
UNA ARQUITECTURA DE SOFTWARE PARA LA PROVISIÓN CONTINUA DE SERVICIOS DE SALUD EN AMBIENTES UBICUOS: APLICACIONES DE SEMANTIC WEB Y BPM

MATÍAS ECHEVERRÍA *
ÁNGEL JIMÉNEZ-MOLINA *
SEBASTIÁN RÍOS *

Resumen

Los pacientes con enfermedades crónicas requieren una atención médica continua, personalizada y anticipativa. El paradigma de la computación ubicua es un enfoque que permite hacer realidad esta visión. Sin embargo, el uso de servicios de salud ubicuos e información contextual del paciente es bastante limitado. Para abordar este desafío, este artículo propone un framework basado en Web semántica para la provisión continua de servicios ubicuos, donde las necesidades de los pacientes se representan por medio de procesos de negocios. Además, se propone un modelo de descripción semántica de los procesos, servicios, información médica y contexto, con el fin de facilitar la selección de los servicios adecuados para los procesos de negocio. El framework se evalúa a través de un caso de estudio para enfermedades crónicas respiratorias que hace uso de datos de pacientes reales, y con un estudio de usabilidad aplicado a profesionales de salud de un hospital público pediátrico.

Palabras Clave: Ubiquitous Health, Semantic Web, Context-Awareness, Web Services, Business Process Management.

*Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

1. Introducción

Las enfermedades crónicas son un desafío para los sistemas públicos de salud de todo el mundo. Se estima que el costo de los tratamientos requeridos podría alcanzar el 80 % del presupuesto de salud en muchos países [10]. Además, estas enfermedades suelen ser de larga duración y de progresión lenta. Sólo en 2008, 36 millones de personas murieron a causa de condiciones crónicas en el mundo.

Las enfermedades crónicas más comunes son, dentro de otras, las patologías cardiovasculares, el stress y la depresión, la diabetes e hipertensión, la demencia, los problemas de obesidad, la apnea del sueño obstructiva y las complicaciones respiratorias [2, 4, 10].

Varios países han coincidido en la necesidad de hacer frente a este desafío por medio de un servicio de salud más preventivo, personalizado y anticipativo. Ésto requiere que los pacientes crónicos sean protagonistas de su salud, asumiendo una mayor responsabilidad para mantenerse en estados estables y así no colapsar la red de atención pública. Lo anterior implica hacer realidad la visión de una provisión de atención médica continua al paciente, entregando el servicio de asistencia sanitaria en todas partes y en cualquier momento [1].

El paradigma de la computación ubicua (CU) es un enfoque que busca hacer realidad visiones como la anterior. Sus principios consisten en la provisión invisible y poco invasiva de servicios al usuario en momentos oportunos. Ejemplo de ello en el dominio de la salud ubicua (u-health) es el servicio de monitoreo remoto de pacientes, en que por medio de biosensores y dispositivos adosados al cuerpo de una persona es posible capturar y analizar en tiempo real sus signos vitales independientemente de su ubicación geográfica. Estos datos constituyen información de contexto que permite predecir riesgos de crisis antes que éstas ocurran, alarmando a tiempo al paciente, su cuidador y al conjunto de actores de la red de salud que tienen relación con el usuario (médicos, paramédicos, enfermeras, secretarías, etc.).

Este artículo propone un framework basado en Web Semántica para la provisión continua de servicios u-health a pacientes con enfermedades crónicas. Este framework está centrado en el paciente, es decir, los servicios u-health se proporcionan desde la perspectiva de la persona y en menor grado de la tecnología. Esto se realiza representando los servicios u-health que requieren los pacientes mediante procesos de negocio. Ejemplo de tales procesos son los procedimientos clínicos definidos por la autoridad sanitaria, principalmente los Ministerios de Salud, para diagnosticar, tratar o controlar la patología del paciente. Tales procedimientos por lo general carecen de una representación en

procesos y por lo tanto difícilmente son reutilizados. Además, en caso de existir apoyo tecnológico a las actividades de tales procedimientos, por lo general es *ad hoc* y poco sofisticado. Lo anterior limita la reusabilidad de aplicaciones tecnológicas, la calidad de los diagnósticos y la anticipación a crisis.

El framework se estructura en tres niveles de abstracción: una capa de procesos de negocio, una capa mediadora compuesta por un conjunto de actividades coordinadas, y una capa de servicios Web. Este framework se complementa con un modelo semántico que describe los procesos de negocio, sus actividades, los servicios Web y la información de contexto médico y ambiental. Contar con un modelo semántico de este tipo facilita la creación de diversas instancias de aplicaciones en función de la información contextual. La razón es que este tipo de modelos fomenta en el proceso y en los desarrolladores de servicios la reutilización e integración de una diversidad de recursos.

Los beneficios del framework incluyen la personalización de aplicaciones en función del estado del paciente y de la información de contexto; la independencia de dispositivos y servicios Web específicos, toda vez que lo relevante es la funcionalidad de éstos, pudiendo ser reemplazados en cada instanciación de un proceso en una aplicación; la reusabilidad de procesos y servicios Web para diferentes pacientes y aplicaciones respectivamente; la orquestación dinámica de los servicios Web en función de la lógica de coordinación de las actividades contenidas en el proceso y su aplicabilidad en diversas patologías crónicas.

La efectividad del framework se evalúa a través de un caso de estudio de enfermedades crónicas respiratorias en un hospital público pediátrico de Santiago. Se utilizan signos vitales históricos de diferentes pacientes crónicos, y se expone a los profesionales del hospital a los servicios Web desarrollados. Este estudio intenta clasificar el nivel de riesgo del paciente, con el fin de anticiparse a un estado potencial de crisis de salud, como es habitual en este tipo de pacientes en la estación invernal. Con fines ilustrativos, lo anterior se realiza mediante la aplicación de un modelo de clasificación basado en razonamiento difuso. El nivel de riesgo de crisis se entiende en este trabajo como información de contexto de alto nivel, en función de la cual se seleccionan procesos de negocios – por ejemplo un procedimiento clínico para tratar obstrucción respiratoria – y se mapean hacia los servicios Web que satisfacen los requerimientos de las actividades.

