

**MUESTREO PREDICTIVO COMO ESTRATEGIA DE AHORRO DE ENERGÍA EN UNA
RED DE SENSORES INALÁMBRICOS.**

Wilson Medina Sánchez

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA Y SISTEMAS
ESCUELA DE INGENIERIA
MEDELLIN
Febrero de 2011**

**MUESTREO PREDICTIVO COMO ESTRATEGIA DE AHORRO DE ENERGÍA EN UNA
RED DE SENSORES INALÁMBRICOS.**

Wilson Medina Sánchez

**TARABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA**

**ASESOR:
EDWIN MONTOYA, PH.D.**

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA Y SISTEMAS
ESCUELA DE INGENIERIA
MEDELLIN
Febrero de 2011**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Asesor

Jurado 1

Jurado 2

Fecha

DEDICATORIA

'A mi hijo: Jerónimo Medina Domínguez'

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos especiales a mi familia, "por esperar pacientemente que terminara este nuevo reto en mi profesi3n; al grupo de investigaci3n en Redes y Sistemas distribuidos de la Universidad EAFIT, especialmente al profesor Edwin Montoya por su apoyo en la investigaci3n de este proyecto.

Muchas Gracias.

Resumen

Las redes de sensores inalámbricos (RSI o en inglés WSN Wireless Sensor Network) son dispositivos de bajo costo, con capacidades de sensado, cómputo y comunicación, que tienen muchas aplicaciones relevantes en el mundo de la tecnología. Igualmente, los usos de estas redes se hacen cada vez más complejos, críticos e importantes en diferentes áreas ambientales, agrícolas, militares, salud, industrial, entre otros.

Uno de los principales problemas en una RSI es el consumo de energía, es por eso que muchos de los trabajos realizados en este campo proponen diferentes opciones para dar solución al ahorro de energía.

En este trabajo se plantea una estrategia de ahorro de energía en los Nodos Sensores de una RSI, basada en una técnica de pronósticos que se le hace al sistema con base a los datos históricos obtenidos por el Nodo Sensor; dicha predicción da como resultado el ajuste del periodo de muestreo con que se adquieren los datos del medio físico: el aumento del periodo favorece el ahorro de energía en el dispositivo. Estos datos son analizados según sea su comportamiento, es decir, datos que presenten patrones estables, con tendencia positiva o negativa y estacionarios. Con lo anterior, se logra reducir en el Nodo la transmisión de los datos, logrando con ello una buena optimización de trabajo en el radio, dispositivo de mayor gasto energético en un Nodo Sensor; inclusive se llega a apagar temporalmente el dispositivo en momentos en que la técnica ha alcanzado periodos de muestreo muy estables. Es así como, se da también un ahorro adicional de energía en el Nodo, permitiendo una mayor duración en su batería.

La estrategia planteada, no ejecuta el procesamiento matemático de los datos sensados en el Nodo Sensor, debido al alto cálculo computacional generado por el algoritmo de pronósticos estadísticos. Es por eso, que se diseña una arquitectura en la red de tal manera que la estrategia de ahorro de energía sea colaborativa entre el Nodo Sensor y el sistema *Back End (BE)*; este último, recibe la información transmitida por el Nodo Sensor para ser procesada mediante el algoritmo mencionado y realimenta sus resultados al Nodo para que el dispositivo ajuste su periodo de muestreo, buscando que éste siempre aumente partir de su valor nominal inicial.

Lo anterior, se centra en la propuesta de una estrategia de ahorro de energía gestionada en los diferentes módulos del Nodo: módulo de conversión análogo a digital "A/D", módulo de transmisión / recepción de datos y el módulo de desconexión temporal.

El trabajo se desarrolla sólo para variables que presentan una respuesta lenta, además, que muestren un patrón de datos de tipo estacionario o de tendencias lineales estables, tales como: la temperatura, presión de algunos procesos industriales, iluminación natural, humedad, nivel, entre otras.

Abstract

Wireless sensor networks (WSN) are low-cost devices with sensing capabilities, computation and communication, which have many relevant applications in the world of technology. Similarly, the uses of these networks become increasingly complex, critical and important in different environmental areas, such as, agricultural, military, health, industrial, among others.

One of the main problems in a WSN is energy consumption, which is why many of the work done in this field offer different options for achieving energy savings.

This paper presents a strategy for saving energy in sensor nodes of a WSN, based on a forecasting technique that performs the system based on historical data gathered by the Sensor Node, this prediction results in an adjustment in the sampling period to acquire data from the physical environment: the increase of the sampling period promotes energy saving in the device. These data are analyzed according to their behavior, ie, data showing a stable pattern, with positive or negative and/or stationary trends.

With this strategy there is an actual decrease in the data transmitted by the node, thereby achieving good optimization of the work done by the radio, a device with higher energy expenditure in a Sensor Node, in addition to that, the device turns off temporarily when the measured system has reached very stable sampling periods. Thus, there is also a further saving of energy in the node, allowing more time on its battery.

The proposed strategy does not perform mathematical processing of the sensed data in the sensor node, due to the high computational calculations generated by the statistical forecast algorithm. That is the reason why, to design a network architecture so that the energy saving strategy is collaborative between the sensor node and the system Back End (BE), the latter receives the information transmitted by the sensor node to be processed using the algorithm mentioned and the results fed back to Node for the device to adjust its sampling period, it is always looking to increase from its initial nominal value.

The process previously described focuses on a proposal for an energy saving strategy implemented in different Node modules: module analog to digital conversion A / D, module of data transmission and reception and the temporary disconnection module.

The work is performed only for variables that have a slow response and also show a pattern of data which is stationary or stable with linear trends, such as temperature, pressure from some industrial processes, natural lighting and humidity level, among others.

Índice de contenido

AGRADECIMIENTOS	
Resumen.....	
Abstract	
Índice de contenido.....	I
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
3 OBJETIVOS.....	4
3.1 Objetivo general.....	4
3.2 Objetivos Específicos.....	4
4 MARCO DE REFERENCIA Y TRABAJOS RELACIONADOS.....	5
4.1 Un vistazo a la estructura de un nodo que conforma una RSI.....	5
4.1.1 Arquitectura del Sensor.....	5
4.1.2 Unidad de sensado.....	6
4.1.3 Unidad de procesado.....	7
4.1.4 Procesador.....	7
4.1.5 Almacenamiento.....	7
4.1.6 Unidad de transmisión.....	7
4.1.7 Unidad de suministro de energía.....	8
4.2 Restricciones de RSI.....	8
4.3 Trabajos relacionados.....	9
4.3.1 Modelado predictivo para la Conservación de la energía en redes de sensores inalámbricos (RSI).....	9

4.3.2	Estrategia de gestión del sistema de sensado en los nodos de una red de sensores inalámbrica orientada al mejoramiento del consumo de potencia.....	10
4.3.3	Encendido y apagado del radio para baja potencia en una RSI.....	10
4.3.4	Muestreo Adaptativo para el ahorro de energía en una Red de Sensores Inalámbricos con aplicación supervisión de nieve.	11
4.3.5	Un estudio sobre el estado del arte en los estándares 802.15.4 y <i>ZigBee</i> en una Red de Sensores Inalámbricos.....	11
4.3.6	Algoritmo que proporciona una distribución óptima de energía en una Red de Sensores Inalámbricos.	12
4.3.7	Métodos adaptativos.	12
4.4	Análisis de trabajos relacionados	13
5	MARCO TEÓRICO.....	15
5.1	Modelos autorregresivos de media móvil.....	15
5.2	Series de tiempo.	16
5.3	Pronósticos.....	16
5.3.1	Modelos comunes para pronósticos cuantitativos.....	18
5.3.2	Promedios móviles.....	20
5.3.3	Promedios móviles dobles	21
5.3.4	Mínimos cuadrados.....	23
5.3.5	Distribución normal.....	25
6	DISEÑO DEL MODELO.....	27
6.1	Arquitectura del diseño.	27
6.2	Protocolo de comunicación.	30
6.3	Diseño de la estrategia.	33
6.3.1	Diseño de la estrategia en el Nodo Sensor.	36
6.3.2	Diseño de la estrategia en el <i>Back End</i>	37
7	DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	45
7.1	Implementación del sistema.....	45

7.2	Montaje físico: el Nodo y el <i>Back End</i>	47
7.2.1	Modalidad de adquisición de datos.	48
8	Resultados y discusión.	52
8.1	Modalidad CON y SIN estrategia.....	52
8.2	Análisis de resultados.	57
8.3	Discusión ante uno de los trabajos referenciados en el capítulo 4.	59
	CONCLUSIONES	62
	TRABAJOS FUTUROS.....	66
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

Índice de figuras

Figura 4.1 Diagrama de bloques de un nodo sensor	5
Figura 4.2 Placa sensora de Crossbow [10].....	6
Figura 5.1 Distribución normal [17]	25
Figura 6.1 Arquitectura de red.....	27
Figura 6.2 Arquitectura de red.....	28
Figura 6.3 Codificación para el Tiempo de ajuste.....	32
Figura 6.4 Codificación para el tiempo de reposo.	32
Figura 6.5 Reglas de Protocolo.....	33
Figura 6.6 Algoritmo diseñado en el Nodo Sensor, Máquina de Estado Finitos.	36
Figura 6.7 Algoritmo diseñado en el <i>Back End</i>	40
Figura 7.1 Menú principal de la configuración del sistema desde el <i>BE</i>	47
Figura 7.2 ΔT en función de una Regresión lineal.....	50
Figura 7.3 Respuesta de una hipérbola.....	50
Figura 7.4 Distribución normal ante diferentes errores.	51
Figura 8.1 Respuesta del sistema sin estrategia ($e\%$ y ΔT)	54
Figura 8.2 Respuesta del sistema sin estrategia (Temperatura y Consumo energía)	54
Figura 8.3 Respuesta del sistema con estrategia ($e\%$ y ΔT)	56
Figura 8.4 Respuesta del sistema con estrategia.....	57
Figura 8.5 Actividad del Nodo Sensor según el error de la predicción.....	58
Figura 8.6 Validación CON y SIN estrategia.....	59

Índice de tablas

Tabla 4-1 Diferencias entre las redes inalámbricas tradicionales y RSI.....	9
Tabla 5-1 Manejos de promedios deslizantes (simulación del llenado de un tanque)	22
Tabla 7-1 Tasa de consumo de energía del Nodo Sensor [21].....	48
Tabla 8-1 Sin estrategia y Con estrategia	53
Tabla 8-2 Comparación de trabajo relacionado	61

1 INTRODUCCIÓN.

Una red de sensores inalámbricos (RSI) es un conjunto de microdispositivos (o nodos), equipados con sensores que se sincronizan para llevar a cabo una tarea, éstos tienen la capacidad de procesar y comunicar datos en una red de forma inalámbrica. El campo de aplicación de estas redes es amplio, desde fines militares, pasando por la medicina, el área automotriz y los entornos domóticos [7].

Estas redes se caracterizan principalmente es monitorear condiciones físicas o ambientales. Dada la particularidad que hay en una RSI, por su naturaleza inalámbrica, se considera que uno de los problemas más críticos es el consumo de energía, básicamente por el corto tiempo de vida de sus baterías. Como alternativa para enfrentar esta problemática, este proyecto propone una estrategia que permite optimizar la capacidad de procesamiento en los nodos y el consumo de energía en éstos.

La estrategia consiste en reducir la frecuencia de muestreo con que son adquiridos del medio físico, hasta inclusive a pagar el Nodo Sensor. Basado en la variación del periodo de muestreo en función del error porcentual y el tiempo inicial de muestreo, se genera una estrategia por medio de un algoritmo de predicción que facilita un ahorro en el consumo energético en los nodos sensores de una red inalámbrica, con un ahorro hasta del 93.55% cuando se implementa el método ante un sistema sin estrategia alguna. Este trabajo se desarrolla teniendo en cuenta que es para variables que presenten una respuesta lenta ante excitaciones o perturbaciones [6], además, donde se pueda reconocer patrones de tendencia, cíclicos o estacionales, tales como: la temperatura, la presión de algunos procesos industriales, la iluminación natural, la humedad etc.; pueden seleccionarse técnicas capaces de extrapolarlos de manera eficaz [5]. Es por eso que, un factor importante que influye en la selección de una estrategia de pronóstico o predicción es identificar y entender los patrones históricos de los datos.

La hipótesis sobre la que se sustenta este trabajo radica en la utilización de una estrategia basada en **Pronósticos** de los datos sensados por el Nodo Sensor para reducir la frecuencia de muestreo de los sensores del dispositivo y por consiguiente transmitir menos y ahorrar energía, e inclusive permitiendo al Nodo entrar al modo de desconexión temporal. La teoría desarrollada se obtiene por medio de un análisis de pronósticos de datos basados en estadística de promedios móviles, regresiones lineales y aplicación de la teoría de la distribución normal.

El trabajo se desarrolla de la siguiente forma:

En el capítulo 2, se plantea el problema que presentan las RSI, relacionados con el consumo de potencia de los nodos sensores por la actividad que mantienen tanto en el procesamiento de la información como en la transmisión de la misma

En el capítulo 3, se exponen los objetivos propuestos para el desarrollo del trabajo, teniendo objetivos generales y objetivos específicos los cuales ayudan a demarcar el alcance del proyecto.

En el capítulo 4, se realiza el estado del arte con respecto a los trabajos relacionados y el marco de referencia en el tema de ahorro de energía en las RSI, acá se da un vistazo a la estructura de un nodo que conforma una RSI, detallando su estructura y funcionamiento; finalizando con los trabajos relacionados que se han presentado en este tipo de proyectos basados en ahorro de energía en los nodos sensores de una red inalámbrica.

En el capítulo 5, se habla del marco teórico, donde se hace una breve descripción sobre las teorías que son de importancia para la estrategia implementada en este trabajo, temáticas que permiten estimar los valores futuros de una señal análoga con base a las muestras tomadas o datos históricos del medio sensado; este tipo de análisis es a menudo conocido como filtros de predicción, filtros predictivos o series de tiempo, pronósticos de datos, etc.

En el capítulo 6, se describe el diseño del modelo, acá se presenta detalladamente la estrategia del modelo utilizado para disminuir el consumo de energía en el Nodo Sensor de una RSI. Empezando por la arquitectura del diseño de la red, el diseño de la estrategia tanto en el nodo como en el *Back End*.

En el capítulo 7, se realiza la validación de la estrategia mediante el diseño de experimentos, en este apartado se expone el rendimiento ofrecido por la estrategia de ahorro de energía en el Nodo Sensor y se evalúa la factibilidad de su utilización que permitieron observar el comportamiento de la misma en diferentes espacios de tiempo.

En el capítulo 8, se analizan los resultados y la discusión de los mismos se hace una validación CON y SIN estrategia de ahorro de energía, culminando con el análisis de los resultados de la línea base contemplada en el proyecto.

Finalmente, se muestran las conclusiones, donde se puede observar los alcances logrados en el trabajo y las ventajas y desventajas que tiene la estrategia desarrollada, además, se hace referencia sobre los trabajos futuros que se pueden dar alrededor de esta temática.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Con el crecimiento de las redes de sensores inalámbricos (RSI), aumenta cada día la necesidad de optimizar al máximo los servicios y sus aplicaciones. Sin embargo, estos requerimientos son cada vez más exigentes, presentan grandes retos en cuanto se requiere de un alto grado de complejidad en el hardware, el software y los protocolos de comunicación. Además es necesario orientar el diseño hacia el bajo consumo de potencia, en busca de extender la vida de las baterías al mayor tiempo posible [11].

El consumo de energía es una cuestión crítica en las redes de sensores inalámbricos, donde el tiempo de trabajo se mide en horas, días, meses o años. Normalmente los protocolos de comunicación se basan en mecanismos para reducir la energía en la red y el favorecimiento del aumento de la latencia (suma de retardos temporales dentro de una red) en la comunicación [14]. Para bajar el consumo de energía del sensor, se han propuesto algoritmos que se adaptan al muestreo dinámico de la señal. Esto reduce la actividad de los sensores y el radio [2]. Adicional a esto, también se muestra que las técnicas de ahorro de energía para redes de sensores normalmente se basan en el supuesto que los datos de detección y transformación consumen menos energía que una comunicación. Esta hipótesis no se sostiene en algunos escenarios de aplicación práctica.

Las aplicaciones y servicios que ofrecen los dispositivos o elementos que intervienen en el sistema de una RSI, generan un consumo de energía alto, siendo éstas: la medición, el procesamiento de la información, los esquemas de modulación, los tiempos de actividad del transmisor y el receptor, el tamaño de los paquetes, entre otros. En [13] se considera que una de las razones de pérdida de energía en los nodos sensores, es mantener activo el dispositivo para el procesamiento de los datos, donde un nodo está siempre adquiriendo datos, otras razones son: la colisión de paquetes, la sobrecarga de destino de paquetes a otros nodos y sobrecarga en paquetes de control.

Las RSI permiten desarrollar e implementar estrategias tanto en software como en hardware que pueden favorecer el bajo consumo de energía. El problema radica en el método utilizado en la implementación de la adquisición de los datos por medio de los nodos, donde el sensado de una señal analoga se hace en una toma periódica de la información de una variable (luz, temperatura, velocidad, presión, flujo, etc.) de una manera pasiva y repetitiva. Es así como al sensor se le fija una frecuencia de muestreo que puede ser poco óptima y además perjudicial para su ahorro eficaz de energía.

Por estos motivos, es necesario responder al siguiente interrogante:

¿Cómo desarrollar una estrategia para ajustar la frecuencia de muestreo en un Nodo Sensor de una red inalámbrica de forma predictiva que permita un ahorro de energía?

3 OBJETIVOS.

3.1 Objetivo general.

Proponer una estrategia para ajustar la frecuencia de muestreo de forma predictiva, orientada al consumo efectivo de la energía en una red de sensores inalámbricos.

3.2 Objetivos Específicos.

- Proponer una estrategia de gestión en los nodos de sensado que facilite la reducción del consumo de energía en los nodos.
- Validar la estrategia propuesta mediante el desarrollo de una aplicación que permita evaluar las prestaciones de la técnica propuesta.

4 MARCO DE REFERENCIA Y TRABAJOS RELACIONADOS.

4.1 Un vistazo a la estructura de un nodo que conforma una RSI.

4.1.1 Arquitectura del Sensor.

El núcleo de una Red de Sensores Inalámbrica es el nodo, los aspectos relacionados con el diseño de éste como son: los sensores que soporta, la interfaz de comunicación, el software que soporta, los protocolos que implementa, el sistema de control y los periféricos que maneja, entre otros, son los factores que determinan las principales características de la red tales como las aplicaciones a la que está orientada, las prestaciones que puede obtener la misma, que sensores es posible adaptar, etc. Es importante describir como está diseñado este dispositivo desde el punto de vista del hardware que lo compone y el software que utiliza. Como es de esperarse, el nodo de una RSI es un Sistema Embebido, el cual es la unión de subsistemas más simples. Es posible generalizar la arquitectura estándar de un nodo, el cual está compuesto básicamente por cinco subsistemas: Potencia, Memoria, Sensores, Unidad de Control e Interfaz de Radio; en la cual se destacan además los aspectos relacionados con el software que se ejecuta en el nodo, constituyendo una parte muy importante de la funcionalidad del mismo. A continuación se hará una breve descripción de cada uno de estos subsistemas [1]

En la Figura 2.1 se observa el diagrama de bloques de dicha arquitectura.

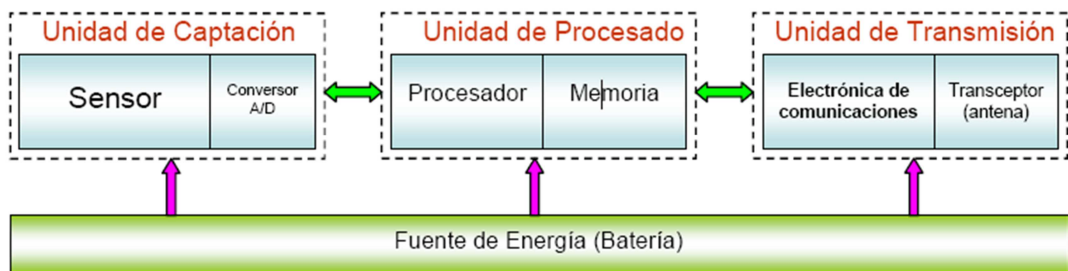


Figura 4.1 Diagrama de bloques de un nodo sensor

En este diagrama se encuentra:

- Unidad de sensado, con una serie de sensores que se encargan de adquirir los datos. Estos sensores pueden ser de temperatura, humedad, luz, acelerómetros, etc.
- Unidad de procesado (CPU), con el que se realiza el procesado de los datos.
- Unidad de transmisión, para la comunicación con otros nodos.

