

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Visión general y estado del arte

Entre los tópicos teóricos que contempla este proyecto se relacionan diversas áreas:

Sistemas automáticos de control: La automatización de procesos ha tenido grandes avances con los aportes de la computación y la electrónica avanzada, ya que ha permitido incorporar a estos sistemas características que los hacen más eficientes. Con la utilización de técnicas de inteligencia artificial se han creado sistemas adaptativos que *captan* las condiciones del medio y los aplican a la resolución de problemas y toma de decisiones.

Procesamiento digital de señales: Con la aparición de equipos de cómputo de gran capacidad de almacenamiento y procesamiento, las señales han podido ser analizadas por métodos matemáticos y estadísticos, entre otros. Estas señales pueden ser resultado de una medición que tiene una variación respecto a otra variable

como el tiempo; tales mediciones han permitido utilizar la información provista por sensores¹ de distinto tipo, para realizar monitoreo y control en diversos campos de investigación y producción.

Sistemas en tiempo real: los sistemas en tiempo real tienen la función primordial de ejecutar aplicaciones en rangos de tiempo muy limitados o en instantes precisos de tiempo, debido a requerimientos indispensables de los problemas a tratar. A medida que los sistemas de cómputo han ido evolucionando, se dá paso a su utilización en procesos industriales y científicos más complejos, teniendo como condiciones indispensables de diseño una respuesta completa y correcta al problema, además del predeterminar el tiempo máximo o preciso necesario para tenerla.

Algoritmos y métodos de detección: La detección de eventos sobre señal digital consiste básicamente en determinar el momento sobre el tiempo en el cual ocurren cambios o fenómenos de interés, de manera abrupta o paulatinamente en el tiempo. La importancia de estos métodos radica en que ciertos comportamientos de la señal pueden indicar estados especiales sobre el sistema que sugieran la necesidad de emitir una acción o respuesta de algún sistema. La idea general es que el algoritmo sea lo suficientemente robusto como para tener un grado de confiabilidad alto (tasa de aciertos), contemplando efectos propios del monitoreo de variables físicas como el ruido y otros factores externos.

Ingeniería de software: Durante los últimos 20 años la manera de producir soft-

¹**Sensor:** dispositivo físico, mecánico, químico o electrónico que entrega datos sobre el comportamiento de un objeto de estudio.

ware ha sufrido grandes transformaciones. A medida que los sistemas de software son más complejos se han requerido mecanismos que permitan diseñarlos más confiablemente. Para el desarrollo de software de uso exhaustivo, donde su correcto funcionamiento determine en gran medida la operatividad de un sistema, es necesario contar con una metodología para realizar análisis, diseño e implementación de una solución de software adecuada a las condiciones del problema.

Estas áreas de conocimiento corresponden a diversas ramas de la Ingeniería y las ciencias exactas, que serán utilizadas de manera conceptual y práctica en el desarrollo de este proyecto. Se hace en este capítulo una breve explicación de los apartes más significativos al producto a desarrollar.

2.2. Sistemas de control

2.2.1. Descripción general

La teoría de sistemas de control y tecnología de control son disciplinas académicas aplicadas a problemas de ingeniería y ciencia. Los sistemas de control constituyen modelos de flujo de información compuestos por entradas, salidas, procesamiento de datos y realimentación [Kuo96].

Sistemas y teoría de control

La teoría de control está relacionada con el comportamiento dinámico de los sistemas con entradas y salidas, e interactivos con el ambiente.

Tecnología de control

La tecnología de control está relacionada con el control del comportamiento dinámico de sistemas técnicos complejos, por ejemplo sistemas (electro) mecánicos y procesos químicos o biológicos. El objetivo del control es lograr un comportamiento del sistema de acuerdo a las especificaciones deseadas, la complejidad del proceso aumenta en la medida que se tenga una descripción menos precisa del comportamiento dinámico del sistema. La tecnología de control es muy próxima a la síntesis, usando métodos, técnicas y herramientas de diversos campos científicos, en particular teoría de sistemas.

La teoría de control se concentra en problemas asociados con el comportamiento dinámico de sistemas. Estos problemas son tratados como sistemas abiertos, que significan, sistemas con entradas y salidas, que interactúan con el ambiente. Algunos problemas importantes manejados por la teoría de control son:

Modelamiento: La búsqueda de conceptos adecuados y herramientas matemáticas para describir sistemas dinámicos en interacción con el medio.

Identificación: Desarrollo de algoritmos para formular modelos dinámicos sobre la base de la observación de señales.

Filtrado: Estimación del comportamiento de una variable a partir de la observación de la razón señal - ruido.

Control: Aplicar principios y algoritmos para obtener un procesador con retroalimentación que responda adecuadamente al comportamiento dinámico del sistema.

Motivada por los problemas de ingeniería, la teoría (o también tecnología) de control aporta conceptos como la dependencia tecnológica y aplicabilidad de restricciones principales. Ambos conceptos son utilizados de una parte por la teoría de control, y de otra por el análisis y modelamiento matemático de problemas.

La teoría de sistemas y tecnología de control son complementarias en muchas situaciones, por ejemplo en modelamiento de procesos electro-mecánicos o químicos y en la validación de diseños. Una infraestructura tecnológica y un conocimiento científico son necesarios para proponer un modelo y validarlo en un alto nivel. Para ejecutar exitosamente las tareas asociadas al modelamiento, un científico de control deberá tener conocimiento de las áreas de aplicación, así como con sistemas modernos para procesamiento de datos.

2.2.2. Componentes básicos

Según [Kuo96], un sistema de control se describe mediante:

- Objetivos de control.
- Componentes del sistema de control.
- Resultados o salidas.

En términos técnicos, los objetivos se pueden identificar como entradas, o señales actuales y a los resultados se les denomina salidas, o variables controladas. En general, el objetivo de un sistema de control es controlar las salidas en alguna forma prescrita mediante las entradas a través de los elementos que componen tal sistema.

2.2.2.1. Sistema de control en lazo abierto

(Sistemas no retroalimentados). Los sistemas de control en lazo abierto son sistemas simples, que no pueden satisfacer requerimientos de desempeño crítico. Los elementos de un sistema de control en lazo abierto se pueden dividir en dos partes: el controlador y el proceso controlado. Una señal de entrada o comando se aplica al controlador, cuya salida actúa como señal actuante; la señal actuante controla el proceso de tal forma que la variable controlada se desempeñe de acuerdo con estándares preestablecidos. En los casos simples, el controlador puede ser un amplificador, unión mecánica, filtro u otro elemento de control. En los casos más complejos el controlador puede ser una computadora tal como un microprocesador. Debido a la simplicidad y economía de los sistemas de control en lazo abierto, se les encuentra en muchas aplicaciones no críticas.

2.2.2.2. Sistemas de control en lazo cerrado

(Sistemas de control retroalimentado). Un sistema de control en lazo abierto sería más exacto y adaptable si tuviera una conexión o retroalimentación desde la salida hacia la entrada del sistema. En este caso, la señal controlada debe ser retroalimentada y comparada con la entrada de referencia, enviando una señal actuante proporcional a la diferencia de la entrada y la salida a través del sistema para reevaluar el proceso realizado. Un sistema con una o más trayectorias de retroalimentación como el que se acaba de describir se denomina sistema en lazo cerrado.

