetivos de este trabajo.

Para la realización del Modelo Estático se usaron los conocimientos adquiridos. Se identificaron los conocimientos que utilizaba la experta cuando supervisaba las tareas analíticas. Los conocimientos de la experta se dividieron en tres grupos: los propios de la técnica de análisis (conocimientos estratégicos), la forma en la cual la experta conducía la monitorización del proceso analítico (conocimientos tácticos) y los hechos propios de una instancia dada de análisis (conocimientos fácticos). De acuerdo con los principios de las determinaciones analíticas, la presunción de falla se consideraba como una falla real. Esto permitió simplificar la incertidumbre lógica de los conocimientos fácticos, evitando la necesidad de conceptualizar y formalizar conocimientos inciertos, para lo cual deberían haberse utilizado formalismos tales como la lógica difusa (Zadeh, 1983). También se identificaron metacognocimientos, es decir, conocimientos que se utilizaban para tomar decisiones que modificaban las instancias de producción según la aparición de ciertos hechos especiales. Luego se realizó una síntesis conceptual, obteniendo una serie de documentos gráficos constitutivos de los Modelos Estático y Dinámico de la tarea que realizaba el experto.

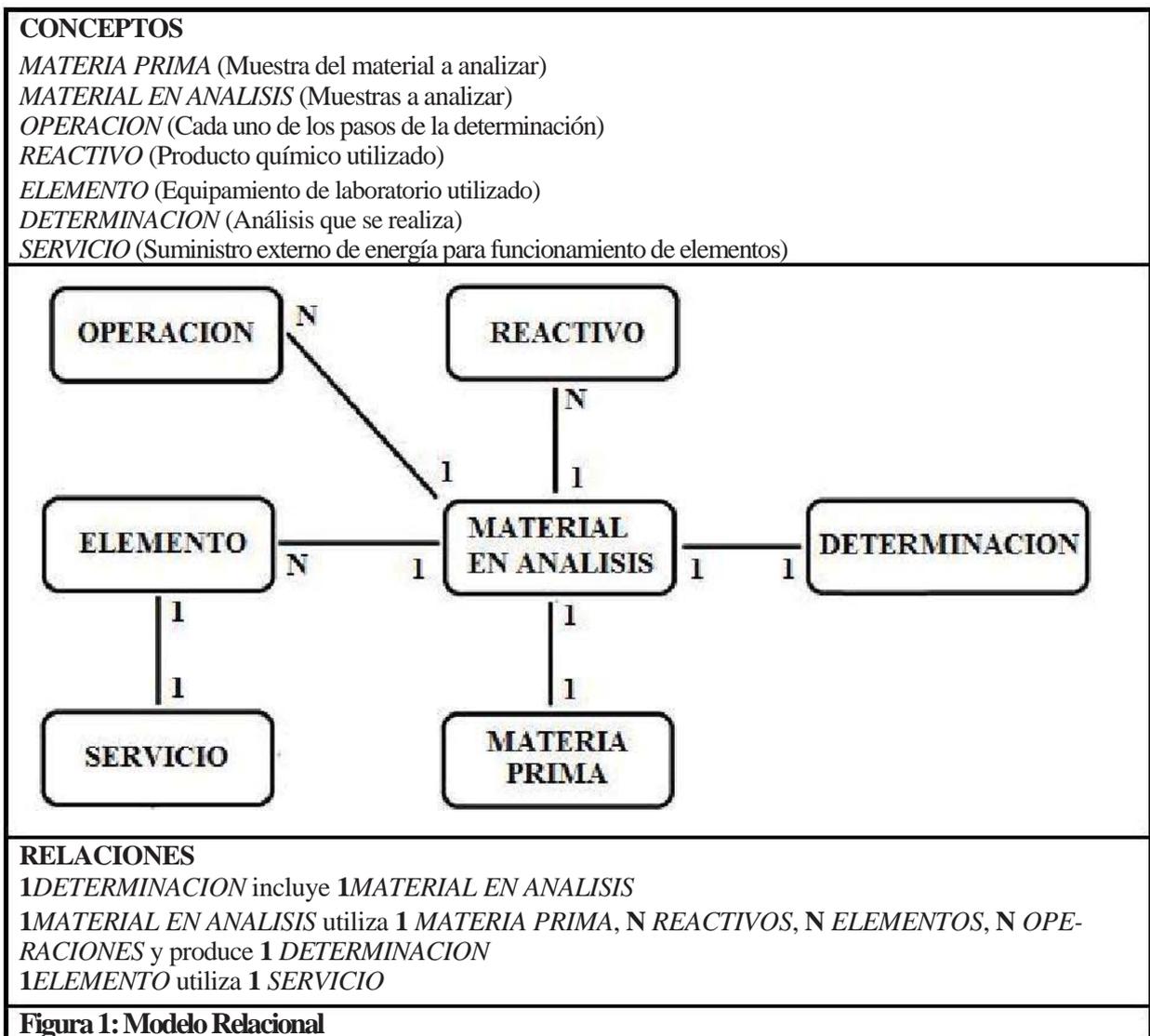
Se identificaron siete conceptos (*Determinación, Material-En-Análisis, Elemento, Reactivo, Operación, Servicio, Materia-Prima*). La identificación de estos conceptos se fundó en los siguientes aspectos: el objetivo fundamental del trabajo era la verificación de la determinación del contenido de azúcares en muestras de zanahoria; ésta resultaba de la determinación del contenido de azúcares reductores y totales en las muestras de zanahoria; a su vez, la determinación del contenido de azúcares reductores y totales dependía de las muestras de zanahoria, de los reactivos y elementos que se utilizaban y de los métodos operativos que se realizaban; la determinación del contenido de azúcares era la resultante de la comparación de resultados contra un blanco de reactivo y un testigo; las muestras de zanahoria dependían de la materia prima y de la forma como se preparaban, de los reactivos y los elementos que se utilizaban y de los métodos operativos que se realizaban; el funcionamiento de algunos elementos dependía del servicio energético que utilizaban.