Por otro lado, se muestra un conjunto de servicios Web desarrollados para la gestión de la información del paciente una vez que éste, su cuidador y el médico han sido notificados de una posible crisis de salud. Se evalúa la usabilidad de estos servicios permitiendo que los profesionales del hospital interactúen con ellos.

La Sección 2 de este artículo introduce el trabajo relacionado. La arqui-

itectura del framework se describe en la Sección 3. La Sección 4 presenta el modelo semántico, mientras que la implementación y evaluación del framework se discute en la sección 5. El artículo se concluye en la sección 6.

2. Trabajo Relacionado

El enfoque que más se acerca a la provisión continua de atención médica es el monitoreo remoto de pacientes, que ha tenido un éxito parcial en hacer realidad tal visión. Se define como la medición continua o periódicamente frecuente de las características fisiológicas del paciente. La principal limitación de los casos existentes es que están diseñados y construidos desde una perspectiva técnica y no centrada en el paciente, constituyendo aplicaciones aisladas, especializadas en una o pocas enfermedades y para un grupo específico de pacientes.

Por otro lado, los frameworks que proveen servicios u-health en base a datos de biosensores u otros dispositivos, presentan el problema que se desarrollan de manera ad hoc. Por lo tanto, de ser necesaria la implementación de un nuevo biosensor en una aplicación, se debe desarrollar desde cero la capacidad de soportarlo. Esto significa que, dada la falta de flexibilidad de los frameworks existentes, las aplicaciones no se pueden obtener en tiempo de ejecución.

Recientemente, han aparecido servicios de salud autónomos que incorporan inteligencia artificial, como machine learning, que asisten a profesionales de salud en la interpretación de datos médicos y en la toma de decisiones [3]. Tales servicios implementan algoritmos de minería de datos sobre bioseñales para agrupar pacientes, predecir sus estados de salud o realizar pre-diagnósticos médicos mediante reglas lógicas de primer orden [13].

Por otro lado, la aparición de servicios de salud que resultan de la composición estática de servicios Web y su despliegue en dispositivos móviles, ha permitido un fácil acceso y una provisión proactiva de información médica en cualquier lugar y momento [5]. Tal avance ha requerido la integración de diferentes tecnologías, sistemas e infraestructuras de comunicación [14]. En este sentido, la literatura muestra que estos sistemas tienden a evolucionar hacia arquitecturas de software orientadas a servicio (SOA por su nombre en Inglés), que ofrece flexibilidad para la integración e interoperabilidad [11].

En esta línea, el Health Level Seven Group y el Object Management Group han juntado esfuerzos para promover la interoperabilidad dentro de organizaciones de salud que estén en búsqueda de implantar el enfoque SOA, creando el Proyecto de Salud de Especificación de Servicios (Healthcare Services Speci-

fication Project en Inglés). El objetivo de este proyecto es la generación para el sector salud de estándares SOA que definan el comportamiento de los distintos servicios e interfaces [8].

El trabajo relacionado enfocado al uso de la CU en este tipo de sistemas es escaso. En efecto, si bien el término servicio u-health ha sido acuñado para identificar los servicios de salud computacionales provistos en ambientes de CU [9], se ha hecho poco esfuerzo en crear plataformas lo suficientemente flexibles para desarrollar, compartir y reusar de manera efectiva diversos servicios. Un caso cercano a lo que se propone en este artículo pero aún insuficiente es la arquitectura que proponen Han et al., la cual permite que se puedan registrar y utilizar características comunes durante el desarrollo de servicios u-health [5], tales como la obtención, gestión y análisis de diversos tipos de datos fisiológicos del paciente, como la extracción de conocimiento a partir de ellos y el apoyo a la toma de decisiones médicas.

Entre los pocos modelos basados en la combinación de CU y SOA se encuentra el trabajo de Giuli Paganelli et al. [12], quienes además proponen una ontología de la información de contexto. Los recursos principales de esta ontología son: localización del paciente, tipos y valores de datos fisiológicos, actividad en que se encuentra involucrada la persona, síntomas, patología, red de cuidado del paciente, entre otros. El sistema propuesto por estos autores incorpora en la ontología aspectos claves del proceso, como el razonamiento acerca del contexto del paciente, y una apropiada política de alertas preventivas.

Siguiendo un enfoque similar, otros autores han propuesto ontologías para sistemas de manejo remoto de salud y detección de alertas, los cuales de manera explícita integran en las ontologías minería de datos, en conjunto con el juicio experto de los médicos, pero sólo estableciendo lineamientos generales sin alcanzar una lógica acabada [13].

En síntesis, el mayor problema de las soluciones existentes para la provisión continua de atención médica es que utilizan una asociación estática entre las aplicaciones de salud y los servicios u-health. La principal limitación es que la provisión de estos servicios sólo puede ser realizada de acuerdo a la forma en que fueron configurados en el momento de diseño.

3. Arquitectura del Framework

Los principales elementos del framework consisten en el *context manager*, el *process manager* y el *repository system*. En el *context manager* existe el módulo *raw data collector*, que es un listener que captura señales generadas por diferentes sensores, las cuales deben estar previamente suscritas al *context manager*. Los sensores pueden generar datos fisiológicos, ambientales, geográficos, etc. Además, el *raw data collector* puede clasificar los distintos tipos de datos, o hacer una simple fusión de éstos. La información generada es procesada por el *high-level context generator*, que de acuerdo a la naturaleza de los datos recibidos, genera un contexto de alto nivel a través de la activación de diferentes servicios contextuales. La Sección 5.2 ejemplifica este proceso para dos tipos de contexto de alto nivel: el nivel de riesgo de un paciente para caer en una crisis, y la imprecisión de la predicción de un modelo para evaluar el nivel de riesgo. En este framework encapsulamos tales servicios de contexto en servicios REST, los cuales son invocados por el *high-level context generator*.