2.2.2.3. Retroalimentación

La retroalimentación se usa para reducir los errores de la entrada de referencia y la salida del sistema. La reducción del error del sistema es uno de los efectos más importantes que se puede realizar sobre el sistema. Para evaluar los efectos de la retroalimentación sobre un sistema de control, es esencial examinar el fenómeno en un sentido más amplio: cuando ésta es aplicada en forma deliberada para propósitos de control, su existencia se identifica fácilmente. Sin embargo, existen numerosas situaciones en donde un sistema físico, que normalmente se reconocería como un sistema inherentemente no realimentado, se puede volver uno cuando se observan variables distintas. En general, cuando una secuencia cerrada de relaciones causa-efecto existe entre las variables de un sistema, se dice que existe retroalimentación.

2.2.2.4. Tipos de sistemas

Los sistemas de control realimentados se pueden clasificar en diversas formas, dependiendo del propósito de la clasificación. Por ejemplo, de acuerdo con el método de análisis y diseño, los sistemas de control se clasifican en lineales y no lineales, variantes o invariantes con el tiempo. De acuerdo con los tipos de señales usados en el sistema, se hace referencia a sistemas en tiempo continuo y en tiempo discreto, o sistemas modulados y no modulados. A menudo, los sistemas de control se clasifican de acuerdo a su propósito principal. Por ejemplo, un sistema de control de posición y un sistema de velocidad controlan las variables de salida de posición y velocidad, como sus nombres lo indican.

2.3. Procesamiento digital de señales

De acuerdo a la definición de [SWS99], el procesamiento digital de señales (DSP² sigla en inglés) es distinguido de otras áreas en ciencias de la computación por el tipo único de datos que usa: señales digitales. En muchos casos, estas señales se originan como datos observados en el mundo real: vibraciones sísmológicas, imágenes visuales, ondas de sonido, etc. DSP comprende la matemática, los algoritmos y las técnicas usadas para manipular estas señales después de su conversión en forma digital. Este procesamiento tiene diversas aplicaciones, como: mejoramiento de imágenes visuales, reconocimiento y generación del habla, compresión de datos para almacenamiento y transmisión, entre otros.

La parte más importante de cualquier aplicación de DSP es entender cómo la información está contenida en las señales con las que se está trabajando, ya que pueden existir muchas formas, esto es especialmente cierto si la señal es artificial.

Por lo general, las señales se presentan en el mundo real como flujos continuos de información. Para que estas señales sean procesadas en sistemas de cómputo, se realiza un proceso denominado digitalización, donde la señal original (análoga) se representa por un conjunto discreto de valores (digital). El proceso de conversión análogo a digital presenta una pérdida de datos, pero dependiendo del sistema observado la señal digital podrá representar fidedígnamente la señal análoga. Esta conversión es favorable puesto que el conjunto discreto de datos se puede procesar

²(Digital Signal Processing) Procesamiento digital de señales. Hace referencia al conjunto de técnicas y métodos utilizados para el procesamiento matemático, estadístico o algorítmico que sufra un arreglo numérico correspondiente a una señal digital.

con algoritmos y otras técnicas matemáticas que puedan ejecutarse sobre procesadores computarizados. El proceso de digitalización se describe en la Figura 2.1.

2.3.1. El efecto del ruido

En observación de señales del mundo real, es común encontrar que la señal observada es una composición de varias, producto de variables externas que inciden en el objeto de estudio, es decir, la señal observada tiene inmersa la señal que se desea obtener, más otras señales de poco o nulo interés; a estas señales se les denominan regularmente ruido. Hay diversos tipos de ruido, los cuales se pueden catalogar dependiendo de los entes que lo generen (eléctricos, mecánicos, seres vivos). De acuerdo a los elementos con los cuales se recolecte la señal, los niveles de ruido pueden variar; también puede existir como representación de otro tipo de información que se encuentra en el ambiente, pero que no es de interés para el estudio realizado.

2.3.2. Filtrado

El filtrado es una operación que consiste en extraer de una señal observada, la señal útil al observador : se pueden citar como ejemplos la extracción de una señal inmersa en ruido o la estimación de la derivada de una señal con ruido. [SS99]

- Si la operación realizada es lineal e invariante, se dirá que se hace un filtrado lineal : el filtro será un sistema dinámico lineal.
- Si el mensaje y la señal son continuos, el filtro es continuo o analógico. Si

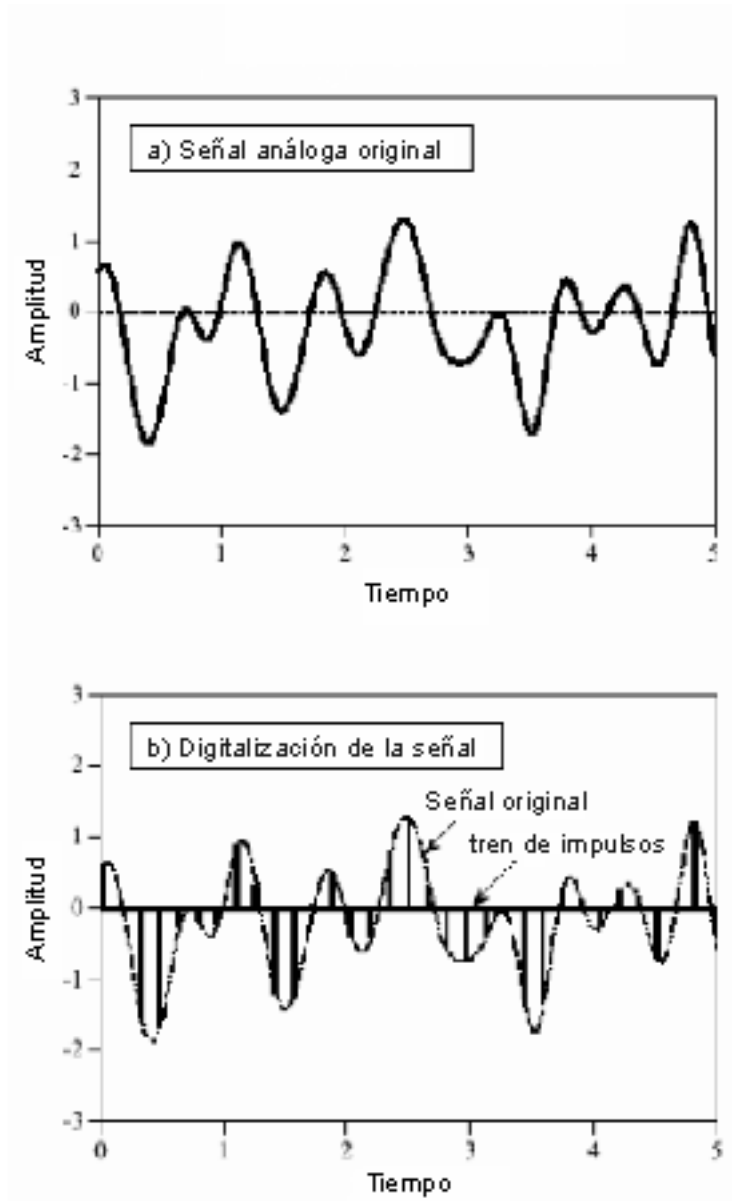


Figura 2.1: Conversión análogo/digital

al contrario el mensaje y la señal útiles son discretas o discretizadas se dirá que el filtro es digital. Según el método de síntesis se puede tener:

- filtro temporal; el filtro es especificado a partir de las características temporales.
- filtro de frecuencias; las características del filtro están dadas por su respuesta en frecuencia.
- filtrado óptimo; si la síntesis hace intervenir un criterio de optimización.
- filtrado estocástico o determinista; si el estudio del filtro hace o no intervenir señales aleatorias, su representación y su cálculo de probabilidades. Desde un punto de vista práctico se distingue el filtrado en tiempo real del filtrado a tiempo diferido.

