



**FACULTAD
DE INGENIERIA**

Universidad de Buenos Aires

**CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN
SISTEMAS EMBEBIDOS**

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

**Llamador Bluetooth con micrófono para
sistema de llamado a enfermera**

Autor:

Ing. Raul Alejandro Camacho Dorado

Director:

Ing. Sergio Starkloff (SURIX)

Codirector:

Mg. Ing. Ericson Joseph Estupiñan Pineda (FIUBA)

Jurados:

Ing. Héctor Lacomí (CITEDEF)

Mg. Ing. Mara Fusco (UTN - FRH)

Esp. Ing. Facundo Adrián Lucianna (FIUBA)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires,
entre marzo de 2020 y Abril de 2021.*

Resumen

En la presente memoria se describe el desarrollo de un sistema de llamado a enfermera para la empresa SURIX S.R.L., basado en comunicación por Bluetooth, que reemplazará al actual, basado en comunicación cableada. El sistema desarrollado consiste en un dispositivo llamador, que se conecta con una terminal de sala y puede enviar solicitudes del paciente, así como informar el estado de su batería de alimentación. La terminal de sala debe recibir estos mensajes y reenviarlos a la terminal de enfermería, y si es necesario iniciar una llamada entre el paciente y la enfermera.

Para el desarrollo de esta aplicación se utilizaron conocimientos relacionados a programación de microcontroladores, protocolos de comunicación, sistemas operativos en tiempo real, testing de software y desarrollo de aplicaciones.

Agradecimientos

Esta sección es para agradecimientos personales y es totalmente **OPCIONAL**.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Antecedentes y análisis de contexto	1
1.2. Objetivos y Alcance	2
1.2.1. Objetivos	2
1.2.2. Alcance	3
1.3. Justificación	4
2. Introducción específica	5
2.1. Bluetooth	5
2.1.1. Bluetooth low energy (LE)	5
2.1.2. Bluetooth clásico	6
2.2. Sistema Propuesto	6
2.3. Requerimientos	7
2.4. Planificación	8
3. Diseño e implementación	11
3.1. Análisis del software	11
4. Ensayos y Resultados	13
4.1. Pruebas funcionales del hardware	13
5. Conclusiones	15
5.1. Conclusiones generales	15
5.2. Próximos pasos	15

Índice de figuras

2.1. Diagrama en bloques del sistema propuesto	7
2.2. Diagrama activity on node del trabajo	9

Índice de tablas

1.1. Sistemas de llamado a enfermera	3
2.1. Tecnologías Bluetooth	6

Dedicado a... [OPCIONAL]

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se describe el contexto actual del cual parte el trabajo, el estado del arte de los sistemas de llamado a enfermera, se presentan los objetivos y alcance del trabajo y se expone su justificación.

1.1. Antecedentes y análisis de contexto

SURIX es una empresa argentina fundada en 1998, que se dedica al desarrollo de sistemas de control de acceso basados en tecnología IP. Actualmente ofrece líneas de productos para el hogar y edificios, aplicaciones tecnológicas personalizadas para corporaciones, industrias, hospitales, centros comerciales, autopistas y entes gubernamentales, productos que exporta a más de 14 países para diversas aplicaciones, por lo que tiene oficinas en Israel y México [1].

Entre los productos ofertados por SURIX, se destaca el sistema de llamado a enfermera, este consta de un dispositivo llamador, que se conecta por cable a una central de sala, y ésta a su vez se conecta a través de una red a la terminal de enfermería [2].

Desde el dispositivo llamador, el paciente puede encender la luz de lectura o –lo que es más relevante– requerir la atención del personal de servicio a la habitación. En caso de necesitar atención, la central de sala iniciará una llamada VoIP a la terminal de enfermería.

El sistema diferencia el llamado desde cama, baño o botón de paro cardíaco, y si fue atendido por enfermería remotamente o está en presencia de enfermera, y también cuando concluye el servicio.

Además permite visibilizar la solicitud y tipo de solicitud, desde pasillo por medio de una luminaria, que se puede configurar para iluminarse de diversos colores o encenderse intermitentemente en función del tipo de solicitud del paciente.

En la terminal de enfermería se dispone de un panel donde se puede visualizar el estado de cada cama, y la terminal de sala actualmente sólo puede conectarse a dos dispositivos llamadores.