- Unidad de suministro de energía.

4.1.2 Unidad de sensado.

El propósito principal de los nodos de una red de sensores, no es computar o comunicar, sino detectar. El componente sensor de los nodos es la actual tecnología de cuello de botella, estas tecnologías actualmente no están progresando con la rapidez de los semiconductores. Las limitaciones conceptuales son significativamente estrictas tanto para los sensores como para los procesadores y almacenamiento. Los transductores son unos componentes en un nodo que se usan para transformar una forma de energía en otra sin perder la equivalencia de la señal medida [7]. Además, los sensores pueden tener otros cuatro componentes: convertidor análogo/digital, un convertidor digital-análogo y un microprocesador. El diseño más simple puede incluir un solo transductor.

Los sensores utilizados en las distintas plataformas pueden ser de diferentes clases:

- Modalidad de baja potencia.
- Fotodetector (sensor de luz).
- Sensor de temperatura.
- Acelerómetro de dos dimensiones.
- Modalidad de media potencia.
- Micrófono (detector acústico de umbral).
- Magnetómetro.
- Modalidad de alta potencia.
- Sensor de imagen.
- Sensor de video.

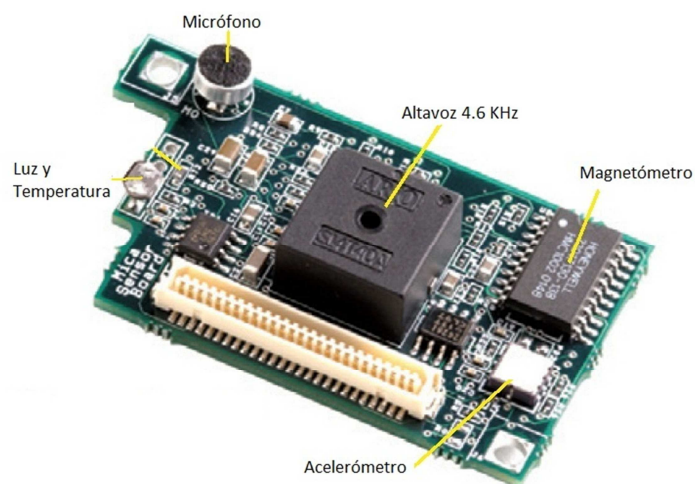


Figura 4.2 Placa sensora de Crossbow [10].

4.1.3 Unidad de procesado.

Esta unidad se encuentra dividida a su vez en dos subunidades: el procesador y la unidad de almacenamiento.

4.1.4 Procesador.

Los microcontroladores son la primera opción para el procesamiento dentro del nodo. Los requerimientos de memoria dependen de la aplicación que se vaya a implementar. Existen diferentes fabricantes de procesadores, tales como: Microchip, Intel, Atmel, etc.

4.1.5 Almacenamiento.

Dependiendo de la estructura de toda una red de sensores, los requerimientos de almacenamiento en términos de rapidez y no-volatilidad de memoria en cada nodo pueden ser diferentes. Por ejemplo, si se sigue el modelo arquitectónico en el cual la información se envía instantáneamente al nodo central, se necesita muy poco almacenaje local en los nodos individuales. Sin embargo, en un escenario donde la meta es minimizar la cantidad de comunicación y que la mayor parte de aplicación la realice cada nodo, será necesario un requerimiento significativo de almacenaje local. Existen al menos dos alternativas de almacenamiento de datos en un nodo local:

- La primera opción es usar una memoria flash, que es una solución muy atractiva en términos de coste y capacidad de almacenamiento. Sin embargo, tiene serias limitaciones en cuestión de las veces que puede ser utilizada para el almacenamiento de diferentes tipos de datos en las mismas posiciones físicas.
- La segunda opción es utilizar memorias MRAM basadas en elementos nanoeléctricos. Se espera que las MRAM se puedan utilizar pronto para apoyar un número elevado de aplicaciones en número de áreas.

4.1.6 Unidad de transmisión.

Los módulos de radio frecuencia de corto alcance como los componentes de comunicación son importantes porque la parte del presupuesto de energía dedicado a enviar y recibir mensajes normalmente domina el conjunto del presupuesto de energía. Durante el diseño y la selección de los transmisores/receptores, se debe considerar al menos tres capas diferentes de abstracción: capa física, capa MAC (Medium Access Control) y la capa de red. La capa física es la responsable de establecer los enlaces físicos entre el transmisor y uno o más receptores. Las principales tareas a este nivel incluyen la modulación de señal y el encriptamiento de los datos para mantener la comunicación en presencia

de un canal de ruido y señales interferentes. Para usar de manera eficiente el ancho de banda y reducir el costo de desarrollo, se utilizan varios radios que comparten el mismo medio de interconexión. La participación compartida es facilitada por la capa MAC. Finalmente, la capa de red es la responsable de establecer el camino que un mensaje debe realizar a través de la red para que se transfiera de la fuente a su destino. El diseño de potencia y la eficiencia de ancho de banda de los radios es una de las principales investigaciones y tareas de desarrollo. Es importante darse cuenta que la arquitectura radio es una función en la que se emplea arquitecturas de red y protocolos. Hay que determinar un compromiso entre el costo relativo de energía en transmisión y recepción ya que escuchar el canal es muy caro en términos energéticos. Por lo tanto, es necesario desarrollar esquemas que combinen periodos de actividad con periodos de *standby* o inactividad en los sensores.

Las bandas de frecuencias en las que suelen operar son: 433MHz, 916MHz, 2.4MHz en las bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). La potencia típica que transmite es 0 dBm y la sensibilidad en recepción es tan baja como -110 dBm. La comunicación se realiza en banda estrecha con la modulación FSK o espectro ensanchado. Generalmente tiene unas tasas de transmisión relativamente bajas (menores a 100 kbps), lo que permite ahorrar potencia [10].

4.1.7 Unidad de suministro de energía.

Un gran consenso es que la energía será una de las restricciones principales tecnológicas para los nodos de RSI. La energía puede ser suministrada de dos formas principalmente: la primera es equipando cada Nodo Sensor con una fuente de energía (recargable). En la gran mayoría de las plataformas existentes, se suministra la potencia mediante las baterías AA. Estas baterías son las que dan el mayor o menor tamaño del nodo. Otra opción son las baterías de botón que son más compactas; la segunda alternativa es recoger la energía disponible en el entorno como pueden ser las células solares. Actualmente ya son ampliamente utilizadas para aplicaciones móviles como las calculadoras y se pueden utilizar para algunas aplicaciones.

4.2 Restricciones de RSI.

Las RSI tienen varias restricciones las cuales deben ser consideradas en el diseño de cualquier protocolo para estas redes. Algunas de estas limitaciones son:

- Suministro de energía limitado. Requieren de protocolos eficientes en el consumo de energía.
- Capacidades limitadas de cómputo. No pueden correr protocolos sofisticados de red.

- Comunicación. El ancho de banda de enlaces inalámbricos que conectan a los sensores es limitado.
- El hardware que poseen es limitado, por lo tanto en aplicaciones grandes donde se requiera de infraestructuras complejas se requeriría de muchos de ellos.

En la Tabla 2-1, se exhibe las diferencias entre las redes inalámbricas tradicionales y RSI.

Tabla 4-1 Diferencias entre las redes inalámbricas tradicionales y RSI

RSI	WN Tradicionales
Energía limitada. Requiere operar por largos períodos de tiempo sin mantenimiento.	Fuentes de energía recargables o Reemplazables.
Prioridad: consumo eficiente de energía para aumentar el tiempo de vida de la red.	Prioridad: optimización de la QoS y la eficiencia del ancho de banda.
Nodos estacionarios o con baja movilidad.	Nodos móviles.
Baja tasa de datos de muchos a uno.	Comunicación entre nodos, punto a punto.

4.3 Trabajos relacionados.

En los últimos años ha habido un interés particular por parte de los investigadores en la temática de ahorro de energía, problema principal de las RSI. Al momento de realizar la revisión de los trabajos relacionados con el tema, se analizaron algunas propuestas relacionadas con este proyecto, trabajos a los cuales solo los une el hecho de compartir el mismo fin; que no es más que, el de obtener optimización en el consumo de energía desde la perspectiva de los servicios.

A continuación se presenta una síntesis conceptual de algunos trabajos relacionados y considerados como los más relevantes con este trabajo investigativo, donde se resaltan aspectos básicos a nivel de funcionamiento al igual que metas de diseño.

4.3.1 Modelado predictivo para la Conservación de la energía en redes de sensores inalámbricos (RSI).

El trabajo que se observa en [9], desarrolla una técnica mediante la generación de una predicción a partir de las lecturas recibidas de los nodos de sensores en el campo

detectado en un tiempo determinado. Las lecturas son utilizadas para generar un modelo de predicción que busca reducir el consumo de energía en el sensado de los datos externos. El software está desarrollado en Visual Basic el cual permite que se haga una vigilancia sobre la red en un periodo determinado por el usuario, para establecer los diferentes modos de dormir en cada nodo. Los nodos hacen una comparación de los datos sensados en los últimos instantes de tiempo, con la estimación generada por el algoritmo; de allí se genera un umbral o zona de trabajo con el fin de manejar el nodo dentro de este rango, si este permanece dentro del límite se prolongará el tiempo de dormir del dispositivo, permitiendo un ahorro de energía en cada uno de ellos. Cada que las lecturas se acercan al umbral superior, el tiempo de dormir se hará más corto, cuidando que la estimación de los datos no se desvíen sobre los datos reales tomados.

Este mecanismo evita que un sensor transmita innecesariamente todas las lecturas que pueden ser pronosticadas con éxito en la estación central. Este ahorro se obtiene a coste de cálculos extras en la estación base para la generación de modelos de predicción y el costo adicional de su transmisión. Ante esta disyuntiva, la eficacia de este método depende de la precisión con la que los modelos de predicción se generan y el porcentaje de lecturas que puede ser bien pronosticado por ellos, sin demasiado gastos de cálculo.

4.3.2 Estrategia de gestión del sistema de sensado en los nodos de una red de sensores inalámbrica orientada al mejoramiento del consumo de potencia.

[12] Radica en la implementación de una técnica que, sin reducir la frecuencia de muestreo de los conversores A/D, puede hacer un procesamiento sobre los datos capturados por cada nodo de una RSI que ejecuta una aplicación típica de adquisición de datos; este enfoque busca otorgar un papel más activo a los nodos, haciendo que éstos implementen un “modelo” de la señal sensada de manera que mediante este procesamiento, el nodo esté en capacidad de decidir cuándo una muestra resulta significativa para transmitirla hacia la estación central (*Back End*), lo que se busca entonces es reducir el número de transmisiones que deben hacer a la red, logrando así extender la vida útil de las baterías y explotando, al mismo tiempo, la capacidad de procesamiento con la que se cuenta. No es viable dotar estas redes con robustos sistemas de sensado y donde, adicionalmente, resulta inviable dotar a los nodos con hardware extra orientado al rechazo de señales ruidosas.

4.3.3 Encendido y apagado del radio para baja potencia en una RSI.

En este trabajo [14], los autores construyen un dispositivo activador del transmisor de baja potencia, el cual se puede utilizar para vigilar continuamente el canal y activar el nodo de comunicaciones (receptor), permitiendo únicamente operaciones asincrónicas. Consiste en un detector de cero con un diodo *Schottky*, utilizado para recibir una señal modulada por ancho de pulso. El promedio total de consumo de potencia es inferior a 20 uW, que es un resultado bueno para la aplicación.

4.3.4 Muestreo Adaptativo para el ahorro de energía en una Red de Sensores Inalámbricos con aplicación supervisión de nieve.

Este es uno de los trabajos que más se acerca en cuanto a su temática, al presentado en este proyecto, dejando claro que es un modelo o técnica adaptativa y, el propuesto en este proyectos es predictivo. Los autores implementan un algoritmo que facilita el ahorro de energía en el sensor mediante el uso de un enfoque de adaptación en el ciclo de tiempo de procesamiento, que consiste en (i), apagar el sensor entre dos muestras consecutivas y (ii) mediante la frecuencia de muestreo óptimo para la cantidad física que debe vigilarse. Se implementa una estrategia para muestrear el nivel de las formaciones de nieve usando técnicas adaptativas sobre los sensores, para ello se estima la frecuencia a la que debe ser muestreada la señal con base a las transformadas de Fourier rápida calculada sobre las muestras de la misma, en un intento por reducir el consumo de potencia debido a los periodos de encendido - apagado de los sensores y los circuitos necesarios para el acondicionamiento de las señales [2].

4.3.5 Un estudio sobre el estado del arte en los estándares 802.15.4 y ZigBee en una Red de Sensores Inalámbricos.

En este trabajo [13] los autores proponen diferentes estrategias en el ahorro de energía de una forma global, a continuación se presentan algunas:

- **Energía eficiente.** Es catalogado el tema más importante en las RSI. El dispositivo de radio es uno de los elementos más consumidores de potencia, entre todos los demás. Algunas de las razones de pérdida de energía en los nodos son: la escucha inactiva, donde un nodo está esperando escuchar algo, la transmisión de datos redundantes, la colisión de paquetes, la sobrecarga de destino de paquetes a otros nodos y sobrecarga en paquetes de control, etc. Varias propuestas intentan reducir la pérdida de energía en la capa MAC (*Medium Access Control*), pero, investigaciones recientes reconocen la importancia de la coordinación con la capa superior de la pila de protocolo (red y capas de aplicación).
- ***Connected dominating set approaches.*** Una de las primeras propuestas se deduce en el seguimiento de muchas redes densas, donde los nodos cerca son equivalentes desde un punto de vista de enrutamiento. La idea es seleccionar algunos nodos predominantes para constituir una espina dorsal de red y activar la conectividad en la red todo el tiempo que sirvan de suministro temporal de los mensajes almacenados, con el fin de estar junto a los nodos que no formen parte de la espina dorsal. Los nodos no importantes (no ejes) duermen la mayor parte del tiempo (ahorrando la energía) y de vez en cuando se activan para intercambiar mensajes con su vecino de la espina dorsal. Ya que estos nodos consumen más energía que otros nodos, CDS (*Connected Dominating*

Set) estos protocolos requieren que los nodos alternen entre el estado de importancia de cada uno.

- **MAC layer approaches (acceso de capa MAC).** Las soluciones de capa MAC intentan alcanzar el ahorro de energía por el empleo exclusivo de instalaciones de control de acceso al medio de modo que las capas superiores de la pila de protocolos no se vean afectadas y no requieren de ello. Estas soluciones suelen ser inflexibles a las diferentes, ruta específica, velocidad de transmisión de datos (esta información es sólo a disposición de las capas más altas).
- **Protocolos TDMA.** La solución obvia al idle listening en la capa MAC discuten temas que están en la programación de la transmisión a priori, de modo que, cualquier nodo sabe exactamente cuándo debe encender su radio y seguramente no tendrá colisiones en los resultados. *ZigBee* realmente emplea este modo superframe para topologías estrella, donde los nodos sólo pueden hablar con el coordinador, topologías árbol, donde los nodos internos coordinan sus propias redes de estrella y, al mismo tiempo, actúan como un esclavo en la red estrella padre.

4.3.6 Algoritmo que proporciona una distribución óptima de energía en una Red de Sensores Inalámbricos.

En este trabajo los autores implementan un algoritmo que facilita el agrupamiento proporcional de potencia distribuida. Donde los nodos estén decididos a ser una distribución óptima, haciendo que el consumo de energía total del grupo sea proporcional al total de energía que almacena. En el proceso de agrupamiento la formación de una manera distribuida es adoptada. Los sensores en primer lugar, comparan sus posiciones y se organizan en un óptimo agrupamiento y luego compiten por ser el líder en el grupo de acuerdo con su posición y la energía residual que son evaluados por la función de idoneidad. La topología de la agrupación formada por el DPPC hace que la eficiencia energética de las mismas sea mejorada para la RSI [18].

4.3.7 Métodos adaptativos.

El trabajo [15], muestra una propuesta en una técnica auto-adaptativa, donde se busca encontrar el número óptimo de nodos despiertos en la red, estrategia que hace que la RSI mantenga su operación al tiempo que minimiza el número de terminales activas, buscando que la red extienda su vida útil hasta el máximo, para ello, se creó un esquema que determina la ruta necesaria para llegar a una estación base determinada, haciendo que solo se activen los nodos estrictamente necesarios para la transmisión del paquete. El trabajo expuesto en [3] se desarrolla en una estrategia que se orienta a aplicaciones de detección de eventos, donde ésta intenta solucionar el problema de encontrar la ubicación espacial más acertada de un evento, tratando de minimizar el consumo de

energía que se da por la comunicación del mismo por medio de la caracterización de las aplicaciones que se dan entre el muestreo, los falsos positivos y la calidad de los enlaces. En el trabajo [2] se propone una estrategia para muestrear el nivel de las formaciones de nieve usando métodos adaptativos sobre los sensores, para ello se estima la frecuencia a la que debe ser muestreada la señal con base a los cálculos de las transformadas de Fourier rápida sobre las muestras de la misma, en un intento por reducir el consumo de potencia debido a los periodos de activación de los nodos sensores y el hardware necesarios para el acondicionamiento de las señales.

4.4 Análisis de trabajos relacionados

Los diferentes trabajos que se analizaron en el desarrollo de este estudio, fortalecieron el conocimiento de las estrategias implementadas en este tipo de temáticas de ahorro de energía, en el numeral 4.3 se expusieron algunos proyectos relevantes, éstos muestran una relación muy estrecha en la búsqueda de ahorro energía en los nodos sensores o en una red de sensores inalámbricos, las diferentes técnicas que estos utilizan, gestionan métodos que facilitan el procesamiento computacional más eficaces dentro y fuera del nodo, observándose una característica que es relevante y es el de diseñar técnicas que disminuyan el uso del dispositivo de radiofrecuencia, módulo que consume la mayor parte de energía en una RSI. Algunos de estos trabajos presentan algoritmos muy robustos que deben ser analizados con cautela en el momento de su implementación en una red, debido a que son soluciones que su alto costo computacional puede hacer que se disminuya la eficiencia para lo que fueron diseñados.

Es claro que el costo computacional, la utilización de los módulos del nodo como: el convertor A/D, la radio, entre otros y, el hecho de estar en actividad constante, resulta necesario diseñar técnicas que faciliten gestionar mejor la ejecución de la información tanto en su unidad de procesamiento como en la utilización del radio. Los trabajos relacionados que se mostraron con temáticas de muestreo adaptativo, presentan un enfoque diferente para el problema de la adquisición de los datos y la transmisión de ellos. Mediante diferentes técnicas, se toman decisiones acerca de las frecuencias de muestreo con las que deben ser capturadas las lecturas de los sensores y por ende, las transmitidas hacia la red. Mirando con detalle estos indicadores, se puede apreciar que la adquisición de datos puede darse en tasas de muestreo variables dependiendo del comportamiento o el patrón de los datos, este fin presenta buenos resultados en el sentido de no estar sensado señales con comportamientos redundantes pero, siempre cuidando que no se pierda información significativa del medio.

Los trabajos basados en temáticas basadas en series de tiempo están orientados a lograr un compromiso entre la comunicación y el cómputo que cada nodo ha de realizar, son muy buenos en cuanto a la autonomía que se puede manejar en la distribución de la actividades en toda la red pero, las desventajas que se pueden apreciar en este tipo de

estrategias es el alto costo computacional que puede requerir la implementación de la técnica. En el marco teórico en el ítem 6.2 se menciona algo sobre la teoría de este tema.

5 MARCO TEÓRICO.

A continuación se hace una breve descripción sobre las teorías que son de importancia para la estrategia implementada en este trabajo. Desde el punto de vista de estas temáticas, es posible estimar los valores futuros de una señal análoga con base a las muestras tomadas; este tipo de procesamiento es a menudo conocido como filtros de predicción, filtros predictivos o series de tiempo, la estrategia se plantea bajo los siguientes apartes.

