

Sistemas Embebidos: Rediseño del proceso de seguimiento de trayectorias de Vicuñas

Embedded Systems: Process Redesign for tracking Vicuñas Paths

Esteban Volentini¹, Eduardo Daniel Cohen², Juan Pablo Gruer³

Recibido: abril 2017

Aprobado: agosto 2017

Resumen.- La vicuña es una especie autóctona de los Andes que vive en estado silvestre y cuya lana tiene un alto valor económico. El conocimiento de los hábitos de la vicuña permite brindar nuevas alternativas para mejorar la conservación de la especie. El presente artículo describe el rediseño de un sistema embebido para investigar los recorridos de las vicuñas durante un período anual en su hábitat natural. Se detallan las estrategias aplicadas que contemplan diferentes aspectos: condiciones de la zona, integración de tecnologías informáticas, diseño para bajo consumo y aseguramiento de la comunicación de datos mediante herramientas de verificación.

Palabras Clave: Sistemas Embebidos; Reingeniería; Verificación; Diseño para Bajo Consumo.

Summary.- The Vicuna is a native species of Los Andes that lives in the wild and has a high economic value due to its fine wool. Knowledge of vicuna's habits may allow devising new ideas to enhance the conservation status of the species. This article describes the redesign of an embedded system to track their paths during an annual period on its natural habitat. Application of fundamental strategies includes: geographical conditions, information technologies integration, design for low energy consumption and proved dependability of communication protocols, by means of formal verification tools.

Keywords: Embedded Systems; Reengineering; Verification; Design for Low Power.

1. Introducción.- La explotación de la lana de la vicuña es fundamental para los habitantes de la puna argentina, hábitat natural de las vicuñas, pero una de las zonas más pobres de la República Argentina. En los años sesenta, la demanda llevó a la vicuña al borde de la extinción, ya que se cazaron cantidades enormes. La especie se recuperó gracias a controles efectivos, pero el futuro de la misma depende del mantenimiento de las poblaciones silvestres y de su aprovechamiento apropiado. Por otra parte es importante considerar que las vicuñas no pueden sobrevivir a una vida en cautiverio. Hoy en día, se hace la esquila viva de las poblaciones silvestres para obtener la lana sin matar a las vicuñas y mantener así esta importante fuente de ingresos.

Investigadores de la Facultad de Ciencias Naturales, de la Universidad Nacional de Tucumán, estudian el comportamiento de las vicuñas mediante el seguimiento de sus recorridos o

¹ Docente de la carrera Ingeniería en Computación, de la Universidad Nacional de Tucumán, Argentina
evolentini@herrera.unt.edu.ar

² M.Sc.E.E., Technion – Israel Institute of Technology. Docente de la carrera Ingeniería en Computación, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. dcohen@herrera.unt.edu.ar

³ Investigador del Laboratorio de Microprocesadores, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

trayectorias. Esta investigación es muy importante para la conservación de los animales y no resulta fácil debido a que las mismas se mueven, en general, por lugares de muy difícil acceso al hombre.

Tradicionalmente [1], se coloca un collar en el animal que emite una señal de radiofrecuencia, los investigadores deben estar cerca para captar, mediante triangulación, datos sobre su localización. Esta técnica requiere antenas grandes, difíciles de usar y manejar en el campo. Solo se recolectan datos del momento en que el investigador está detrás del animal, lo que es muy difícil de lograr ya que las vicuñas viven en un territorio montañoso, alto y desértico, con muy pocos caminos de acceso para el hombre. Por otra parte, el investigador toma los datos manualmente y posteriormente debe introducirlos de esa misma forma a una computadora en su laboratorio.

En el presente artículo se propone una reingeniería del proceso [2] de registro de los recorridos a fin de lograr mejoras sustanciales en todo el proceso de recolección de datos. El objetivo consiste en obtener datos de las trayectorias de las vicuñas durante un año completo, día y noche, sin necesidad de que los investigadores deban estar detrás de los animales y que estos datos no requieran ser ingresados manualmente al sistema de investigación del laboratorio.

2. Soluciones tecnológicas para rastreo de animales.- Existen diversas soluciones tecnológicas para el seguimiento y/o identificación de animales, se tratan como nodos sensores y sus respectivas topologías [3], a saber:

- a) Rastreo por triangulación [1], previamente mencionado, consiste en un collar que emite una señal constante de radiofrecuencia, esta señal se capta mediante dos antenas, lo que permite el cálculo de la posición.
- b) Dispositivos GPS y seguimiento satelital [4]. Un dispositivo, colocado en el collar del animal, toma datos GPS y transmite los mismos a un determinado satélite quien los reenvía al servidor del centro de investigación. Se requiere un abono para el servicio satelital. Adicionalmente, el collar debe incluir un tranceptor con alcance satelital La topología de la interconexión es del tipo “estrella”, en la que todos transmiten sus datos a un centro, que en este caso es el satélite. Una evaluación de las restricciones técnicas y el coste del seguimiento de animales salvajes con comunicación satelital (satélite ARGOS) [5] concluye que el costo es alto: entre US\$ 7000 y 9000 más abono anual al satélite. Estos costos no permiten contar con este tipo de dispositivos para los grupos de investigación de las universidades argentinas, que cuentan con exiguos presupuestos.
- c) Dispositivos seguidores en red con GPS [6], con conexión a estaciones fijas. En este caso, la estación fija reemplaza al satélite y se requiere que todos los dispositivos en algún momento puedan situarse al alcance de la base fija para transmitir – asimismo debe haber un medio para transferir los datos desde la base fija al laboratorio del investigador. La topología de interconexión es del tipo “árbol”. En este caso la topología es de tipo “árbol”.
- d) Dispositivos seguidores en red con GPS [7] con conexión entre ellos: cuando los animales se encuentran próximos entre sí se comunican y transfieren datos. Un único dispositivo que se recupera, permite recolectar prácticamente la totalidad de los datos del grupo. Este tipo de dispositivos se emplea para el estudio de migración de aves, son descartables (muchas aves quedan en el camino, y otros simplemente no se pueden recuperar por la dificultad para capturar las mismas aves). La topología de conexión es del tipo “malla”: todos con todos.
- e) En [8] se adopta un método de comunicación multi-punto (multi-hop) con store and forward. Ello permite estudiar procesos de formación de grupos en animales silvestres sociales. Se combina, adicionalmente, con estaciones fijas. Además se realizan otras mediciones, por medio de acelerómetros, para detectar situaciones diversas (caza, reposo, fuga, entre otras). La topología empleada es de tipo “malla”.

3. Rediseño del Sistema.

3.1 Características Geográficas.- El territorio de la puna argentina, en que habitan las vicuñas, se caracteriza por ser una zona desértica de altura. Durante la estación seca solo quedan unas pocas aguadas permanentes y los animales suelen concentrarse en ellas para beber y alimentarse. Al aumentar las lluvias, se dispersan y eventualmente retornan en el siguiente año. Es muy importante minimizar la interacción de los investigadores con los animales, ya que ello los altera sustancialmente con peligro de causarles daño por stress.

3.2 Objetivos.- De acuerdo a las características cíclicas de los recorridos de las vicuñas, surgen los siguientes objetivos para el diseño del equipo:

- a) almacenar información por lo menos un año en un dispositivo móvil que se coloca en un collar en el animal
- b) descargar la información de los equipos móviles de manera inalámbrica en estaciones “base” situadas en aguadas permanentes
- c) maximizar la duración de la batería de los equipos móviles para tratar de obtener un año de autonomía, y simultáneamente mantener su peso y tamaño en valores razonables para no causar problemas al animal
- d) contar con un protocolo diseñado a medida para la comunicación inalámbrica que priorice el ahorro de energía minimizando el tiempo de transmisión y permita transferencias parciales de la información en caso de que la comunicación deba cortarse por diversas razones (alejamiento del móvil).

Habida cuenta de las dificultades para detectar y solucionar errores una vez que los equipos se encuentren instalados en los animales, resulta imprescindible incluir durante el diseño una etapa de verificación del protocolo, mediante una herramienta formal que se describirá más adelante [9].

3.3 Dispositivo Móvil.- Los dispositivos móviles deben estar dotados de un chip GPS a fin de poder registrar la posición en que se encuentra el animal. Adicionalmente requieren memoria no volátil a fin de registrar los datos medidos y el registro horario correspondiente, ambos provenientes del GPS. Por último es necesario contar con un transceptor de UHF para poder comunicarse con la estación base y transferirle los datos en cuanto sea posible.

Para cumplir con los requisitos de bajo consumo, el dispositivo móvil debe alternar entre dos modos de trabajo:

- a) activo: todo el sistema funciona activamente a fin de obtener una posición GPS y guardarla en memoria no volátil (flash). Cada módulo funciona el tiempo absolutamente necesario para realizar su función: por ejemplo el dispositivo GPS una vez que obtiene los datos de posición, pasa a “inactivo”, antes de escribir los mismos en memoria no volátil o de intentar transmitirlos a una estación base.
- b) inactivo o de bajo consumo: la mayor parte de los circuitos se desactivan, excepto los circuitos necesarios para que el sistema pase al modo activo. El GPS pasa a modo “stand-by”, ya que si se apagara requeriría mucho tiempo – y consumo – para tomar datos de la posición.

Teniendo en cuenta la velocidad de movimiento del animal, resulta suficiente tomar una medida de posición una vez por hora. En consecuencia, el dispositivo debe permanecer en modo inactivo durante una hora para recién ingresar en modo activo.

Para minimizar aún más el consumo, el sistema verifica si la posición medida es similar a la inmediatamente precedente (dentro de la cota de error estimado), en cuyo caso no procede a

realizar la escritura en memoria flash. Al tener menos datos en flash, también se ahorra consumo al momento de transmitirlos a la base.

