

# Capítulo 9

## 9. Administración de la Energía

### 9.1 Introducción

Los nodos en una red de Sensores esta limitada por la capacidad de energía en la batería. Por ende, la vida útil de la misma se ve afectada.

De esta manera, la administración de la energía, es un factor de suma importancia. En estas redes el flujo de información, pasa de un nodo a otro de manera subsiguiente.

La energía conlleva un proceso de control que va desde la explotación de las características de la batería (clase de batería, corriente de descargas, calendarización de funcionamiento, etc.), ajuste de potencia de transmisión hasta la minimización del consumo de dispositivos periféricos.

En consecuencia, se tienen 3 áreas de investigación que buscan mejorar el consumo de la energía suministrada por la batería, dividiéndolas en:

1. Estudio del comportamiento de la batería.
2. Ajuste de la potencia de transmisión.
3. Administración general de la energía del sistema.

## **9.2 Diseño Eficiente en Energía**

Como se menciona, los nodos sensores tienen una limitante con respecto a la capacidad de energía con la que estos dispositivos operan. La optimización en el consumo de energía tiene como finalidad prolongar la vida de cada nodo de la misma forma que inferirá por completo en toda la red. Un consumo promedio de los nodos deben de estar alrededor de micro amperes [CHI02].

Durante la operación activa, la comunicación de radio constituye una fracción significativa de la capacidad de energía total del nodo. Algoritmos y protocolos son detallados, dando así solución a la radio actividad cuando sea posible.

Además de incorporar algoritmos eficientes en el consumo de energía a nivel de un nodo, debemos considerar a lo ancho de la red la cooperación entre los nodos para incrementar la vida de la red.

El software usado en las redes de sensores tales como el sistema operativo, debe ser considerado como una de sus prioridades para optimizar el uso de energía.

## 9.3 Necesidad de Administrar la Energía en las Redes de Sensores

La eficiencia de energía de un nodo sensor se define como la razón de la cantidad de información transmitida por nodo sobre el total de la energía consumida por éste.

Un aumento en la eficiencia implica una mayor transmisión de información por un nodo con respecto a una cantidad de energía disponible. Las principales razones por las cuales la energía debe optimizarse se en lista a continuación:

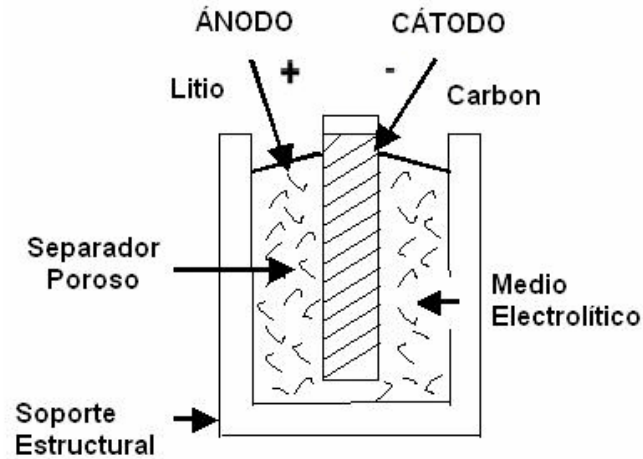
1. Cantidad de Energía limitada: La principal razón del uso de las redes de Sensores es proporcionar una comunicación inalámbrica en un área cualquiera. No obstante, se tienen recurso energéticos limitados. Los avances en la tecnología de baterías han alcanzado los requerimientos en el consumo de energía. El tamaño de la batería, afecta específicamente a la cantidad de material activo que mediante un proceso químico convierte la energía química a eléctrica [CHI01].
2. Dificultad para reemplazar baterías: Dependiendo de la aplicación el cambio o recarga de las baterías es prácticamente imposible como en el caso de escenarios de combate.
3. Falta de coordinación central: La necesidad de enlaces múltiples entre los nodos, involucra retransmisión de la información. Es por ello, que se debe buscar un consumo de energía equitativo mediante un control distribuido.

4. Ajuste óptimo de la potencia de transmisión: Un nivel de potencia selectivo determina el rango de alcance en cuanto a la comunicación con los nodos. Seleccionando la potencia adecuada, la interferencia entre los nodos disminuiría, lo que significa un aumento en el número de transmisiones simultáneas realizables.

Para mejorar el consumo de energía se puede considerar los rubros arriba mencionados. En la siguiente sección se detalla a fondo los diversos prospectos que se aprueban para aumentar la longevidad de la red.