En el Modelo Estático se realizaron cuatro documentos para identificar, comparar y categorizar los conceptos: el Glosario de Términos, el Diccionario de Conceptos, la Tabla Concepto-Atributo-Valor y el Modelo Relacional. Un Glosario de Términos incluye la terminología específica que empleaba la experta a lo largo de su tarea. Se lo realizó para evitar la aparición de ambigüedades en la interpretación o manipulación de los mismos. Por definición, un concepto es un ente acerca del cual se desea decir algo (Gómez et al., 1997) y un atributo de un concepto es una propiedad o característica del mismo que se necesita conocer para modelar la tarea. En este caso, los conceptos consistían en la descripción de tareas propias de un análisis químico. Un Diccionario de Conceptos describe los diferentes conceptos identificados y la terminología específica de la aplicación, en forma de una lista que sintetiza todo lo obtenido en la etapa de adquisición de conocimientos. Una Tabla Concepto-Atributo-Valor permite representar los atributos correspondientes a cada concepto y especificar los diferentes valores que cada atributo puede llegar a poseer a lo largo de la resolución del problema.

Obtenidos todos los conceptos, se determinaron las relaciones o conjunto relacional de base entre dichos conceptos. Para ello, se utilizó el Modelo Entidad-Relación de Y en (Gómez et al., 1997), mediante el cual se describió en forma gráfica el model mental que el experto tiene del aspecto estático del problema (Figura 1), donde se pueden observar las diferentes relaciones que realizaba el experto entre los distintos conceptos.

El análisis de los conocimientos estratégicos permitió desarrollar una definición clara de los pasos modulares que completaban la tarea del experto (ya que la modularidad es importante puesto que permite tratar a cada módulo en forma independiente) y del flujo de control que se producirá dentro de un sistema que emule las características de la experta, para realizar después una síntesis adecuada, reestructurando, si es necesario, las distintas partes, módulos o sub-tareas que componen el sistema.

Para ello, en primer lugar se identificaron los pasos de alto nivel que un sistema experto debería ejecutar, el orden en que deben tener lugar estos pasos y las condiciones en las que debe ejecutarse cada paso. Luego se descompusieron los pasos de alto nivel en tantos sub-pasos como fue necesario. Finalmente se descubrió la secuencia de entrada, el modo de razonamiento y las acciones de salida que el sistema experto deberá realizar dentro de cada uno de los sub-pasos del nivel más bajo. En la Figura 2, mediante un Árbol de Descomposición Funcional, se representa la forma en la que la experta ejecuta los pasos estratégicos de Alto Nivel.