Cada dispositivo lleva en memoria la posición de las estaciones base. Al terminar una medición y antes de entrar en modo inactivo, verifica si se encuentra en el radio de alcance de alguna estación base, en cuyo caso intentará transmitir los datos que se hayan recolectado y que no se transmitieron todavía en comunicaciones anteriores. Nuevamente se procura minimizar el consumo ya que se transfieren únicamente los datos nuevos. Una vez finalizada esta operación, se pasa al estado inactivo.

Es claro que la forma de trabajo previamente descrita requiere de una lógica programada a cargo de un microcontrolador. Un temporizador interno del mismo se encarga de dar la señal correspondiente para pasar el sistema al estado activo.

En la figura I se muestra la placa que contiene el sistema embebido pudiendo distinguir los siguientes elementos:

- Unidad de almacenamiento, constituida por un micro SD.
- Batería Li-Ion, recargable, con 3,7 V nominales y 4 A máximos. La capacidad de carga es de 14,8 Wh (4Ah).
- El microcontrolador MC9S08QE32.
- Transceptor de UHF APS230. y su antena,

La Unidad GPS, FV M8, se sitúa en la parte posterior de la placa.

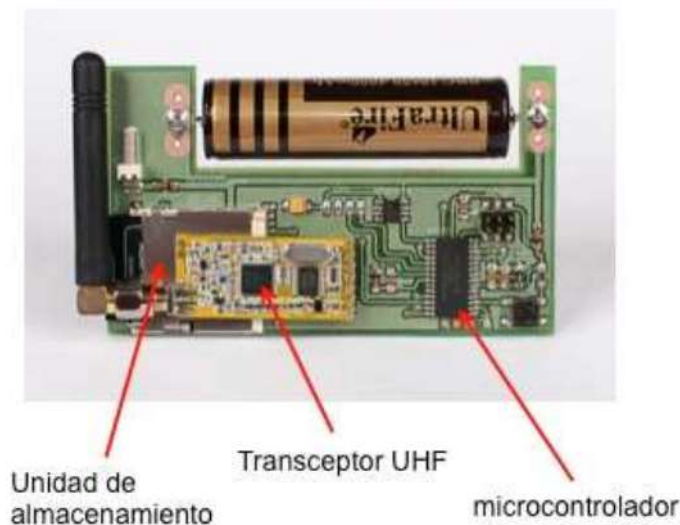


Figura I.- Placa del Dispositivo Móvil

3.4 Dispositivo Base.- El dispositivo base, provisto también de un microcontrolador, se encarga de recibir los datos de los dispositivos móviles mediante un transceptor de UHF y almacenarlos en memoria flash intercambiable.

El equipo base, por estar fijo, no requiere un diseño de bajo consumo ya que puede conectarse a una batería de tamaño y capacidad muy superior – por ejemplo una batería de un automóvil la que se puede recargar mediante celdas solares, aprovechando el clima de altura del noroeste

argentino, caracterizado por cielo claro y alto nivel de insolación prácticamente durante todo el año.

A excepción del GPS, el dispositivo base cuenta con los mismos módulos que el dispositivo móvil permitiendo emplear similar diseño de placa para su construcción.

3.5 Recolección de los datos.- La revisión del estado de las baterías, como así también del módulo de memoria Flash, podría ser realizado en la base, por un poblador de la zona, una vez al año. Completada esta operación, podrá enviar los datos vía Internet al Laboratorio de Investigación, en donde ingresarán al sistema evitando errores de tipeo manual, el que ya no es necesario.

Para completar el rediseño del proceso de toma de datos, se desarrolló un software para cambiar el formato de los datos en el servidor, a fin de que los mismos puedan ser interpretados por un sistema de mapas geográficos, por ejemplo Google-Maps. Con todo esto, se logra reducir los errores manuales y obtener las trayectorias gráficas con facilidad.

3.6 Protocolo de Comunicación.- El protocolo de comunicación se diseñó teniendo en cuenta que las estaciones base no requieren un diseño para bajo consumo, mientras que esta característica es vital para los dispositivos móviles. Resultó así un protocolo del tipo maestro-servidor en el cual la estación base se encuentra permanentemente chequeando si algún móvil se encuentra dentro de su alcance de comunicaciones, en cuyo caso se establecerá un nexo con el mismo. Este chequeo se realiza para cada móvil, de manera cíclica en un esquema "round-robin": se envía una "invitación de comunicación" en un ciclo predeterminado, partiendo del primero hasta el último, para luego comenzar nuevamente desde el primero y así sucesivamente. Al invitar a un móvil k , es posible que el mismo no se encuentre en el área de cobertura y por tanto no responda, lo cual se detecta luego de superar un tiempo de espera determinado T_i , la base intentará con el siguiente dispositivo, $k+1$, y así sucesivamente.

Cualquier dispositivo móvil, k , contiene las coordenadas GPS de las bases y en función de su posición determina si se encuentra dentro del radio de alcance de alguna de ellas. Las mismas se sitúan, claro está, de manera que sus alcances no se superpongan.