2.4. Redes de estaciones

Esta sección trata sobre la composición y distribución de una estructura que denominaremos red, de acuerdo a [LEE91]. En general, una red puede ser vista como un conjunto de nodos enlazados entre sí por medio de aristas. Para cada aplicación real los nodos y las aristas tienen significado: una red telefónica tiene como aristas los cables o líneas de interconexión físicas o inalámbricas; los nodos corresponderían a los puntos donde se conectan los equipos telefónicos (*celulares, fax, teléfonos*). Otro ejemplo, un poco más general, lo constituye un conjunto de estaciones actuando como nodos, un medio de transmisión o interconexión como aristas y una señal como mensaje. Este concepto puede aplicarse a un sistema concreto como la

sismología.

2.4.1. Estaciones de registro

Para un caso más particular de red, se tiene una estación de registro como un nodo fuente de información, es decir, captura o genera información por sí mismo y la transmite por las aristas al resto de la red.

Una estación de registro sísmológico contiene básicamente uno o varios sensores, un amplificador de señal y una unidad transmisora; alternativamente la estación puede realizar el proceso de digitalización, almacenamiento y procesamiento de la señal.

2.4.1.1. Sensores

Un sensor es un dispositivo eléctrico, mecánico, físico o químico que mide una o varias variables sobre un ambiente u objeto. El propósito de un sensor es hacer una cuantificación de una o más variables regularmente en función del tiempo.

2.4.1.2. Transmisión de datos

Es el proceso de envío de un conjunto de datos desde un origen a un destino utilizando un medio. Con los avances en los sistemas de comunicación se tienen diversas alternativas para realizar transmisión remota o local de información.

2.4.2. Topologías de red

Una red sismológica es un sistema de observación sísmica compuesto por un grupo de estaciones. Cada una contiene básicamente un sensor, que puede ser de movimiento, velocidad o aceleración y componentes electrónicos para realizar el registro de la señal en algún medio, más los mecanismos para transmitir la información. Estas estaciones por lo general se localizan en sitios geográficos donde existen bajos niveles de ruido generado por factores distintos al terrestre (carreteras, ciudades) y bajo condiciones geológicas específicas. Una red sismológica puede estar compuesta de estaciones no telemetradas, o telemetradas utilizando diversas tipos de tecnologías.

Estaciones telemetradas: indica si las estaciones realizan envío de los datos registrados a un punto geográfico distinto, a través de algún sistema de comunicación, para su almacenamiento o procesamiento en una estación central donde se reuna con la información de otras estaciones. Esta transmisión permite obtener registros sísmicos de varias estaciones en muy corto tiempo; la información tomada en un instante de tiempo se transmite instantáneamente, por lo cual se considera como un sistema de funcionamiento *online*, es decir, a medida que se va generando la información es enviada para su análisis. En la Figura 2.2, se indica la distribución geográfica de estaciones sismológicas de la red del sur-occidente del **OSSO**.

Estaciones no telemetradas: cada estación realiza almacenamiento local de la información tomada, algunas pueden realizar procesamiento sobre los datos. Este caso en sismología no es comúnmente usado para localización de eventos en corto

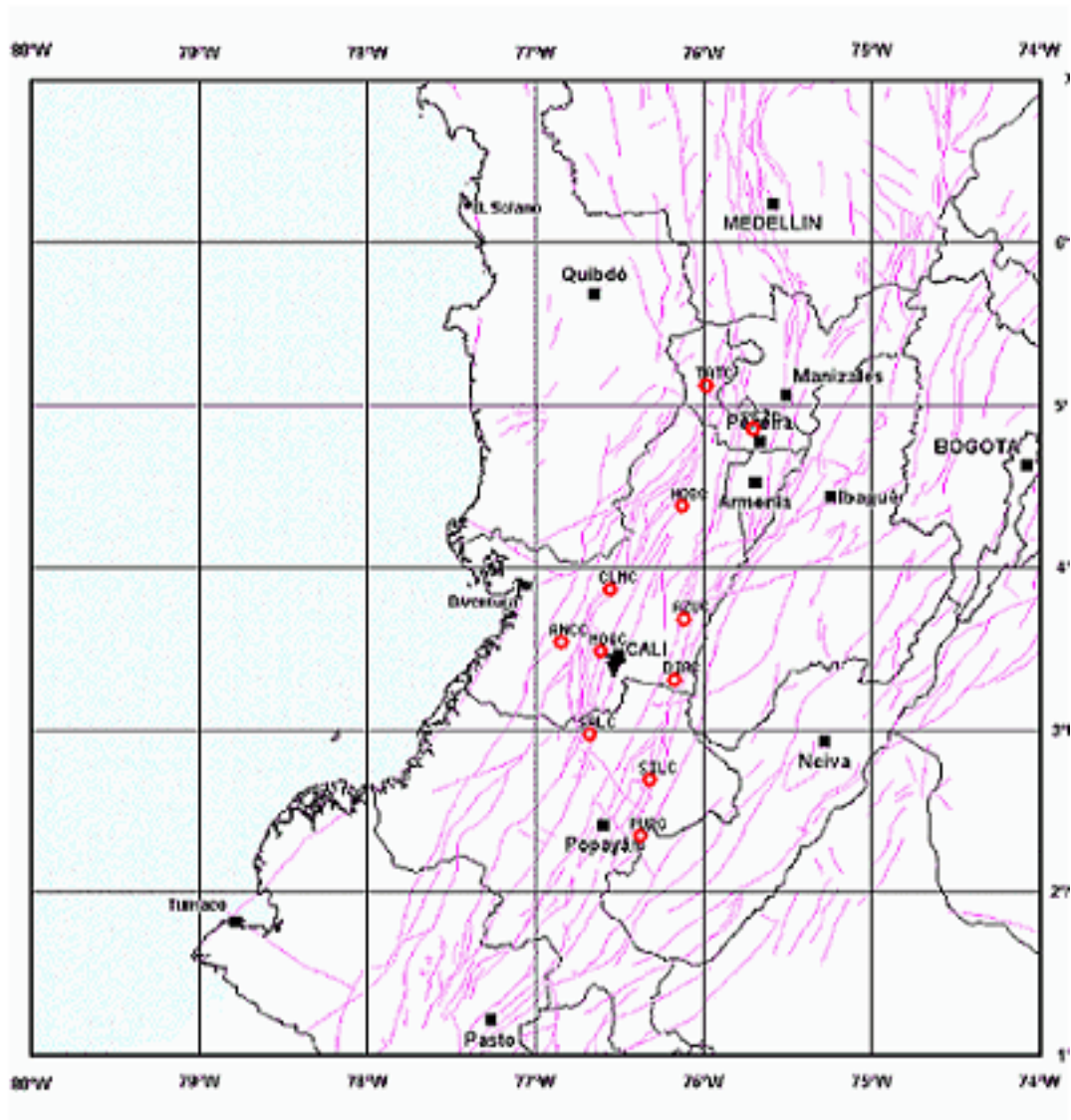
tiempo, por lo tanto se considera de funcionamiento fuera de línea (*offline*). A pesar que la señal está referida con el tiempo en el que se produjo, se almacena para su posterior análisis.