5.1 Modelos autorregresivos de media móvil.

En estadística estos modelos (AutoRegressive Moving Average Models, ARMA en inglés), también llamados Modelos Box-Jenkins, son aplicados a series temporales de datos. Dada una serie temporal de datos, entonces, el modelo ARMA es una herramienta para entender y aún más para predecir futuros valores de la serie. El modelo está formado por dos partes, una parte autorregresiva (AR) y otra de media móvil (MA). El modelo está normalmente referenciado como un modelo ARMA (p,q), donde p es el orden de la parte autorregresiva y q es el orden de la parte de media móvil. Supongamos que se requiere filtrar un ruido blanco $v(n)$ a través de un sistema discreto de respuesta infinita al impulso, cuya función de transferencia está dada por la siguiente expresión:

$$H(z) = \frac{X(z)}{V(z)} = \frac{\sum_{n=0}^q b_q(n)z^{-n}}{1 + \sum_{n=0}^p a_p(n)z^{-n}} \quad 5-1$$

La respuesta del sistema puede ser calculada con base en una ecuación en diferencias:

$$x(n) + \sum_{l=1}^p a_p(l)x(n-l) = \sum_{l=0}^q b_q(l)v(n-l) \quad 5-2$$

Multiplicando ambos lados de la igualdad por $x^*(n)$ y tomando el valor esperado la expresión anterior se convierte en:

$$r_x(k) + \sum_{l=1}^p a_p(l)r_x(k-l) = \sum_{k=0}^q b_q(l)E\{v(n-l)x^*(n-k)\} \quad 5-3$$

Dada la expresión matemática de ruido blanco cuando un sensor toma una señal más la del ruido.

$$r_y(k, l) = r_x(k, l) + r_v(k, l) \quad 5-4$$

5.2 Series de tiempo.

En áreas como la estadística, procesamiento de señales y otras disciplinas, las series de tiempo son reconocidas en el mundo investigativo como técnicas que presentan un buen desempeño a la hora de construir modelos que se adapten al comportamiento de señales. Una serie temporal o cronológica es una secuencia de datos, observaciones o valores, medidos en determinados momentos del tiempo, espaciados entre sí de manera uniforme y por tanto ordenados cronológicamente. El análisis de series temporales comprende métodos que ayudan a interpretar este tipo de datos, extrayendo información representativa, tanto referente a los orígenes o relaciones subyacentes como a la posibilidad de extrapolar y pronosticar su comportamiento. De hecho uno de los usos más habituales de las series de datos temporales es su análisis para predicción y pronóstico. Por ejemplo de los datos climáticos, de las acciones de bolsa, o las series pluviométricas. Resulta difícil imaginar una rama de las ciencias en la que no aparezcan datos que puedan ser considerados como series de tiempo.

Debido a que estos métodos se basan en teoría de filtros digitales, también son conocidos como filtros predictivos – adaptativos (Hayes., 1996). En [16] se propone una técnica basada en filtros adaptativos para la estimación del comportamiento de una señal. Para implementar esta estrategia, se utiliza un filtro FIR como estimador.

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=0}^N x(n)w_i(n - i) \quad 5-5$$

En la ecuación se minimiza el error cuadrático medio $E\{e^2(n)\}$ utilizando mínimos cuadrados, para garantizar la convergencia del algoritmo, se calibran de manera manual los coeficientes $w_i(n)$, la idea radica en llevar un modelo aceptable de los sensores para evitar el reprocesamiento de la toma de datos que no sean necesarios. Una temática un poco diferente se encuentra en [19], en el cual se utilizan los modelos ARMA (p,q) para disminuir la tasa de errores en aplicaciones de detección de eventos con RSI. El proyecto realizado en [20] propone una estrategia puntual para llevar modelos de las variables sensadas en una RSI con base a series de tiempo, para ello, se propone una serie de modelos que pueden ser seleccionados con base al comportamiento de la variable sensada, estos algoritmos se ejecutan en el Sink y cada nodo reporta cambios que considera significativos para la actualización del modelo.

5.3 Pronósticos.

Son procesos de estimación de un acontecimiento posterior proyectando hacia el futuro datos del pasado. Éstos, se combinan sistemáticamente en forma predeterminada para hacer una estimación del futuro [5]. Teoría que será utilizada en la solución del problema planteado en este trabajo.

Los pronósticos son la base de la planificación a largo plazo de los diferentes sistemas en donde se quiera implementar. Los pronósticos se utilizan para tomar decisiones periódicas con respecto a la selección de procesos, a la planificación de la capacidad, a la planificación de la producción, a la programación de actividades, al inventario o propiamente, como es nuestro caso, al ahorro de la energía en las redes de sensores inalámbricos.

Téngase presente que un pronóstico perfecto suele ser imposible. Es fundamental revisar y actualizar continuamente los pronósticos con base en los datos más recientes, lo que se logra con un sistema flexible de planificación de los procesos.

Algunas de las preguntas que deben plantearse antes de decidir la técnica de pronósticos más apropiada para un problema específico son las siguientes:

- ¿Por qué se necesita un pronóstico?
- ¿Quién utilizará el pronóstico?
- ¿Cuáles son las características de los datos disponibles?
- ¿Qué periodo debe pronosticarse?
- ¿Cuáles son los requisitos mínimos de datos?
- ¿Qué tanta precisión se desea?
- ¿Cuánto costará el pronóstico?

Además considerar que para pronosticar o predecir comportamientos de procesos o variables se debe tener presente que:

- Un pronóstico no puede ser más preciso que los datos en los que se basa.
- El método de pronóstico fallará si se aplica a datos que no sean confiables.
- El método de pronóstico, ayudará a la toma de decisiones.
- Pocos datos no es conveniente para pronósticos positivos.
- Muchos datos pueden ser irrelevantes del pasado remoto.
- Serie de tiempo = $t++$.
- Como saber el patrón de datos, por ejemplo si son aleatorios:
 - La ecuación es un modelo aleatorio simple llamado modelo de ruido blanco. La observación Y_t está compuesta de dos partes: C , el nivel general y ε_t , el componente de error aleatorio. Es importante notar que el componente ε_t no está correlacionado de un periodo a otro.

$$Y_t = C + \varepsilon_t \quad 5-6$$

- Elección de una técnica de pronóstico. Es importante considerar unos tips valiosos cuando se trata de seleccionar un modelo de pronósticos, estos son:

- a. Horizonte de tiempo para el pronóstico.
- b. Disponibilidad de datos.
- c. Precisión requerida.
- d. Tamaño de datos para pronósticos.

A fin de seleccionar adecuadamente la técnica conveniente de pronóstico el pronosticador o el algoritmo de pronósticos, debe ser capaz de:

- Definir la naturaleza del problema de pronóstico.
- Explicar la naturaleza de los datos que se pronostican.
- Definir las capacidades y limitaciones de técnicas de pronóstico potencialmente útiles.
- Desarrollar algunos criterios predeterminados sobre los que se pueda tomar la decisión de la selección.

Los pronósticos se pueden clasificar en cuatro tipos básicos: cualitativos, **análisis de series de tiempo o cuantitativos**, relaciones causales y simulación.

Las técnicas cualitativas son de carácter subjetivo y se basan en estimaciones y opiniones. El análisis de series de tiempo se basa en la idea que se puedan usar los datos relacionados con la información del pasado para realizar pronósticos. Los pronósticos causales suponen que la demanda está relacionada con uno o más factores subyacentes del ambiente. Los modelos de simulación permiten al pronosticador recorrer una gama de suposiciones sobre la condición del pronóstico.

5.3.1 Modelos comunes para pronósticos cuantitativos

- **Promedio móvil:** este método de promedio generan pronósticos con base en el promedio de observaciones pasadas. De esta forma cada dato histórico que se tome genera influencia sobre la predicción.
- **Promedio móvil ponderado:** ciertas observaciones pasadas se ponderan más o menos que otros, según se considere conveniente de acuerdo con el histórico de los datos.
- **Suavizamiento exponencial:** los datos más recientes tienen mayor peso; este peso se reduce exponencialmente, cuanto más antiguo son los datos.
- **Análisis de regresiones:** ajusta una línea recta a datos pasados, por lo general relacionando el valor del dato con el tiempo. El método de ajuste más común es el de mínimos cuadrados.

- **Análisis de series de tiempo:** los modelos de pronóstico de series de tiempo tratan de pronosticar el futuro con base en datos pasados. Los promedios móviles y el suavizamiento exponencial son uno de los mejores y más fáciles de usar para pronósticos a corto plazo: requieren pocos datos y los resultados generados son aproximados a los reales. Los modelos a largo plazo son más complejos, requieren más datos de entrada y ofrecen mayor precisión. Desde ya, los términos corto, medio y largo son relativos, dependiendo del contexto en que se apliquen.

En general, cualquiera de los distintos modelos puede ser el mejor, dependiendo del patrón de los datos, el nivel de error y de longitud del periodo de pronóstico. Casi siempre al hacer el pronóstico se puede tener la opción de diferentes modelos, que pueden ser buenos para la mayoría de los tipos de datos que se deseen analizar, cuando la selección se basa solamente en el error de pronóstico.

Un factor importante que influye en la selección de una técnica de pronóstico es identificar y entender los patrones históricos de los datos. Si se pueden reconocer patrones de tendencia, cíclicos o estacionales, pueden seleccionarse técnicas capaces de extrapolarlos de manera eficaz [5]. Aquí se mencionan las más relevantes:

- **Técnicas de pronóstico para datos estacionarios.**

Una serie estacionaria es aquella cuyo valor medio no cambia a lo largo del tiempo. Tales situaciones surgen cuando los patrones de demanda que influyen en las series son relativamente estables. En su forma más simple, el pronóstico de una serie estacionaria implica utilizar la historia disponible de la serie para estimar su valor medio, lo que a su vez se convierte en el pronóstico de periodos futuros. Las técnicas más sofisticadas implican actualizar el estimado conforme se disponga de información nueva. Estas técnicas son útiles cuando los estimados iniciales no son confiables o cuando la estabilidad del promedio está en duda. Además, las técnicas de actualización proporcionan cierto grado de receptividad a los cambios en la estructura subyacente de la serie.

Las técnicas estacionarias de pronóstico se usan siempre que:

- Las fuerzas que generan una serie se han estabilizado y el entorno donde existe la serie permanece relativamente sin cambios. Ejemplos de ello son el número de descomposturas por semana en una línea de ensamble que tiene una tasa uniforme de producción, las ventas unitarias de un producto o servicio en la etapa de maduración de su ciclo de vida y el número de ventas resultantes de un nivel constante de esfuerzo.
- La serie puede convertirse en una serie estable. Por ejemplo, transformar una serie al tomar logaritmos, raíces cuadradas o diferencias.

- La serie es un grupo de errores de pronóstico de una técnica de pronóstico que se considera adecuada.

Las técnicas que deben considerarse cuando se pronostican series estacionarias incluyen los métodos informales, los de promedio simple, los de promedio móvil y los de modelos autorregresivos de promedio móvil (ARMA) y los modelos Box-Jenkins.

- **Técnicas de pronóstico para datos con tendencia.**

Se ha definido a una serie con tendencia como una serie de tiempo que contiene una componente de largo plazo que representa el crecimiento o el decremento. En otras palabras, se dice que una serie de tiempo tiene tendencia si su valor promedio cambia a lo largo del tiempo, de forma que se espera que aumente o disminuya durante el periodo para el que se desea hacer el pronóstico. Es común que las series de tiempo en muchos sistemas contengan tendencia.

Las técnicas que deben considerarse al pronosticar series con tendencia incluyen los modelos de promedios móviles, de suavizamiento exponencial lineal de Holt., de regresión simple, curvas de crecimiento, exponenciales y los modelos autorregresivos integrados de promedio móvil (ARIMA) también conocidos como métodos Box-Jenkins.

5.3.2 Promedios móviles.

El método de promedios simples utiliza la media de todos los datos para hacer el pronóstico. ¿Qué pasa si el analista se preocupa más por las observaciones recientes? Se puede especificar un número constante de puntos de datos al inicio y se puede calcular una media para las observaciones más recientes. El término promedio móvil se usa para describir este enfoque. Conforme se tienen nuevas observaciones, se calcula una nueva media al sumar el valor más reciente y al eliminar el más antiguo. Este promedio móvil se usa para pronosticar el siguiente periodo. La ecuación 6.7 da el pronóstico como el promedio móvil simple. Un promedio móvil de orden k , $MA(k)$, se calcula mediante la ecuación:

$$\hat{Y}_{t+1} = \frac{Y_t + Y_{t-1} + \dots + Y_{t-k+1}}{k} \quad 5-7$$

Donde:

\hat{Y}_{t+1} = valor pronosticado para el siguiente periodo

Y_t = valor real en el periodo t

k = número de términos en el promedio móvil

El promedio móvil para el periodo t , es la media aritmética de las observaciones más recientes de k . En un promedio móvil se asignan pesos iguales a cada observación. Cada nuevo punto de datos se incluye en el promedio al estar disponible y se elimina el punto de datos más antiguo. La tasa de respuesta en los cambios en el patrón subyacente de datos depende del número de periodos k , incluidos en el promedio móvil.

Observe que la técnica de los promedios móviles solo maneja los últimos periodos K de datos conocidos; el número de puntos de datos en cada promedio no cambia al pasar el tiempo. El modelo del promedio móvil no maneja muy bien la tendencia, aunque lo hace mejor que el método del promedio simple.

El analista debe elegir el número de periodos k , en un promedio móvil. Un promedio móvil de orden 1, MA (1), usaría la observación actual Y_t , para pronosticar Y para el siguiente periodo.

5.3.3 Promedios móviles dobles

Una forma de pronosticar datos de series de tiempo que presenten una tendencia lineal, es usar los promedios móviles dobles. Este método hace lo que está implicado en su nombre: se calcula un grupo de promedios móviles y entonces, se calcula un segundo grupo como un promedio móvil del primer conjunto. Ver Tabla 5-1, ejemplo de resultados simulados, sistema de llenado de una tanque de nivel.

Esta tabla muestra los datos de un sistema de nivel y junto a ellos los resultados obtenidos a partir de un promedio móvil en un periodo determinado, dando como resultado el pronóstico de sus niveles futuros. Al examinar la columna de error, se puede ver que la diferencia entre la estimación y el dato actual real es cero, lo cual significa que los pronósticos alcanzaron la tendencia esperada. Observe como los pronósticos mediante los promedios móviles de tres periodos se atrasan con respecto a los valores reales en periodos comparables: esto ilustra lo que sucede cuando se usa la técnica de promedios móviles con datos con tendencia. Observe también que los pronósticos realizados por medio de promedios móviles dobles se atrasan respecto al primer conjunto de pronósticos casi tanto como este se atrasa respecto de los valores reales. La diferencia entre los dos grupos de promedios móviles se suma al promedio móvil de tres periodos, a fin de pronosticar los valores reales.

Tabla 5-1 Manejos de promedios deslizantes (simulación del llenado de un tanque)

x	y	PMS	PMD	$a_t=2PMS-PMD$	$b_t=(n/n-1)(PMS-PMD)$	$\hat{Y}_{t+x} = a_t + b_t x$	e
1.00	0.50						
2.00	2.50	2.50					
3.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00	2.00	0.00
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	0.00	4.00	0.00
5.00	3.50	3.50	3.50	3.50	0.00	3.50	0.00
6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	0.00	6.00	0.00
7.00	5.50	5.50	5.50	5.50	0.00	5.50	0.00

Donde:

x: es el periodo futuro que se desea el pronóstico.

y: nivel sensado.

PMS: promedio móvil simple.

PMD: promedio móvil doble.

a_t : es el punto donde la recta intercepta al eje Y.

b_t : es la pendiente de la recta.

x: es el periodo futuro que se desea predecir o pronosticar.

\hat{Y}_{t+x} : valor pronosticado o estimado.

e: error entre el valor real y el estimado.

Las ecuaciones de la 5.9 a la 5.12 resumen la construcción de promedios móviles dobles. Primero se utiliza la ecuación 5.8 para calcular el promedio móvil del orden K.

$$M_t = \hat{Y}_{t+1} = \frac{Y_t + Y_{t-1} + Y_{t-2} + \dots + Y_{t-k+1}}{k} \quad 5-8$$

Entonces, se usa la ecuación 5.9 para calcular el segundo promedio móvil.

$$M'_t = \frac{M_t + M_{t-1} + M_{t-2} + \dots + M_{t-k+1}}{k} \quad 5-9$$

La ecuación 5.10 se usa para desarrollar un pronóstico que consiste en sumar la diferencia entre los dos promedios móviles al primero.

$$a_t = M_t + (M_t - M'_t) = 2M_t - M'_t \quad 5-10$$

La ecuación 6.11 es un factor de ajuste adicional, que es como la media del cambio en la pendiente a lo largo de la serie.

$$b_t = \frac{2}{k-1}(M_t - M'_t) \quad 5-11$$

Por último se usa la ecuación 5.12 para hacer el pronóstico de p periodos en el futuro.

$$\hat{Y}_{t+x} = a_t + b_t x \quad 5-12$$

Donde:

k : número de periodos en el promedio móvil.

x : número de periodos futuros por pronosticar.

5.3.4 Mínimos cuadrados.

En las temáticas de pronósticos, para estimar el valor de \hat{Y} a partir de un valor x , es necesario determinar una línea que pase a través de todos los valores medios de x e y , y que minimice la suma entre las distancias de cada uno de los puntos y la línea de estimación. Este acercamiento debería resultar en una línea que se define como "mejor ajuste" a los datos de la muestra. El método de los mínimos cuadrados alcanza este resultado mediante el cálculo del promedio mínimo al cuadrado de las desviaciones entre la muestra y la línea estimada. Un procedimiento básico para encontrar los valores de a y b , la cual se reduce a la solución de ecuaciones lineales simultaneas.

Es así como, el procedimiento más objetivo para ajustar una recta a un conjunto de datos presentados en un diagrama de dispersión se conoce como "el método de los mínimos cuadrados".

$$y = f(x) \quad 5-13$$

y : variable dependiente

x : variable independiente.

$$y = a + bx + e \quad 5-14$$

a : intercepto con y

b : pendiente

e : error de ajuste

$$e = y - a + bx \quad 5-15$$

La recta resultante presenta dos características importantes:

$$\sum(\hat{y} - y) = 0 \text{ la suma de las desviaciones} \quad 5-16$$

$$\sum(\hat{y} - y)^2 \cong 0 \quad 5-17$$

La sumatoria de los cuadrados de las desviaciones debe ser (mínima)

El mejor ajuste se logra:

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (y_i + a_0 - a_i x_i) \quad 5-18$$

$$Sr = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i + a_0 - a_i x_i)^2 \quad 5-19$$

$$G = \sum (y - a - bx)^2 \quad 5-20$$

$$\frac{dG}{da} = 2 \sum (y - a - bx)(-1) = 0 \rightarrow \frac{dG}{da} = \sum y - na - b \sum x = 0 \quad 5-21$$

Ecuación normal 1.

$$\sum y = na + b \sum x \quad 5-22$$

Para b :

$$\frac{dG}{db} = 2 \sum (y - a - bx)(-x) = 0 \quad 5-23$$

$$\frac{dG}{db} = 2 \sum (yx - ax - bx^2) = 0 \quad 5-24$$

Ecuación normal 2.

$$\sum xy = a \sum x + b \sum x^2 \quad 5-25$$

$$\therefore A = \sum y, \quad B = \sum x, \quad C = \sum xy, \quad D = \sum x^2 \rightarrow \begin{cases} na + Bb = A \\ Ba + Db = C \end{cases} \quad 5-26$$

Esta teoría se puede aplicar haciendo uso del *MATLAB*, utilizando los siguientes comandos y haciendo uso de las ecuaciones anteriores, se tiene:

`>>s=solve('n*a+B*b=A', 'B*a+D*b=C', 'a,b')` da como resultado:

`>>s=a:[|x|sym]`

`b:[|x|sym]`

- Como “s” es una estructura, toca pedir luego el valor correspondiente al campo de “b” así:

>>s*b

$$ans = \frac{-n * C + A * B}{(n * D - B^2)}$$

Como función dará:

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad y \quad a = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad 5-27$$

5.3.5 Distribución normal.

En la teoría de la estadística y la probabilidad se le llama distribución normal, distribución de Gauss o distribución Gaussiana, a una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece en fenómenos reales. La gráfica de su función de densidad tiene una forma acampanada y es simétrica respecto de un determinado parámetro. Esta curva se conoce como campana de Gauss. La importancia de esta distribución radica en que permite modelar numerosos fenómenos naturales, sociales y psicológicos. Mientras que los mecanismos que subyacen a gran parte de este tipo de fenómenos son desconocidos, por la enorme cantidad de variables incontrolables que en ellos intervienen, el uso del modelo normal puede justificarse asumiendo que cada observación se obtiene como la suma de unas pocas causas independientes. La distribución normal también es importante por su relación con la estimación por mínimos cuadrados, uno de los métodos de estimación más simples y antiguos. La representación de esta gráfica se puede apreciar en la figura 5.1.