El comportamiento del dispositivo genérico k se describe mediante el diagrama de estados de la Figura II. Inicialmente el dispositivo se encuentra "inactivo". Una interrupción periódica del temporizador interno cada hora, lo coloca en el estado activo. Adquiere una nueva posición de GPS y si alguna de las siguientes condiciones se cumple retorna nuevamente al estado inactivo:

- todos los datos de posición previos han sido transferidos a la base, y la nueva posición no difiere de la anterior dentro de un determinado margen de error.
- el sistema se encuentra fuera de rango de las bases.

Si las condiciones anteriores no se cumplen, el sistema toma el dato más antiguo que no fue transmitido todavía y espera la llegada de un mensaje de invitación de comunicación con la identificación k desde la base. A fin de limitar el consumo de energía durante la espera de turno, se establece un tiempo máximo de espera a la misma, T_b , tras lo cual el móvil retorna al estado inactivo. Una vez que llega este mensaje, procederá a enviar la trama de datos a la base y espera una respuesta de reconocimiento de la misma. Si la respuesta no llega luego de un tiempo determinado, T_r , el sistema reenvía el dato. Si al cabo de tres intentos no se recibe reconocimiento, el sistema pasará al estado inactivo.

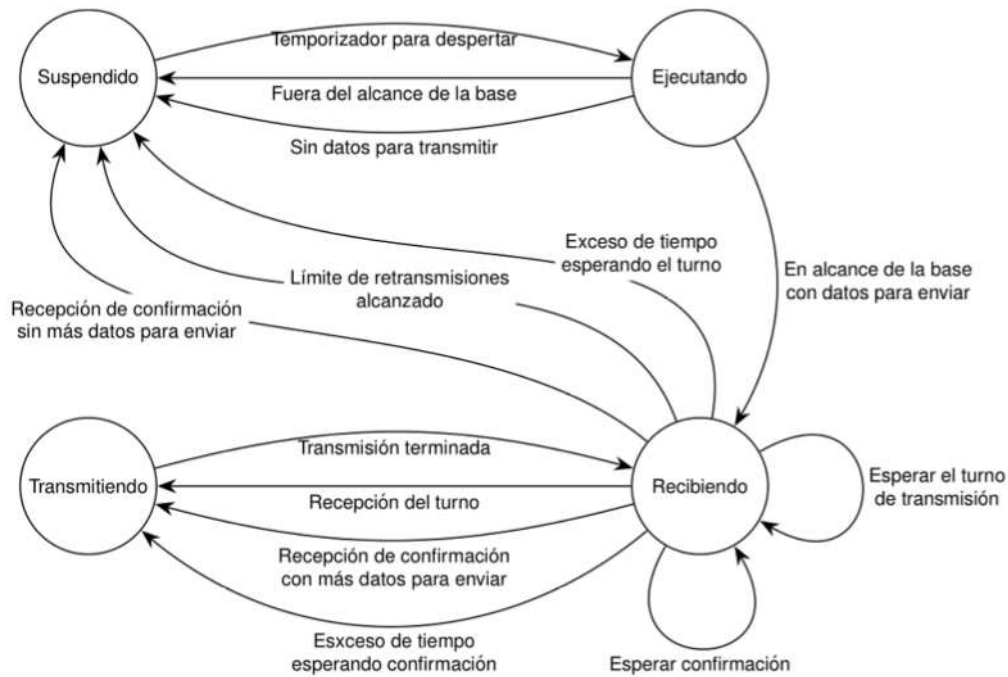


Figura II.- diagrama de estados de un dispositivo móvil

Si las condiciones anteriores no se cumplen, el sistema toma el dato más antiguo que no fue transmitido todavía y espera la llegada de un mensaje de invitación de comunicación con la identificación k desde la base. A fin de limitar el consumo de energía durante la espera de turno, se establece un tiempo máximo de espera a la misma, T_b , tras lo cual el móvil retorna al estado inactivo. Una vez que llega este mensaje, procederá a enviar la trama de datos a la base y espera una respuesta de reconocimiento de la misma. Si la respuesta no llega luego de un tiempo determinado, T_r , el sistema reenvía el dato. Si al cabo de tres intentos no se recibe reconocimiento, el sistema pasará al estado inactivo.

Siempre que reciba mensajes de reconocimiento de la base, verificará si posee datos no enviados, en cuyo caso se repite el procedimiento de envío de datos. Una vez enviados todos los datos, el móvil retorna al estado inactivo. Es importante notar que con la transmisión de cada dato, el dispositivo móvil, actualiza su puntero de datos transferidos a fin de no volver a enviarlos nuevamente cuando establezca el próximo vínculo.

Cada dato contiene una posición y la fecha y hora en que fue adquirida, provistos por el GPS. La lectura del "tiempo-GPS" permite evitar derivas de temporizadores de los móviles. Es importante notar que no necesariamente todos estos dispositivos deben activarse a la misma hora, por el contrario, el hecho de que lo hagan en distinto momento permite reducir el tiempo de espera para su asignación de turnos desde la estación base y por lo tanto reducir el consumo. Lo único que se requiere es que el tiempo de inactividad sea de una hora. Para mayor claridad, la figura III ilustra el diagrama UML con dos secuencias características del protocolo considerando las interacciones entre la base y los móviles.