El *process manager* es el encargado de seleccionar los procesos de negocios en función del contexto de alto nivel generado en el *context manager*. Ésto se realiza a través de los siguientes módulos: *context listener*, *properties matchmaker*, *semantic measurer* y el módulo *process selector*. El primero es un listener basado en eventos que suscribe tipos específicos de contexto de alto nivel, y activa al módulo *properties matchmaker* para que éste haga un match entre el contexto y los valores de las propiedades de la ontología de procesos residente en el *repository system* que se explica en la Sección 4.1.

El *process manager* obtiene la definición del proceso seleccionado desde el *repository system*. Esta definición consiste en un archivo BPEL (Business Process Execution Language) que describe la lógica de coordinación de cada proceso haciendo uso de patrones secuenciales, concurrentes o iterativos, y de diferentes tipos de compuertas lógicas, tales como OR-split, OR-join, X-OR-split, AND-join, AND-split, etc.

El archivo BPEL es procesado por el *interpreter* del *service engine*. Este módulo recorre el archivo para extraer las actividades que componen el proceso, además de su información: variables de entrada y salida, condiciones previas y variables de efecto, definiciones funcionales, URIs (Uniform Resource Identifier) y parámetros de calidad de servicios. La Sección 4.1.1 muestra un ejemplo simplificado de una definición en BPEL.

La información anterior extraída por el *interpreter* es procesada por el

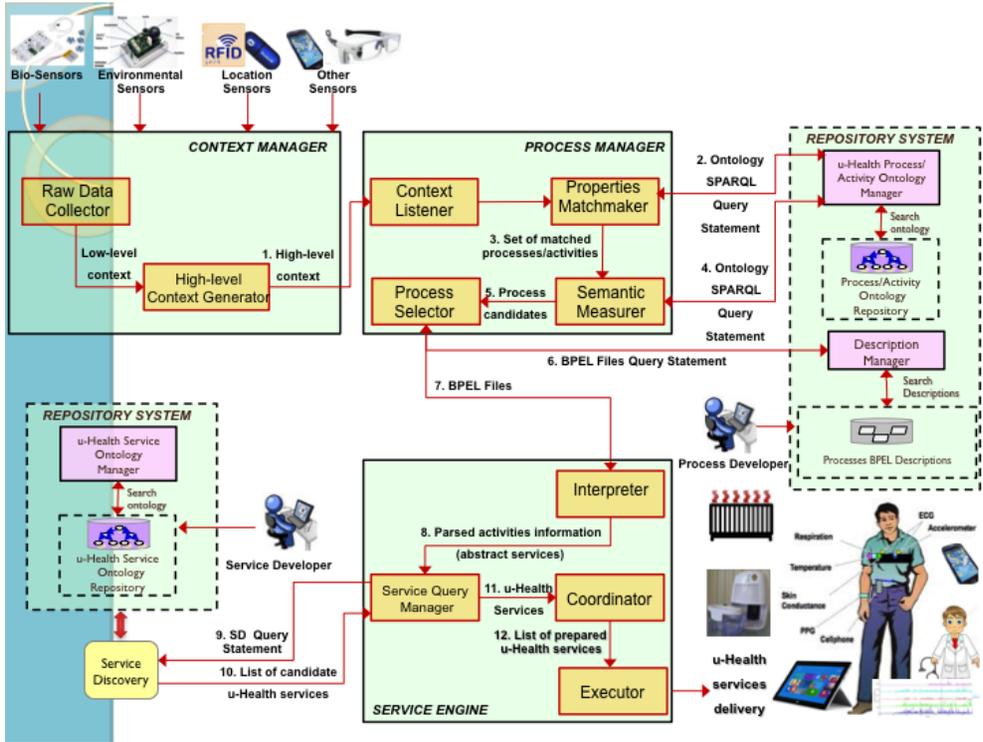


Figura 1: Visión General de la Arquitectura del Framework basado en Web Semántica para la Provisión Continua de Servicios u-health

service query manager, el cual define una serie de servicios abstractos para satisfacer los requerimientos funcionales y calidad de servicio de cada actividad. Luego, este módulo genera una sentencia de consulta hacia el *service discovery*, encargado de buscar servicios apropiados y disponibles en la ontología de servicios, de una forma similar a la realizada por el *properties matchmaker*.

Una vez que se descubren estos servicios, el *coordinator* los asocia con las actividades del proceso. La asociación servicio-actividad no necesariamente es uno a uno, es decir, una actividad podría requerir un conjunto de servicios compuestos entre sí. Posteriormente, el *coordinator* envía una lista de operaciones de servicios dispuestos en conformidad con la lógica de coordinación establecida por la definición del proceso. Finalmente, los servicios son activados y ejecutados por el módulo *executor*.

El *repository system* tiene un *ontology manager* y un *description manager*, los cuales contemplan funciones de almacenamiento, modificación, eliminación y actualización de ontologías y definiciones. En particular, los desarrolladores de procesos interactúan con el *description manager* para crear y almacenar procesos de negocio recientemente generados, de la misma forma que los desa-

rolladores de servicios interactúan con el *ontology manager* para hacer lo mismo con los servicios.

4. Modelo Semántico

En esta sección se introduce el modelo semántico que describe procesos de negocio, ilustrado en la Figura 2. Este modelo representa la información de contexto involucrada en la provisión de servicios, a través de signos vitales obtenidos desde bio-sensores, registros de salud del paciente, perfiles de los stakeholders, condiciones del entorno, entre una serie de otros recursos.

El contexto se modela en tres aspectos: médico, personal y de entorno. El contexto médico de un paciente incluye recursos que representan la información de su ficha médica, así como los signos vitales, riesgo de crisis y síntomas medidos o inferidos en un momento dado. El recurso persona se especializa en múltiples roles y perfiles tales como el paciente, médicos, cuidadores de salud, enfermeras, secretarías, etc.