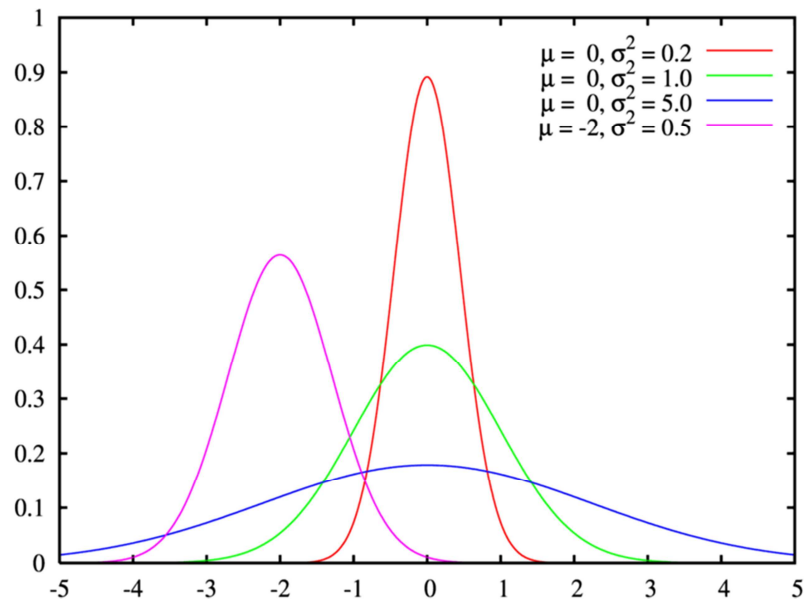


Figura 5.1 Distribución normal [17]

La función característica de la distribución normal para nuestro caso es:

$$\Delta T = T_{muestreo} * \left(1 + max * e^{-\left(\frac{(PromErr-m)^2}{2*(\sigma)^2}\right)} \right) \quad 5-28$$

Esta ecuación se muestra con la nomenclatura utilizada en el método de predicción utilizada en este proyecto, más adelante se ampliará con mayor detalle cada parámetro que la conforma en la técnica utilizada.

6 DISEÑO DEL MODELO

En este capítulo se hará una descripción del diseño del modelo trabajado, a continuación se presenta la estrategia del diseño utilizado para disminuir el consumo de energía en el Nodo Sensor de una RSI, inicialmente se expone la arquitectura del sistema propuesto. La figura 6.1 muestra la estructura global del sistema desarrollado.

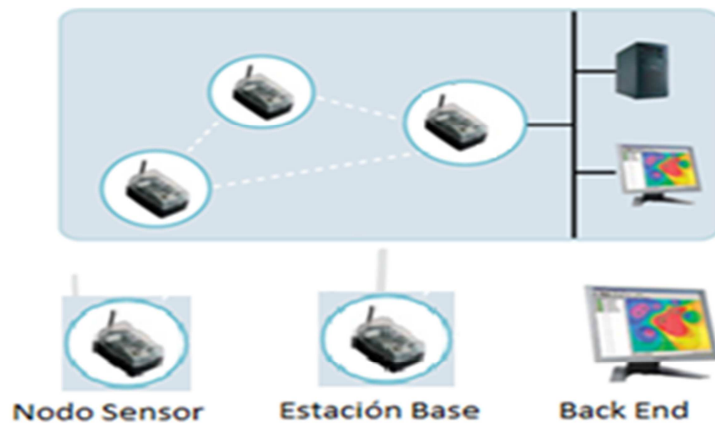


Figura 6.1 Arquitectura de red

6.1 Arquitectura del diseño.

Tradicionalmente, los mecanismos de ahorro de energía han estado centrados en la ejecución de técnicas o métodos de optimización de energía en el Nodo Sensor. En este trabajo, se plantea una estrategia que combina la participación de los nodos sensores y el procesamiento en el *Back End* de la red, con el fin de ahorrar energía en los sensores. El método presenta muchas ventajas y más cuando se trabaja con variables o señales estables, de tendencia o estacionarias, y señales lentas, sin desconocer que puede tener también desventajas en algunos casos, como por ejemplo el alto acople y dependencia de la técnica del *BE*, además, posibles desventajas en la escalabilidad de la red.

La arquitectura propuesta contempla:

- ✓ La ejecución en el Nodo Sensor de una Estrategia Ahorro de Energía (AAE-NS: Algoritmo de Ahorro de Energía –Nodo Sensor).
- ✓ La ejecución de una estrategia en el *BE* como algoritmo de Ahorro (AAE-BE: Algoritmo de ahorro de energía –*Back End*).

- ✓ Un mecanismo de notificación desde el *BE* hacia el *Nodo* para realizar el ajuste de frecuencia o entrar en algunos casos, al modo reposo, esto se logra mediante un protocolo de retroalimentación hacia el *Nodo Sensor*, tal como se puede observar en la figura 6.2.

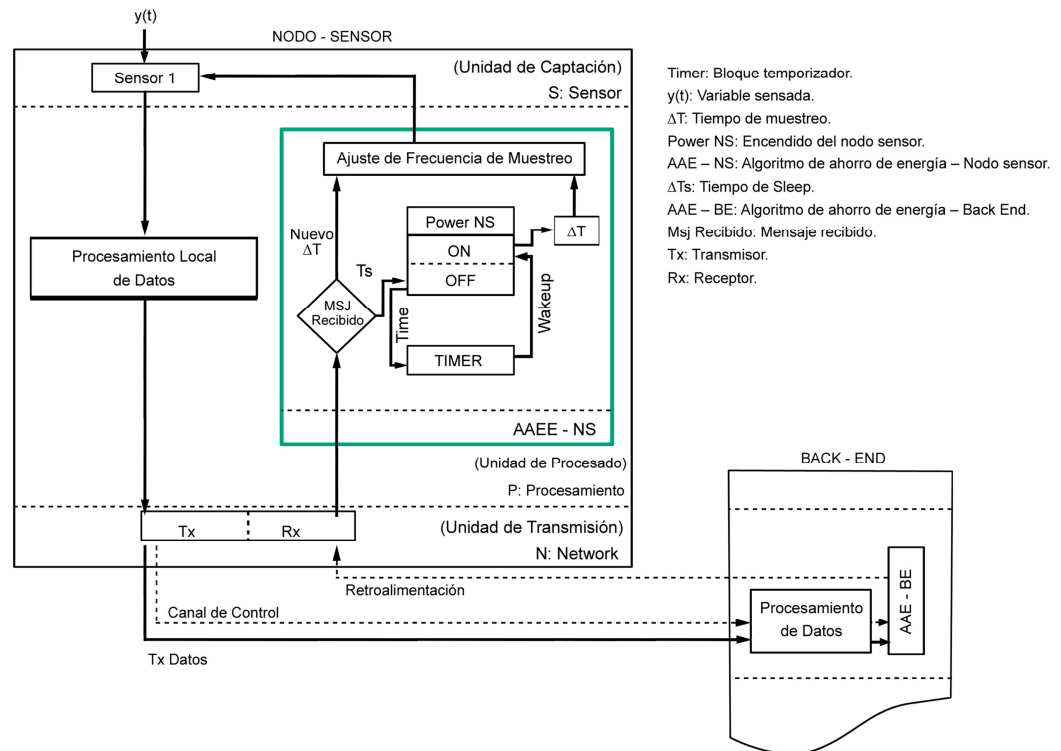


Figura 6.2 Arquitectura de red.

El diseño propuesto en este trabajo se centra en el *Nodo Sensor* directamente, apoyado por una terminal de computo definida como el *Back End (BE)*, tal como lo muestra la figura 6.1, en este esquema se observa la arquitectura de la estrategia: **“Muestreo predictivo como estrategia de ahorro de energía en una red de sensores inalámbricos, RSI”**.

La figura 6.2 muestra una comunicación bidireccional, proporcionada por el protocolo haciendo uso de su *transceiver (TX / RX: transmisión y recepción de la información de la RED)*, compuesta entre el *Nodo Sensor* y el *Back End*. En este diagrama se puede observar la comunicación establecida entre ambos dispositivos; la estructura y la actividad de cada uno de ellos es la siguiente:

1. **El *Nodo Sensor***: dividido en tres secciones:

- **S:** sensor, encargado de capturar la información del medio físico, cuya frecuencia es controlada desde el bloque de Procesamiento según la estrategia implementada en el algoritmo de ahorro de energía para éste.
- **P:** procesamiento, en esta etapa definida como la unidad de procesado se presentan varios estados: el primero es el acondicionamiento de la señal ($y(t)$) que entrega el sensor, que no es más que la conversión del dato Análogo a Digital; el segundo es el registro de los datos procesados (bloque definido en la figura como Procesamiento Local de Datos), y el tercero es el control en el procesamiento, siendo este último el bloque que representa el Algoritmo de Ahorro de Energía en todo el Nodo Sensor (AAE-NS), encargado de ajustar la frecuencia de muestreo en el sensor, algoritmo que se activará según el mensaje de predicción recibido desde el BE. En este procesamiento se desarrolla lo siguiente:
 - El Nodo Sensor una vez encendido, empieza a realizar el envío de los datos del medio con un periodo de muestreo nominal inicial, sin depender de la comunicación con el BE, éste inicia el protocolo de comunicación respectivo con el BE con el fin de iniciar la estrategia de ahorro colaborativa.
 - El bloque que se encuentra en este nodo definido como AAE-NS, está encargado de procesar la información de los mensajes recibidos desde el BE, ejecutando dos tipos de tareas: la de reducir la frecuencia de muestreo (nuevo ΔT), es decir, ajustar el tiempo con que se adquieren los datos del medio físico, según la naturaleza de la señal sensada o la de llevar inclusive al dispositivo a apagar el *transceiver* o el radio de transmisión del Nodo Sensor, poniendo al dispositivo en un tiempo de desactivación o de dormido (T_s).
 - En este bloque se encuentra un elemento condicional encargado de mantener el Nodo en modo encendido o apagado (ON / OFF), siendo este último el modo de reposo del nodo, cuando el dispositivo se debe activar nuevamente (*wakeup*) lo hace gracias al recurso de un temporizador (*timer*) asignado para llevar el control del tiempo requerido para el modo de desconexión. Cuando el Nodo se apaga parcialmente o entra a modo de dormido, deja encendido su *timer*, con el fin que este genere una interrupción en el momento que haya terminado su tiempo de reposo (T_s), permitiendo con esto restablecer la actividad del Nodo Sensor, es decir, poniéndolo en modo de encendido (ON), en este momento el algoritmo

recupera el último ΔT con el que se fue a la desconexión, con el fin de hacer el muestreo de la señal.

- **N: red**, es la parte que facilita la comunicación entre el Nodo Sensor y el *BE*, en este bloque se encuentra el radio de transmisión (*Tx/Rx*), "*Tx*" es el módulo que transmite la información al *BE* y el "*Rx*" es el módulo que recibe los mensajes del *BE* permitiendo lo siguiente: la transmisión de los datos al *BE*, el canal de control hacia el mismo y la realimentación que hace el *BE* al Nodo Sensor, tal como lo muestra la figura 6.2.
2. **El back End:** el bloque del *BE* es el encargado de ejecutar el Algoritmo de Ahorro de Energía (*AAE-BE*) de una forma colaborativa con el Nodo Sensor, este bloque está dividido en dos sub-bloques:
- **Procesamiento de Datos**, este sub-bloque recopila la información que le envía el Nodo Sensor, en esta primera etapa se hace una recopilación de datos con el fin de formar una semilla de datos para ser entregados al siguiente sub-bloque para ser procesados en el algoritmo respectivo de ahorro.
 - **Algoritmo de Ahorro de Energía en el Back End (*AAE-BE*)**, tiene la tarea de procesar la información dentro del algoritmo de ahorro, los resultados que este genere permitirán una disminución de energía en el Nodo Sensor. Dichos resultados serán enviados como un mensaje desde el *BE* al Nodo Sensor (retroalimentación), que consiste en la variación del ajuste del tiempo de muestreo ΔT que debe tener el sensor para la adquisición de los datos, dicho ajuste puede aumentar tanto el tiempo de muestreo que disminuiría la frecuencia del mismo, llevando el Nodo inclusive a un modo de reposo o de desconexión, es decir, el *BE* le transmite dos tipos de mensajes diferentes al Nodo Sensor tal como se explica en el protocolo de comunicación, uno es el ajuste del tiempo de muestreo con que se captura la información del medio y el otro es el tiempo de reposo T_s que debe tener el Nodo Sensor para su desconexión, según los resultados generados por la estrategia de ahorro.

6.2 Protocolo de comunicación.

Antes de entrar más en detalle en el diseño de la estrategia, es necesario saber cómo se crea el **protocolo de comunicación de la red**. Este protocolo está establecido por un conjunto de reglas implementadas en los dispositivos, con el fin de entablar una comunicación entre sí a través de la red, a continuación de definen varios puntos relevantes que facilitan dicho protocolo:

1. **Definición de servicio:** este protocolo consiste en reportar desde el *BE* al Nodo Sensor el ajuste del tiempo de muestreo (ΔT) de los datos que son sensados o el tiempo de reposo (T_s). El servicio es reportar el ajuste en frecuencia de muestreo de los nodos y el tiempo de reposo del Nodo.
2. **Suposición del entorno:** la comunicación establecida tiene las suposiciones que se generan en el entorno de la red:
 - La red debe ser bidireccional.
 - Los procesos de autenticación, autorización y encriptación lo ofrece la tecnología de red subyacente y no se contemplará en este protocolo.
 - Se asume una red subyacente libre de errores.
3. **Vocabulario de mensajes (Vm):** en este paso de la definición del protocolo, existe dos tipos de mensajes: el ajuste del periodo de muestreo " ΔT " y el tiempo de modo reposo, ambos se ejecuta en el nodo sensor (T_s).
 $V_m = \{\text{ajuste}_f, \text{tiempo reposo}\}.$
4. **Codificación del mensaje:** dado que son dos mensajes diferentes que se transmiten al nodo, la codificación de cada uno de ellos se representa de la siguiente forma:
 - Para el primer tipo de mensaje, se usa un mensaje de 5 bytes, en el primer byte se envía un carácter " T " seguido de un valor en *binario* que representa el valor del tiempo de ajuste.
 - Para el segundo tipo de mensaje, que es el tiempo de reposo, se envía el mismo mensaje de 5 bytes, pero en el primer byte se envía un carácter " S " seguido de un valor en binario en los 4 bytes restantes, representando estos el valor del tiempo de desconexión del nodo (modo *sleep*). Esta codificación se realiza para que el Nodo Sensor ejecute la aplicación de gestión dada por el *BE*. Tanto la figura 6.3 como la 6.4 se dan a conocer la codificación del mensaje enviado en el protocolo.

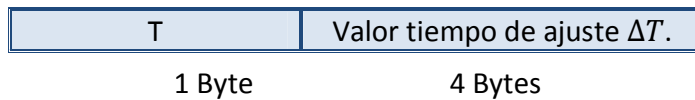


Figura 6.3 Codificación para el Tiempo de ajuste.

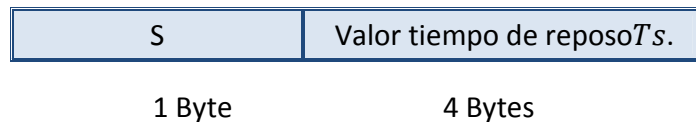


Figura 6.4 Codificación para el tiempo de reposo.

5. **Reglas del protocolo:** realmente este paso es muy básico, pero igual de importante, es una regla definida como **NO Orientada a la Conexión (NOC)**, donde el *BE* le envía una solicitud al Nodo, pero éste no recibe una respuesta de llegada.

En el diagrama de tiempo que se muestra la figura 6.5, se establece la siguiente comunicación:

- El responsable de iniciar la red es el Nodo Sensor, cuando éste se enciende hace el proceso de búsqueda del *BE* para asociarse y transmitirle la información respectiva, inicialmente el nodo le transmite sus parámetros de configuración, entre ellos el tiempo nominal inicial de muestreo con el cual estará sensando los datos del medio físico, una vez entablada esta comunicación, el nodo le envía al *BE* los datos que está capturando del medio.
- Luego de entablada la comunicación, el *BE* procesa la información recibida desde el Nodo Sensor, para luego realimentar el Nodo Sensor con los resultados que permitan una disminución de energía en este. Esta retroalimentación al Nodo Sensor, se hace enviándole dos tipos de mensajes, los cuales han sido ya tratados en los temas anteriores.

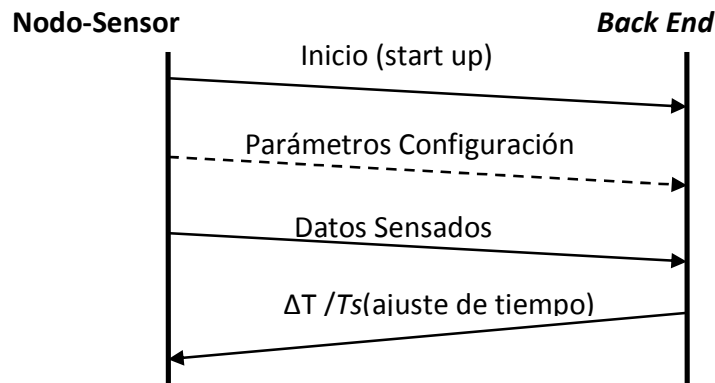


Figura 6.5 Reglas de Protocolo

- ✓ La regla de protocolo se define como un protocolo **“Asincrónico Sin Confirmación”, NO Orientado a la Conexión**. La entidad activa que emite los requerimientos es el **Nodo Sensor** y la entidad pasiva es el **BE** que recibe los requerimientos.

6.3 Diseño de la estrategia.

El diseño se centra en la propuesta de una técnica de ahorro de energía gestionada en diferentes módulos del **Nodo Sensor** (módulo de conversión Análogo a Digital “A/D”, módulo de transmisión/recepción de datos, módulo de reposo o desconexión), ajustando el tiempo nominal inicial con que se muestrean los datos a partir de una estrategia de pronósticos de datos que se ejecuta en el **Back End** de forma cooperativa con el **Nodo Sensor**, obteniéndose así, el mínimo procesamiento en la conversión de las señales análogas a digitales en los datos capturados y en los datos transmitidos hacia el **Back End** o facilitando al **Nodo Sensor** entrar al modo reposo; dicho ajuste hace que en un determinado tiempo, según la naturaleza de los datos, debido a la reducción de la frecuencia de muestreo, permita que el **Nodo** entre a un modo de reposo o desconexión temporal igual a T_s , evitando estar activo en momentos que no se requiere, característica que facilita el ahorro de energía en el **Nodo Sensor**, este resultado puede darse bien sea por el error que se esté dando en la estimación de los datos o por la estabilidad de la misma predicción de ellos.

Con lo anterior, se puede deducir que el diseño de esta propuesta no ejecuta el procesamiento de la estrategia relacionada con el pronóstico de los datos en el **Nodo Sensor** debido al alto cálculo computacional, es por eso que este diseño presenta una arquitectura en la red de tal manera que la estrategia de ahorro de energía es colaborativa entre el **Nodo Sensor** y el sistema **Back End (BE)** de una red, siendo esta última donde se recibe la información transmitida por el **Nodo Sensor**, para

retroalimentarle su pronóstico en el cambio de la frecuencia de muestreo de los datos o el tiempo de reposo.

La matemática de Pronósticos usada en este diseño (*AAE-BE*), facilita predecir el comportamiento de la información recibida del medio físico, basada en los datos históricos obtenidos de los mismos registros adquiridos de la variable sensada. Estos datos hacen parte de un arreglo que se hace en el algoritmo, el análisis estadístico que se hace para determinar el ajuste del tiempo de muestreo, luego de haber analizado el patrón de los datos, está basado en la función ΔT , la cual es:

$$f(\Delta T) = (e, T_{actual}) \quad 6-1$$

Recordar que el *error "e"* es el parámetro hallado entre la diferencia del *valor real* y el *estimado*, *Tactual* es el valor asignado por defecto en el muestreo inicial de los datos y dependerá del tipo de variable a sensar (tiempo nominal inicial).

Para el diseño de la estrategia se debe saber que el *error mínimo* permisible se encuentra entre un límite o umbral establecido por los requerimientos del sistema, este dependerá de varias consideraciones, por ejemplo: el tipo de variable a sensar, la precisión que se requiere en su medida y su pronóstico deseado. Igualmente, el margen de *error* es establecido conociendo todo el sistema implementado en la red. El cual se puede encontrar de la siguiente forma:

- ✓ El error mínimo en la medida de la variable a sensar.
- ✓ El rango en las mediciones de la variable, por lo tanto, la diferencia entre ellas es el 100% de la magnitud a medir.
- ✓ En las condiciones que se diseñe la estrategia, se debe asumir un error porcentual del e% teniendo en cuenta que su valor puede variar según los factores que inciden en la función del ΔT .