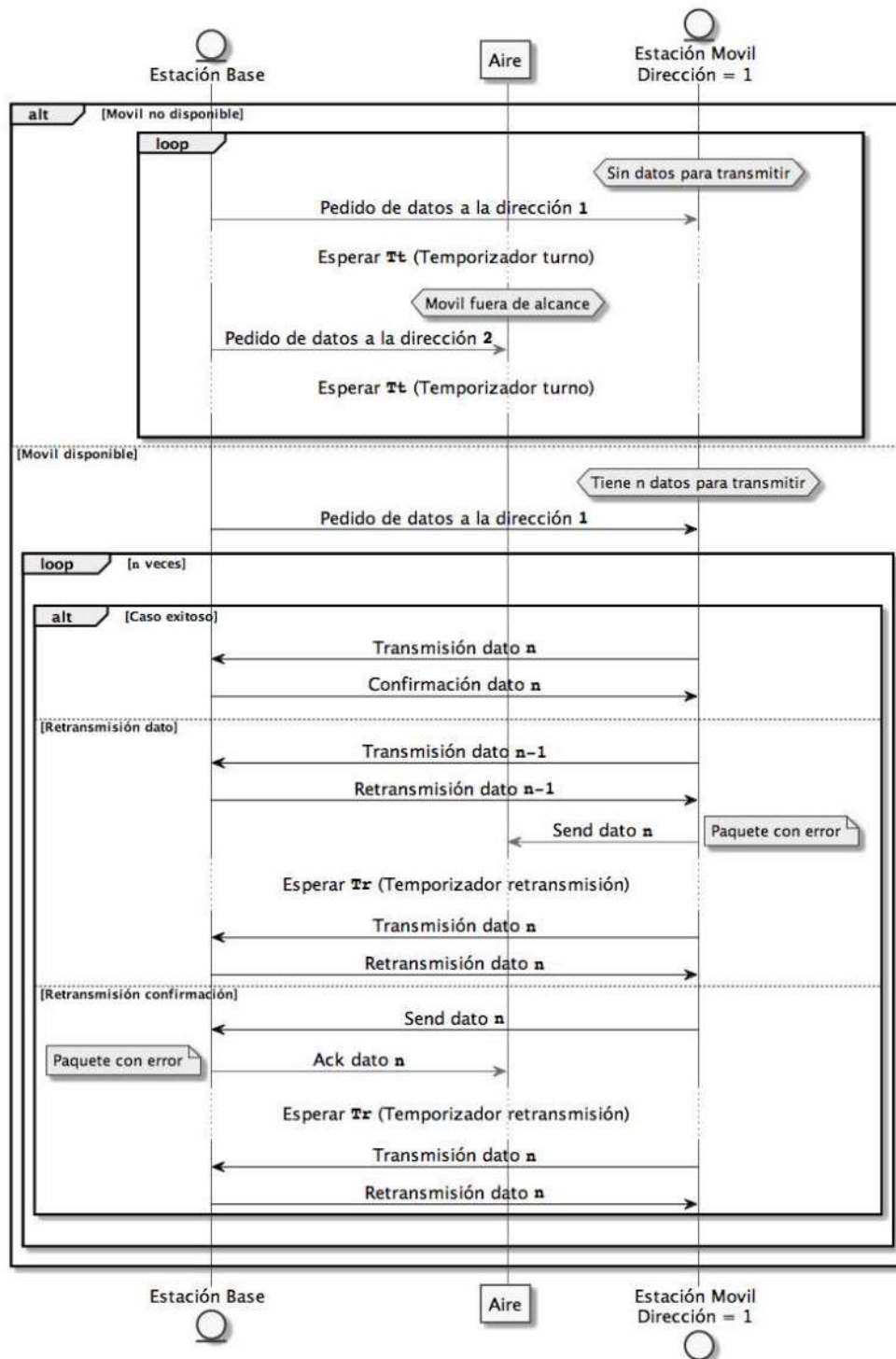


Figura. III.- Diagrama UML del protocolo

3.7 Evaluación del Consumo para comunicaciones.- Para estimar la duración de la batería es necesario considerar el consumo promedio del dispositivo móvil, para lo cual es necesario calcular el promedio ponderado en el tiempo en sus tres modos de trabajo.

El consumo real de las comunicaciones, C , responde a la ecuación (1), en la cual el móvil realiza k transmisiones, cada una de ellas con un tiempo promedio E para espera de turno, transmitiendo cada vez n datos promedio, que demoran un tiempo T sin retransmisiones, a lo que se suma además r retransmisiones por errores de comunicación.

$$C = k * [E + n * T * (1 + r)] \quad (1)$$

No se puede determinar de antemano cuántas veces el portador del móvil va a estar en el alcance de una base, pues ello depende del comportamiento del animal, que es justamente lo que se desea estudiar. Por otra parte, la cantidad de retransmisiones, r , es también desconocida ya que depende de diversos factores, por ejemplo si el portador se mueve muy cerca del límite del alcance.