Una red sismológica puede contener estaciones telemetradas y no telemetradas. Para su análisis digital, se discretiza esta información, usando un elemento de hardware denominado conversor Análogo-Digital. Este conversor aproxima una señal análoga a digital con un nivel de resolución, definido por el número de muestras por segundo que se toman.

La señal digital registrada debe estar referida a un momento exacto en el tiempo, ya que es necesario para determinar, en caso de eventos sísmicos, parámetros como el sitio geográfico, profundidad, etc. Para tener un valor de referencia común del tiempo se utiliza un sistema de posicionamiento global (GPS por su sigla en inglés).

2.4.3. Procesamiento de señales sísmicas

Con los datos recopilados por la red de estaciones, se realiza el análisis sismológico para extraer información sobre las señales. Un evento se denomina de manera general la ocurrencia de movimiento sísmico. El proceso de detección de eventos es una de las etapas del proceso de observación, en la cual se desea conocer el momento en el tiempo donde se ha registrado un evento. A partir de este momento se pueden identificar los parámetros epicentrales realizando el proceso de localización del evento.



(Fuente Catálogo digital OSSO 2002)

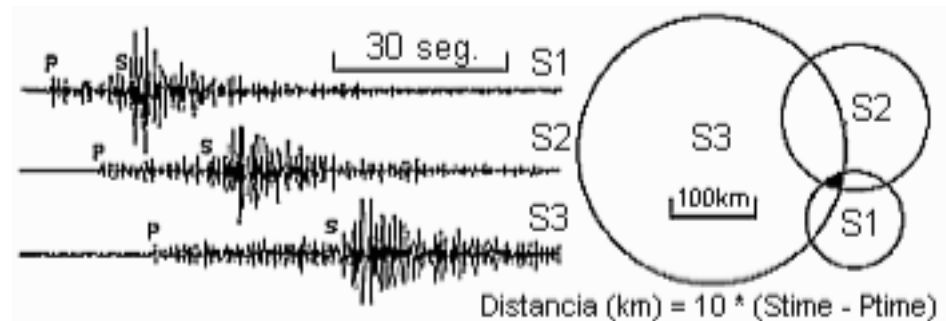
Figura 2.2: Distribución de las estaciones sismológicas del OSSO.

Detección de eventos

La detección de eventos es el procedimiento para encontrar el tiempo aproximado de inicio de un movimiento terrestre con una red sísmica. Una lista de eventos corresponde a una tabla en orden cronológico, con los tiempos de los eventos registrados. Si un movimiento regional o telesísmico es detectado y procesado, también podrá ser incluido en la lista. Este procesamiento se realiza por métodos visuales, automáticos o semiautomáticos.

Localización de eventos

La localización de eventos corresponde a la identificación de los parámetros de magnitud, profundidad y posición geográfica, junto a grado de error y calidad de la solución, entre otros. Figura 2.3.



(Tomado de New Manual of Seismological Observatory Practice)

Figura 2.3: Localización de eventos.

Según [RC92], en el dominio sísmológico un sistema automático debe cumplir 4 tareas principales:

1. **Detección de señales:** precisión para identificar y rechazar trazas de ruido

realizando la relación Señal - Ruido (SNR)

2. **Extracción de características y reconocimiento de fases:** características básicas como tiempo de arribo, amplitud, frecuencia dominante y duración son extraídas de las señales detectadas.
3. **Análisis asociativo:** La idea de detectar señales y tentativamente interpretar fases, es analizada luego con la información de todas las estaciones de la red. Esto valida y mejora la etapa de reconocimiento de fases; la identificación de un evento candidato se hace desde sismogramas candidatos consistentes; fases pertenecientes a sismogramas menos claros, no son tomados en cuenta.
4. **Estimación de parámetros:** El evento es localizado en espacio y tiempo (coordenadas hipocentrales: latitud, longitud, profundidad, tiempo de origen) y cuantificado utilizando escalas de valores aproximados, denominados magnitud.

2.4.4. Otros casos de consideración

Para extender la idea de los casos de redes de estaciones y procesamiento de señales se pueden considerar algunos casos, sobre los cuales se realizará una aproximación en cuanto a su funcionamiento y acoplamiento a la estructura de red presentada. El sistema de procesamiento es visto para estos casos como un sistema especializado para cada caso, así como el término de manejo de eventualidades, como el mecanismo accionador del sistema.

2.4.4.1. Electrocardiógrafo digital

Un electrocardiógrafo simple consta de tres electrodos o sensores de diferencia de potencial que miden pequeños niveles de voltaje en tres puntos alejados de un organismo. La información obtenida en un lapso de tiempo es considerada señal o electrocardiograma, la cual puede ser interpretada por expertos o procesada por software especializado.

En términos generales el comportamiento de este sistema puede ser visto como una serie de estaciones o electrodos, cada uno censando datos físicos, los cuales serán procesados por un sistema central en busca de *eventualidades* propias de las situaciones médicas relacionadas.

2.4.4.2. Sistemas de seguridad física

Algunos sistemas antirrobo están basados en un mecanismo de verificación de espacio o de apertura de pasadores. Por ejemplo un sistema de seguridad física en una empresa puede consistir en un conjunto de cámaras digitales que se activen en horas de inactividad laboral, cada cámara tendrá un espacio visual que, en condiciones normales, no varía o varía muy poco. Para el caso del modelo de redes de estaciones, las cámaras interconectadas a un sistema central corresponden al conjunto de estaciones, la presencia de una *eventualidad* o cambio no considerado dentro del comportamiento del sistema puede considerarse, para este caso, una alerta de seguridad, de acuerdo como se tenga establecido en el sistema de procesamiento de las señales.

2.4.4.3. Control de temperatura

Para un sistema de control de temperatura basado en información obtenida de termómetros, es posible acoplar el mismo sistema descrito en los casos anteriores, bajo el esquema de redes de estaciones (termómetros) incorporados a un sistema centralizado que procese las señales y determine los casos donde ocurran *eventualidades* en el entorno del problema específico.

2.5. Sistemas en tiempo real

2.5.1. Diseño en tiempo real

Como requerimientos fundamentales de un sistema de tiempo real se tiene no solo su correcto funcionamiento, sino también su principal atributo de control : el tiempo. El sistema deberá entregar respuesta en un lapso de tiempo máximo establecido, a impulsos predeterminados o calculados.

De acuerdo a la aplicación final del sistema existen diversos tipos [JHC00]:

Por restricciones de tiempo

Sistemas de Tiempo Real Blandos:

Sistemas que a pesar de tener restricciones de tiempo real, es aceptable que los límites de tiempo no se cumplan siempre.

Sistemas de Tiempo Real Duros:

Es indispensable el cumplimiento de las restricciones temporales impuestas, aún a costa de disminuir las funciones que el sistema es capaz de desarrollar.

Por las escalas de tiempo:

Respuesta en la ejecución de las tareas del sistema frente a los eventos externos que ocurren.

Sistemas basados en Reloj:

Existencia de una señal periódica que desencadena la ejecución de las operaciones del sistema.