El rango del error está establecido por:

$$e \% \text{ mín} < e \% < e \% \text{ máx} \quad 6-2$$

- *e % mín*: error porcentual mínimo establecido por el usuario y no debe ser menor que el permisible de la red o el sistema.
- *e % máx*: error porcentual máximo establecido por el usuario, es limitado por el usuario conociendo las necesidades en el sistema.

Para el análisis y selección del $e\%$ se presenta la siguiente función en relación al *error*:

$$f(\bar{e}\%) = \begin{cases} e\% \text{ máx}, & \Delta T = \Delta T_{\min} = T_{\text{inicial}} \\ e\% \text{ mín}, & \Delta T = \Delta T_{\text{máx}} \end{cases} \quad 6-3$$

De donde la selección del ΔT depende directamente de la siguiente relación:

$$e\% \approx 0 \therefore \Delta T \times k_{\text{max}} \quad 6-4$$

$$e\% \geq e\%_{\text{máx}} \therefore \Delta T \times k_{\text{min}} \quad 6-5$$

Es decir, las ecuaciones 6.3 a la 6.5 se pueden analizar así: a menor error se generará un parámetro de ajuste del ΔT con un valor alto con el fin que la actividad del *Nodo Sensor* disminuya, para valores de errores porcentuales muy grandes, cercanos al máximo, se afectará el ΔT llevándolo a valores pequeños llegando al mismo *tiempo nominal inicial* con que empezó el *Nodo*. El valor de “ k ”, factor que ajusta la función, se define como un parámetro de suavizamiento, este varía según el valor del *tiempo nominal* del sistema, se recomienda un valor constante que se debe ajustar por tanteo y error según la variable a sensar, este factor permite que el ΔT aumente proporcionalmente al error de la estimación.

Dado que el ΔT es el parámetro principal de la estrategia, este diseño se enfoca en el análisis matemático para hallar la función “ ΔT ” usando la Distribución Normal, teoría expuesta en el capítulo 5 (ítem 5.3.5), este método da solución al problema planteado en este trabajo (capítulo 2). Dicha función se detalla en la ecuación 6.6.

Entrando un poco más en el diseño de la estrategia de ahorro de energía en los nodos sensores, se empezará con una descripción en el tipo de mensaje que recibe el *Nodo* del *T's* para entrar al modo reposo (ver figura 6.2), en el *AAE-BE* que se realiza en el *Back End*, se presenta lo siguiente: cuando se ha determinado el ajuste del tiempo de muestreo, se verifica que éste no haya superado el tiempo límite para que el *Nodo* pueda ingresar al modo reposo, si el tiempo es mayor a éste, el *Nodo Sensor* entra en modo de desconexión temporal (estos límites de tiempo se configuran según el comportamiento o tipo de variable a sensar), este valor se asume dentro de la estrategia, ya que, se establece que una vez que el sistema ha alcanzado un punto de estabilidad en los resultados dados por el pronóstico (un valor de ajuste creciente constante en el tiempo de muestreo) basado en sus datos analizados se pueda entrar a un modo de desconexión temporal. Esta información se puede apreciar más adelante en el diagrama de flujo y en el pseudocódigo realizado en el sistema.

El diseño de la estrategia se muestra a continuación en tres etapas:

- La primera es la implementación de una Máquina de Estados Finitos en el Nodo Sensor.
- La segunda en un Diagrama de Flujo que indica cómo se trabaja el algoritmo de ahorro de energía en el BE "AAE-BE".
- La tercera en el Seudocódigo de la estrategia de toda la Red.

6.3.1 Diseño de la estrategia en el Nodo Sensor.

Este punto se basa en el desarrollo de una Máquina de Estados Finitos, en la figura 6.6, se puede observar el modelo que se implementa en el nodo sensor, diseño básico en la estructura de su programación, la actividad de éste se enfoca en ajustar el tiempo de muestreo con los cuales adquiere los datos del medio físico y además, en entrar al modo reposo o de desconexión por un tiempo definido denominado T_s .

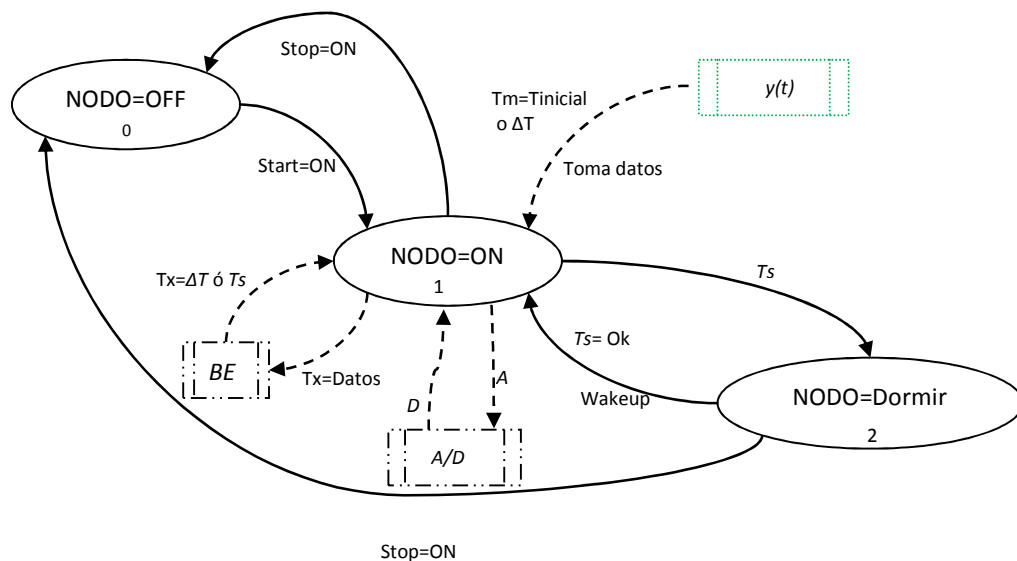


Figura 6.6 Algoritmo diseñado en el Nodo Sensor, Máquina de Estado Finitos.

Definición de variables:

$y(t)$ -> Señal análoga capturada del medio físico o ambiental (temperatura, humedad, etc).

T_m -> Periodo de muestreo de la señal sensada.

T_x -> Transmisión de Datos, variable sensada.

ΔT -> Ajuste de periodo de muestreo de la señal sensada.

T_s -> Tiempo de reposo del nodo sensor.

A -> Datos Análogos.

D-> Datos Digitales.

El diseño de la máquina de estado finito está compuesto por 3 estados:

- **Estado cero:** en este estado se encuentra el Nodo Sensor apagado esperando que sea encendido o activado.
- **Estado uno:** una vez se da la señal de transición de encendido al Nodo en el estado cero, se entra al segundo estado, la acción inicial en este estado es realizar el sensado de los datos del medio físico " $y(t)$ ", este estado presenta varias señales de transición de salida, una de ellas es el evento que ocurra un apagado del Nodo Sensor, la cual tiene como fin ir a la transición del estado inicial, la otra es la señal de salida hacia el estado dos, ésta se da según el tipo de mensaje recibido desde el *BK*, en este caso es el T_s parámetro que pondrá a dormir el Nodo Sensor. Además se presentan otras señales paralelas (líneas punteadas en la figura 6.6) a las demás señales de este estado, estas son: la señal, hacia el medio físico con un tiempo de muestreo variante según el tipo de mensaje que se reciba del *BE*, la señal al bloque de conversión análoga a digital y la señal hacia el bloque del *BE*, con el fin de entablar la estrategia de ahorro colaborativa con el Nodo Sensor.
- **Estado dos:** este estado se da cuando el procesamiento de la información que se ha realizado y analizado en el bloque del *BE* determina por medio de un mensaje que el Nodo Sensor debe entrar o pasar a modo reposo por un determinado tiempo. La activación del Nodo (*wakeup*) se producirá después del tiempo ejecutado del T_s gracias a la interrupción que se genera por un temporizador definido como el *timer*.

6.3.2 Diseño de la estrategia en el *Back End*.

En la figura 6.7 se observa el diseño macro de la estrategia desarrollada en el *BE*, cerebro de la estrategia de ahorro de energía. El pseudocódigo presenta varias estructuras diseñadas bajo el esquema matemático desarrollado, diseño que consiste en lo siguiente:

1. Se almacena una semilla de datos, en el bloque de procesamiento de datos (ver figura 6.2), previamente recibidos por del nodo, con esta información se inicializa un análisis estadístico encargado de encontrar dos parámetros importantes, el ajuste del tiempo de muestreo y el tiempo de reposo para el dispositivo:

$V_m = \{ajuste_f, tiempo\ reposo\}$.

2. Los datos recibidos son procesados para verificar el comportamiento de ellos, es decir, distinguir su patrón: en este trabajo sólo se trabaja con datos que presentan un patrón de tendencia positiva o negativa y datos estacionarios; si los datos analizados son de otro tipo, por ejemplo aleatorios, simplemente el algoritmo no ejecuta ninguna estrategia y se dedica solo a tomar datos y a mirar su comportamiento, hasta que el patrón cambie. El diseño de la función para determinar el patrón de los datos es:

```
suma = 0;  
para j = 1 : (magnitud(prom)-1)  
    suma = suma + (prom(j+1)-prom(j))/(length(prom)-1);
```

Donde se hace un arreglo del tamaño de la magnitud de los datos promediados a partir de los registros históricos adquiridos y se aplica la operación *suma* que determinará el patrón de la información, para ello se tiene que:

➤ *prom*: es el promedio móvil de los n datos consecutivos dentro del arreglo.

3. Si el patrón de los datos arroja un resultado donde la información recibida es de tendencia, se procede a la estrategia matemática que permitirá pronosticar este tipo de comportamientos, la ecuación diseñada para esto se da en el marco teórico en el ítem 5.3.1.
4. Sí, por el contrario el patrón de los datos es de tipo estacionario, el algoritmo diseñado ejecuta la estrategia para este tipo de comportamientos, es decir, a partir de una ventana de datos se hallan los promedios móviles y con éstos se calcula los promedios móviles dobles, teorías expuestas en el ítem 5.3.2 y 5.3.3, con sus respectivas ecuaciones.
5. Una vez resuelto los puntos anteriores, se calcula el *error porcentual* válido, parámetro que está contemplado como el límite máximo que se permite en el sistema con respecto al pronóstico diseñado. Es decir, es el umbral del error de aceptación en el pronóstico ($e\% = y - \hat{y}$).
6. En cualquiera de las estrategias seleccionadas, el diseño del sistema trabaja siempre y cuando los datos estimados se encuentren dentro del límite del error

permisible, el algoritmo procederá a calcular el nuevo ajuste del tiempo de muestreo (ΔT (ms)) de los datos que se ejecutará en el Nodo Sensor. Este parámetro se diseña con base a la teoría de la *Distribución Normal* o *Campana de Gauss* (en el capítulo de resultados se argumenta tal decisión), tal como se indica en la siguiente ecuación:

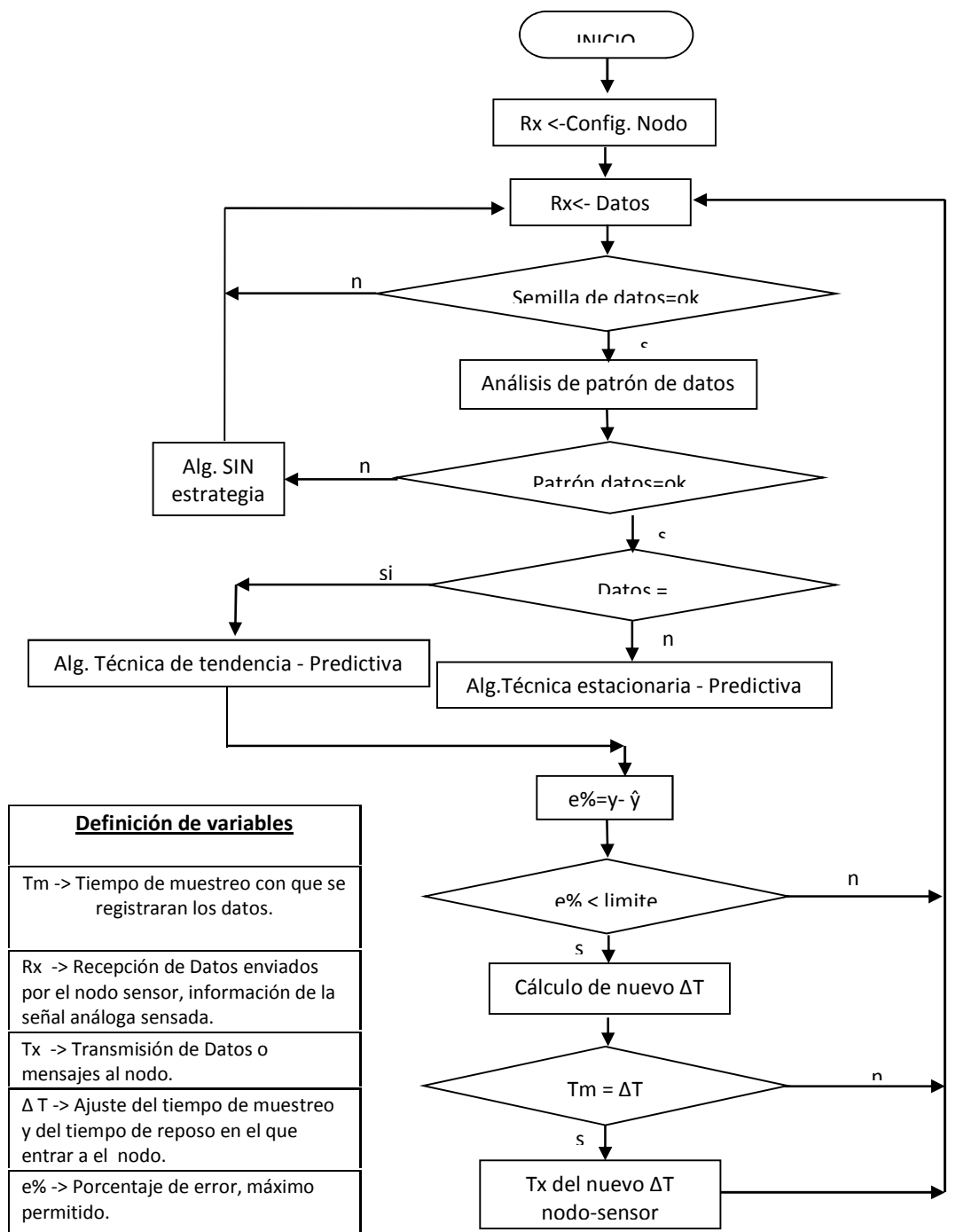
$$\Delta T = T_{muestreo} * (1 + max * e^{-\left(\frac{(PromErr-m)^2}{2*(\sigma)^2}\right)}) \quad 6-6$$

Siendo:

- ***Tmuestreo***: valor inicial del tiempo de muestreo de los datos a capturar.
- ***Max***: factor que multiplica la función, este varía según el valor del *Tinicial* del sistema. Dependerá del tipo de la variable que se desee muestrear o sensar.
- ***PromErr***: valor del error porcentual, este valor dependerá de la variable que se desea medir y del error mínimo de la medida del sistema.
- ***Sigma* (σ)**: es el valor de la dispersión en la campana de Gauss, el diseño se realizó con un valor de 1.5(valor hallado haciendo uso del análisis del error, ver capítulo de resultados)para la dispersión de los datos (figura5.1),

$$\sigma = \frac{Ran_err}{3.33}$$
- **ΔT** : parámetro de realimentación hacia el nodo, usado éste para ajustar su tiempo de muestreo de los datos sensados y para llegar inclusive a entrar en el modo reposo o desconexión del dispositivo.
- ***m***: es el valor que se desea trabajar en la media de la campana de Gauss, parámetro que debe seleccionarse bien, con el fin de suavizar los valores límites del ΔT .

A continuación se presenta el diagrama de flujo del sistema diseñado en el *Back End*, figura 6.7.



Definición de variables
T _m -> Tiempo de muestreo con que se registraran los datos.
R _x -> Recepción de Datos enviados por el nodo sensor, información de la señal análoga sensada.
T _x -> Transmisión de Datos o mensajes al nodo.
Δ T -> Ajuste del tiempo de muestreo y del tiempo de reposo en el que entrar a el nodo.
e% -> Porcentaje de error, máximo permitido.

Figura 6.7 Algoritmo diseñado en el *Back End*.

A continuación se presenta el Seudocódigo global diseñado para el algoritmo de ahorro de energía en el *Back End* - *AAE_BE*.

%inicialización de variables

Pattern=Cont_err=PromErr=0

%consumos de energía, estos son valores dados según fabricante de nodos sensores

Cargar valores de:

CEA = Consumo de energía en actividad

CEI = Consumo de energía por Instrucción

CER = Consumo de energía por Recepción

CES = Consumo de energía cuando se encuentra en modo reposo

CEWU = Consumo de energía en Encendido / Apagado

%Inicio Programa

Visualizar "Toma Datos Línea"

Imprimir Vectores en pantalla (tiempo-variable-pronóstico-error-patron-ΔT-consumo)

Tactual = Tmuestreo % ΔT ajustado

TiempoA=cont=0;

*mientras (TiempoA<=TiempoD*60 || cont<Window || cont<NumDatos)*

Cont=cont+1

si (Datos son reales)

Temp=Datos

Time=clock()-clock_s;

si (time es ≥ hr-min-seg)

Haga ajuste de time

sino

tiempoA=time

si (cont>1)

ΔT=Tactual

*Consumo=(CEsleep*ΔT+CEActivo*1+CEInstru+CETx+CERx)/ΔT*1000;*

fin_si

% Cálculo de Promedio Móviles Simple "PMS"

si (cont>=window)

PMS=0;

para (cont2=(cont-window+1):cont)

PMS=cont2/window + PMS

```

        Finpara
        PMS=PMS
    fin_si
    % Cálculo de Promedio Móviles Doble "PMD"

    si (cont>=2*window)
        PMD=0
        Para cont2=(cont-window+1):cont
            PMD=cont2/window + PMD
        fin_si
        PMD=PMD
    fin_si

    % Análisis de datos estadísticos

    si (cont>1)
        si (mod(cont,NumDatos)==0 | Patron≠0)
            Cálculos estadísticos
            Media,promedio,desviación,patrón
        fin_si
        si (patrón ≠ numero)
            patrón=0:
        fin_si
    sino
        patrón=0
    fin_si

    %cálculo de pronósticos basados en datos estadísticos

    si (patrón<=0.2 && patrón>=-0.2 &&predicción ≠ 0)

        %Cálculo de pronóstico y error (estacional)

        error=0
        si (cont>2*window)
            a=2*PMS-PMD
            b=window/(window-1)*(PMS-PMD)
            si(predicción ==1)
                 $\hat{y} = a + b * x$ 
            sino (predicción==2)
                 $\hat{y} = a$ 
            fin_si
        fin_si
    fin_si

```

```

    fin_si
    errorP=|error|/(y)*100
    %cálculo del pronóstico y error (tendencia)

    x2=cont-window+1:tiempo
    y2=cont-window+1:y
    coeficientes=coefic.polinomio(x2,y2,n)
     $\hat{y}=(coefic(1))*(tiempo+tactual/1000+x)+coefic(2)$ 
     $\hat{y}=coefic(1)*x+coefic(2)$ 
    error=y- $\hat{y}$ 
    errorp=|error|/y*100
sino
     $\hat{y}=0$ 
fin_si

%Ajuste del tiempo de muestreo haciendo uso de la técnica de la
% distribución normal

max=100    % parámetro de ajuste según tipo de datos sensados
si (patrón  $\neq$  número)
    patrón=0
fin_si
si (predicción ==0)
    Tactual=Tmuestreo
sino
    NumErr=1
    si (errorP<=Ran_error)
        PromErr=(PromErr+errorP)/NumErr
        Cont_error=cont_error+1;
        si (cont_error>= NumErr)
            Calcular Tactual con ecuación de Gauss
            Cont_error=0
            PromErr=0
        fin_si
    sino % error fuera del rango
        cont_error=PromErr=0
        Tactual=Tmuestreo
    fin_si
fin_si
si (Tactual<Tmuestreo)
    Tactual=Tmuestreo
Sino

```

```

    si(Tactual>Tmuestreo*max)
    Tactual=Tmuestreo*max
    fin_si
    si (cont<=NumDatos || cont<=2*window)
        Tactual = Tmuestreo
    fin
    si (Tactual>=límite en minutos)
        TactualSleep=Tactual
        Transmitir al nodo TactualSleep
    sino
        Transmitir al nodo Tactual
        Imprimir Datos en BE
    fin_si
    fin_si
    fin_si

```

7 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.