La ecuación brinda algunas herramientas para mejorar el consumo, por ejemplo podría limitarse la variable k , programando que la comunicación no se establezca cuando la cantidad de datos a transferir no supere un mínimo determinado. Asimismo, se podría cortar una comunicación en la que la cantidad total de retransmisiones supere un determinado límite – ya que ello significaría que la misma no es suficientemente buena.

En síntesis, la ecuación (1) muestra que es imposible determinar de antemano el consumo para comunicaciones, brindando así también algunas ideas para un ajuste fino que permita reducir el mismo.

Dada la imposibilidad de conocer el tiempo de comunicación, se considerará el caso ideal en el que no haya tiempos de espera por turnos ni retransmisiones por problemas de comunicación, al solo efecto de evaluar si la duración de la batería alcanzaría en este caso el objetivo de un año. El ensayo para determinar el consumo por comunicaciones en el caso ideal se realiza con el móvil muy cerca de la base y transfiriendo una cantidad grande de datos. A partir de allí se obtiene el consumo unitario por dato y se multiplica por 24 para obtener el equivalente de un día de datos.

También por ensayos del prototipo se determina el consumo de la batería en estado activo y con funcionamiento del GPS, como así también el consumo en estado inactivo. Los resultados se presentan en la tabla I, que muestra también el tiempo diario total en que el sistema móvil permanece en cada modo, medido en segundos, durante un día.

Modo	Consumo (mA)	Tiempo (seg)
Adquisición Posición (GPS)	60	120
Bajo Consumo	2,8	86.255
Comunicación	32	25

Tabla I.- consumos y tiempos diarios de cada modo de trabajo

El consumo medio ideal, CI , se calcula mediante la ecuación (2), prorateando los consumos en sus correspondientes tiempos, obteniendo así un promedio ponderado.

$$CI = (60 * 120 + 2,8 * 86.255 + 32 * 25) / 86500 = 2,88 \text{ mA} \quad (2)$$

Dividiendo la carga total de la batería, 4000 mAh, en el consumo medio ideal, obtenemos un límite ideal de 58 días, muy distante del objetivo previsto.

Si bien existen diversas alternativas para intentar obtener un protocolo más eficiente desde el punto de vista del consumo, por ejemplo uno que se base en compartir el medio mediante contenciones [10] para disminuir los tiempos de espera por turnos, se sabe de antemano que el esfuerzo será inútil ya que ni siquiera el caso ideal cumple con las especificaciones. Esta misma conclusión se aplica al ajuste fino, detallado previamente, del protocolo diseñado.

Consecuentemente con el resultado anterior, se está desarrollando un nuevo prototipo que permitirá recargar la batería mediante el agregado de una celda solar y lograr así el tiempo de funcionamiento requerido.

3.8 Verificación.- Dado el difícil acceso a los sistemas una vez instalados en los animales, es muy importante poder asegurar el buen funcionamiento y la confiabilidad de los protocolos de comunicación de datos, los cuales han sido diseñados expresamente para esta aplicación. Para establecer dicha confiabilidad se ha elegido la técnica de la verificación por medio de herramientas formales. La verificación consiste en establecer, con la fuerza de una demostración matemática, que un sistema dado S , generalmente representado por un modelo formal M_S satisface cierta propiedad P , siendo la relación de satisfacción entre modelo y propiedad la que se expresa en lógica formal según la ecuación (3). Los modelos son, en general, abstracciones del sistema, que representan algún aspecto del mismo, por ejemplo: estructura, comportamiento u otros.

$$M_S \vdash P \quad (3)$$

En el caso de los protocolos, el modelo representa el comportamiento. Las propiedades que se trata de verificar son de dos tipos: seguridad y vivacidad. Una propiedad de vivacidad expresa que el sistema es capaz de completar la tarea que se le ha encomendado. Una propiedad de seguridad expresa que el sistema no puede ingresar en un modo de funcionamiento incorrecto o erróneo. Existen dos grandes familias de herramientas de verificación. Por un lado están aquellas basadas en algoritmos de prueba semiautomática de teoremas, mientras que por el otro se encuentran aquellas basadas en la exploración de los espacios de estado (revisión de modelos).

En nuestro caso, dada la importancia de ciertos parámetros temporales de los protocolos, la herramienta escogida ha sido el entorno UPPAAL [10]. El lenguaje de modelado de este entorno es el de los autómatas temporizados. El entorno incluye un editor de modelos, un simulador y un revisor de modelos (model-checker). Tratándose de propiedades de comportamiento, el revisor de modelos de UPPAAL admite, para la expresión de las mismas, un segmento del lenguaje de la lógica temporal que combina operadores temporales lineales con operadores temporales arborescentes. Dicho segmento es suficientemente expresivo para formular las principales propiedades de vivacidad y de seguridad. En nuestro caso hemos sometido nuestros protocolos a la verificación de propiedades que expresan:

- a) los autómatas pueden, en toda evolución, llegar a estados que indican que una operación de envío de datos ha sido completada (vivacidad).
- b) el sistema no llega nunca a una situación de bloqueo total o abrazo mortal (seguridad).
- c) nunca dos sistemas móviles mandan datos simultáneamente (seguridad).