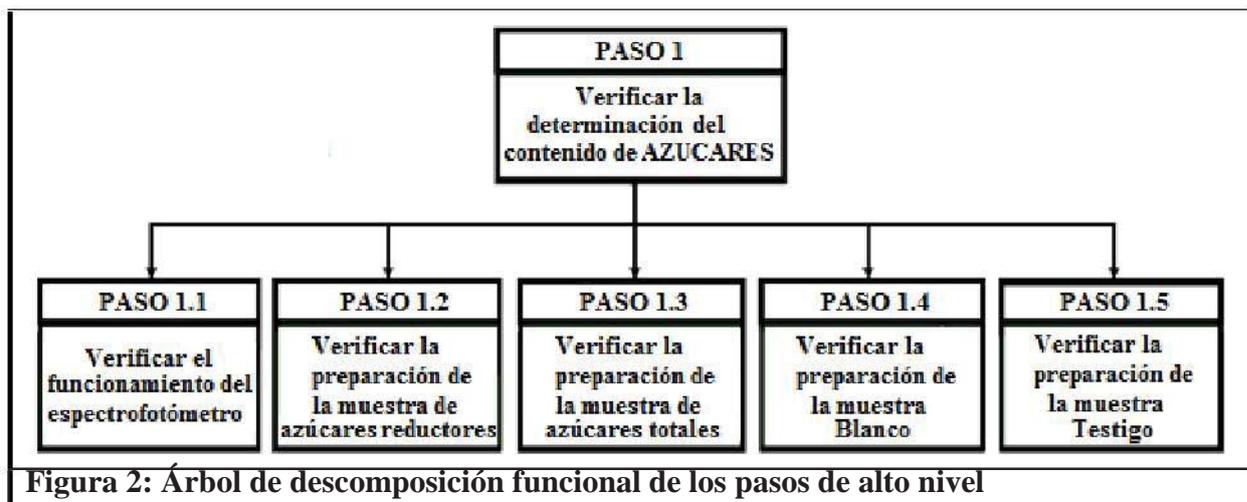


Figura 2: Árbol de descomposición funcional de los pasos de alto nivel

En el análisis de los conocimientos tácticos, se buscaron las inferencias y las incertidumbres que componían los conocimientos tácticos de la experta y especificaban cómo el sistema puede usar correctamente hechos conocidos y las hipótesis actuales acerca del caso para obtener nuevos hechos e hipótesis tanto en situaciones deterministas como, sobre todo, en condiciones de incertidumbre. Este análisis permitió producir una definición detallada de cada paso de razonamiento que deberá ejecutar el sistema. Es de destacar que la experta, en el marco de su tarea de verificación de la determinación del contenido de azúcares, cuando dudaba acerca de si el mismo era correcto o si había fallas, eliminaba la incertidumbre considerando la peor situación, es decir, catalogaba que se estaba produciendo una falla.

Para representar los conocimientos tácticos se utilizaron representaciones adecuadas a los tipos de conocimientos que se intentaban describir y al grado de entendimiento y claridad que el experto alcanzaba con dichas representaciones, usando inferencias sin incertidumbres. Por ello, en este trabajo, como el conocimiento que se deseaba conceptualizar se presentaba en la forma "si son verdaderos un conjunto de hechos C_i , se debe ejecutar ciertas acciones A_j ", se pudo representar en forma de seudorreglas (Gómez et al., 1997) del tipo:

$$SI C_1, C_2, \dots, C_n \text{ ENTONCES } A_1, A_2, \dots, A_m$$

MUESTRA INICIAL Y AGUA DESTILADA AGREGADAS A TUBO DE ENSAYO TI	
Palabras del experto	Se deben añadir X ml de la muestra inicial utilizando una pipeta de X ml y X ml de agua destilada utilizando una pipeta de X ml a un tubo de ensayos.
Formulación externa de la regla	SI el tubo TI está preparado para su uso y la materia en análisis es muestra inicial y la pipeta PipN está preparada para su uso y el volumen de muestra inicial es X ml y el reactivo es agua destilada y la pipeta PipN está preparada para su uso y el volumen de reactivo es X ml, ENTONCES la muestra inicial diluida se encuentra agregada al tubo TI.
Nombre de la regla	MuIniAgrTuboTI

Figura 3: Seudorregla para el agregado de muestra inicial y agua destilada al tubo TI

Las seudorreglas se comenzaron a confeccionar en la etapa de análisis conceptual de los conocimientos, a partir de las palabras del experto. Se obtuvieron ciento setenta seudorreglas correspondientes a decisiones propias de la tarea de verificación de la determinación del contenido de azúcares. Dada la extensión de la documentación producida, como ejemplo se muestra una seudorregla (Figura 3). También se documentaron metaconocimientos de tipo táctico, referidos a las condiciones que a la experta le permitían inferir *a priori* que la determinación del contenido de azúcares era inviable, en forma de dos metaseudorreglas.

INFORMACION	DESCRIPCION
Nombre	Volumen agregado de fructosa
Nombre en la KB	Fructosa. Volumen
Descripción	Se verifica el volumen agregado del reactivo solución de fructosa en el vaso VP4 usando la pipeta PIP15.
Tipo de valor	Numérico
Rango de valores	0 ml ... 10 ml
Número de valores por caso	1
Fuente	Inferencias a partir del conocimiento de la preparación de la muestra testigo.
Detalle acerca del método para obtener esta información	Obtenido por observación de la medición en la pipeta y agregado del volumen en el vaso de precipitados.
Uso	Preparación de la muestra testigo.