Con el fin de evaluar el diseño de la estrategia desarrollada en este trabajo, se establece una serie de experimentos que permiten observar el comportamiento de la misma en diferentes condiciones. Este diseño experimental se desarrolla luego de haber analizado y validado diferentes métodos y/o algoritmos matemáticos que permiten predecir el comportamiento de diferentes patrones de datos. A continuación se presenta el resultado de la estrategia que logra alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo.

En este trabajo la gestión de ahorro de energía se hace sobre uno de los nodos sensores de una RSI, las pruebas se realizan utilizando el Nodo Sensor sólo haciendo toma de datos del medio físico, dejando aún lado las tareas de enrutamiento de paquetes provenientes de la red, en este caso la señal sensada es la temperatura ambiente del laboratorio de la Universidad; en los ensayos realizados la potencia de transmisión de los nodos se estableció en un valor fijo de 0dB.

A continuación se detalla el diseño de experimentos en diferentes etapas.

7.1 Implementación del sistema.

En la figura 7.1 se puede apreciar la interfaz de usuario, ésta presenta el algoritmo de Ahorro de Energía en el BE desarrollado en *Matlab*, parámetros de configuración que fueron explicados en el capítulo 6 de este trabajo.

En el desarrollo de este trabajo se ha indicado que el *BE* es la parte principal en el diseño de la estrategia. El *BE* se configura utilizando un menú principal (ver figura 7.1), tal como se explicó en el capítulo de diseño. A continuación se da una breve explicación de los ítems más relevantes del menú:

- El tiempo total que trabajará el sistema o la estrategia de ahorro de energía en el Nodo Sensor se establece en minutos.
- Cantidad de datos que se quieren analizar, esto es el número de datos que requiere la función implementada en el algoritmo para identificar el patrón de los datos: datos con tendencia positiva o negativa y datos estacionarios. Por lo regular se trabaja con un valor de 10 datos como mínimo.
- Ventana de promedios móviles, información requerida para la estrategia implementada, la cual está basada en promedios simples y promedios dobles, si

los datos son estacionarios, de lo contrario no es usado cuando éstos presenten otro patrón, tema ya explicado en el capítulo anterior.

- El tiempo de muestreo inicial, es el tiempo mínimo en milisegundos para la adquisición de los datos, CON o SIN estrategia.
- Cantidad de muestras a predecir, es el horizonte con que se desea la predicción o pronóstico de los datos.
- En el ítem de Predicción se tiene las siguientes consideraciones:
 - **0**: sistema sin predicción, se ejecuta el algoritmo sin ningún cálculo computacional, en este caso la opción se utilizó para validar la estrategia de predicción con la de no predicción, es decir, se corrió un experimento con estrategia y otro sin ella, permitiendo evaluar el consumo de energía en el nodo en cada una de ellas.
 - **1 -ab**: esta opción permite ejecutar un tipo de estrategia con la ecuación de regresión lineal ($\hat{y} = a + b(x)$), donde "x" es el periodo futuro que se desea en el pronóstico, es decir, un instante de tiempo siguiente, dos instantes, y así sucesivamente.
 - **2 -a**: opción que posibilita ejecutar un tipo de estrategia con la ecuación de la Regresión Lineal ($\hat{y} = a$). "a" es un valor hallado de los promedios móviles.
- Por último, el error porcentual permisible en el sistema.

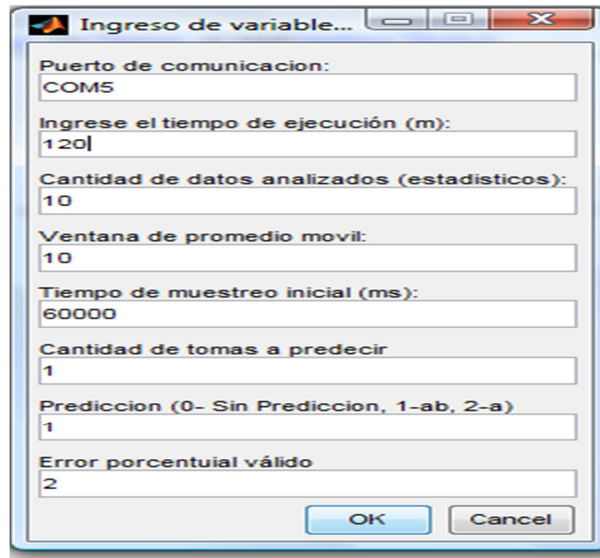


Figura 7.1 Menú principal de la configuración del sistema desde el *BE*.

7.2 Montaje físico: el Nodo y el *Back End*.

El Nodo Sensor, encargado solamente del sensado de las señales análogas o discretas que existan en el entorno y de transmitir las hacia el *BE*, siempre y cuando estén asociados en la RED, para el caso de los experimentos evaluados. La ejecución del sistema se realiza con 2 Nodos Sensores tipo **Imote2**, de Crossbow Inc. uno se usa como Nodo Sensor y otro como estación base (coordinador), también un sistema de cómputo definido como el *Back End*, software realizado en *Matlab*. Las características del Nodo Sensor en cuanto a consumo de energía se presentan en la tabla 7-1, estos datos son utilizados directamente para hallar el consumo total del experimento CON y SIN estrategia. Con estos parámetros se obtiene el promedio del consumo total en un tiempo determinado, tiempo en el cuál se realiza la adquisición total de los datos, en el sistema diseñado. Tener presente que, en caso de cambiar el dispositivo de referencia o de fabricante, se debe modificar en el código del programa principal los valores de consumo del mismo según la hoja de datos de cada dispositivo.

Tabla 7-1 Tasa de consumo de energía del Nodo Sensor [21]

Ítem	Potencia	Observaciones/consumo
CE Activo	0.0096[mJ/ms];	El consumo en actividad.
CE Instrucción	0.000004 [mJ/instr]	Por instrucciones.
CE Transmisión	5.76 [mJ/byte]	Por Tx byte.
CE Recepción	0.88 [mJ/byte]	Por Rx byte.
CE Sleep	0.00033[mJ/ms]	El consumo en modo SLEEP.
CE Wakeup/Sleep	0.24[mJ/vez]	Donde se suma cada vez que se cambia de estado.

- **CE:** consumo de energía.
- **mJ:** mili julios.
- **instr:** instrucción.
- **s:** segundo.
- **ms:** mili segundos.

7.2.1 Modalidad de adquisición de datos.

La adquisición de los datos, se programa de manera que el Nodo Sensor realice el muestreo inicial de la forma cómo fue configurado en el sistema con su valor de tiempo nominal inicial, o sea, tiempo de muestreo de los datos, el Nodo reporta al *BE* una semilla de datos igual al número de veces que realiza la operación de la ventana promedio de los datos seleccionados (ver tabla 7-1); con el propósito de hacer una recolección de datos que serán almacenados en el *BE* y que posteriormente servirán para ser analizados bajo las teorías estadísticas de la estrategia diseñada. Los datos se adquirirán dependiendo de tres etapas diferentes: la primera, es cada periodo de muestreo inicial configurado previamente por el usuario, tiempo nominal de muestreo de datos en el Nodo; la segunda, según el ajuste del tiempo de muestreo que se esté dando como resultado de la predicción de los mismos datos y la tercera, según el tiempo de reposo que se halla asignado por la estrategia luego de haber superado un valor de tiempo de muestreo en su ajuste, en este caso, el tiempo de muestreo superado es un valor de 5 minutos.

Acto seguido en esta modalidad, igual que en el caso anterior, se realiza el sensado de la variable, en este caso de la temperatura ambiente del laboratorio, pero esta vez aplicando los principios vistos en el capítulo del marco teórico y del capítulo de diseño.

Tal como se explicó anteriormente, la función ΔT es el parámetro principal de la estrategia diseñada en este trabajo, el resultado de esta función permite poner el Nodo Sensor en un modo de trabajo más regulado a la hora de muestrear los datos del medio e igualmente,

luego de un límite de tiempo, donde la frecuencia de muestreo se encuentre muy baja, se puede llegar inclusive ejecutar un tiempo de reposo en el Nodo.

El error generado en la estrategia ejecutada es el parámetro hallado entre la diferencia del *valor real* y el *estimado*, el *error* permisible del sistema se encuentra entre un límite o umbral establecido por el usuario, este dependerá de varias consideraciones, por ejemplo: el tipo de variable a sensar, la precisión que se requiere en su medida y su pronóstico deseado. Igualmente, el margen de *error* se establece cuando se conoce todo el sistema implementado, es decir, en éste caso se halla un error instrumental del 0.09%, encontrado de la siguiente forma:

- ✓ El error mínimo en la medida de la temperatura dada por el sensor es de 0.05°C.
- ✓ El rango en las mediciones es entre 16°C y 25°C, por lo tanto, la diferencia entre ellas es de 9°C, esto sería el 100% de la magnitud a medir.
- ✓ Para las condiciones en las cuales se trabaja la estrategia, se asume un error porcentual del 4% teniendo en cuenta que su valor puede variar según los factores que inciden en la función del ΔT , claro que los experimentos arrojan unos errores mucho más aceptables, por debajo del 2% y en la mayoría de los casos por debajo del 1%.

Con base en esto, se plantea diferentes métodos matemáticos que permiten la mejor relación entre el ΔT estimado y el rango del ErrorPorcentual "*e %*" seleccionado para la estrategia diseñada. Dado que el ΔT es el parámetro principal de la estrategia, se plantea diferentes metodologías en los experimentos, con el fin de encontrar la mejor respuesta en la variación de este tiempo en relación con el *error* permitido. Algunas de ellas fueron:

1. Utilizando el método matemático de Regresión Lineal, se puede observar en la figura 7.2 el comportamiento de la función, acá se genera una pendiente entre el ΔT y el *e %*, la pendiente responde muy bien cuando los errores están cercanos a su máximo, pero en errores cercanos al mínimo, los valores de ΔT , aparte de ser muy altos, varían repentinamente y de una forma brusca entre diferencias muy pequeñas en los errores hallados, dicho comportamiento refleja una pendiente muy pronunciada en estos puntos, haciendo que se presente un desempeño poco suave en el ajuste de adquisición de los datos y en el modo reposo del nodo para cuando sea necesario, es por eso que este método se descarta. Se puede apreciar en la figura 7.2 el comportamiento de la regresión lineal y además, se indican las ecuaciones que se implementan en este método, ellas son:

$$\Delta T = \frac{10 * T_{inicial} - T_{inicial}}{e\%_{m\acute{a}x}} \times T_{inicial} (e\%_{medido}) + k_{m\acute{a}x} T_{inicial} \quad 7-1$$

$$e_{medido} = e \%máx - e \%actual$$

7-2

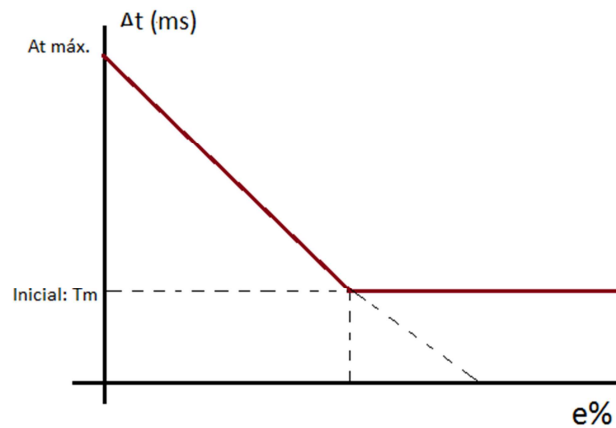


Figura 7.2 ΔT en función de una Regresión lineal.

- Seguidamente y buscando suavizar la respuesta de los ΔT estimados, se implementa una función Hipérbola para hallar el valor del ΔT , con este método se presentaron errores muy similares al caso anterior. En la figura 7.3 se puede observar que la gráfica responde entre el 0% y el 90 % del *error* con una pendiente suave, caso contrario se da entre el 91 % y el 100 % del *error*, donde se aprecia una pendiente pronunciada, haciendo esto que los valores hallados para la función ΔT se presenten muy altos.

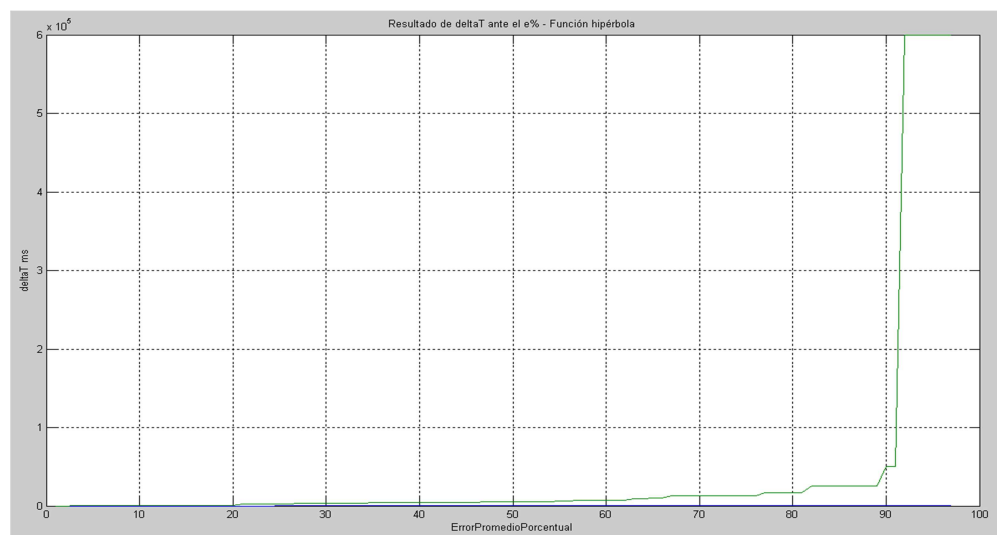


Figura 7.3 Respuesta de una hipérbola.

3. Con los resultados obtenidos en las dos funciones anteriores: función Hipérbola y función Regresión Lineal, y con el propósito de encontrar un buen comportamiento en el ajuste del tiempo de muestreo " ΔT ", se diseña la función del " ΔT " usando la función Gaussiana, teoría expuesta en el capítulo 5 del ítem 5.3.5 de este trabajo, este método matemático genera resultados mucho más satisfactorios en todo el rango del error, incluyendo sus máximos y mínimos. En la figura 7.4 se observa la relación de las variables que inciden en la función ΔT expuesta en la ecuación 6.6. En la puesta en marcha del sistema se utilizan diferentes porcentajes del rango del *error* con el fin de encontrar el parámetro que se ajuste a la estimación del tiempo. En el capítulo siguiente se analizarán sus resultados.

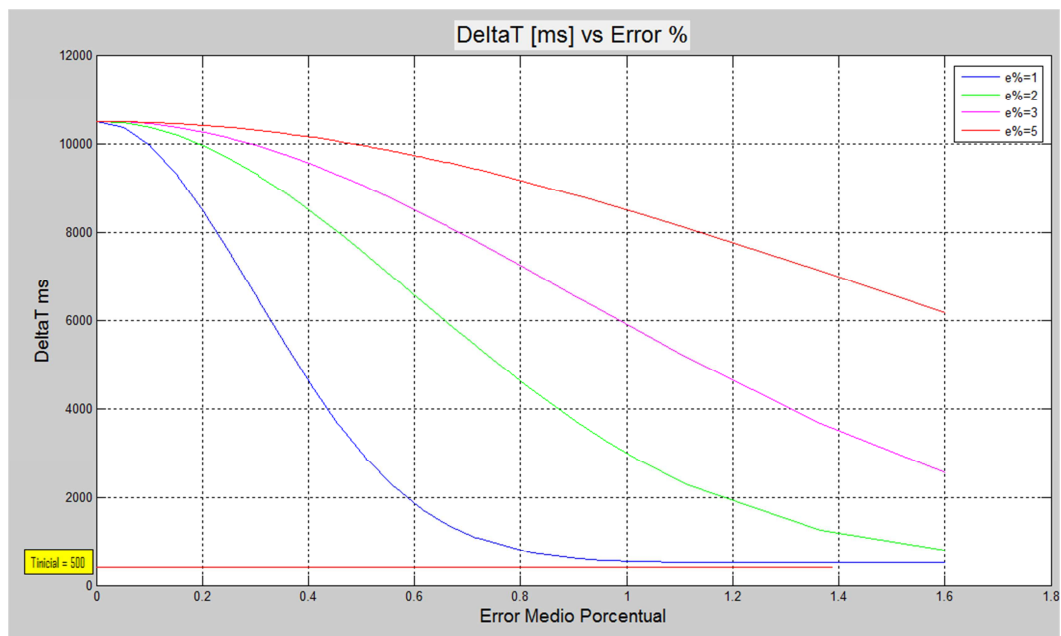


Figura 7.4 Distribución normal ante diferentes errores.

8 Resultados y discusión.

En este capítulo se exponen los resultados logrados en el trabajo y, se da la discusión de los mismos con el fin de consolidar el alcance de la propuesta establecida sobre el ahorro de energía en un Nodo Sensor de una Red de Sensores Inalámbricos.

Es así, que haciendo uso del método de pronósticos basados en promedios simples y promedios dobles sobre un arreglo de datos recopilados en línea y, utilizando la función Gaussiana con el fin de ajustar el tiempo de muestreo en el sensado de la información y enviar al Nodo a un tiempo de reposo temporal, a continuación se exponen los siguientes resultados y análisis dados en este trabajo.

Los resultados se pueden apreciar y analizar a partir de la figura 7.4, allí se observan diferentes gráficas, indicándose un buen resultado en la respuesta Gaussiana cuando es usada para distribuciones con un error permisible del 2 % (ver la gráfica verde), en ella se da un punto de corte cercano al 1.8 % del error, queriendo decir con ello que frente a las demás gráficas se exhibe un comportamiento coherente a los propósitos del trabajo, es decir, ajustado y directamente proporcional a la relación entre el periodo de muestreo y el error permisible, en ella se genera una pendiente no muy inclinada, ni muy achatada; en cualquier rango del error, lo que facilita que hayan cambios normales y no bruscos en los intervalos o ajustes del tiempo de muestreo, resultados que se envían al Nodo Sensor. En la misma gráfica y siguiendo el comportamiento del rango de los errores, se aprecia que las gráficas registradas en el 3 % y el 5 %, se dan con el fin de buscar resultados que se acerquen a las estimaciones planteadas, allí se presenta un efecto aceptable y no se deben descartar, ya que pueden servir para futuras aplicaciones, como por ejemplo si se fuera a sensar otro tipo de variable con patrones de comportamientos diferentes. El hecho que estas dos últimas respuestas no corten el eje del error en 1.8 %, es debido a que cuando se activa la red, se da como resultado *errores* menores a este valor.

8.1 Modalidad CON y SIN estrategia.

En este punto se indican los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas en los experimentos, en ellas se diseña el problema en dos fases; la primera fase **SIN estrategia**, definido por el usuario, ver figura 7.1 (caso 1) y la segunda fase **CON estrategia** para el caso 2.

En la configuración del sistema se tiene en cuenta dos parámetros iguales, el tiempo total de ejecución del sistema: 1 hora y para el tiempo muestreo inicial: 500ms. En la tabla 8-1 se entrega la comparación de los resultados obtenidos en estas modalidades.

Tabla 8-1 Sin estrategia y Con estrategia

	Sin estrategia	Con estrategia	Diferencia
# datos sensados	720	34	686
# patronD	10	10	-
VentanaP	10	10	-
Tinicial (ms)	5,000	5,000	0
Horizonte	1	1	-
Estrategia	0	1	-
ErrorM %	0	4	-
Tiempo ejecución(hr)	1	1	0
PromConsumo(mJ/s)	5.64	0.56	5.08
Total (mJ)	20,311.94	1,309.98	19,001.96

En la tabla se observan datos y diferencias importantes, discusión que se dará con más detalle más adelante para cada uno de los casos. Igualmente, en la figura 8.6 se aprecia el comportamiento del sistema cuando fue evaluado **con** y **sin** estrategia, cada caso se valora en 4 etapas, las dos primeras calculan el *error porcentual* de la variable sensada y el pronóstico que se dio para cada muestreo y el comportamiento obtenido con la función ΔT ; en las otras dos se tiene que, la primera indica la temperatura en grados centígrados y su valor pronosticado y la segunda es el resultado del consumo de energía en cada intervalo de tiempo. A continuación se amplían estos casos.

a. Para el caso1, sin estrategia.