En el mercado existen varias soluciones similares a la que se desea desarrollar, entre las que podemos mencionar:

- MMCALL: sistema que utiliza tecnologías inalámbricas y dispone de pulsadores de llamada colocados en las habitaciones y baños de los pacientes, a través de los cuales solicitan asistencia presionando un botón. La estación

de enfermería muestra el número de habitación o cama asignado a ese pulsador de llamada y simultáneamente activa un cronómetro para garantizar una atención oportuna, de manera que si la llamada no es respondida envía un recordatorio tanto a la estación de enfermería como a todos los relojes inalámbricos, con los que cada miembro del personal puede ser equipado, para asegurar que la llamada sea respondida sin importar en qué parte del hospital se encuentren. Todas las llamadas se registran en la estación de enfermería, lo cual permite sacar reportes de desempeño y rendimiento. Su alcance es de 70 a 80 metros, pero se puede extender utilizando amplificadores y repetidores de señal [3].

- **Helpnex:** sistema modular que utiliza tecnología IP, dispone de pulsadores para cama y baño que permiten que el paciente solicite asistencia presionando un botón, y permite visualizar y atender el requerimiento, pudiendo detallar el motivo o añadir todo tipo de observaciones. Todas las alarmas y tareas quedan registradas en una base de datos. Ofrece control sobre personas en general, y con desorientación en particular, mediante un tag pequeño y compacto, que permite la localización de la persona, a través de radiofrecuencia (RF) sobre las principales salidas del centro, con distinción entre cercanía o apertura de una puerta, con visualización de alarmas en el plano en tiempo real. Permite también alarma para pasillo con diferentes códigos de colores, emitiendo indicación sonora y luminosa LED. Además ofrece la posibilidad de disponer de un puesto de control para la emisión de informes personalizados, permitiendo conocer todo lo ocurrido en el centro [4].
- **Llamador de enfermería inalámbrico SEI:** sistema desarrollado para clínicas, hospitales, geriátricos, hogares de ancianos o casas particulares con personas con movilidad reducida. Dispone de un llamador en cada habitación identificado por un número, cada uno dispone de tantos pulsadores como camas posea la habitación. Cuando el paciente presiona el pulsador, se reporta inalámbricamente a una central receptora, encendiendo el LED correspondiente a dicha habitación, y una señal sonora advierte del llamado. Mientras existan llamados activos se oirá un “bip” cada 10 segundos alertando a la persona a cargo del llamado pendiente. Si el llamado lleva activo un tiempo mayor a 5 minutos el LED comenzará a parpadear alertando la demora. Para cancelar el llamado la enfermera o persona a cargo debe dirigirse a la habitación correspondiente y presionar el botón “cancelar” del llamador. Mientras el llamado esté activo, en el llamador destellará un LED indicando dicho estado. El alcance del sistema es de 30 a 35 metros que puede extenderse mediante el uso de retransmisores [5].

A continuación, se presenta la tabla 1.1 que resume las características de los sistemas de llamado a enfermera disponibles en el mercado y el sistema actual de SURIX.

TABLA 1.1. Tabla comparativa de los sistemas de llamado a enfermera disponibles en el mercado

Característica \ Sistema	SURIX	MMCALL	Helpnex	SEI
Dispositivo llamador inalámbrico				X
Central de enfermera inalámbrica		X	X	X
Aviso de presencia de enfermera por RFID	X		X	
Sistema de localización de pacientes			X	
Panel de control	X	X	X	X
Alarma de pasillo configurable	X	X	X	
Emisión de informes	X	X	X	

1.2. Objetivos y Alcance

1.2.1. Objetivos

El objetivo general es dotar de conectividad Bluetooth al sistema actual de llamado a enfermera de SURIX.

Para el logro del objetivo planteado el trabajo contempla:

- El diseño e implementación de un módulo de expansión que permita dotar de conectividad Bluetooth a la terminal de sala del sistema actual de SURIX.
- El diseño e implementación de un nuevo dispositivo llamador con conectividad Bluetooth.
- El desarrollo del firmware para el módulo de expansión diseñado.
- El desarrollo del firmware para el nuevo dispositivo llamador.
- El desarrollo del firmware de la terminal de sala para el control de módulo de expansión diseñado.