Figura 4: Descripción del atributo *Volumen agregado de Fructosa*

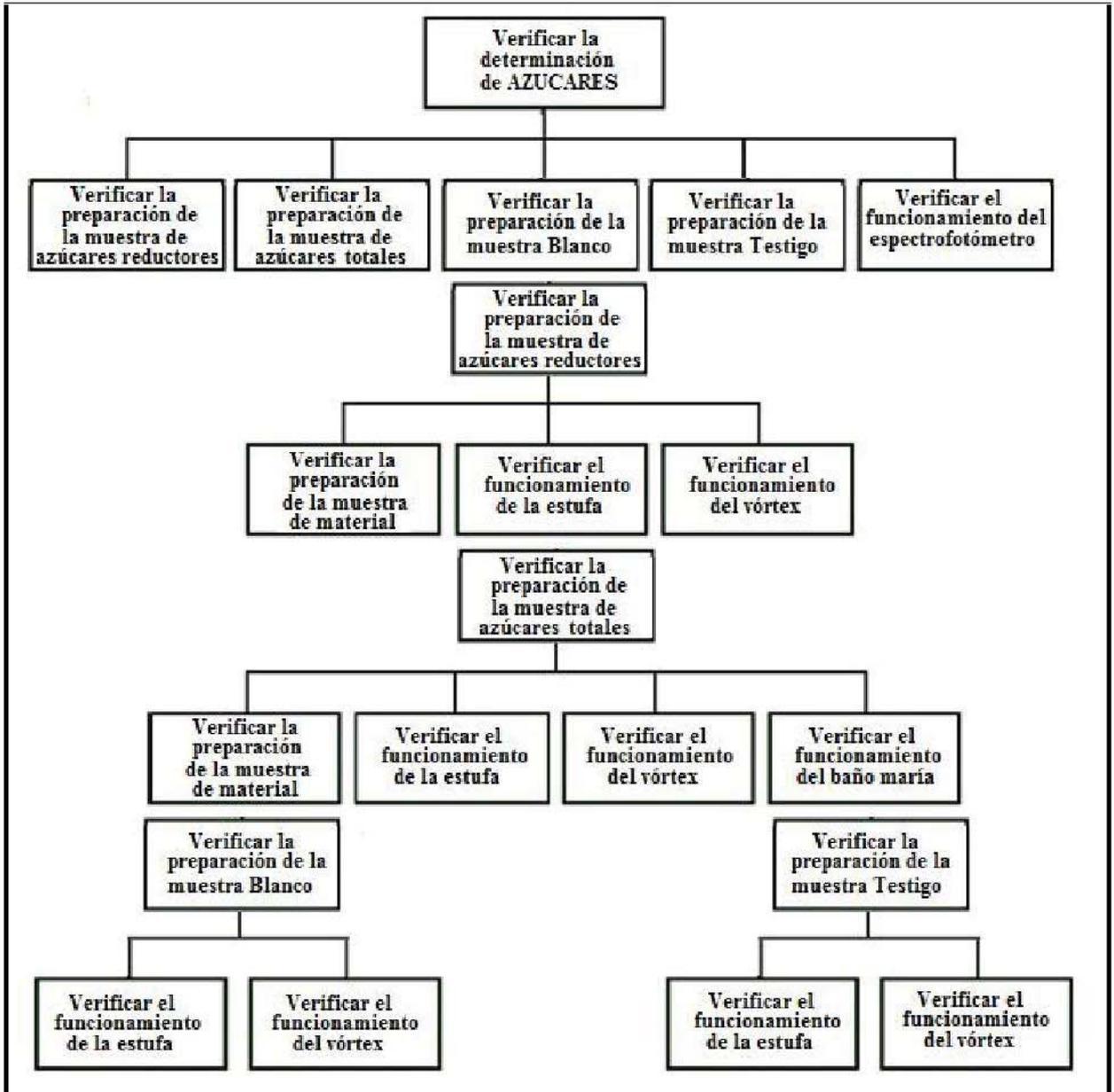


Figura 5: Estructura de Jerarquías

El paso final del análisis de los conocimientos adquiridos para el desarrollo del modelo conceptual fue el análisis de los conocimientos fácticos. Los conocimientos fácticos de la experta contenían información que el sistema debe conocer *a priori* acerca del área de la aplicación, así como información que el sistema obtendrá acerca de casos específicos al ejecutar su tarea. Un sistema experto utilizará los atributos generales como datos de entrada, conclusiones o resultados de salida. La información obtenida sobre cada atributo se debe organizar como una definición escrita. Se identificaron trescientos conocimientos fácticos propios de la tarea de verificación de la determinación del contenido de azúcares. Para caracterizarlos se definió la descripción de atributos para cada uno de ellos usando el formato estándar indicado por A. Gómez y colaboradores (Gómez et al., 1997), que se ejemplifica para el "Volumen agregado de Fructosa" (Figura 4).

Una vez finalizada la etapa de análisis de la *conceptualización*, donde se identificaron los distintos conocimientos estratégicos, tácticos y fácticos, se comenzó con la

Dada la extensión de la documentación producida para este Modelo Dinámico, se muestra un ejemplo de tarea en la Figura 6, donde se ilustra la definición de la tarea "verificar el funcionamiento del vórtex" y el proceso ligado a ella.

Por último, el Modelo Conceptual completo del comportamiento de la experta se integró en un mapa de conocimientos. En la Figura 7 se muestra el Mapa de Conocimientos del contexto de la verificación de la determinación del contenido de azúcares.