Al verificar la tercera condición el revisor de modelos indicó que la misma no era satisfecha y brindó además datos exactos de la secuencia de eventos que desencadena la transmisión simultánea de dos dispositivos móviles. El análisis de estos eventos muestra que existe una relación entre los valores asignados a los temporizadores de turno T_i y de retransmisiones T_r . Al asignar al temporizador T_i un valor menor a tres veces T_r puede suceder que el móvil k este retransmitiendo y la base invitando a transmitir al móvil $k+1$. Un aspecto muy interesante es que, si bien la lógica general del protocolo era correcta, un error en la asignación de un temporizador

podía provocar un mal funcionamiento. El valor del temporizador, causante del problema, fue modificado y la propiedad fue declarada satisfecha por el revisor

Una descripción detallada para analizar este protocolo se presenta en [6], esta referencia de los mismos autores, si bien trata sobre el producto objeto del presente artículo, está orientada principalmente a ilustrar un caso de uso de la herramienta de verificación UPPAAL. Por el contrario, en este artículo el foco está orientado hacia el proceso integral de diseño, en particular de un caso de rediseño integral.

El revisor de modelos de UPPAAL, cuya descripción detallada para este caso se presenta en [6], permitió comprobar que el valor asignado a un parámetro del protocolo: un tiempo de espera, era incorrecto y podía conducir a una colisión de tramas. El valor fue modificado y la propiedad fue declarada satisfecha por el revisor.

3.9 Prueba de funcionamiento e integración.- Las pruebas del funcionamiento en vicuñas presentan varios inconvenientes, a saber: se requiere un período muy largo para recolectar información, no se considera adecuado someter a los animales a stress para primeras pruebas, es imposible realizar una prueba de larga duración ya que se sabe de antemano que la batería no durará el tiempo especificado (por lo que se está encarando una nueva versión). En consecuencia se diseñó una prueba más sencilla que permite determinar la correcta integración y funcionamiento de las tecnologías involucradas.

La prueba consistió en trasladar el prototipo móvil por distintos puntos del Gran San Miguel de Tucumán, a fin de que recolecte datos de GPS y los incorpore en memoria no volátil. El recorrido finalizó en el Laboratorio de Microprocesadores de la Universidad Nacional de Tucumán, momento en que el móvil ingresa al campo de alcance del prototipo de la base. Una vez concluida la transmisión de datos, se retiró la unidad de almacenamiento de la base y se la colocó en una PC, a fin de probar el Software de integración con la aplicación "Google Maps". Todas las pruebas fueron satisfactorias, obteniéndose el mapa con la trayectoria del móvil, tal como se muestra en la figura IV.

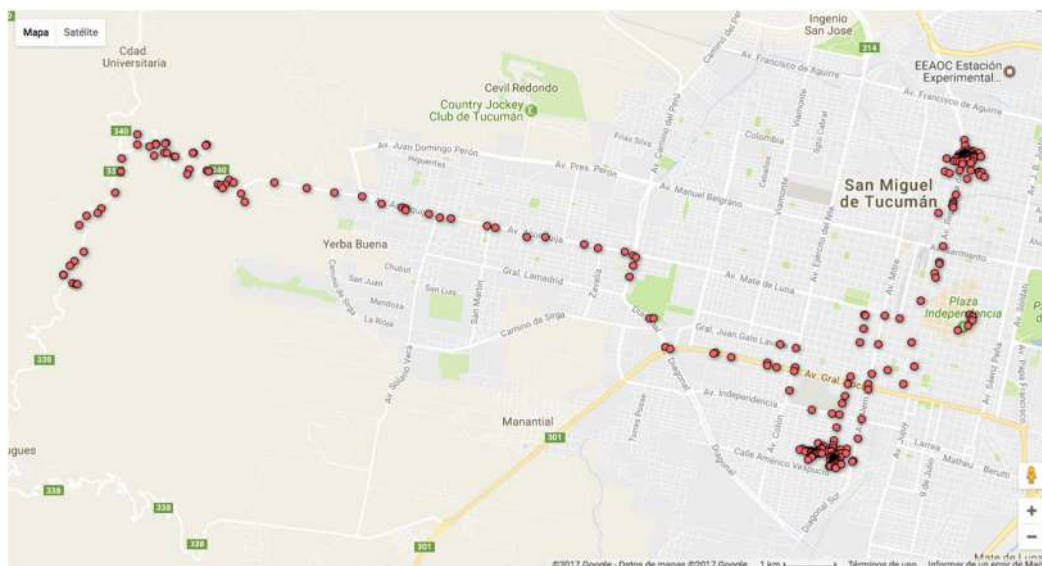


Figura IV.- Trayectoria del dispositivo móvil en "Google Maps"