1.2.2. Alcance

El alcance del trabajo está definido por las siguientes consideraciones:

- Si bien en el trabajo uno de los objetivos es desarrollar el firmware para control del módulo de expansión, esto no implica sustituir el firmware de la terminal de sala por uno nuevo, sino sólo escribir el módulo que permita interactuar a la terminal de sala con el módulo de expansión diseñado, ya que el resto del sistema actual se seguirá utilizando.
- Debido a que el diseño del dispositivo llamador debe ser de bajo consumo de energía, este no dispondrá de un parlante, por lo que no se considera el desarrollo de firmware que envíe audio al dispositivo llamador, y la salida de audio se mantendrá en la terminal de sala, como ocurre con el sistema actual.

- Aunque el diseño del dispositivo llamador implica elegir una fuente de alimentación, el trabajo no contempla diseñar un sistema de recarga para la batería.

1.3. Justificación

El trabajo permite ampliar la capacidad de conexión de la terminal de sala, que actualmente está limitada a sólo dos dispositivos llamadores, de manera que será posible conectar un mayor número de dispositivos llamadores.

Adicionalmente, al tener conectividad Bluetooth, se elimina el riesgo de romper el cable de conexión e inutilizar, al menos temporalmente, el dispositivo llamador cuando el paciente trata de acercarlo a él, y jala del cable.

Quitar el cable también posibilita que los pacientes que por su estado se encuentren débiles puedan acercar el llamador a su boca haciendo que sea más fácil escuchar su voz.

El hecho de que el dispositivo llamador sea inalámbrico permite que pueda ser utilizado en distintos lugares, lo que permite reorganizar fácilmente una sala, o incluso usar el dispositivo llamador en otra sala, donde sea requerido.

Por otro lado, el dotar de conectividad Bluetooth al sistema actual permitirá a SURIX posicionar este producto para competir con otros sistemas existentes en el mercado, que ya ofrecen esta característica.

Capítulo 2

Introducción específica

En el presente capítulo se brinda una explicación del funcionamiento general del sistema implementado, y una introducción a diferentes tecnologías utilizadas en el trabajo. Se presentan además los requerimientos y la planificación del trabajo.

2.1. Bluetooth

La tecnología Bluetooth opera en la banda de frecuencia industrial, científica y médica (ISM) sin licencia de 2.4GHz, admite múltiples opciones de radio que permiten a los desarrolladores desarrollar productos que cumplen con requisitos de conectividad únicos en el mercado.

Ya sea que un producto transmita audio de alta calidad entre un teléfono inteligente y un altavoz, transfiera datos entre una tableta y un dispositivo médico, o envíe mensajes entre miles de nodos en una aplicación de automatización de edificios, las tecnologías Bluetooth Low Energy (LE) y Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR) están diseñadas para satisfacer las necesidades únicas de los desarrolladores de todo el mundo [5].

2.1.1. Bluetooth low energy (LE)

La tecnología Bluetooth Low Energy (LE) está diseñada para funcionar con muy baja potencia. Permite un funcionamiento confiable en la banda de frecuencia de 2.4 GHz, aprovecha un sólido enfoque de espectro ensanchado por salto de frecuencia que transmite datos a través de 40 canales [5].

Esta tecnología, brinda a los desarrolladores una enorme flexibilidad, incluidas múltiples opciones PHY que admiten velocidades de datos de 125 Kb/s a 2 Mb/s, múltiples niveles de potencia, entre 1 mW y 100 mW, así como múltiples opciones de seguridad [5].

Bluetooth LE también admite múltiples topologías de red, incluidas redes punto a punto, de broadcast y de malla.

2.1.2. Bluetooth clásico

La tecnología Bluetooth clásica, también conocida como Bluetooth Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR), está diseñada para un funcionamiento de baja potencia y también aprovecha un sólido enfoque de salto de frecuencia adaptable, que transmite datos en 79 canales [5].

Esta tecnología incluye múltiples opciones PHY que admiten velocidades de datos de 1 Mb/s a 3 Mb/s, múltiples niveles de potencia, entre 1 mW y 100 mW, múltiples opciones de seguridad y una topología de red punto a punto [5].

La tabla 2.1 muestra una comparación de las principales características de ambas tecnologías Bluetooth: LE y BR/EDR π .