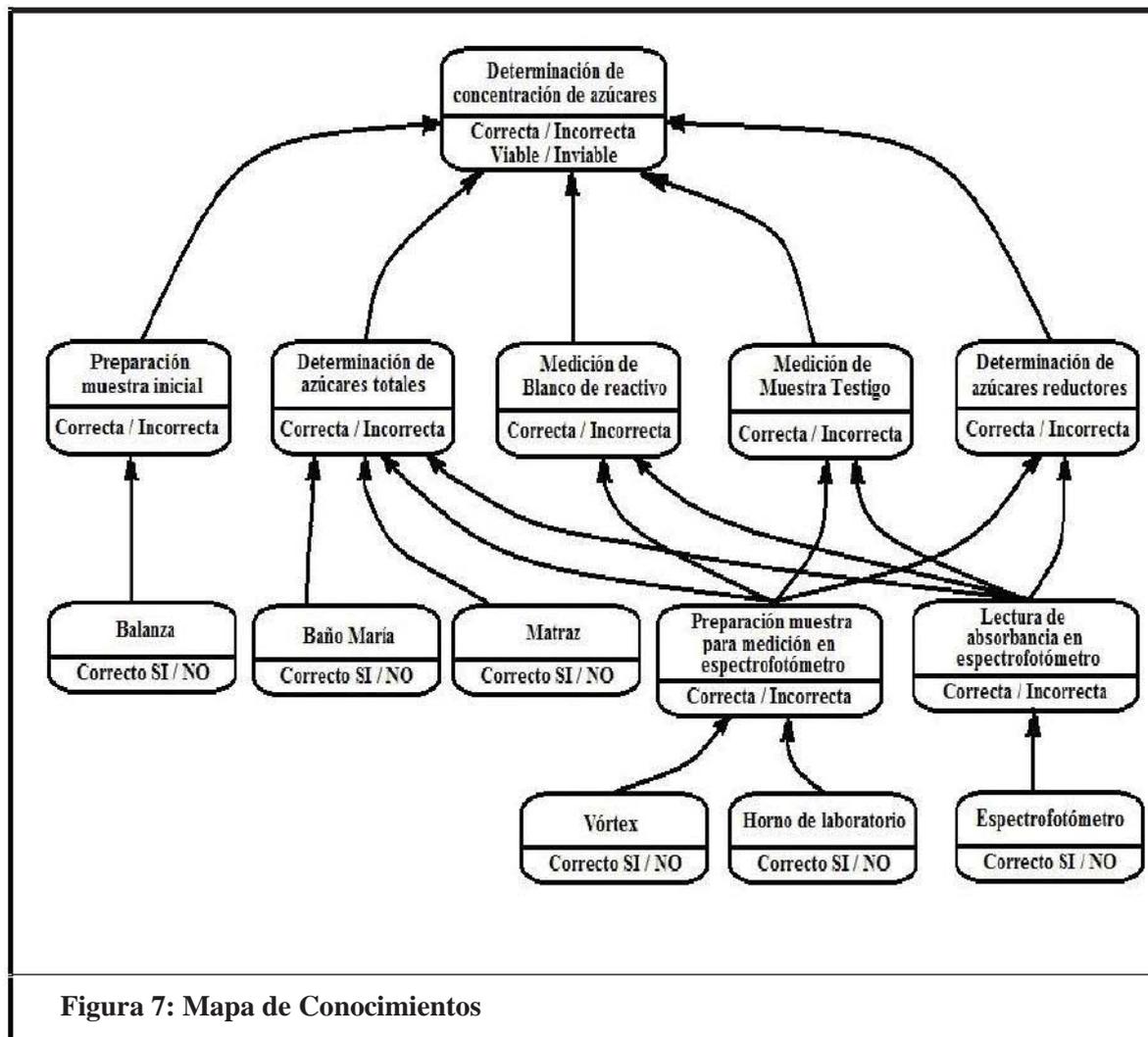


Figura 7: Mapa de Conocimientos

El modelo formal

Un modelo formal es una representación "semi-computable" de los conocimientos y de la conducta del experto que se obtiene en la etapa de formalización de conocimientos de la Metodología I.D.E.A.L. En esta etapa, el modelo conceptual se transforma en el modelo formal, utilizando alguno de los formalismos de representación de conocimientos disponibles en la literatura. Para este caso, se eligió un híbrido de Marcos y Sistemas de Producción (Yen et al., 1989).

El Formalismo de Marcos se define como una estructura de datos que representa situaciones estereotipadas construidas sobre situaciones similares ocurridas anteriormente. Esto permite aplicar a situaciones nuevas el conocimiento de situaciones, eventos y conceptos previos. Los conocimientos que se expresan en los marcos son conocimientos declarativos del dominio. Este formalismo se eligió para representar especialmente los conocimientos estáticos.

Representando cada uno de los conceptos y sus atributos mediante marcos, se puede plantear el Modelo Conceptual en forma concisa y clara. Los elementos que se utilizan al formalizar la base de conocimientos en Marcos son: *marcos*, para representar conceptos, *relaciones*, para expresar dependencias entre conceptos, *propiedades*, para describir cada concepto, y *facetas*, para expresar, de múltiples formas, los valores con los que se puede rellenar cada propiedad. Para representar conceptos como Marcos, se definieron marcos-clase y marcos-instancia. Mediante marcos-clase se representaron los conceptos obtenidos, definidos por un conjunto de propiedades comunes al concepto que representa el marco.

Se representaron siete marcos-clase, que se describen más adelante en función de sus propiedades: *determinación*, *material-en-análisis*, *elemento*, *reactivo*, *operación*, *servicio* y *materia prima*.

Los marcos-instancia permiten representar los elementos o individuos propios de los conceptos dados por los marcos-clase. Se representaron ochenta y ocho marcos- instancia (seis relacionados con el marcos-clase *Determinación*, diez relacionados con el marcos-clase *material en análisis*, cuarenta y ocho relacionados con el marcos-clase *elemento*, ocho relacionados con el marcos-clase *reactivo*, trece relacionados con el marcos-clase *operación*, dos relacionados al marcos-clase *servicio* y uno relacionado al marcos-clase *materia prima*).