4. Conclusiones.- El rediseño del proceso para obtener datos de trayectorias de vicuñas contempló el replanteo fundamental y el rediseño radical para lograr mejoras dramáticas en aspectos críticos del funcionamiento, como ser costo, servicio y velocidad, lo que responde a la definición de reingeniería de procesos [2]. Los investigadores zoólogos se sorprendieron positivamente de los resultados obtenidos, sus especificaciones no contemplaban las prestaciones finales a obtener del producto desarrollado. En esta era de permanentes cambios tecnológicos, una clave de la innovación consiste en que el desarrollador conozca muy bien las necesidades del cliente, tanto las que este establece y es capaz de expresar, como aquellas de las que no es consciente. Esta característica invertida del proceso de especificaciones se debe a que el avance tecnológico frecuentemente crea oferta para productos nuevos, para los cuales – por tanto – no existe una necesidad. En otras palabras, la oferta crea su propia demanda.

Una segunda característica importante de los productos innovadores se obtiene en general mediante la integración de distintas tecnologías informáticas, en este caso una unidad de procesamiento, memoria no volátil, baterías recargables, paneles solares, GPS, bases de datos de trayectorias y servicios de mapas de Google.

Por último es importante mencionar la capacidad de aprovechar condiciones particulares, específicas al uso del producto a desarrollar, en este caso las características geográficas y climática de la puna argentina. Ello permite lograr diseños que de otra forma hubieran sido imposibles de concebir. Este tipo de características son muy importantes cuando se desarrolla un producto para un nicho específico de mercado.

Dada la altísima expansión que se ha verificado en la generación de sistemas embebidos, tanto en cantidad como en innovación, la mayoría de las aplicaciones dependerán cada vez más, críticamente, de su capacidad para desempeñar sus funciones de manera correcta. En este contexto toma importancia la posibilidad de emplear métodos formales para validar previamente su funcionamiento. El ejemplo de aplicación que se presenta en este artículo permitió detectar un error, que si bien simple, hubiera costado mucho tiempo y esfuerzo para solucionarlo mediante pruebas tradicionales de funcionamiento del prototipo.

En cuanto al bajo consumo, los objetivos de funcionamiento no se pueden cumplir a partir de la carga de la batería empleada. Para solucionar este problema se está desarrollando una nueva versión del prototipo dotado con panel solar. A pesar de este resultado negativo, el diseño para bajo consumo es fundamental para una gran cantidad de sistemas embebidos. Un sistema de bajo consumo demandará paneles solares reducidos que permitan satisfacer las capacidades físicas de un dispositivo móvil. Por otra parte, se espera que el avance de la tecnología de baterías permitirá – en el futuro – lograr el tiempo de funcionamiento esperado sin necesidad de energía adicional.

5. Referencias

- [1] Black de Décima, P., Dürig, F. y Rebuffi, G., *Estructura social y áreas de actividad de vicuñas macho familiares en semi-cautiverio en Abra Pampa, Jujuy, Argentina*, V Congreso Internacional sobre manejo de Fauna Silvestre, 2001: p. 20 - 23
- [2] Hammer, M. & Champy, J., *Reingeniería*, 1994. Norma.
- [3] Perez J., Urdaneta, E. y Custodio, A.: *Metodología para el diseño de una red de sensores inalámbricos*, *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 2014, 18(70): p. 12 – 22.
- [4] Méndez, D., Cuevas, E., Navarro J., González Garza, B. y Guzman Hernández, V. *Rastreo satelital de las hembras de tortuga blanca Chelonia mydas y evaluación de sus ámbitos hogareños en la costa norte de la península de Yucatán, México*, *Revista de biología marina y oceanografía*, versión On-line, 2013, 48(3): p. 497 - 509.
- [5] Thomas, B, Holland J. and Minot, E., *Wildlife tracking technology options and cost considerations*, *Wildlife Research*, No. 38, pp 653–663, 2011
- [6] Volentini E., Cohen, E. D. y Gruer J.P., *Embedded communicating system for vicuñas*

- migration monitoring: Protocol design and verification for low energy consumption*, IEEE CACIDI - IEEE Conference on Computer Sciences, 2016: p. 39 - 43.
- [7] Guilford, T.C. *GPS tracking of the foraging movements of Manx Shearwaters Puffinus breeding on Skomer Island, Wales*, Ibis, 2008. 150(3), p. 462 - 473.
- [8] Markham, A., *On a Wildlife Tracking and Telemetry System: A Wireless Network Approach*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering, University of Cape Town, August 2008
- [9] Behrmann, G., David, A., and Larsen, K. G., *A tutorial on UPPAAL*, Formal Methods for the Design of Real-Time Systems: 4th International School on Formal Methods for the Design of Computer, Communication, and Software Systems, SFM-RT, 2004. 3185(1): p. 200 – 236.
- [10] Stallings W., *Data and Computer Communications*, 10th Edition, Prentice Hall Publishers, 2013.