Esta prueba se realiza durante 1 hora y con un tiempo inicial de muestro por el Nodo Sensor de 5 s, parámetros mencionados anteriormente, los resultados obtenidos, mostrados en la tabla anterior fueron: 720 datos muestreados (procesados), lo cual quiere decir que se adquieren 12 datos por cada minuto, generándose en el Nodo un consumo de energía total de 20.31 J y un promedio de consumo de energía total de 5.64 mJ/s.

En la figura 8.1 se dan dos gráficas en las cuales se pueden ver los siguientes resultados:

- En la primera respuesta se observa un *error porcentual* igual a *cero* durante todo el tiempo de ejecución de la prueba, obviamente, es debido a la falta de implementación de un método de ahorro de energía en la red para el Nodo Sensor.
- La segunda gráfica indica que la actividad del Nodo tiene una tasa de muestreo fija, en este caso de 5 s. ($T_{inicial} = \Delta T = 5$ s).

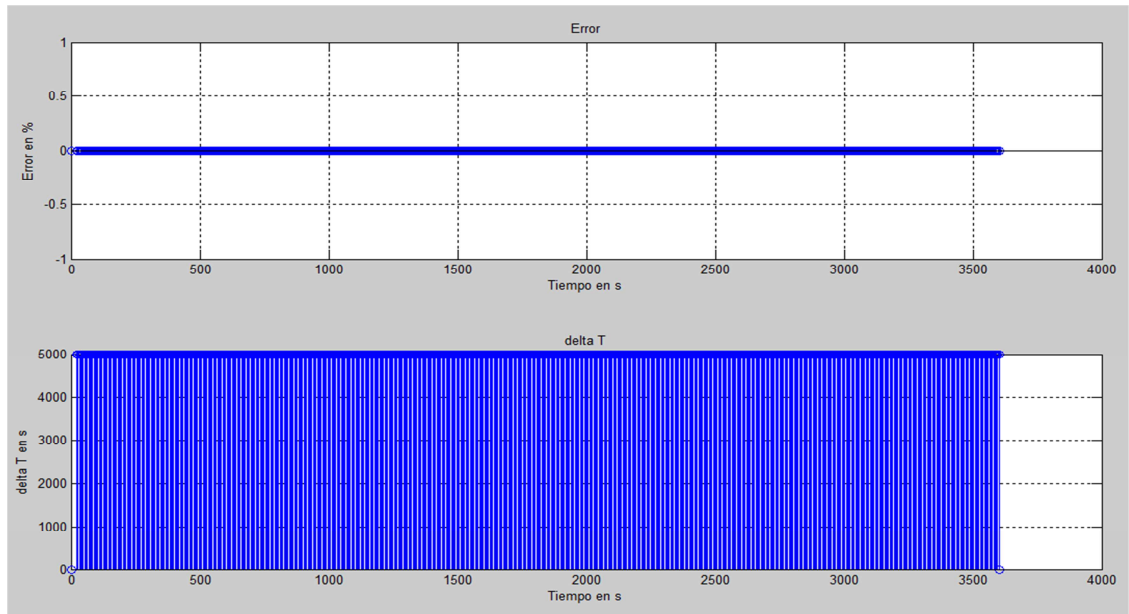


Figura 8.1 Respuesta del sistema sin estrategia ($e\%$ y ΔT)

En la figura 8.2 se dan otras dos gráficas en las cuales se puede ver la respuesta de la variable sensada, en este caso la temperatura, igualmente, el Nodo funcionó por un tiempo de 1 hora, con una tasa de muestreo de 5 s.

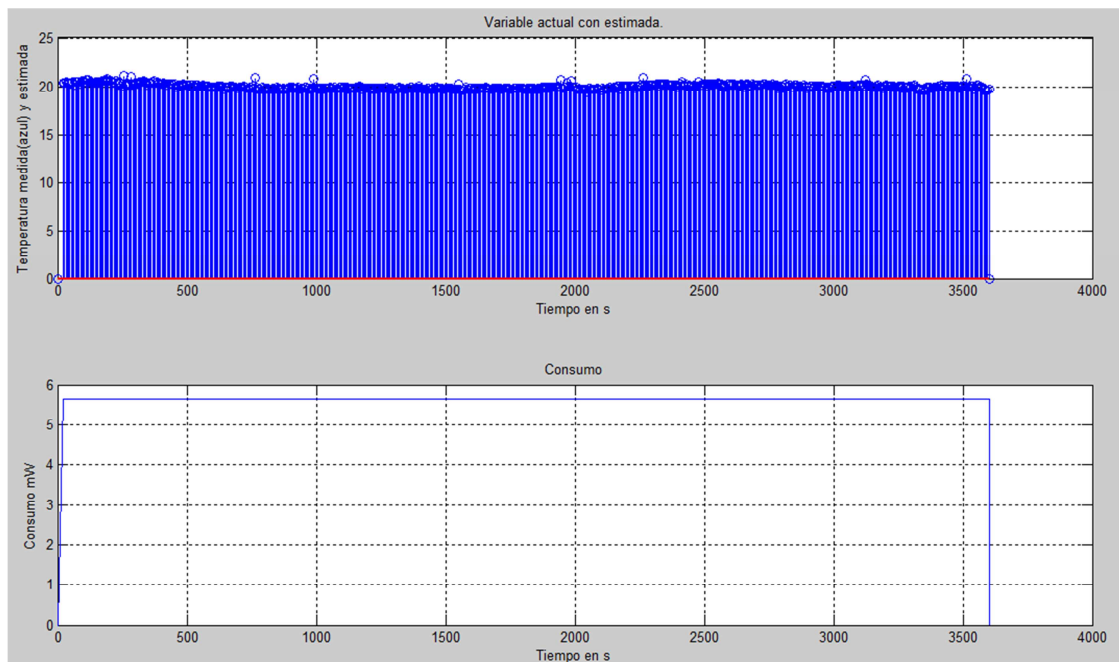


Figura 8.2 Respuesta del sistema sin estrategia (Temperatura y Consumo energía)

Adicionalmente, en la figura 8.2 se muestra la respuesta de consumo de energía del Nodo en mW en cada instante de muestreo, tomado en segundos, indicándose un valor constante de 5.64 mW. Es importante aclarar que el consumo total de esta prueba sin estrategia fue de 20,311.94 mJ, es decir, 20.31 J y un promedio de consumo total de 5.64mJ/s.

b. Para el caso 2, diseño con estrategia.

Teniendo en cuenta los parámetros iniciales iguales al punto anterior, pero, con una estrategia de ahorro de energía en el Nodo, se observa que durante 1 hora y con un periodo de muestreo de sensado inicial de 5 s, se generaron resultados relevantes:

- Registro de sólo 34 datos de la variable medida, menos procesamiento en el Nodo.
- 686 datos menos que el caso 1, disminuyéndose con ello notablemente la actividad del dispositivo.
- Por la actividad del Nodo Sensor sólo se consumió en energía un total de 1.30 J.
- Un promedio de consumo total de 0.56 mJ/s.
- Una reducción del 93.55 % en mJ/s ante el caso 1.

A continuación en la figura 8.3 se muestran dos gráficas, en la primera, se observa la respuesta del *error porcentual* con un valor por debajo del 2 % en algunos puntos, pero, en la mayoría del tiempo de ejecución de la actividad del Nodo fue menor al 1 %, un *error porcentual* bueno para el monitoreo de una variable que presenta un patrón de comportamiento estable, estacionario. Además, se observa en la gráfica una reducción significativa en la actividad del Nodo Sensor, debido al ajuste del tiempo de muestreo " ΔT " que se hace por el algoritmo de ahorro desarrollado, apreciándose una variación acorde a los objetivos planteados en el trabajo, gracias a los resultados entregados por la predicción realizada en el sistema, *AAE-BE*. Además, la función ΔT varía de forma suave en el tiempo de trabajo del Nodo, es decir, se da la orden al dispositivo de ajustar el periodo de muestreo, estos valores hallados se dan entre 493.8 s (8.23 min) para el *máximo valor* y, 135 s (2.25 min) para el *mínimo valor*, tiempo en que el Nodo Sensor varía su trabajo en el sensado de la variable (procesamiento de conversión de A/D) y por ende en la transmisión de sus datos al *BE*, inclusive entrando en *modo reposo*, dejando su actividad de trabajo temporalmente. Resultados que se aprecian mejor en la siguiente gráfica.

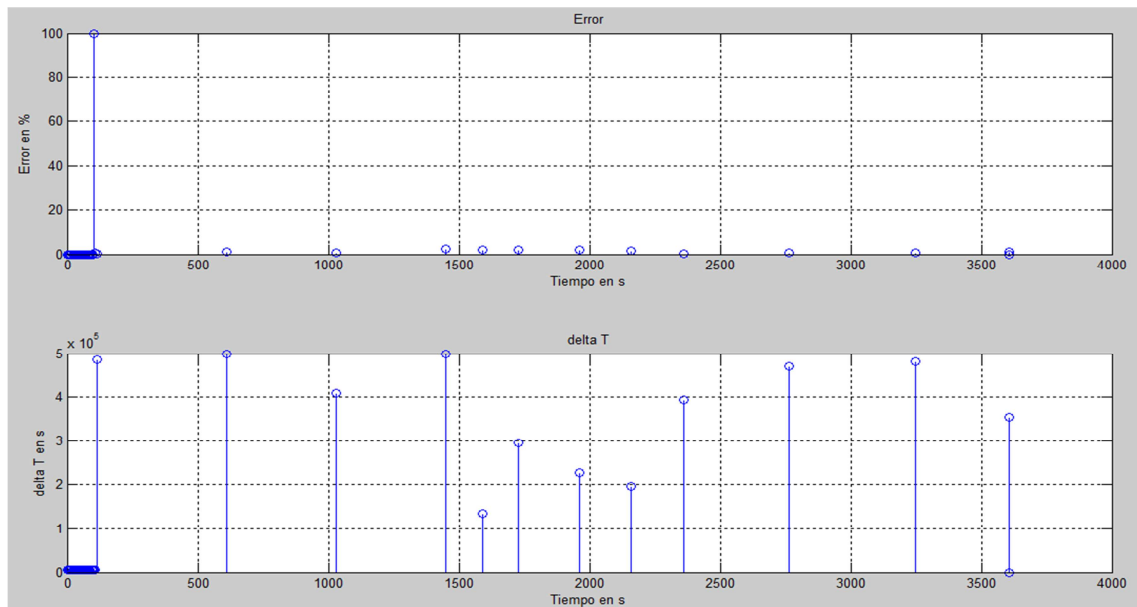


Figura 8.3 Respuesta del sistema con estrategia ($e\%$ y ΔT)

Siguiendo con el análisis de resultados, en la figura 8.4 se pueden apreciar dos gráficas en las cuales se encuentran las siguientes características: la temperatura medida es la línea azul y el pronóstico estimado por la estrategia que se desarrolla en el BE es la línea roja, el tiempo de trabajo de la red es de 1 hora, con una tasa de muestreo inicial de 5 s, a continuación algunos puntos que se destacan:

- La exactitud con la cual se da la *predicción* de los datos muestreados, teniendo en cuenta la función del Nodo, tanto en el ajuste en los periodos de muestreo de sus ΔT , como en su activación después de haberse desconectado temporalmente; es decir, en los momentos de inactividad del Nodo, la temperatura deja de ser registrada y por ende el Nodo deja de TX, pero cuando éste se activa nuevamente (wakeup) y vuelve a tomar el valor de la temperatura actual, se sigue leyendo un valor muy similar al anterior, o sea, al estimado para ese instante de tiempo, esto puede comprobarse en la figura 8.3 en la gráfica del *error porcentual*, la cual presenta valores muy cercanos a cero, gracias a la estimación generada por el AAE-BE.

Igualmente, en la segunda gráfica se aprecia un consumo de energía reducido en el Nodo, mostrándose una disminución importante en el ahorro de energía del Nodo Sensor, pasando de un valor de 5.64 mW en los primeros datos muestreados a un valor mínimo de 0.38 mW en los instantes de mejor estimación hecha por el algoritmo de ahorro. Por consiguiente el consumo total de energía en el Nodo Sensor, utilizando la estrategia AAE-

BE fue de un valor de $13,09.98$ mJ, relativamente bajo con relación al caso 1, es decir, de 1.30 J, y de un promedio de consumo total de 0.56 mJ/s.

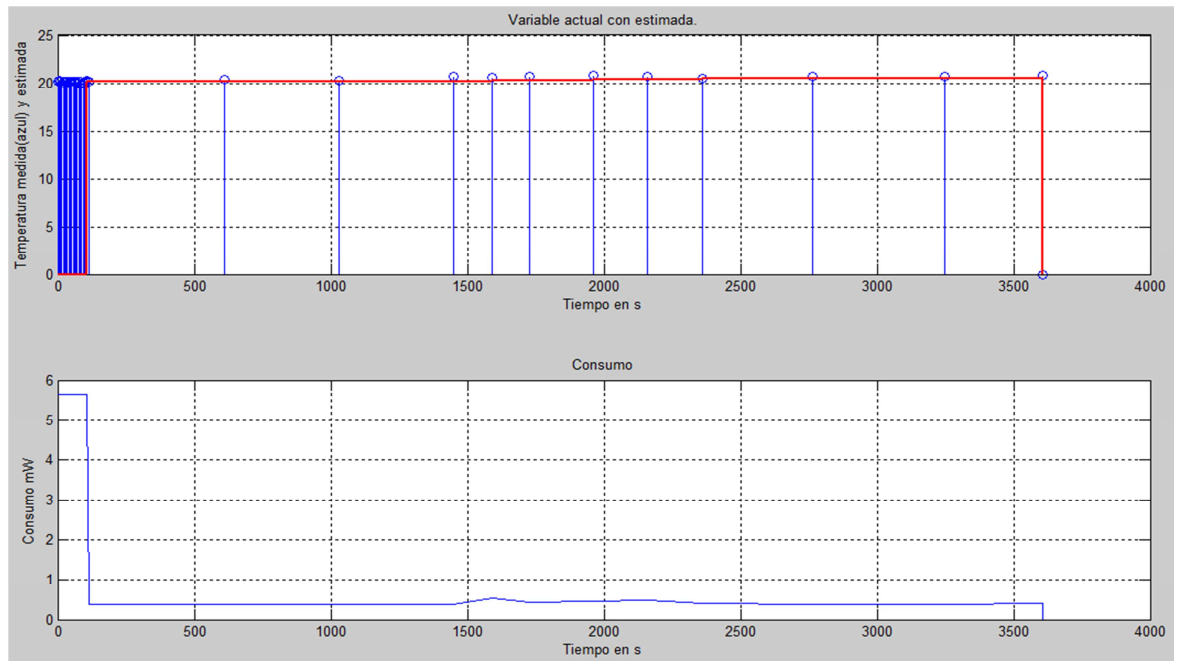


Figura 8.4 Respuesta del sistema con estrategia.

8.2 Análisis de resultados.

Un primer análisis en este capítulo, es en cuanto al consumo dado en el Nodo Sensor en una RSI, este consumo es dado por el trabajo del Nodo en diferentes procesos, es decir: cada que se hace un muestreo se genera un proceso de conversión en la señal registrada, modificando ésta a una señal digital (A/D), el número de instrucciones ejecutado en el procesador del Nodo Sensor por el **AAE-NS** (costo computacional), el encenderse y apagarse por diferentes espacios de tiempo cuando entra al modo de reposo y en la utilización del módulo de transmisión (transmisión/recepción) (ver tabla 7-1. Tasa de consumo de energía de un Nodo).

La estrategia utilizada, se presenta en dos fases: la primera es el aumento del tiempo de muestreo en el sensor para la toma de los datos que se adquieren con el nodo buscando con esto regular directamente el consumo de potencia del mismo y la segunda fase es el uso del recurso del dispositivo que permite que ingrese en un modo de reposo temporal, facilitando con ello aún más el ahorro de energía del dispositivo, ambos cambios dados según el *error porcentual* que se presente por la estrategia diseñada. Los resultados de esto se pueden ver claramente en la figura 8.5 la cual muestra, que a *errores porcentuales*,

cercanos al límite inferior, se da un ΔT de 500 s (recordar que el tiempo inicial nominal es de 5 s) y a errores altos, cercanos al límite superior, el ajuste en el ΔT disminuye sustancialmente haciendo que la actividad del Nodo aumente en todo su sistema. En esta respuesta se aprecia el trabajo que hace la función Gaussiana, la cual suaviza el ajuste del ΔT , teoría que se explica en la figura 7.4.

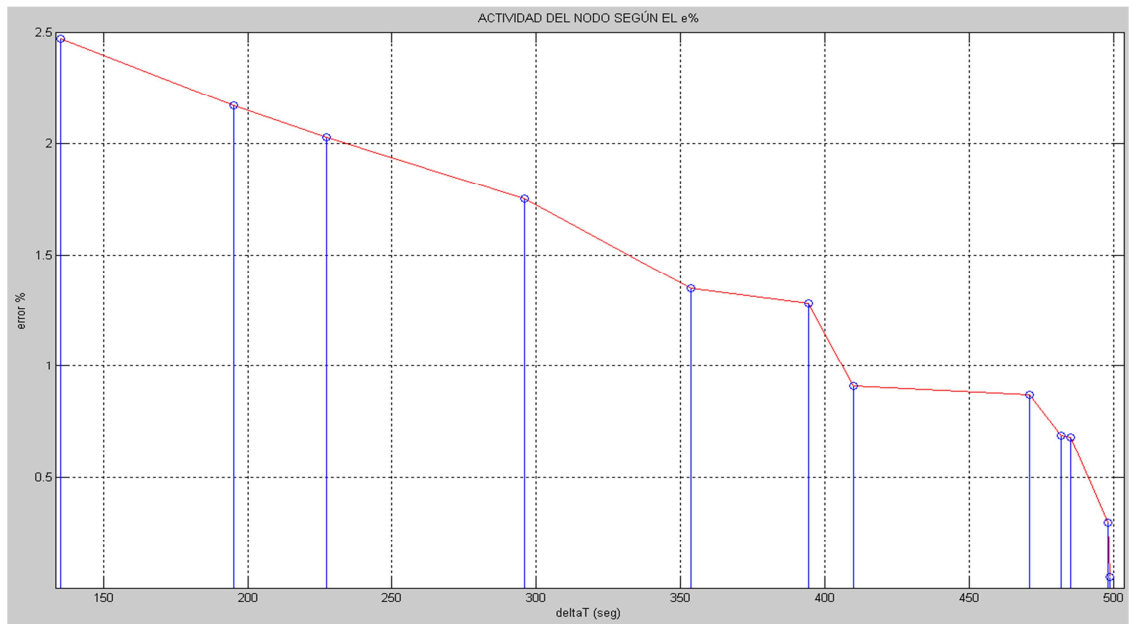


Figura 8.5 Actividad del Nodo Sensor según el error de la predicción.

La validación de los resultados puede apreciarse de forma gráfica en cuanto al consumo de energía y el número de datos muestreados durante 1 hora con un tiempo inicial de registro de 5 s. Los resultados alcanzados están dados por encima del 93.55 % de efectividad en el consumo de energía en el Nodo por la estrategia desarrollada.

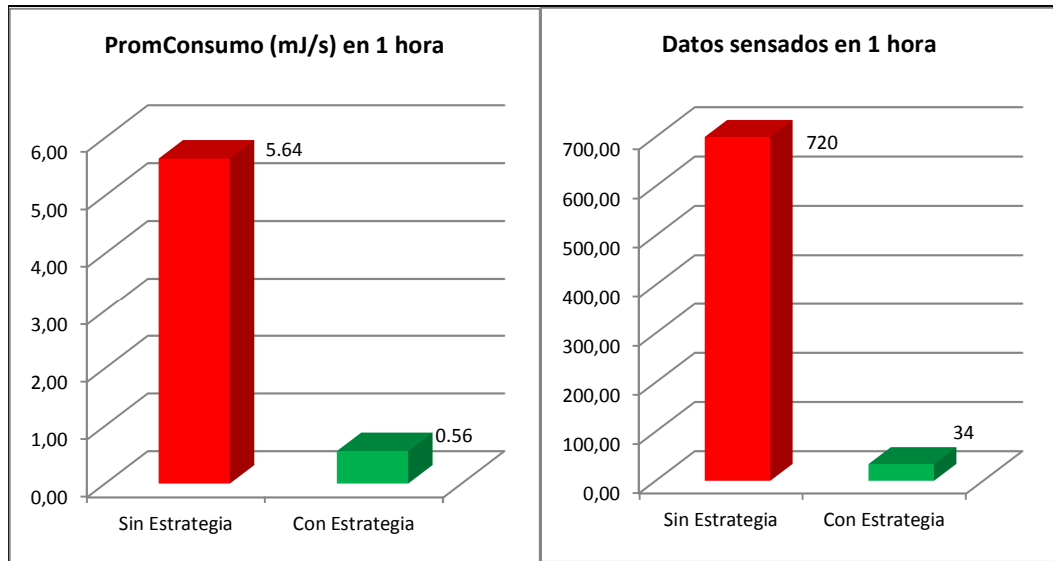


Figura 8.6 Validación CON y SIN estrategia.