Las relaciones del dominio entre conceptos se representan mediante relaciones entre marcos-clase, entre marcos-instancia y entre marcos-clase y marcos-instancia, formando un *Sistema Basado en Marcos*. En la Figura 8 se muestra la representación gráfica de dichas relaciones. Por ejemplo, la relación "*Produce*", definida entre los marcos-clase *material en análisis* y *determinación*, representa la descripción del tratamiento del sistema de muestras utilizando el espectrofotómetro para lograr el sistema de resultados analizados.

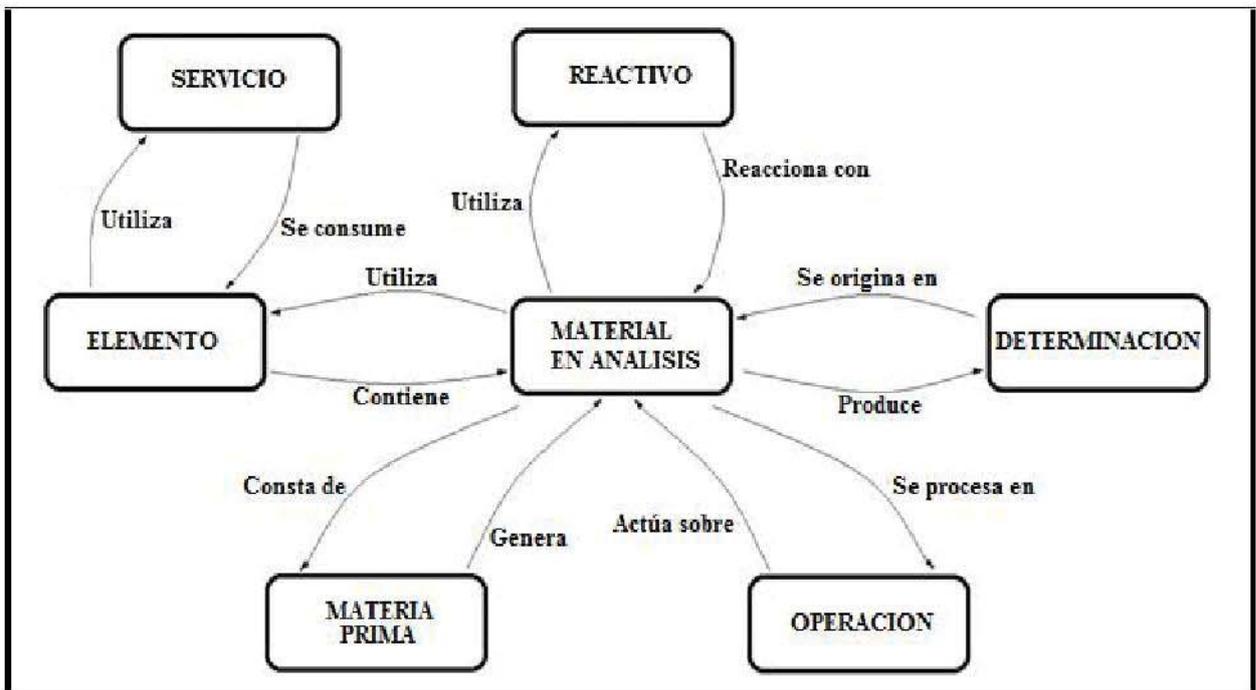


Figura 8: Representación de Relaciones entre los Marcos

El formalismo de Sistema de Producción propuesto en este trabajo está compuesto por una base de reglas que incluye ciento setenta reglas booleanas obtenidas a

partir de lasseudorreglas. Su misión es la descripción de las acciones (las inferencias) que llevan a modificar los valores de los atributos de los conceptos representados como marcos.

Las metarreglas son reglas de producción que contienen conocimientos acerca de cómo manejar en forma adecuada los conocimientos del dominio para mejorar la eficacia y el rendimiento del sistema (Gómez et al., 1997). Son reglas que contienen conocimiento sobre las reglas. Este formalismo, que permite representar el conocimiento específico con el cual opera el sistema, se utiliza como técnica de control. Las metarreglas mejoran el rendimiento del sistema pues localizan, en el proceso de resolución, el conocimiento que es relevante en cada momento. Esto se logra aconsejando, en la etapa de filtrado de un sistema de producción, cuál es el mejor conjunto de reglas que se deben ejecutar en cada momento.

La selección de la metarregla más conveniente en tiempo de ejecución se realiza utilizando mecanismos semejantes a los empleados en la selección de reglas (es decir, se disparan cuando se satisfacen las premisas de la metarregla). Una vez que una metarregla se selecciona para ser ejecutada, se pasa a ejecutar su consecuente, el cual contiene un conjunto de acciones de control cuyo efecto es actuar sobre la estrategia de funcionamiento del sistema; esto es, se establece la forma en la que el sistema utilizará el conocimiento del dominio para resolver el problema.