El servicio de atención médica debe entregarse en función de las características contingentes del entorno, las cuales podrían afectar el estado actual y futuro del paciente. Por ejemplo, la localización geográfica de los stakeholders es crítica para identificar las actuales condiciones ambientales que pueda estar enfrentando el paciente, la distancia de un médico o un cuidador en caso de emergencia médica, o la enfermera más cercana y con disponibilidad para asistir un evento en caso que el paciente esté hospitalizado, etc. También, el nivel de temperatura actual, humedad o luminosidad del lugar pueden ser útiles para inferir la necesidad de activar actuadores para mejorar tales condiciones, en caso de restricciones del entorno que puedan ser definidas con anterioridad para un paciente. Por ejemplo, en el caso de un paciente con hospitalización domiciliaria debido a una enfermedad respiratoria crónica, podría ser necesario activar automáticamente un deshumidificador para disminuir los niveles de humedad en la habitación en que se encuentra.

En síntesis, se podría desarrollar, por ejemplo, un proceso de negocio para notificar cuidadores, médicos o enfermeras sobre el nivel de riesgo de crisis de un paciente que se encuentra con hospitalización domiciliaria, así como también las actividades requeridas para gestionar tal condición. Un proceso como este es útil siempre y cuando el *context manager* infiera, basado en algún modelo predictivo, que el paciente está en un alto nivel de riesgo de crisis dados sus actuales signos vitales. Por lo tanto, es claro que este proceso debe ser insertado como una instancia en la ontología de procesos, tomando en cuenta, por ejemplo, que las propiedades de *localización*, *enfermedad crónica*,

especializada. Este paso se explica en trabajos previos [6, 7], y esta fuera del alcance de este artículo.

4.1.1. Ejemplo de Proceso: Notificar a los Cuidadores de Salud

En esta Sección se provee un ejemplo concreto de un proceso de negocio orientado a notificar a los cuidadores sobre el nivel de riesgo de crisis del paciente. En efecto, siempre que el contexto consista en el nivel de riesgo, identificación y patología del paciente, el *process selector* extrae desde la ontología aquellos procesos cuyas propiedades *hasPatology* del recurso *healthRecords* e *isComposedOfCurrentRiskLevel* del recurso *medicalContext* calcen exactamente con el contexto. Debido a que podría ser una situación crítica, no se acepta un matching parcial en este ejemplo.

Al aplicar en el framework el contexto anterior, se seleccionan los siguientes procesos:

- Cuando el riesgo del paciente es *sin riesgo*, cualquier proceso de negocio es seleccionado.
- Cuando el riesgo del paciente es *bajo riesgo*, el *process selector* extrae los procesos etiquetados como *notificar bajo riesgo al cuidador de salud* y *proveer recomendaciones de cuidados básicos*, dentro de otros. El primero tiene una definición de procesos representada en un archivo BPeL, el cual es recorrido por el módulo *interpreter*, obteniéndose una lógica de coordinación compuesta de dos actividades secuenciales, a saber, *obtener el cuidador del paciente* y *obtener la información de contacto del cuidador del paciente*, seguido por un patrón paralelo con una compuerta OR-SPLIT de tres ramas – *enviar SMS*, *enviar e-mail*, y una tercera rama compuesta por una secuencia para *obtener el médico del paciente*, *obtener la secretaria del médico*, y *asignar la llamada telefónica a la secretaria del médico*. El archivo BPeL que define la primera actividad establece que su input consiste en un string con el identificador del paciente, y su output corresponde a un string con el identificador del cuidador de salud. Los servicios REST que implementan la actividad *obtener el cuidador del paciente*, consisten en dos consultas SPARQL, en donde la primera une de manera conjunta las propiedades *identificador* y *tieneCuidadorDeSalud* del recurso que representa al paciente (no explicitadas en la Figura 2). La segunda actividad recibe como input el *identificador* del cuidador y genera como output un arreglo de strings con tres espacios, en donde el primero representa el número telefónico móvil del cuidador de salud, el segundo su email, y el tercero su teléfono

fijo. El servicio REST que implementa la segunda actividad es una simple consulta SPARQL que une la propiedad *hasContactInformation* del cuidador de salud. La actividad *enviar SMS* se implementa mediante la utilización del servicio Google Cloud Messaging. El resto de la lógica de coordinación es trivial. El siguiente script representa una versión simplificada de su definición en BPEL:

```

1 < process >
2   < sequence >
3     < receive name='receive' partnerLink='processSelector'
4       operation='request' variable='request' initiate='yes' >
5     < /receive >
6     < invoke name='gettingPatientCaregiver' partnerLink='patient'
7       operation='getCaregiver' inputVariable='patientIdentifier'
8       outputVariable='careGiverIdentifier' >
9     < /invoke >
10    < invoke name='gettingCaregiverContactInformation' partnerLink='caregiver'
11      operation='getCaregiverContactInformation'
12      inputVariable='caregiverIdentifier'
13      outputVariable='careGiverContactInformation' >
14    < /invoke >
15    < flow >
16      < invoke name='sendingSMS' partnerLink='caregiver'
17        operation='sendSMS' inputVariable='caregiverCellphoneNumber'
18      < /invoke >
19      < invoke name='sendingEmail' partnerLink='caregiver'
20        operation='sendEmail' inputVariable='caregiverEmail' >
21      < /invoke >
22      < sequence >
23        < invoke name='gettingPatientPhysician' partnerLink='patient'
24          operation='getPatientPhysician' inputVariable='patientIdentifier'
25          outputVariable='physicianIdentifier' >
26        < /invoke >
27        < invoke name='gettingPhysicianSecretary' partnerLink='physician'
28          operation='getPhysicianSecretary'
29          inputVariable='physicianIdentifier'
30          outputVariable='secretaryIdentifier' >
31        < /invoke >
32        < invoke name='assignPhoneCallToSecretary' partnerLink='secretary'
33          operation='setPhoneCallToSecretary'
34          inputVariable='secretaryIdentifier' >

```

```
35             < /invoke >  
36             < /sequence >  
37         < /flow >  
38     < /sequence >  
39 < /process >
```

- Análogamente, cuando el riesgo del paciente es *riesgo medio* o *riesgo alto*, el *process selector* extrae el proceso etiquetado como *notificar riesgo medio/alto al cuidador de salud y al médico*, dentro de otros procesos de negocio. La única diferencia de este proceso es que el cuidador de salud y el médico son notificados del nivel de riesgo del paciente.