Sistemas basados en Eventos:

Las actividades son ejecutadas cuando ocurre un evento o condición que activa el sistema.

Por la integración con el sistema físico:

Por el entorno en el cual se ejecuta el sistema:

Sistemas embebidos

Se usan para controlar hardware especializado, en este caso el software que se instala es específico para controlar un tipo particular de hardware (*firmware*³).

Sistemas no embebidos

Estos son sistemas en donde el software no está directamente integrado al hardware, pueden a su vez clasificarse como acoplados o débilmente acoplados según el grado de dependencia del software respecto al hardware sobre el cual puede correr.

³Software almacenado en memoria de solo lectura (ROM) o sobre ROM programable, generalmente utilizado para hardware programable.

2.5.2. Adquisición digital de datos

Los procesos de adquisición y procesamiento de datos modernos, realizan la captura de datos por dispositivos de hardware especializados para esta tarea, operados por *firmware* o equipos de cómputo de propósito general, operados por *software*.

El proceso de adquisición tiene restricciones en cuanto al tiempo, la precisión de los datos y la transmisión de la información a otros módulos para el almacenamiento y procesamiento, por eso se considera un sistema de adquisición de datos en línea un sistema de tiempo real duro, ya que se debe garantizar la recepción de la información en lapsos de tiempo determinados, ya sea para almacenamiento o para otros servicios.

La adquisición digital de datos, no es proceso exclusivo de la sismología. Se puede presentar en procesos industriales automáticos, receptores de radar o telecomunicaciones. Un esquema general del flujo de la información se muestra en la Figura 2.4.

El proceso de adquisición es independiente de los procesos de recepción y transmisión de datos, sin embargo se deben conocer los tiempos de retraso ocasionados por la transmisión remota, así como el tipo de datos que llegan a cada canal de entrada.

La adquisición digital sobre un computador, consiste en el almacenamiento en memoria principal o secundaria de un conjunto de datos con un formato específico durante un periodo de tiempo. Generalmente se tienen varios canales de adquisi-

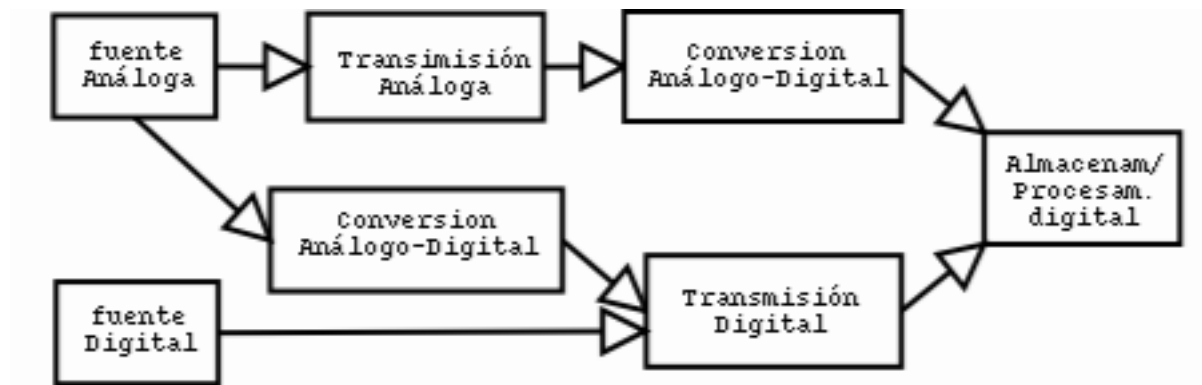


Figura 2.4: Adquisición digital

ción. La adquisición digital puede tener una etapa previa dependiendo de la señal. Si ésta es análoga, se debe realizar la conversión o discretización de ésta. Este proceso de conversión análogo-digital es realizado por hardware dedicado conocido como conversores A/D (análogo/digital), los cuales se encuentran limitados por el número de muestras por segundo que pueden recibir y por el nivel de resolución de cada dato medido en bits.

2.5.3. Estructuras de datos

La señal discretizada puede ya ser procesada en el computador. El procesamiento es un proceso específico del análisis realizado. Los datos que han sido adquiridos deben tener un formato claro que permita su interpretación.

El formato que encapsula la señal, será determinado por el programa. Básicamente se debe especificar cual es la tasa de muestreo, la referencia de tiempo, la fuente de los datos y un flujo de datos a procesar. Esta información se encuentra en algún me-

dio de almacenamiento digital y se accede bajo una estructura de almacenamiento circular que permita la disponibilidad continua de datos. Como característica asociada a la estructura de datos se debe tener en cuenta que la permanencia de la señal en el medio tiene un periodo de permanencia, regularmente corto, lo cual indica que otros procesos deben atender esta información antes de ser reemplazada por nuevos datos.

2.5.4. Referencia a la señal de tiempo

La localización de eventos sísmicos requiere una buena precisión del tiempo en que las señales se están registrando. Para tener una referencia global de tiempo se usa un sistema de posicionamiento global (GPS), el cual capta determinadas señales de satélites artificiales geoestacionarios para determinar datos como la posición geográfica y un valor de tiempo en meridiano 0 (Hora UTC). Con este sistema se asigna el tiempo que acompaña la señal obtenida, regularmente manejada con una precisión de décimas o centésimas de segundo.

2.5.5. Tiempo de respuesta

Un sistema adecuado a los requerimientos de entrada y salida de datos debe considerar un tiempo de respuesta máximo, que permita atender las peticiones de recepción de datos y transferencia a otros procesos que los soliciten. Por otra parte se debe garantizar que las operaciones de procesamiento de datos cumplan con tiempos máximos de respuesta, admisibles por los requerimientos del sistema.

2.6. Detección y clasificación de señales

Un detector es un sistema que identifica la ocurrencia de cambios abruptos sobre una señal. De manera general se busca conocer el momento en el cual la señal presenta un cambio en su amplitud, tratando de evitar las condiciones de ruido.

Según [CHT98], los cuatro principales problemas de la detectabilidad de eventos son:

- Diferenciación entre señal débil y formas de onda con ruido puro.
- Errores en la señal y modelos de ruido como resultados de disimilaridades de onda P (tiempo de llegada del primer cambio abrupto o inicio del evento sísmico), a través del arreglo.
- Alta probabilidad de activación del detector de eventos por falsas alarmas y ruido
- Fluctuaciones del nivel de ruido o dependencia de frecuencia de relación señal-ruido (SNR).

2.6.1. Detección STA/LTA

Short Term Average / Large Term Average.

STA/LTA es un algoritmo de detección de cambios que se activa frente a la relación de la amplitud de la señal en dos ventanas de tiempo. Es utilizado en sismología porque regularmente no presenta alteraciones debido a la amplitud del ruido ajustando automáticamente la sensibilidad de las estaciones sísmicas a los actuales

niveles de ruido. Como resultado, provee una alta sensibilidad del sistema durante periodos de quietud sísmica y logra prevenir un número excesivo de alarmas sísmicas, o al menos mitiga durante periodos de ruido sísmico. Los cálculos son repetidamente ejecutados en tiempo real. Este proceso es realizado, por lo general, independientemente de todos los canales de una estación sismológica o de una red sísmica.