8.3 Discusión ante uno de los trabajos referenciados en el capítulo 4.

Con el fin de analizar con más detalle los resultados obtenidos en esta propuesta, a continuación, se plantea una discusión enmarcada en la comparación de algunos de los logros entre dos trabajos que se enfocan en objetivos similares, éste y otro trabajo referenciado en el capítulo 4.

En el artículo *“Predictive Modeling for Energy Conservation in Wireless Sensor Network”*, referenciado en [9], también se hace alarde al tema de ahorro de energía en el nodo sensor de una *RSI*, usando una estrategia basada en un algoritmo que minimiza el consumo de energía en el sensor. Lo anterior, se hace mediante un modelo de predicción a partir de las lecturas recibidas de los Nodos en ciertos periodos de tiempo, la información adquirida por los dispositivos es utilizada para que dicho algoritmo se ejecute en la estación base (*BE*) de la red y, los resultados generados en él se envían a los nodos sensores. La técnica implementada, define 2 modos de tiempo para que el dispositivo final pase a un periodo de reposo (*sleep*), uno corto y otro largo según el comportamiento de los datos sensados, la ejecución de la estrategia se realiza en el *BE*, con la información recibida, se determina un umbral de aceptación en la lectura que hagan los nodos, una vez determinada esta zona de trabajo los nodos sensores hacen sus comparaciones entre las lecturas actuales y el rango definido por el *BE*, de acá en adelante el nodo transmite sus lecturas sólo cuando se encuentran por fuera de esta franja de trabajo. Siempre y cuando los datos sensados se encuentren dentro del umbral dado por el *BE*, los dispositivos entrarán a uno de los modos de reposo asignados por el sistema.

Con esta estrategia de ahorro, en el trabajo se manifiestan algunos resultados que reducen la energía en los nodos sensores desde un 23 % hasta un 97% en algunos casos.

Unos puntos que se observan en [9] son:

El método no hace ajustes del periodo de muestreo en la toma de los datos, sólo predice cuando se va a dormir.

Este sistema es usado para variables que presentan respuestas lentas, la validación de los resultados en este caso se comprobó con una señal de temperatura del ambiente.

Con los resultados expuestos en la estrategia desarrollada en el presente trabajo (ver capítulo anterior), se encontraron diferencias relevantes con los obtenidos en el trabajo referenciado en [9], estas son:

- La estrategia no ajusta el tiempo de muestreo, sólo se lleva al nodo a un modo reposo de dos formas diferentes.
- El método se presenta de una forma empírica y no por medio de una estrategia matemática.
- Se exhibe la estrategia sólo en dos fases: un tiempo corto de desconexión en el Nodo Sensor por 1 minuto y un tiempo largo de 5 minutos, variando únicamente en dos puntos el periodo su modo de reposo. El no hacerlo variable lo limitaría para otro tipo de variables que presenten patrones diferentes en su comportamiento. Es decir, datos aleatorios, de tendencia, de respuesta muy lenta o muy rápida, entre otros.
- A continuación, en la tabla 8-2 se muestran los resultados de ambos trabajos, haciéndose una comparación entre ellos, con el fin de analizar los alcances de ambos. Es necesario aclarar que el autor prueba su estrategia con 5 sensores y los indica de diferentes formas, la discusión que se hace acá, está basada con uno sólo, con el fin de tener puntos de referencia coherentes y equitativos con el propuesto en el presente trabajo.
- En la tabla, existe un desfase alto entre los dos trabajos, esto es debido a que en el trabajo presentado en el modelo A ([9]) no se tiene en cuenta los cálculos de todos los parámetros que inciden en el consumo de energía en un Nodo Sensor (ver tabla

7.1), por ejemplo: consumo de energía cuando éste está: activo, por ejecución de cada instrucción, por transmisión de bytes, por recepción de bytes, por entrar al modo de reposo, por activarse nuevamente; además, 88 uJ es lo que se consume un Nodo por un 1 bit transmitido y no por cada trama de datos, por lo general es una trama de 32 bits como mínimo por cada dato transmitido.

- Lo anterior hace que los resultados obtenidos en el trabajo no alcancen en realidad los porcentajes reales de ahorro en el consumo de energía, a éstos se les debe restar aproximadamente un 10 % de lo expuesto en él.

A continuación se presentan las dos estrategias: la estrategia predictiva A es del autor [9], y la estrategia predictiva B es la presentada en este trabajo.

Tabla 8-2 Comparación de trabajo relacionado

Caso	Estrategia de pronóstico A (ref. [9])		Estrategia de pronóstico B	
1	Consumo de energía SIN estrategia.	720 datos x 88uJ = 63.36 mJ (100%)	Consumo de energía SIN estrategia	720 datos x operaciones = 20,311.94 mJ (100%)
2	Consumo de energía CON estrategia.	22 mJ (93%)	Consumo de energía CON estrategia	1,309.98 mJ (93.55%)

A simple vista se podría ver muy similar el modelo del caso del A con el caso B, pero, la estrategia del A no contempla todos los elementos de consumo de energía y la proporción de las unidades, como ya se ha mencionado anteriormente, esto lo hace ser poco real al presentado ante el caso B, donde sí se asumen todos los parámetros que limitan al Nodo Sensor por la energía consumida, inclusive, hasta se mide la eficiencia energética que tienen frente al estado de activar y desactivar el radio y la de entrar al modo de reposo. El porcentaje que presenta el caso A bajaría aproximadamente un 10% más sobre los resultados expuestos, siempre y cuando tuvieran en cuenta lo antes mencionado.

CONCLUSIONES

En este ítem se presentan las conclusiones arrojadas del presente trabajo sobre la estrategia diseñada.

- ✓ La búsqueda de ahorro de energía en los Nodos Sensores que conforman una RSI, siempre será un tema de investigación queriéndose lograr cada vez más, una disminución de energía significativa en el dispositivo, las estrategias que se puedan diseñar en este campo, deben tener presente la validez del método utilizado, dado que el mismo desarrollo puede ser conveniente a la hora de medir el consumo, por la misma actividad que exige la red, la cual puede hacer que se pierda el objetivo principal en la actividad del Nodo dentro de una red, es importante saber dónde se ejecuta el algoritmo de ahorro, si en el Nodo Sensor o en el *Back End* de la RSI. Por ejemplo, puede que no resulte muy factible desarrollar estrategias de ahorro de energía en el dispositivo directamente, es decir, correr algoritmos como Redes Neuronales, Algoritmos Genéticos, Predicción de Coeficientes Lineales (LPC), Filtros de Kalman u otras estrategias de procesamiento que requieran de un elevado costo computacional, ya que las medidas pueden ser contraproducentes en lo referente a bajo consumo de energía, dado que la potencia de procesamiento de estos métodos incrementarían en el nodo por el costo computacional que se requiere, el promedio total de consumo de energía se elevaría por encima del sistema de la toma de los datos.
- ✓ La eficacia de la estrategia depende de varios parámetros que entrega la función ΔT definida para el ajuste del periodo de muestreo o de la misma, el tiempo de reposo que requiere el Nodo; estos parámetros son: el *error* en la estimación dada entre la predicción y el dato futuro sensado, el *tiempo inicial del muestreo* y el *factor de ajuste* (definido en la propuesta como K o *máx*) en la función de la *Distribución Normal*, parámetros importantes dentro de la estrategia desarrollada.
- ✓ El *error porcentual* que se da en la estimación de los datos pronosticados, dependerá de la sensibilidad que se requiera con respecto a la variable que se desee sensar, para este caso se puede concluir qué, datos que arrojen un patrón de tipo estacionario o de tendencia, bien sea, positiva o negativa y además, con tiempos de respuesta lentas, pueden trabajarse dentro de un *error* por debajo del 1%, parámetro que dependerá de la sensibilidad con la cual se desempeñará el algoritmo propuesto, *AAE-BE*.
- ✓ Teniendo en cuenta lo anterior, el margen de error debe establecerse conociendo toda la red, es decir, en éste caso se halló un error instrumental del 0.09% en los datos sensados (ver ítem 7.2.1). Variables como la temperatura, la presión en algunos procesos industriales, la iluminación natural, la humedad etc., resultan ideales para el uso de la estrategia que acá se propone, debido a que éstas

presentan una respuesta lentas y en general no suelen cambiar de forma brusca [6].

- ✓ La estrategia realizada con base a pronósticos de datos, usando promedios móviles es buena para desarrollos de ahorro de energía en las RSI, para esto es importante concluir que a la hora de usarlas se deben tener varias consideraciones:
 - Para el uso de promedio móviles, los periodos recientes son los mejores para pronosticar el futuro.
 - La magnitud de un arreglo para el promedio móvil, se obtiene de todos los valores pertinentes, con el fin que su resultado pronostique el periodo siguiente o el horizonte requerido.
 - Cuando se usa promedios móviles, se debe tener en cuenta que este método no considera la medida de todos los datos, sino sólo los más recientes. Para este trabajo se asumen los valores más recientes $n = 10$.
 - No existe una regla específica que indique cómo seleccionar la base del promedio móvil "n". Si la variable que se va a pronosticar no presenta variaciones considerables, esto es, si su comportamiento es relativamente estable en el tiempo, se sugiere que el valor de "n" periodos sea grande. Por el contrario se recomienda un valor de n pequeños si la variable muestra patrones cambiantes. En la práctica, los valores de "n" oscilan entre 2 y 10.
- ✓ El sistema se comporta acorde con la estimación de los datos, el pronóstico diseñado en este trabajo se realiza con un horizonte de 1 instante de tiempo, pero, cuando se ejecutó en otros experimentos se observó que cuando se ejecutaba la estrategia con horizontes de 4 periodos futuros el comportamiento de la estimación es acertada, los siguientes resultados dan fe de ello:
 - *Error porcentual* entre 0.99% y 0%, con un tiempo de trabajo de 20 minutos.
 - Algunos datos que se destacan en el muestreo de los datos son:
 - # datos sensados = 3
 - Horizonte trabajado = 4
 - PromConsumo (mJ/s) = 0.94
 - ErrorMedido entre = 0% y 0.99%
- ✓ El variar el periodo de muestreo en un Nodo Sensor, permitirá ventajas positivas en su ahorro de energía, algunas de ellas son:

- Reducción significativa del procesamiento en la toma de muestras del medio (adquisición de datos), por ende la frecuencia de muestreo se reduce. Debido a esto el Nodo Sensor usa el mínimo recurso de máquina en su ejecución computacional.
 - Uso eficiente de energía, usando el módulo del dispositivo que permite llevarlo al modo de reposo temporal, con periodos variables según la optimización de las estimaciones o los pronósticos arrojados por el sistema, no menores al periodo de muestreo inicial con el que se captura la señal del entorno.
 - Mínimo costo computacional, el procesamiento de cálculos matemáticos complejos en el Nodo Sensor es despreciable, debido a que el algoritmo principal se realiza en el *Back End* de la RSI.
 - El Nodo Sensor presenta una disminución notoria en el número de transmisiones que hace en la red cada que sensa un nuevo dato, ya que la técnica permite ajustar periódicamente el tiempo de muestreo o ejecución de la adquisición de los datos según la estimación de los datos. Recordar que la transmisión es el elemento de mayor consumo de energía en un Nodo Sensor.
 - Se logra minimizar el procesamiento de datos y la transmisión del Nodo Sensor debido a la disminución en la redundancia de los datos procesados, mejorando el problema del tráfico que se pueda generar en la red.
- ✓ La estrategia no siempre responderá bien cuando se use con variables que no se encuentren dentro de lo contemplado en el trabajo, por eso algunas de las desventajas de la estrategia son:
- El muestreo de algunos variables con tipos de patrones diferentes a los ya mencionados, por ejemplo: datos aleatorios o de respuesta rápida, no resultan ser buenas para la implementación de esta estrategia, debido a que en la mayoría de los casos estas señales presentan una diferencia entre sus muestras consecutivas, por lo general en este caso el error medido es alto, contrarrestando las virtudes y ventajas de la estrategia propuesta.
 - Cuando el Nodo Sensor se encuentra en modo de reposo, puede darse el caso que ocurra uno o varios eventos relevantes en la medida de la señal, esto posiblemente afectaría el registro ideal de la variable que requiera fidelidad en su medida.

- ✓ Con respecto a los análisis realizados a la estrategia de ahorro de energía en un Nodo Sensor, se puede concluir que: los algoritmos diseñados para tal fin deben correrse en el *BE* de la red y no en los propios Nodos, esto se recomienda por el costo computacional que podrían tener los dispositivos si se corrieran estrategias de ahorro en ellos, si así fuese, el consumo de energía sería mayor, impidiendo alcanzar el objetivo de la estrategia en el ahorro de energía. En una red de sensores inalámbricos, realmente el costo computacional está dado en las múltiples tareas que demande la red, aparte del mismo sensado de las señales análogas o digitales que existan en el entorno, ellos también se centraran en las funciones de enrutamiento, de transmisión y recolección de la información, técnicas de calidad de servicios (QoS), entre otros; es por eso que la ejecución del algoritmo, como tal, dentro de un sensor ya es bastante complicado correrlo por el análisis matemático que este demanda.
- ✓ El trabajo desarrollado, define un protocolo de red para hacer la asociación entre el Nodo Sensor y el *BE*, permitiendo activar o desactivar la estrategia de ahorro de energía, la función entre ambos es colaborativa, este protocolo es asíncrono y sin confirmación, es NO orientado a la conexión, siendo el *BE* el dispositivo pasivo y el Nodo Sensor el dispositivo activo. Esta característica puede tener sus ventajas y desventajas; una ventaja es el mínimo consumo de tipos de mensajes que se utilizaría en la red para la asociación entre ellos y una desventaja es a medida que crezca el número de nodos en la red.
- ✓ La escalabilidad es un factor crítico en una red de sensores inalámbricos, en este desarrollo no es considerado este factor y lo que puede ocurrir es que a medida que crezca el número de nodos en la red (cientos o miles), puede llegar a colapsar el *BE*, debido a la misma demanda del sistema.

TRABAJOS FUTUROS

Los posibles trabajos futuros que se pueden generar a partir de este proyecto, pueden ser:

- ✓ Dado que existe la posibilidad que el Nodo Sensor se encuentre en modo de reposo o sleep y puede darse el caso que ocurra uno o varios eventos relevantes en la medida de la señal, lo cual afectaría el monitoreo ideal de una variable que requiera veracidad en la medida; se recomienda como trabajo futuro diseñar una estrategia física o por software, con el fin que el Nodo Sensor interrumpa su modo de desconexión o reposo, para cuando se generen eventos que no se puedan predecir, es decir, si el nodo se encuentra durmiendo luego de haber muestreado una señal cualquiera, se deje un módulo del procesador del Nodo activo con el fin que se esté comparando la entrada actual con la que se midió antes de entrar al modo reposo, de tal forma que se interrumpa éste en el caso de existir un evento diferenciador de la señal, permitiendo así que el sistema sea más eficiente y se pueda utilizar en aplicaciones de mayor envergadura en el sensado de señales, por ejemplo: en deslizamientos de tierra, procesos que puedan ser perturbados en algún instante del tiempo, entre otros.
- ✓ Proponer una estrategia basada en pronósticos, donde se pueda estimar el comportamiento de señales diferentes a las que se presentan en este trabajo (otro tipo de variables), por ejemplo señales que varíen constantemente en el tiempo o señales que presenten comportamientos aleatorios, entre otras, este tipo de diseños podría complementar la estrategia que aquí se utiliza.
- ✓ Dado que la estrategia implementada a nivel experimental no se probó en una arquitectura de una red compleja, como por ejemplo con una escalabilidad alta, una propuesta de investigación futura, sería evaluar el desempeño de esta estrategia ante una red de características de exigencias mayores, con el fin de medir su recurso computacional cuando se integre con toda la actividad de la RSI.
- ✓ En este trabajo, el nodo sensor no paquetiza la información registrada de las señales adquiridas, un posible trabajo futuro es almacenar cierta información en el dispositivo y luego transmitirla, buscando un mejor uso del canal que utiliza la RSI.
- ✓ Realizar simulaciones que permitan estimar el comportamiento con redes grandes de sensores, de mayor complejidad.
- ✓ Utilizar otro tipo de algoritmos de pronósticos.
- ✓ Proponer modelos híbridos: utilizar parte de un algoritmo de ahorro de energía en el Nodo Sensor y parte en el *BE*. Es decir el algoritmo principal de ahorro dividirlo en los dos dispositivos de la red buscando resultados diferentes al propuesto en este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alexander, A. M. (2008). *Estrategia de gestión del sistema de sensado en los nodos de una red de sensores inalámbrica orientada al mejoramiento del consumo de potencia*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- [2] C. Alippi, G. Anastasi, C. Galperti, F. Mancini, and M. Roveri. (Oct. 2007). Adaptive sampling for energy conservation in wireless sensor networks for snow monitoring applications. *Mobile Adhoc and Sensor Systems. IEEE International Conference.*, 1–6, 8-11 .
- [3] Erhan B. Ermis and Venkatesh Saligrama. . (2005). Adaptive statistical sampling methods for decentralized estimation and detection of localized phenomena. 143–150.
- [4] Hayes., M. H. (1996). *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. New York, NY, USA.
- [5] Jhon E. Hanke and Dean W. Wichern. (2006). *Pronósticos en los negocios*. México: PEARSON Education.
- [6] John G. Proakis and Dimitris K. Manolakis. (March 2006.). *Digital Signal Processing (4th Edition)*. Prentice Hall.
- [7] John L. Hennessy and David A. Patterson. (May 2002). *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. Morgan Kaufmann.
- [8] M, Athanassoulis; I, Akagiannis; S, Hadjiefthymiades;. (2007, 2008). *Energy Efficiency in wireless sensor networks: A utility-based architecture*. European.
- [9] M.C. Ndinechi, G.A. Chukwudebe; C.M. Akujuobi. (2008). Predictive Modeling for Energy Conservation in Wireless Sensor Network. *Medwell*, 893-904.
- [10] Martin, H. (s.f.). www.ewh.ieee.org/soc/icss/. Marzo de 2009
- [11] Mike Willey and Kris Stafford. (Diciembre 2001). Low-power design. *IEEE*.
- [12] MORALES, J. A. (2008). *Estrategia de gestión del sistema de sensado en los nodos de una red de sensores inalámbrica orientada a mejoramiento del consumo de potencia*. Medellín.

- [13] Paolo Baronti, Prashant Pillai, Vince W.C. Chook, Stefano Chessa, Alberto Gotta, Y. Fun Hu. . (2007). Wireless sensor networks, a survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. *Computer Communications*.
- [14] Philippe Le-Huy; Sébastien Roy. (2008). Low-Power 2.4 GHz Wake-Up radio for wireless sensor networks. *IEEE, International Conference on Wireless & Mobile Computing, Networking & Communication*.
- [15] S.S. Rizvi and A. Riasat. (July 2007.). Use of self-adaptive methodology in wireless sensor networks for reducing energy consumption. 1–7, 6-7.
- [16] Silvia, S. (February 2006.). Towards adaptive wireless sensor networks. Zurich, Switzerland, In Adjunct Proceedings of the 3rd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2006),.
- [17] Spiegel, M. R. (1992). *Theory and Problems of Probability and Statistics*. New York: McGraw-Hil.
- [18] Tengfei Zhu, Jun Peng, Ying Guo, Xiaoyong Zhang, Fu Jiang, Chunming Li. (2008). A Distributed Power Proportional Clustering Algorithm to Improve EnergyzEfficiency for Wireless Sensor Networks. *IEEE the 9th International Conference for Young Computer Scientists*.
- [19] Xue Wang, Jun-Jie Ma, Sheng Wang, and Dao-Wei Bi. (2007). Time series forecasting for energy-efficient organization of wireless sensor networks. *Sensors*, 7:1766–1792.
- [20] Yann-A`el Le Borgne, Silvia Santini, and Gianluca Bontempi. (2007). Adaptive model selection for time series prediction in wireless sensor networks. *Signal Process*, 87(12):3010–3020.
- [21] Bo Jiang, Kai Han, Binoy Ravindran, and hyeonjoog Cho. Energy efficient Sleep Scheduling based on Moving Directions in Tracking Sensor Network.13 th International Conference on Network – Based Information Systems, 2010.