El *motor de inferencia* examina en cada ciclo de funcionamiento la base de hechos y decide qué regla ejecutar, encadenando las reglas de los llamados ciclos de resolución (Gómez et al., 1997). El esquema general de funcionamiento consiste en seleccionar alguna regla de la base de reglas que pueda aplicarse a la situación actual, en tanto que los hechos de la base de hechos no satisfagan una condición de terminación o que se ejecute una regla de parada. En el caso de este trabajo, las inferencias se realizan mediante *encadenamiento hacia adelante (Forward Chaining)*. Este encadenamiento consta de dos fases, una de decisión o selección de reglas, y otra de acción, activación o ejecución de la regla. El *conocimiento de control*, factor distintivo del comportamiento experto, se identificó a partir de los metaconocimientos obtenidos. Se utilizó un modelo de búsqueda en amplitud, lo cual se ajustaba con la heurística que el experto desarrollaba para la detección de problemas. Se definieron dos meta-seudorreglas y, a partir de ellas, la misma cantidad de metarreglas para tomar decisiones prioritarias y particionar las reglas en conjuntos, simplificando la búsqueda.

Discusión

Los modelos obtenidos fueron evaluados por la experta en numerosas oportunidades y corregidos en función de los errores detectados en cada caso, hasta considerarlos completos y correctos. En lo referente al Modelo Conceptual, en varias sesiones de adquisición de conocimientos la experta evaluó la representación de los conocimientos estratégicos que eran propios del desempeño de su tarea. Analizó especialmente que no hubiese omisión de las tareas y también la priorización de algunas de ellas. Se validó a través del Árbol de Descomposición Funcional y de cada uno de los pasos y subpasos que lo componen. Con respecto al análisis de los conocimientos y metaconocimientos tácticos, un grupo de trabajo conformado por los ingenieros de conocimiento y la experta realizó una revisión de todas lasseudorreglas planteadas. La metodología que se siguió fue la siguiente: la experta fue planteando posibles situaciones y luego se evaluó si, ante un dado caso, las representaciones definidas se correspondían con las tácticas que ella hubiese realizado. El resultado fue satisfactorio. Una vez lograda la especificación de los conocimientos fácticos, junto con la experta se realizaron revisiones exhaustivas de las definiciones logradas a fin de asegurar su calidad, tanto en lo referente a la completitud como a la claridad de las mismas.

Conclusiones

El dominio de la aplicación no es de características complejas, pero su exhaustivo desarrollo hizo que el proyecto se extendiese por un período de tiempo considerable. La repetitividad de ciertos elementos en la determinación (pipetas, uso de la estufa, etc.) fue una ayuda importante. Permitted que rápidamente se interpretara la problemática, se extrajeran los conocimientos básicos y se establecieran las relaciones existentes entre ellos.

La conceptualización en sí fue la tarea más ardua. En especial, el modelo dinámico fue la tarea más difícil de realizar dado que, para su desarrollo, se deben considerar todos los posibles cursos de acción. La etapa de formalización mostró una cantidad de matices realmente muy interesantes, desde los aspectos más simples de las reglas de producción hasta la teoría de los marcos, donde realmente se integran y se sintetizan los conocimientos en una forma simple pero muy completa.

Sobre la base del Modelo Formal, se está en condiciones de realizar la implementación de un primer prototipo de Sistema Experto. Esto es posible gracias a que dicho modelo ha sido construido para facilitar una programación orientada a objetos, sobre una plataforma comercial afín al desarrollo de sistemas basados en conocimientos. Otra actividad mucho más simple es la implementación de un manual sobre papel o un software interactivo para seguir el desarrollo de la determinación química analizada y utilizable cuando la experta no se encuentre disponible para hacer esa tarea. Sería una guía con la cual, sobre una serie de hechos obtenidos en forma experimental, se puede llegar a inferir si se produce o no una falla en el procedimiento.

Para un nuevo proyecto que trate la verificación de la determinación del contenido de azúcares, superador del realizado, se propone establecer nuevos requisitos que permitan incorporar el tiempo de las distintas operaciones como variable a controlar, en la cual se pueden producir fallas y también algunos aspectos ligados a la incertidumbre como elemento mejorador, aun cuando no fueron necesarios para representar el conocimiento de la experta en esta experiencia.

Recibido: 10/04/14. Aprobado: 08/08/14.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, S., Juristo, N., "A Process Model Applicable to Software Engineering and Knowledge Engineering" en *Int. J. Software Engineering and Knowledge Engineering*, 1999.
- Alonso, C., Pulido, B., Acosta, G., Llamas, C., "On-line industrial supervision and diagnosis, knowledge level description and experimental results", en *Expert Systems with Applications* 2001, 20, 117-132.
- Alonso, F., Juristo, N., Maté, J., Pazos, J., "Software Engineering and Knowledge Engineering: Toward a Common Life Cycle", *Journal of Software and Systems*, 1996.
- Alonso, F., Juristo, N., Pazos, J., "Trends in Life cycle Models for SE and KE: Proposal for a Spiral-conical Life-Cycle Approach" en *Int. J. Software Engineering and Knowledge Engineering*, 1995.
- Arroyo, G., Alvarez, Y., Sucar, L., "An intelligent system for the diagnosis and prediction of events in power plants", en *Expert Systems with Applications* 2000, 18, 75-86.
- Blanco, B., Mata, N., Serrano, L., "Desarrollo de un sistema experto para la operación de un sistema de generación de vapor" en *Revista de la Facultad de Ingeniería*, Universidad Central de Venezuela, 2001, 16 (1), 119-124.
- Buchanan, B. y Shortliffe, E., *Rule-Based Expert Systems*, Ed. Addison Wesley, 1985.
- Castillo, E., Álvarez, E., *Sistemas Expertos*, Ed. Paraninfo, 1989.
- Ebersbach, S. y Z. Peng, "Expert system development for vibration analysis in machine condition monitoring" en *Expert Systems with Applications*, 2008, 34 (1), 291-299.
- Ghezzi, C., Jazayeri, M., Mandrioli, D., *Fundamentals of Software Engineering*, Ed. Prentice Hall, 1991.
- Gómez, A., Juristo, N., Montes, C., Pazos, J., *Ingeniería del conocimiento*, Ed. CEURA, 1997.
- Hatzilygeroudis, I., Prentzas, J., "Integrating (rules, neural networks) and cases for knowledge representation and reasoning in Expert Systems" en *Expert Systems with Applications*, 2004, 27, 63-75.
- Hayes-Roth, F., Waterman, D., Lenat, D., *Building Expert Systems*, Ed. Addison Wesley, 1983.
- Juristo, N., Moreno, A., "Software Engineering and Knowledge Engineering Teaching Experiences" en *Int. J. Software Engineering and Knowledge Engineering*, 1999.