El algoritmo procesa señales sísmicas filtradas en dos ventanas de tiempo: una corta, de promedio de tiempo (STA) y otra larga con su promedio de tiempo (LTA). El STA mide el 'instante' de la señal sísmica e inspecciona ocurrencia de terremotos. El LTA toma nota del actual promedio de amplitud del ruido.[SRC00]

Primero, se calcula la amplitud absoluta de cada muestra de datos. Luego se realiza para el promedio de amplitud absoluta en ambas ventanas. En un paso posterior se calcula una razón de ambos valores (ratio STA/LTA). Esta razón se compara continuamente comparado con un valor seleccionado por el usuario: umbral de detección STA/LTA. Si el ratio excede este umbral, un canal de ocurrencia de evento será declarado. Este no necesariamente es el medio para que un grupo de canales o red sísmica inicie un registro de señal sísmica. Todas las redes sísmicas y muchos registros sísmicos tiene un mecanismo para determinar la activación (*trigger*⁴) del sistema, basado en que varios canales presentan la condición de ocurrencia de evento antes de que el instrumento o la red inicien el registro de datos. Después que la señal gradualmente termina, se da la condición de parada (*detrigger*). El usuario puede determinar una condición de parada, la cual será menor o igual que la dada

⁴**Trigger** : condición de disparo o alerta sobre una señal ante la presencia de cambios abruptos.

para la condición de activación.

Adicionalmente a los datos adquiridos entre los tiempos de activación y de parada, las redes sísmicas y las estaciones entregan una gran cantidad de datos antes del *trigger* - datos del pre-evento (PEM). Después de que la condición de *trigger* termina, se toman los datos de post-evento (PET). La Figura 2.5 muestra la disposición de estas variables sobre un segmento de señal:

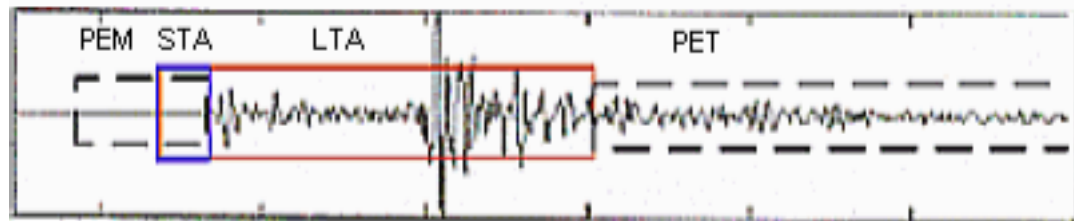


Figura 2.5: STA/LTA

2.6.2. Estimación de parámetros sobre la señal.

La estimación de parámetros en señal sísmica o extracción de características, es un proceso de análisis preliminar de datos partiendo de un conjunto de reglas preestablecidas en el sistema, así como de un proceso de aprendizaje sobre el comportamiento de un grupo de señales. Unas cuantas técnicas en procesamiento de señales son aplicables para estimar características tradicionales de señales sismológicas, tales como amplitud sísmica, periodo y otros aspectos del reconocimiento de señales.

2.6.3. Mecanismos de detección

De acuerdo a [FH98] y [CHT98], existen diversos métodos para determinar la ocurrencia de eventos. Algunos de ellos son:

Detector telesísmico

Enfocados hacia la detección de eventos lejanos a la zona de cobertura de la red de estaciones. Por lo general son eventos de gran magnitud (mayores de 5 grados en la escala de Richter).

Detector por estimación espectral

Obtienen funciones y valores de la señal en términos del espectro generalmente calculado como una transformada.

Detector basado en filtros

Aplicación de algoritmos matemáticos y pseudo-matemáticos para la transformación de las señales en otras que representen de manera más aproximada el comportamiento *real* del sistema.

Detector estadístico

Se tienen de dos tipos principalmente, de comportamiento aproximado o según alguna distribución estadística y basados en métodos Bayesianos, los cuales son una aplicación del teorema de Bayes.

2.6.4. Wavelets

Las técnicas de análisis wavelet emplean regiones de tamaño variable, para el análisis de las señales deja usar durante largo tiempo intervalos donde se necesita mucha información que precisa poca frecuencia y pequeñas regiones donde la información necesita altas frecuencias. El análisis wavelet es capaz de mostrar aspectos de la señal que otras técnicas no logran encontrar [SPIHT].

2.6.4.1. Transformada Wavelet

La transformada wavelet consiste en comparar la señal con ciertas funciones wavelet, las cuales se obtienen a partir de las wavelet madre. La comparación permite obtener unos coeficientes que son susceptibles de interpretación y posterior manipulación. En cualquier caso, un requisito básico es la posibilidad de invertir la transformada, recuperando la señal a partir de esos coeficientes wavelet calculados.

2.6.4.2. Transformada Wavelet Discreta (DWT)

El cálculo de la transformada wavelet para todas las posibles escalas supone una gran cantidad de información. Escoger solo aquellas escalas y posiciones que resulten interesantes para ciertos estudios es una tarea difícil. Si se escogen aquellas escalas y posiciones basadas en potencias de dos, los resultados serán más eficaces. Este análisis se denomina DWT.

Para muchas señales la información más importante se encuentra en las frecuencias bajas, mientras que en las altas frecuencias se encuentran los detalles o matices de

la señal. Por ejemplo, en el caso de la voz humana, si se eliminan los componentes con altas frecuencias, la voz suena diferente pero se sigue entendiendo su mensaje. En cambio, si lo que se elimina son las componentes de bajas frecuencias, el mensaje se vuelve irreconocible. Por eso el análisis wavelet permite descomponer la señal en aproximaciones y detalles, a este proceso se le conoce con el nombre de análisis.

2.7. Inteligencia artificial en DSP

La Inteligencia Artificial (*AI* por su sigla en Inglés) es una de las áreas de las ciencias de la computación encargadas del desarrollo de software o equivalente, que presente comportamientos inteligentes. Regularmente la *AI* es utilizada para resolver problemas cuyas soluciones no son obtenidas mediante el cómputo, para lo cual utiliza métodos de **búsqueda** de soluciones factibles al problema, en un conjunto de soluciones válidas. En el campo específico del Procesamiento Digital de Señales, la información que representan las señales puede no ser fácilmente procesada con algoritmos deterministas. Estos casos son más frecuentes si se tiene en cuenta la naturaleza de las señales: ambientes del mundo real, donde las señales se comportan como una combinación de múltiples fuentes de datos.

2.7.1. Reconocimiento de patrones

El Reconocimiento de Patrones es un área de la tecnología conocida como Aprendizaje de Máquinas (*Machine Learning*) o Aprendizaje Automático. El único propósito de este método es clasificar un grupo de patrones conocido como conjunto de pruebas en dos o más clases de categorías. Esto es posible al calcular las ca-

tegorías del conjunto en prueba comparándolo con un conjunto de entrenamiento previo (*training set*). Un clasificador dado mide la distancia entre varios puntos dados (compara), para saber cuales puntos son mas cercanos a la meta en un modelo parametrizado [JK02].