5. Caso de Estudio

El framework se implementa en Java con las siguientes herramientas de apoyo: (1) Protege para crear archivos OWL; (2) el Lenguaje de Ejecución de Procesos de Negocios (BPEL por su sigla en Inglés) para describir el proceso y la definición de las actividades; (3) la librería de Java Jena para implementar razonamiento semántico; (4) SPARQL como el lenguaje de consultas y como protocolo de acceso a los archivos OWL, y (5) el sistema administrador de bases de datos MySQL para almacenar los datos de los pacientes.

5.1. Descripción del Escenario

La idoneidad del framework se evalúa a través de un caso de estudio en enfermedades crónicas respiratorias, haciendo uso de datos de pacientes reales y con el apoyo de profesionales de salud del “Hospital Exequiel González Cortés” (HEGC), hospital público pediátrico de Santiago. Esta institución atiende alrededor de 300.000 pacientes cada año, la mayoría de ellos de un segmento de la población con ingresos bajos.

Las enfermedades respiratorias en Santiago tienen un aumento explosivo en otoño e invierno debido a la alta contaminación del aire. El Ministerio de Salud, con apoyo del HEGC, ha desarrollado dos programas innovadores llamados Apoyo Ventilatorio Invasivo y Apoyo Ventilatorio No-Invasivo. Ambos se han desarrollado con el objetivo de cuidar la salud de pacientes con enfermedades respiratorias crónicas en sus domicilios. Estos programas capacitan a los parientes del niño para que tomen y registren las señales fisiológicas, y utilicen una serie de dispositivos médicos. Además, los paramédicos realizan visitas domiciliarias periódicas con el fin de supervisar.

El escenario tiene relación con predecir una potencial crisis del paciente a través de una clasificación del riesgo de salud, con el objetivo de anticipar un estado general de potencial gravedad, sin necesariamente asociarlo a una crisis determinada. Esto se realiza mediante la implementación de un modelo de clasificación inteligente basado en razonamiento difuso, la generación de un contexto del riesgo del paciente a partir de los signos vitales, y el uso del framework para seleccionar procesos de negocio apropiados en función del riesgo, los cuales se mapean a servicios u-health para satisfacer las necesidades del paciente. Además, se muestra un conjunto de servicios que se desarrollaron para apoyar la gestión de alertas una vez que un paciente, su cuidador, y su médico han sido notificados de una potencial crisis de salud. Se evalúa la usabilidad de estos servicios u-health permitiendo a los profesionales de salud interactuar con la funcionalidad del servicio.

5.2. Ejemplo de Contexto de Alto Nivel: Evaluación del Nivel de Riesgo del Paciente

Esta sección describe cómo el context manager genera contexto de alto nivel a través de un servicio que encapsula un modelo de razonamiento difuso, encargado de calcular el nivel de riesgo del paciente, en un servicio REST. De hecho, los médicos del *HEGC* han definido que la *frecuencia respiratoria*, *frecuencia cardíaca*, *temperatura* y *saturación de oxígeno en la sangre* son signos vitales necesarios para evaluar el nivel de riesgo de crisis en pacientes con enfermedad respiratoria crónica. Estos signos vitales son monitoreados de forma remota por un conjunto de bio-sensores no invasivos, tales como electrocardiogramas, oxímetros, termómetros, entre otros. Se configura un conjunto de micro controladores para integrar y transmitir señales digitales en estos dispositivos hacia el servidor del hospital, pero sus detalles están fuera del alcance de este trabajo.

El *context manager* periódicamente obtiene los signos vitales capturados por los biosensores, y alimenta el *high-level context generator*. Cada vez que este módulo recibe signos vitales, gatilla una consulta SPARQL hacia la ontología, con el objetivo de obtener la instancia del modelo de predicción predefinida para la patología del paciente. El modelo obtenido se ejecuta con los signos vitales medidos para evaluar el nivel de riesgo contingente del paciente: sin riesgo, bajo riesgo, riesgo medio o moderado, riesgo alto. En este escenario, con fines ilustrativos, la evaluación se realiza utilizando un modelo de razonamiento difuso que integra el juicio experto de los médicos del *HEGC*. Sin embargo, como se verá, es perfectamente posible hacerlo con otro modelo de clasificación.

La generación del modelo se lleva a cabo por médicos y analistas, quienes son apoyados por un proceso de negocio semi-automatizado por el *process manager* cada vez que el modelo no alcance un cierto nivel de especificidad y sensibilidad. Es decir, el modelo se ha vuelto obsoleto o sus parámetros deben ser ajustados. Este proceso se describe en la Sección 5.3.1. De esta forma, el nivel de riesgo del paciente es un contexto de alto nivel generado por el *context manager*, el cual es transmitido hacia el *process manager*. Posteriormente, se utiliza este contexto de alto nivel recién generado para identificar un conjunto de procesos de negocio candidatos.

5.2.1. Evaluación del Servicio Contextual Basado en Razonamiento Difuso

Se prueba el servicio contextual que implementa el modelo con razonamiento difuso mediante la utilización de signos vitales provenientes de 31 pacientes con enfermedad respiratoria crónica, bajo la autorización del comité ético del *HEGC*.

Un registro de la base de datos contiene campos para caracterizar anónimamente al paciente – edad, género, diagnóstico, etc. –, almacenar los signos vitales – temperatura, pulso, frecuencia respiratoria y saturación oxígeno en la sangre –, e indicar el tipo de ventilación al que ha estado sometido últimamente. Los signos vitales se registran cada dos o cuatro horas, dependiendo si el paciente está en la unidad de cuidado intensivo, o la unidad pediátrica respectivamente.