TABLA 2.1. Tabla comparativa de tecnologías Bluetooth

	Bluetooth low energy (LE)	Bluetooth clásico
Bandas de frecuencia	Banda ISM de 2.4GHz (2.402 - 2.480 GHz utilizados)	Banda ISM de 2.4GHz (2.402 - 2.480 GHz utilizados)
Canales	40 canales con espaciado de 2 MHz (3 canales publicitarios, 37 canales de datos)	79 canales con espaciado de 1 MHz
Uso de los canales	Espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS)	Espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS)
Modulación	GFSK	GFSK, $\pi/4$ DQPSK, 8DPSK
Consumo de energía	$\sim 0.01 \times 0.5 \times$ de referencia (dependiendo del caso de uso)	1 (valor de referencia)
Velocidad de datos	LE 2M PHY: 2 Mb/s LE 1M PHY: 1 Mb/s LE Coded PHY (S=2): 500 Kb/s LE Coded PHY (S=8): 125 Kb/s	EDR PHY (8DPSK): 3 Mb/s EDR PHY ($\pi/4$ DQPSK): 2 Mb/s BR PHY (GFSK): 1 Mb/s
Potencia máxima de Transmision	Clase 1: 100 mW (+20 dBm) Clase 1.5: 10 mW (+10 dbm) Clase 2: 2.5 mW (+4 dBm) Clase 3: 1 mW (0 dBm)	Clase 1: 100 mW (+20 dBm) Clase 2: 2.5 mW (+4 dBm) Clase 3: 1 mW (0 dBm)
Topologias de red	Punto a punto (incluida piconet) Transmisión Malla	Punto a punto (incluida piconet)

2.2. Sistema Propuesto

La figura 2.1 muestra un diagrama de bloques del sistema propuesto donde se puede apreciar que es completamente inalámbrico, ya que el dispositivo llamador se conecta a la terminal de sala a través de bluetooth, esto permitirá eliminar la limitación de ésta para recibir solo dos dispositivos llamadores, además de eliminar los riesgos asociados al cableado, tambien lo hace más cómodo y versátil, pues el paciente podrá llevarlo con él a donde sea que vaya y lo podrá utilizar sin estar necesariamente en la cama, por ejemplo si necesita ir al baño y estando ahí requiere ayuda, no necesita volver a la cama para solicitar atención.

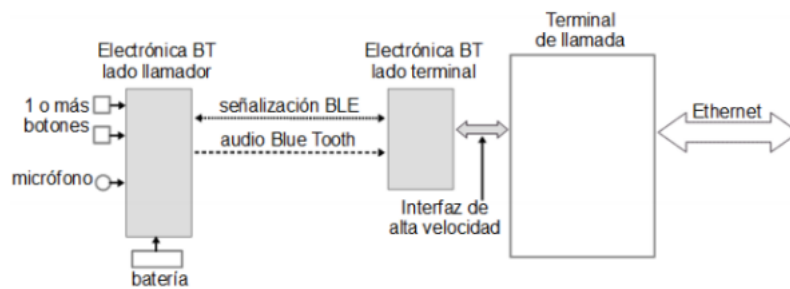


FIGURA 2.1. Diagrama en bloques del sistema propuesto

El sistema desarrollado agrega la electrónica tanto del lado del llamador como del lado de la terminal, cuyo dispositivo bluetooth acepta varios llamadores bluetooth, que le envían novedades. La terminal de sala a su vez redirecciona las novedades de cada paciente a la terminal de llamada.

La terminal de llamada como ya hacía el anterior sistema notifica vía ethernet a la enfermera, y en caso necesario establece una llamada entre el paciente y la enfermera.

El nuevo sistema cambia la ubicación del micrófono al dispositivo llamador, de manera que ahora esta más cerca del paciente, manteniendo el parlante en la terminal de sala, mejorando así la comunicación.

El microfono seleccionado utiliza la interfaz de audio digital PDM, que es compatible con el procesador elegido dispone de un periférico para controlar micrófonos con este tipo de interfaz.

La comunicación entre el dispositivo Bluetooth y la terminal de llamada se realiza a través de una interfaz UART, que está disponible en los puertos de accesorios de la terminal de llamada del sistema anterior.