También se puede definir Reconocimiento de Patrones como el acto de tomar datos sin ningún sentido y clasificarlos de acuerdo a una acción basada en las categorías de un patrón dado o previamente analizado. Las operaciones en un sistema de reconocimiento son las siguientes :

- **Sensado** : toma de información de sensores⁵.
- **Segmentación y Agrupamiento** : La operación de segmentación ocurre cuando el sistema determina que un elemento, objeto o muestra finaliza y da comienzo a otro.
- **Extracción de Características** : La meta del extractor es caracterizar un objeto con medidas o cualidades cuyos “valores” tienden a ser similares.
- **Clasificación**: El objetivo en la operación de clasificación es utilizar un “vector” con las características provistas por el extractor para asignar el objeto (patrón) de la entrada a una categoría.
- **Procesamiento a Posteriori**: En un clasificador raramente existe la clasificación nula, sin embargo en muchos casos es utilizada para recomendar

⁵**Sensor**: dispositivo físico, mecánico, químico o electrónico que entrega datos sobre el comportamiento de un objeto de estudio.

decisiones y acciones que dependen de un costo o riesgo particular. El procesamiento a posteriori se utiliza en la descarga o resultado del clasificador para recomendar una acción.

2.7.2. Redes Neuronales

Emulando la estructura biológica del cerebro humano, las técnicas de redes neuronales modelan las neuronas como unidades de proceso. Cada unidad de proceso se compone de una red de conexiones de entrada, una función de red (de propagación), encargada de computar la entrada total combinada de todas las conexiones, un núcleo central de proceso, encargado de aplicar la función de activación, y la salida, por dónde se transmite el valor de activación a otras unidades.[BM01]

La función de red es típicamente el sumatorio ponderado, mientras que la función de activación suele ser alguna función de umbral o una función sigmoideal.

- **Función de propagación o de red:** Calcula el valor de base o entrada total a la unidad, generalmente como simple suma ponderada de todas las entradas recibidas, es decir, de las entradas multiplicadas por el peso o valor de las conexiones. Equivale a la combinación de las señales excitatorias e inhibitorias de las neuronas biológicas.
- **Función de activación:** Es quizás la característica principal o definitoria de las neuronas, la que mejor define el comportamiento de la misma. Se usan diferentes tipos de funciones, desde simples funciones simples de umbral a funciones no lineales. Se encarga de calcular el nivel o estado de activación de la neurona en función de la entrada total.

- **Conexiones ponderadas:** hacen el papel de las conexiones sinápticas, el peso de la conexión equivale a la fuerza o efectividad de la sinápsis. La existencia de conexiones determina si es posible que una unidad influya sobre otra, el valor de los pesos y el signo de los mismos definen el tipo (excitatorio/inhibitorio) y la intensidad de la influencia.
- **Salida:** calcula la salida de la neurona en función de la activación de la misma, aunque normalmente no se aplica más que la función identidad, y se toma como salida el valor de activación. El valor de salida cumpliría la función de la tasa de disparo en las neuronas biológicas.

La idea detrás del proceso consiste en que las neuronas codifican criterios de operación, durante el periodo de ejecución de la red neuronal las conexiones se van reasignando como de mayor o menor peso, según la respuesta de la red a los estímulos de nuevos datos de entrada. El resultado de todo el proceso se entrega como la unidad de salida.

Aunque inicialmente se desarrollaron redes de una sola capa, lo más usual es disponer de tres o más capas: la primera capa actúa como almacenamiento de entrada, conteniendo la información bruta suministrada a la red o realizando un sencillo pre-proceso de la misma, se denomina capa de entrada; otra capa actúa como interfaz o espacio de salida, almacenando la respuesta de la red para que pueda ser leída, llamada capa de salida; y las capas intermedias, principales encargadas de extraer, procesar y memorizar la información, se conoce como capas ocultas.

Como parte de los procesos de implementación de la red neuronal se realiza la etapa

de aprendizaje, la cual le permitirá a la red establecer sus valores de operación. El aprendizaje de una red se puede producir de tres formas:

- **Aprendizaje supervisado:** consiste en introducir una serie de patrones de entrada a la red y a su vez mostrar la salida que se quiere tener. La red es capaz de ajustar los pesos de las neuronas de forma que a la presentación posterior de esos patrones de entrada la red responde con salida memorizada.
- **Aprendizaje no supervisado:** se presentan los patrones de entrada a la red y ésta los clasifica en categorías según sus rasgos más sobresalientes.
- **Aprendizaje autosupervisado:** la propia red corrige los errores en la interpretación empleando una realimentación.

El uso de las redes neuronales en procesamiento de señales aprovecha la capacidad de aprendizaje y adaptabilidad de estas técnicas, mostrando buenos resultados en su aplicación como filtros digitales sobre la señal y como mecanismo de aplicación de reconocimiento de patrones. La utilización de las técnicas de redes neuronales es conveniente cuando el comportamiento de las señales no presentan patrones o comportamientos predecibles o ajustables a un comportamiento del entorno. Con la utilización de técnicas supervisadas de aprendizaje, una red entrenada puede clasificar uno o varios segmentos de señal en grupos establecidos de acuerdo a características comunes.

2.7.3. Algoritmos genéticos

Son basados en modelos computacionales de procesos evolucionarios fundamentales como la selección, recombinación y mutación. Son codificados como palabras

compuestas sobre algunos alfabetos y una población inicial producida por muestras aleatorias de estas palabras. Una vez la población ha sido producida, puede ser evaluada usando una función objetivo con características individuales del dominio del problema. La función objetivo es también usada como la base para la selección y determina la eficiencia de un individuo en este ambiente. Estos procesos de selección, reproducción y evaluación son repetidos hasta un criterio de terminación determinado. Por ejemplo, cierto número de generaciones, una desviación promedio en la eficiencia de los individuos de la población o cuando un punto particular en el espacio de búsqueda es encontrado.

2.7.4. Otras técnicas

KDD

KDD (Knowledge Discover on Databases) o Descubrimiento de conocimiento en bases de datos en una área mixta de trabajo de las bases de datos, la inteligencia artificial y la estadística. Básicamente busca extraer información oculta en bases de datos con gran cantidad de registros; se pretende conocer comportamientos o patrones de interés que surjan de los datos. Las técnicas de KDD permiten reconocer reglas que se presentan “de manera natural” en los datos, organizándolos como patrones o reglas. Para que estas reglas se consideren válidas es necesario contar con gran cantidad de datos que sustenten su aprobación. Para el caso del procesamiento de señales la aplicación del KDD es factible. Sin embargo, el procesamiento de tal cantidad de información impediría tener un tiempo de respuesta adecuado para el sistema, por lo cual su uso en este tipo de aplicaciones no es muy extendido en procesamiento de señales.

Investigación de Operaciones

Aplicados a problemas de optimización, los modelos matemáticos de la investigación de operaciones pueden usarse en determinadas etapas del procesamiento de señales a fin de encontrar valores óptimos y valores máximos o mínimos. Estas técnicas son usadas en diversos campos del conocimiento, donde el conjunto de variables de búsqueda y el número de datos de entrada no son muy extensos y se encuentran claramente definidos en el contexto de cada problema. Para la resolución de este tipo de problemas, se debe tener en cuenta las limitaciones computacionales que pueda tener una posible implementación, debido a que algunos planteamientos podrían no ser determinados o requerirían muchos recursos de procesamiento.

2.8. Desarrollo de proyectos de software

La Ingeniería de Software se define como “la rama de la ingeniería que aplica los principios de la ciencia de la computación y las matemáticas para lograr soluciones costo-efectivas (eficaces en costo o económicas) a los problemas de desarrollo de software”, es decir, “permite elaborar consistentemente productos correctos, utilizables y costo-efectivos”. Como cualquier proyecto de ingeniería moderna, el software se construye de acuerdo a las posibilidades técnicas y la factibilidad de los recursos disponibles para hacerlo. Para dimensionar el desarrollo de un producto de software es necesario realizar la planeación general del proyecto, como proyecto de Ingeniería, así como considerar su análisis y diseño dentro de los principios de desarrollo de la Ingeniería de Software.