El modelo se prueba sin individualizar los registros, utilizando el 80 % de los datos para entrenar y el 20 % para evaluar. El enfoque sin individualización es similar a lo que el personal de salud realiza la mayor parte del tiempo en el triage, en que se asume que las personas tienen un comportamiento parecido. Evidentemente es necesario explorar el caso en que se individualiza al paciente, para lo cual hay que utilizar otros métodos de clasificación distintos a lógica difusa.

El modelo obtiene una especificidad de 78 %, una sensibilidad de 56,6 % y una exactitud de 79,3 % . En este escenario el médico está más interesado en la especificidad y la sensibilidad que en la exactitud. En efecto, una alta sensibilidad significa que los casos falsos negativos son una fracción pequeña, es decir, si el modelo clasifica a un paciente con alto riesgo, la probabilidad de que sea verdad es alta. Sin embargo, no se obtuvo un valor aceptable de sensibilidad, pero sí de especificidad, que es lo que más le importa al médico. De todos modos, es necesario más trabajo probando otros modelos de clasificación para este escenario.

Tabla 1: Tabla de Desviaciones de Puntajes para los Indicadores de Salud.

Esquema de Puntaje	Estado de Bioseñal
1	Temp. Alta o Temp. Baja
2	Frecuencia Cardíaca Alta
2	Frecuencia Respiratoria Alta
2	SAT 90 – 93 (CR)
2	SAT 94 – 95 (NCR)
3	Frecuencia Cardíaca Baja
3	Frecuencia Respiratoria Baja
4	SAT 90 – 93 (NCR)
5	SAT < 90

5.3. Ejemplo de Procesos de Negocio y Servicios U-Health

5.3.1. Ejemplo de Proceso: Desarrollar un Modelo Predictivo

Como se ha explicado, el proceso de negocio conocido como *desarrollar un modelo predictivo* intercala las acciones llevadas a cabo por el analista, como el ajuste de parámetros, y los servicios REST requeridos para simular variables y validar el servicio contextual implementado por el modelo de razonamiento difuso. Se desarrolla este modelo de razonamiento (que fue evaluado en la Sección 5.2.1) siguiendo el mencionado proceso. La primera actividad consiste en definir, por parte de los médicos, un conjunto de rangos de referencia específicos para diferentes segmentos de edad del paciente, ya sea para frecuencia cardíaca (FC), temperatura (T), o frecuencia respiratoria (FR). Estos rangos representan los límites inferiores y superiores aceptables para estos signos vitales. Sin importar la edad, el rango normal de temperatura se establece entre 36 y 37,5 grados Celsius, mientras que la saturación de oxígeno en la sangre (SAT) entre 96 y 100. En segundo lugar, los médicos necesitan desarrollar un esquema de puntajes para caracterizar diferentes estados de estos signos vitales (ver Tabla 1). Por ejemplo, si el paciente sólo muestra una alta o baja temperatura, se le asigna un puntaje de 1. Sin embargo, si el paciente muestra una baja frecuencia respiratoria, entonces se le asigna un puntaje de 3.

Una vez que se establece el esquema de puntuación, es necesario definir la correspondencia entre la combinación de las puntuaciones de los signos vitales y el riesgo de una crisis respiratoria (ver Tabla 2). Por lo tanto, la ejecución de este proceso de negocio semi-automatizado puede proporcionar una evaluación del riesgo basada en esta información.

Finalmente, este conocimiento se formaliza en forma de funciones, como

Tabla 2: Mapeo Niveles de Riesgo con Indicadores de Salud.

Nivel de Riesgo	Enfermedades Crónicas Respiratorias (CR)	Enfermedades Crónicas Respiratorias (NCR)
Bajo (2 – 3 puntos)	Frecuencia Cardíaca Alterada	Frecuencia Cardíaca Alterada
Bajo (2 – 3 puntos)	Frecuencia Respiratoria Alterada	Frecuencia Respiratoria Alterada
Bajo (2 – 3 puntos)	SAT 90 – 93	SAT 94 – 95
Medio (4 – 5 puntos)	SAT 90 – 93 y ((FC) o (FR) alterada)	SAT 94 – 95 y ((FC) o (FR) alterada)
Medio (4 – 5 puntos)	Alta FC y Alterada FR	Alta FC y Alterada FR
Medio (4 – 5 puntos)	Alta FR y Alterada FC	Alta FR y Alterada FC
Medio (4 – 5 puntos)	Alterada Temperatura y Baja FC	Alterada Temperatura y Baja FC
Medio (4 – 5 puntos)	Alterada Temperatura y Baja FR	Alterada Temperatura y Baja FR
Medio (4 – 5 puntos)		SAT 90 – 93
Alto (≥ 6 puntos)	Baja (FC) y Baja (FR)	SAT 90 – 93 y ((FC) or (FR) alterada)
Alto (≥ 6 puntos)	SAT < 90	Baja FC y Baja FR
Alto (≥ 6 puntos)	Alta FC y Baja FR y Alterada Temp.	Alta FC y Baja FR y Alterada Temp.
Alto (≥ 6 puntos)	Alta FR y Baja FC y Alterada Temp.	Alta FR y Baja FC y Alterada Temp.
Alto (≥ 6 puntos)		SAT < 90

se muestra en las ecuaciones (1) – (3). Estas ecuaciones definen tres funciones de pertenencia para denotar un rango alto (RA), rango normal (RN) y rango bajo (RB) de una variable.