En este sistema el audio se transmite codificado en PCMU, para mantener compatibilidad con el anterior sistema.

2.3. Requerimientos

Los requerimientos del nuevo sistema de llamado a enfermera son:

1. Al pulsar uno de los botones del dispositivo llamador, la terminal de sala deberá iniciar una llamada con una terminal de enfermería.
2. Una vez que la terminal de enfermería conteste a la llamada de la terminal de sala, o cuando la terminal de enfermería realice una solicitud de iniciar una llamada, la terminal de sala indicará al dispositivo llamador, que corresponda, encender su micrófono e iniciar el envío de la señal de audio.
3. Cada dispositivo llamador debe poder identificarse con un ID único de manera que pueda ser registrado en una terminal de sala.
4. La terminal de sala deberá registrar los IDs de los llamadores correspondientes a las camas que tenga en el cuarto, y no deberá aceptar conexiones de otros llamadores.

5. La transmisión de audio debe realizarse por Bluetooth LE.
6. La transmisión de audio debe realizarse utilizando el codec g711 ulaw empleado en el software actual.
7. El dispositivo llamador debe permanecer en modo de bajo consumo mientras no esté en una llamada, o el paciente presione un botón.
8. La terminal de sala además de sus tareas habituales debe estar a la escucha de los mensajes de los dispositivos llamadores que tenga registrados.
9. Al requerimiento de la terminal de enfermería, la terminal de sala debe poder determinar a qué dispositivo llamador dirigir la solicitud.
10. El software debe permitir modificar sus parámetros operativos y almacenarlos en memoria segura.
11. El software no debe alterar las condiciones de operación actuales del sistema.
12. Se deberá diseñar dos placas eléctricas, una para el modulo de expansión a conectarse a la terminal de sala, y otra para el dispositivo llamador.

Los requerimientos del modulo de expansión para la terminal son:

1. Conectar de 1 a 3 dispositivos llamadores.
2. Notificar a la terminal de sala las solicitudes del paciente para que inicie una llamada con la terminal de enfermería.
3. Notificar a la terminal de sala cuando un dispositivo llamador se encuentre con baja batería.
4. Al estar en llamada, el módulo de expansión deberá ignorar las peticiones de otros llamadores y solo retransmitir la señal de audio a la terminal de sala.

Los requerimientos del dispositivo llamador son:

1. Medir el nivel de batería del dispositivo y notificar al módulo de expansión de la terminal de sala al que se encuentre conectado.
2. Notificar a la terminal de sala sobre las solicitudes del paciente según el botón presionado.
3. Leer señal de audio y transmitirla a la terminal de sala cuando se encuentre en llamada.

2.4. Planificación

En la figura 2.2 se presenta la planificación inicial aprobada para el desarrollo del presente proyecto donde se aprecia el camino crítico para su ejecución, habiéndose estimado un total de 615 horas de trabajo.

Sin embargo, esta planificación inicial no se ha podido cumplir debido a que algunos supuestos del proyecto no se cumplieron, entre los que citamos:

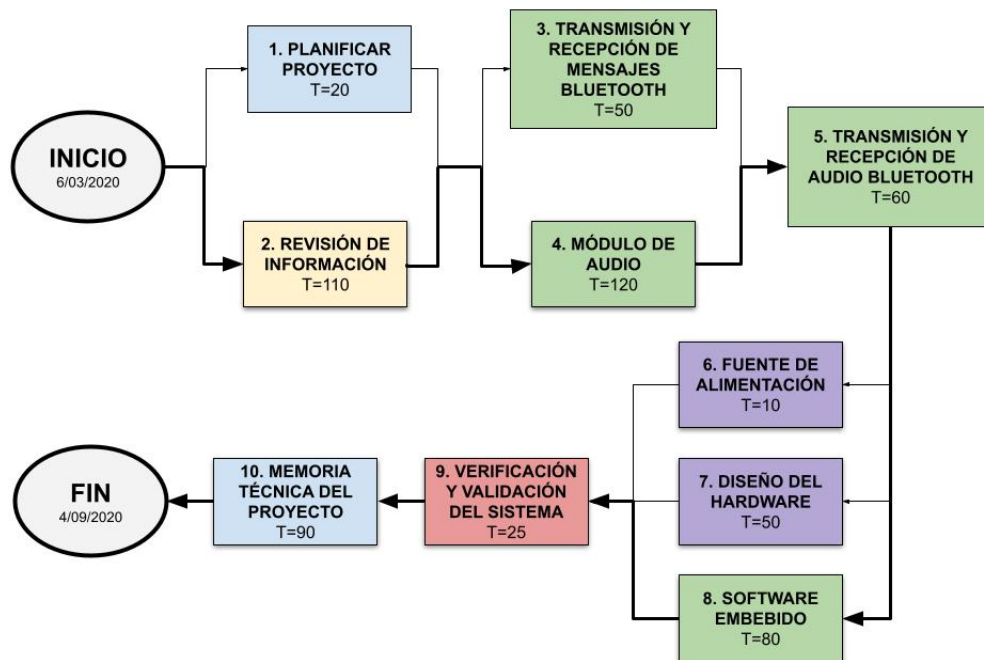


FIGURA 2.2. Diagrama activity on node del trabajo

- El tiempo requerido para el desarrollo del software resultó mayor al previsto. Además de ello, se tuvo un retraso en el inicio de esta actividad ya que debido a la cuarentena que se decretó de un momento a otro, no se dispuso oportunamente del material necesario para desarrollar el proyecto.
- Hubo dificultad al conseguir algunos componentes electrónicos necesarios, particularmente, el micrófono para poder hacer pruebas durante el desarrollo.
- El tiempo requerido para el desarrollo del hardware resultó mayor al previsto. La empresa cuenta con un fabricante de placas de su confianza, el mismo que se encuentra en la China, motivo por el cual debido a la coyuntura originada en la pandemia por la aparición del COVID-19, que aqueja al planeta, se han tenido dificultades en la comunicación y transporte.

Capítulo 3

Diseño e implementación

3.1. Análisis del software

La idea de esta sección es resaltar los problemas encontrados, los criterios utilizados y la justificación de las decisiones que se hayan tomado.

Se puede agregar código o pseudocódigo dentro de un entorno `lstlisting` con el siguiente código:

```
\begin{lstlisting}[caption= "un epígrafe descriptivo"]
las líneas de código irían aquí...
\end{lstlisting}
```

A modo de ejemplo:

```
1 #define MAX_SENSOR_NUMBER 3
2 #define MAX_ALARM_NUMBER 6
3 #define MAX_ACTUATOR_NUMBER 6
4
5 uint32_t sensorValue[MAX_SENSOR_NUMBER];
6 FunctionalState alarmControl[MAX_ALARM_NUMBER]; //ENABLE or DISABLE
7 state_t alarmState[MAX_ALARM_NUMBER]; //ON or OFF
8 state_t actuatorState[MAX_ACTUATOR_NUMBER]; //ON or OFF
9
10 void vControl() {
11
12     initGlobalVariables();
13
14     period = 500 ms;
15
16     while(1) {
17
18         ticks = xTaskGetTickCount();
19
20         updateSensors();
21
22         updateAlarms();
23
24         controlActuators();
25
26         vTaskDelayUntil(&ticks, period);
27     }
28 }
```

CÓDIGO 3.1. Pseudocódigo del lazo principal de control.

Capítulo 4

Ensayos y Resultados

4.1. Pruebas funcionales del hardware

La idea de esta sección es explicar cómo se hicieron los ensayos, qué resultados se obtuvieron y analizarlos.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones generales

La idea de esta sección es resaltar cuáles son los principales aportes del trabajo realizado y cómo se podría continuar. Debe ser especialmente breve y concisa. Es buena idea usar un listado para enumerar los logros obtenidos.

Algunas preguntas que pueden servir para completar este capítulo:

- ¿Cuál es el grado de cumplimiento de los requerimientos?
- ¿Cuán fielmente se pudo seguir la planificación original (cronograma incluido)?
- ¿Se manifestó algunos de los riesgos identificados en la planificación? ¿Fue efectivo el plan de mitigación? ¿Se debió aplicar alguna otra acción no contemplada previamente?
- Si se debieron hacer modificaciones a lo planificado ¿Cuáles fueron las causas y los efectos?
- ¿Qué técnicas resultaron útiles para el desarrollo del proyecto y cuáles no tanto?

5.2. Próximos pasos

Acá se indica cómo se podría continuar el trabajo más adelante.