2.8.1. Ciclo de vida de desarrollo

De acuerdo a la norma [ISO12207-1], se puede describir un ciclo de vida de desarrollo de software como “Un marco de referencia que contiene los procesos, las actividades y las tareas involucradas en el desarrollo, la explotación y el mantenimiento de un producto de software, abarcando la vida del sistema desde la definición de los requisitos hasta la finalización de su uso”.

Los procesos del ciclo de vida de desarrollo de software se muestran en la Tabla 2.1, de acuerdo a [RSP98]. Esta estructura basada en procesos, agrupa como fases generales las actividades a realizar para la construcción de software. Existen diversos enfoques para aplicar las etapas de elaboración; el criterio de escogencia entre los ciclos de vida para el desarrollo, lo otorga a nivel general los requerimientos del problema, así como las características del entorno de desarrollo y utilización del producto.

2.8.2. Bases del desarrollo de software

Tomando el esquema propuesto por [SM96], las bases del desarrollo de software se pueden dividir en :

2.8.2.1. Bases de gestión

Realizar gestión sobre el desarrollo de software, consiste básicamente en dimensionar el producto, en términos de funcionalidad, complejidad, recursos, actividades, entre otros. Como etapas de la gestión se tienen los procesos de estimación, planificación y seguimiento.

1. **Estimación:** corresponde a la cuantificación que se considera sobre el proyecto.

a) *Estimación del tamaño:* se realiza entre otros por puntos de función o en líneas de código. Los puntos de función son indicadores de valor (puntos) de acuerdo a los componentes del producto. Las líneas de código son una medida estándar de la extensión del producto.

b) *Estimación del esfuerzo:* con base en la estimación del tamaño y con experiencias previas similares, se puede considerar dedicación de personal / tiempo.

c) *Estimación de la planificación:* realizando la estimación de tamaño y esfuerzo es posible estimar la duración y distribución del proyecto en el tiempo.

2. **Planificación:**

a) *Selección y organización del personal:* en referencia a los perfiles del personal de desarrollo y de planificación.

b) *Elección del modelo de ciclo de vida a utilizar:* identificar el modelo que mejor se adapte a las condiciones del proyecto y al entorno del desarrollo.

c) *Gestión de riesgos:* La función de la gestión de riesgos es la de identificar, estudiar y eliminar las fuentes de riesgo antes de que empiecen a amenazar la planificación del proyecto.

- Estimación de riesgos: Identificación, análisis y priorización de riesgos.

- Control de riesgos: Planificación, resolución y monitorización de riesgos.
3. **Seguimiento:** verificación constante de la ejecución del proyecto. Constituye las revisiones técnicas y cumplimiento de los parámetros de calidad, así como la demarcación de puntos cruciales para el proyecto.
 4. **Medición:** La medición es un proceso enfocado hacia el desarrollador. En general busca recopilar datos sobre la planificación y envergadura del proyecto, a fin de estimar otros proyectos a futuro.

2.8.2.2. Bases técnicas

Desde el punto de vista del desarrollo técnico del proyecto de software, se pueden considerar:

1. **Gestión de requerimientos:** corresponde a identificar los requerimientos de los actores del proceso de desarrollo, organizándolos de acuerdo a una metodología que permita reflejar lo mejor posible las necesidades y características del entorno de desarrollo.
2. **Diseño:** Conceptos de modularidad y ocultamiento de información. Consideraciones de diseño propios del dominio de la aplicación.
3. **Construcción:** Establecimiento de prioridades en el proceso de codificación. Reglas y métodos para generación de código.
4. **Gestión de configuración:** (*Software Configuration Manager*) Incluye métodos para evaluar cambios propuestos, continuar los cambios, manejar va-

rias versiones y guardar copias de la evolución de los artefactos del proyecto. Los artefactos corresponden a todas los componentes utilizados en la fase de codificación.

2.8.2.3. Bases de control de calidad

Las bases de control de calidad permiten establecer un control sobre la funcionalidad real del producto, buscando minimizar a futuro la corrección de defectos.

1. **Módulos propensos a errores:** por lo general están ligados a la falta de prueba por presiones de tiempo o a deficiencias técnicas en los estilos de codificación.
2. **Prueba:** realización de pruebas del código (desarrollador) y sobre el funcionamiento del sistema. La intención de la prueba es detectar fallos sobre el producto o sus componentes.
3. **Revisiones técnicas:** corresponde a a cualquier clase de revisiones utilizadas para detectar defectos en requerimientos, diseño, código, casos de prueba.

2.8.3. Sistema crítico o con tolerancia a fallos

Como característica fundamental de un sistema crítico se tiene el factor de supervivencia, como la habilidad de un sistema de comunicación o computación para satisfacer requerimientos como seguridad, confiabilidad, tiempo de respuesta, respuesta a situaciones anormales y corrección de errores. La supervivencia debe ser definida respecto al conjunto de situaciones adversas que pongan en riesgo la fiabilidad del sistema [RD97], que generalmente ocurre por:

- Fallos en el hardware.
- Imperfecciones en el software.
- Ataques sobre sistemas y redes de comunicaciones perpetrados por los usuarios de modo intencional o accidental.
- Interferencia electromagnética.

Un sistema crítico de software es visto entonces como un producto de software que puede prevenir, con alcances y limitaciones, un rango de fallos sobre el software en ejecución.

Como factores de consideración en el diseño para construcción de software de seguridad crítica [DG94] se tiene, en primera instancia, 7 factores primordiales:

1. Calidad y experiencia del personal.
2. Uso del manejo de configuración
3. Claridad, estabilidad y validación de los requerimientos del software
4. Independencia de la verificación y validación
5. Uso de un ciclo de vida formal para desarrollo del producto
6. Planificación de los requerimientos y diseño del sistema, a través de los requerimientos, diseño codificación y prueba del software.
7. Uso de análisis de riesgo y debilidades para guiar el desarrollo.

Adicionalmente 9 factores de diseño son esenciales para la seguridad:

1. Referencia a la calidad
2. Buen manejo y completa actividad de documentación
3. Independencia del manejo de la configuración y aseguramiento de la calidad
4. Mejoramiento continuo del proceso
5. Medida de los resultados del proceso de desarrollo de software
6. Disponibilidad suficiente de recursos, apropiado a la dificultad de las tareas de desarrollo
7. Un registro sobre el tiempo, el presupuesto, las especificaciones internas del producto de entrega
8. Detección y resolución del problema primario
9. Seguimiento de defectos

| Procesos principales | Procesos de soporte | Procesos generales |
|--|-----------------------------|---------------------------|
| Adquisición | Documentación | Gestión |
| Suministro | Gestión de la configuración | Infraestructura |
| De * <i>Análisis</i> * <i>Diseño</i> desarrollo * <i>Implementación</i> * <i>Prueba</i> * <i>Aceptación</i> | Aseguramiento de la calidad | Mejora |
| Explotación - Uso | Verificación Validación | Formación - Entrenamiento |
| Mantenimiento | Revisión conjunta | |
| | Auditoría | |
| | Resolución de problemas | |

Cuadro 2.1: Procesos Ciclo de Vida