$$RA_i(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < c_i \\ \frac{(x-c_i)}{(d_i-c_i)} & \text{si } c_i \leq x \leq d_i \\ 1 & \text{si } x > d_i \end{cases} \quad (1)$$

$$RN_i(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a_i \text{ or } x > d_i \\ \frac{(x-a_i)}{(b_i-a_i)} & \text{si } a_i \leq x \leq b_i \\ 1 & \text{si } b_i \leq x \leq c_i \\ \frac{(d_i-x)}{(d_i-c_i)} & \text{si } c_i \leq x \leq d_i \end{cases} \quad (2)$$

$$RB_i(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x > b_i \\ \frac{(b_i-x)}{(b_i-a_i)} & \text{si } a_i \leq x \leq b_i \\ 1 & \text{si } x < a_i \end{cases} \quad (3)$$

donde para cada signo vital i su límite inferior se denota como *Mini* y su límite superior como *Maxi*. Adicionalmente, se introducen dos variables por límite para introducir flexibilidad a estas medidas: *FlexMini* y *FlexMaxi* respectivamente. De esta forma, los parámetros para las funciones de pertenencia se escriben de la siguiente manera:

$$a_i = Mini * (1 - FlexMini) \quad i \in \{T, FR, FC\} \quad (4)$$

$$b_i = Mini * (1 + FlexMini) \quad i \in \{T, FR, FC\} \quad (5)$$

$$c_i = Maxi * (1 - FlexMaxi) \quad i \in \{T, FR, FC\} \quad (6)$$

$$d_i = Maxi * (1 + FlexMaxi) \quad i \in \{T, FR, FC\} \quad (7)$$

Estas ecuaciones se utilizan como un modelo de razonamiento difuso, que se añade a la ontología de procesos como una instancia del recurso *modelo predictivo*.

La calibración del modelo se realiza a través de la similitud con que éste clasifica el riesgo de crisis con respecto al razonamiento de varios médicos expertos. Los parámetros que flexibilizan los límites de los intervalos se ajustan hasta que el razonamiento del modelo sea muy similar al de los médicos evaluadores.

5.3.2. Ejemplo de Servicios U-Health: Gestionando Alertas e Información del Paciente

Se desarrolla un conjunto de servicios para apoyar las alertas y gestión de la información de este caso de estudio. Estos servicios pueden reutilizarse para soportar múltiples actividades y procesos de negocio. Los siguientes servicios pueden ser activados cada vez que una notificación es generada hacia los médicos:

- Un servicio para visualizar la información general de los pacientes, las alertas emitidas relacionadas, el diagnóstico de la enfermedad crónica y los datos relacionados con la última descompensación. Esta lista está ordenada por el nivel de riesgo de los pacientes. Además de esto, los profesionales de salud pueden ver una lista de las alertas generadas, así como su estado correspondiente.
- Un servicio para mostrar una visión general de un paciente específico seleccionado por un profesional de salud. Este servicio muestra los datos personales, indicadores de salud de referencia para cada uno de los signos vitales, el diagnóstico inicial y la crisis anterior, entre otros aspectos.
- Un servicio para visualizar varios comportamientos de signos vitales por paciente. Este servicio permite a los profesionales de salud identificar la evolución de los diferentes indicadores relacionados con la salud del paciente. Presenta gráficos para visualizar los datos transmitidos en el último período, por ejemplo, las últimas 24 horas. Lo relevante aquí es que el profesional de salud tiene toda la información necesaria para detectar cualquier anomalía con respecto al estado de salud del paciente.
- En caso de necesitar información adicional se puede realizar un análisis temporal en cualquier indicador de salud mediante la elección de un intervalo de fechas.

Además, se desarrollaron múltiples servicios móviles que se ejecutan en la plataforma Android, con el objetivo de permitir a los médicos comprobar la información en tiempo real. La Figura 3 muestra algunos de estos servicios, que permiten gestionar las alertas y los registros de salud.

Evaluación del Servicio U-health La utilidad y facilidad de uso de estos servicios son validados mediante un estudio de usuario por los profesionales de salud del *HEGC*. Se analizan tres casos de estudio de pacientes con las siguientes edades: dos meses, un año con dos meses y ocho años. La simulación se realiza mediante el uso de un formulario web, donde los signos vitales se



Figura 3: Servicios Móviles para Gestionar Alertas y Registros de Salud.

introducen a través de un dispositivo tablet. Las interfaces gráficas de usuario de los servicios móviles se despliegan en un Smartphone.

Esta simulación se valida a través de una encuesta que utiliza una escala Likert de cinco niveles. Se encuestó un total de 16 profesionales. La composición de la muestra contiene un 6 % de enfermeras, 19 % de médicos y 75 % de kinesiólogos. La Tabla 3 muestra que cada ítem evaluado tiene un promedio mayor o igual a 4.0, lo que indica que los usuarios consideran a los servicios como útiles (100 %), fáciles de usar (81 %) y que contribuyen a desencadenar acciones preventivas en un momento oportuno (81 %). En relación a las notificaciones preventivas, el 63 % está de acuerdo en que los servicios generan notificaciones apropiadas en relación al riesgo del paciente, y el 19 % está muy de acuerdo con esto.

Se utiliza el alfa de Cronbach para evaluar la confiabilidad de la muestra. Este indicador se basa en los siguientes parámetros: número de ítems, covarianza promedio dentro de los ítems, y la varianza de la puntuación total. El alfa de Cronbach de la muestra tiene un valor de 0.84, considerando un total de 9 ítems y 16 personas encuestadas. Este indicador muestra una buena consistencia interna de la muestra, lo que indica que los resultados son bastante confiables.

Adicionalmente, se lleva a cabo un análisis estadístico de los resultados para determinar el intervalo de confianza para cada elemento con un 95 % de confianza. De la tabla 3 se puede observar que los elementos mejor valorados corresponden a la utilidad (ítem 2), y el atractivo de los servicios (ítem 1). Los ítems con peor evaluación corresponden a la capacidad de uso de los servicios (ítem 3), y las notificaciones basadas en el riesgo del paciente (ítem 7). Estos resultados indican que las principales áreas de mejora se relacionan con la interfaz gráfica de usuario de los servicios, para facilitar la navegación dentro de ellos, y cómo se visualiza la información asociada al estado del paciente.