- Klingström, T., L. Soldatova, R. Stevens, T. E. Roos, M. a Swertz, K. M. Müller, M. Kalaš, et al, "Workshop on laboratory protocol standards for the Molecular Methods Database" en *New biotechnology*, 2013, 30 (2), 109-13.
- Lima J., Massino S., "Manual de detección de fallas de una línea piloto de producción de quesos basado en conocimiento experto" en *Información tecnológica*, 2008, p.65-74, Vol. 19, N°3.
- Lima, J., *Ingeniería de Conocimiento y Producción de Mermeladas*, Edit. EAE, 2012.
- Lima, J., "Conceptualización de los conocimientos de un experto en la monitorización del funcionamiento de una línea de producción de pulpas de frutas" en *Información tecnológica*, 2004, p.105-110, Vol. 15, N°2, (2004)
- Liu, X., F. Xuan, J. Si y S. Tu, "Expert system for remnant life prediction of defected components under fatigue and creep-fatigue loadings" en *Expert Systems with Applications*, 2008, 34 (1), 222-230.
- Musulin, E., Roda, F., Basualdo, M., "A knowledge-driven approach for process supervision in chemical plants" en *Computers & Chemical Engineering*, 2013, 59, 164-177.
- Nurminen, J., Karonen, O., Hätönen, K., "What makes expert systems survive over 10 years" en *Expert Systems with Applications*, 2003, 24, 199-211.
- Patan, K. y J. Korbicz, "Fault detection in catalytic cracking converter by means of probability density approximation" en *Actas del 6° IFAC Symposium (SAFEPROCESS 2006)*, 84-89, Beijing, China, 30 de agosto al 1 de Setiembre (2006)
- Qian, Y., Li, X., Jiang, Y., Wen, Y., "An expert system for real-time fault diagnosis of complex chemical process" en *Expert Systems with Applications* 2003, 24, 425-432.
- Qian, Y., Zheng, M., Li, X., Lim, L., "Implementation of knowledge maintenance modules in an expert system for fault diagnosis of chemical process operations" en *Expert Systems with Applications*, 2005, 28, 249-257.
- Riascos, L., Moscato, L., Miyagi, P., "Detection and Treatment of Faults in Manufacturing Systems Based on Petri Nets", en *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, 2004, Vol. 36 (3), 280-289.
- Shastri, S., Lam, C., Werner, B., "A Machine-learning Approach to generate Rules for Process Fault Diagnosis" en *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2004, 37 (6), 691-697.
- Silva, R., Reuben, R., Baker, R., Wilcox, S., "The adaptability of a tool wear monitoring system under changing cutting conditions" en *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2000, 14 (2), 287-298
- Stein, E., Pauster, M., May, D., "A knowledge-based system to improve the quality and efficiency of titanium melting", en *Expert Systems with Applications*, 2003, 24, 239-246.
- Studer, R., S. Decker, D. Fensel y S. Staab. Situation and Perspective of Knowledge Engineering. en: C. Cuenca, Y. Demazeau, A. Garcia, J. Treur (Eds.). "Knowledge Engineering and Agent Technology" en *IOS Series on Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*: 2003, 52, IOS Press.
- Tang, J. y Q. Wang, "Online fault diagnosis and prevention expert system for dredgers" en *Expert Systems with Applications* (2008)34 (1), 511-521
- Ur'ev, E., Agapitova, Y., "Problems of Creating Technical Diagnostics Systems for Turbine Units", *Thermal Engineering*, 2001, 48 (11), 903-908.
- Wu, M., Nakano, M., She, J., "A model -based expert control system for the leaching process in zinc hydrometallurgy" en *Expert Systems with Applications*, 1999, 16, 135-143.
- Yen, J., Neches, R., MacGregor, R., *Classification-Based Programming: A Deep Integration of Frames and Rules*, Report ISI/RR-88-213, USC/Information Sciences Institute, Marina del Rey, California 1989.
- Zadeh, L., "The role of Fuzzy Logic in the management of uncertainty in expert systems", en *Fuzzi Sets and Systems*, 1983, 1, 3- 28 Zhang, H.