Tabla 3: Resultados de Usabilidad de Servicios Móviles.

ID	Ítem	Puntaje Promedio	Intervalo de Confianza (95 %)
1	Encuentro los servicios atractivos	4.8	[4.61 - 5.00]
2	Los servicios son útiles	4.8	[4.53 - 4.97]
3	Los servicios son fáciles de usar	4.1	[3.73 - 4.40]
4	Los servicios permiten visualizar data relevante del paciente	4.6	[4.25 - 4.87]
5	Los servicios permiten generar acciones de manera oportuna	4.4	[3.98 - 4.77]
6	Los servicios permiten visualizar de manera correcta la información transmitida	4.4	[4.02 - 4.73]
7	Los servicios generan notificaciones adecuadas en base al riesgo del paciente	4.0	[3.69 - 4.31]
8	Estoy satisfecho con las características generales	4.1	[3.73 - 4.40]
9	Los servicios muestran información valiosa para la toma de decisiones preventivas	4.3	[3.92 - 4.70]
10	Evaluación general de 1 a 7	6.2	[5.92 - 6.42]

Se realiza un análisis de correlación con el fin de proporcionar información acerca de las características que los usuarios más valoran. Los resultados indican que los ítems con mayor correlación con la evaluación general de los servicios son los siguientes: el ítem relacionado a la generación de notificaciones apropiadas basadas en el riesgo del paciente (ítem 7, correlación 0.84) y el ítem relativo a la capacidad para ver datos relevantes del paciente (ítem 4, correlación 0.73).

6. Conclusiones

Este trabajo propone un framework basado en Web semántica para la provisión continua de servicios u-health para pacientes con enfermedades crónicas. Sus necesidades de salud están representadas en procesos de negocio, los cuales se mapean a servicios u-health disponibles. Además, se define un modelo de descripción semántico de los procesos de negocio, actividades, servicios u-health, contexto médico, y el contexto del entorno.

Como parte del trabajo futuro, se planea extender el modelo semántico para incluir ontologías médicas existentes en la literatura, así como también aplicar el framework en otras enfermedades crónicas. Además, se tiene la intención de explorar la posibilidad de aplicar un enfoque evolutivo para la ontología para permitir una expansión autónoma del modelo de descripción semántica. En relación a los modelos de clasificación de riesgo de salud, se trabajará en su mejora, abordando el caso de los falsos positivos.

***Agradecimientos:** Este trabajo fue financiado por el programa CONICYT - IDEA FONDEF, código de proyecto: CA13i-10300, y por el programa CONICYT - FONDECYT, código de proyecto: 11130252. Los autores desean agradecer el apoyo continuo del “Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería” (ICM: P-05-004-F, CONICYT: FBO16). Además, se agradece a las distintas personas del hospital que apoyaron el desarrollo del proyecto, como la directora del HEGC Dra. Begoña Yarza, la enfermera gestora de camas Francisca Molina, la directora de los programas AVI Dra. Rebeca Paiva, y la interna de medicina Katrina Lolos. Se agradece al Ingeniero Fabián García por probar el modelo de razonamiento difuso con una base de datos más confiable.*

Referencias

- [1] B. Arnrich, O. Mayora, J. Bardram, y G. Troster. Pervasive healthcare: paving the way for a pervasive, user-centered and preventive healthcare model. *Methods Inf Med*, 49(1):67 – 73, 2009.
- [2] P. Fortier y B. Viall. Development of a mobile cardiac wellness application and integrated wearable sensor suite. In *The Fifth International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pages 301–306, 2011.

- [3] D. Fotiadis, A. Likas, y V. Protopappas. *Intelligent Patient Monitoring*. John Wiley and Sons, Inc., 1st edition, 2006.
- [4] R. Gao. A phone-based e-health system for osas and its energy issue. In *2012 International Symposium on Information Technology in Medicine and Education*, pages 682–686, 2012.
- [5] D. Han, M. Lee, y S. Park. The-muss: Mobile u-health service system. *Comput. Methods Prog. Biomed.*, 97(2):178–188, 2010.
- [6] A. Jimenez-Molina, J. Kim, H. Koo, B. Kang, y I. Ko. A semantically-based task model and selection mechanism in ubiquitous computing environments. In *International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*, pages 829–837, 2009.
- [7] A. Jimenez-Molina y I. Ko. Spontaneous task composition in urban computing environments based on social, spatial, and temporal aspects. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(8):1446 – 1460, 2011.
- [8] K. Kawamoto, A. Honey, y K. Rubin. The hl7-omg healthcare services specification project: Motivation, methodology, and deliverables for enabling a semantically interoperable service-oriented architecture for healthcare. *Journal of the American Medical Informatics Association: JAMIA*, 16(6):1874 – 881, 2009.
- [9] J. Kim, S. Ahn, J. Soh, y K. Chung. U-health platform for health management service based on home health gateway. In *IT Convergence and Security*, pages 351–356, 2012.
- [10] F. Miao, X. Miao, W. Shangguan, y Y. Li. Mobihealthcare system: Body sensor network based m-health system for healthcare application. *E-Health Telecommunication Systems and Networks*, 1(1):12 – 18, 2012.
- [11] W. Omar, B. Ahmad, A. Taleb-Bendiab, y Y. Karam. A software framework for open standard self-managing sensor overlay for web services. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Enterprise Information Systems*, pages 72–81, 2005.
- [12] F. Paganelli y D. Giuli. An ontology-based system for context-aware and configurable services to support home-based continuous care. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 15(2):324–333, 2011.

- [13] D. Patil, V. Wadhai, M. Gund, R. Biyani, S. Andhalkar, y B. Agrawal. An adaptive parameter free data mining approach for healthcare application. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 3(1), 2012.
- [14] M. Serhani, A. Benharref, y E. Badidi. Towards dynamic non-obtrusive health monitoring based on soa and cloud. In *Proceedings of the Second International Conference on Health Information Science*, pages 125–136, 2013.