## **9.4 Esquemas de Administración de la Energía en la Batería**

Los sistemas que funcionan mediante baterías, son aquellos que requieren para su diseño tomar en cuenta el tipo de batería con el que se trabaja y las características intrínsecas de la misma. Dichos sistemas, deben tratar de maximizar la cantidad de energía de la que son provistos, explotando las propiedades inherentes de la batería. En la figura 9.1 ilustran los componentes estructurales de una batería [CHI01].



*Figura 9.1 Componentes de una Batería [CHI01].*

La batería consiste principalmente de un conjunto de células. Éstas tienen un ánodo, un cátodo y un medio electrolítico. Por lo general, el ánodo siempre es un metal y el cátodo un óxido metálico. El electrolítico es una sustancia salina que permite el flujo de iones. El separador poroso se usa para prevenir un corto circuito entre el ánodo y el cátodo manteniéndolos separados uno del otro. El soporte estructural provee estabilidad en base a las dimensiones y normalización al electrodo positivo y negativo para la descarga (o recarga) de cada una de las células. Los iones positivos se mueven del ánodo hacia el cátodo a través del medio electrolítico [CHI02].

A su vez, es importante denotar una batería tiene definiciones específicas para su caracterización como [CHI01]:

- Voltaje inicial de circuito abierto  $V_{oc} = 3.0\text{volts}$  (a carga completa)
- Voltaje de operación de la célula con carga  $V$
- Voltaje de corte ( célula descargada)  $V_{cut} = 1.0\text{volt}$

Igualmente, se tienen parámetros que representan la capacidad de una célula los cuales son dos:

- Capacidad Teórica (cantidad de material activo Ampère -horas)
- Capacidad Nominal (Representa la obtención Ampère -horas de la célula cuando se descarga a una corriente constante a un voltaje de corte específico)

Por último, debemos de poder medir el comportamiento que pasa durante la descarga de la batería, mediante los parámetros que se mencionan [CHI01]:

1. Tiempo de Descarga ( $t_1$ ).- expresado en segundos es el tiempo que pasa de tener una carga completa hasta alcanzar el  $V_{cut}$ , esto indica que es necesario reemplazar la batería o recargarla.

2. Corriente de Descarga.- expresada en Ampère /  $cm^2$ , es la cantidad en Amperes que se sustrae de la batería.

3. Potencia Específica (Energía).- es la potencia (energía) expresada en (watt-hora) watts / kg entregado con una carga completa a una corriente de descarga específica. También se expresa por Ampère -horas/kilogramo.

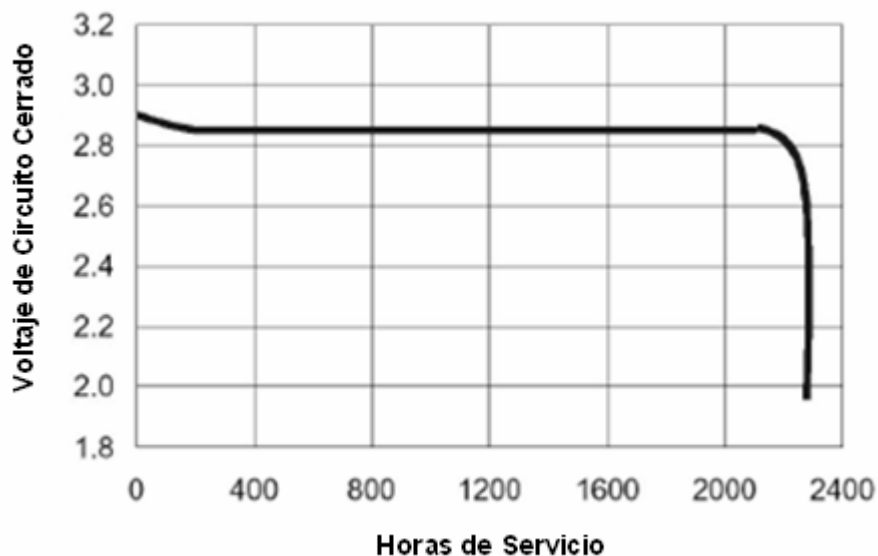
4. Capacidad Específica.- se puede expresar como Ampère -horas/kilogramo.

En el caso de las redes de Sensores Ad hoc se emplean los siguientes tipos de baterías de recarga [DUR01]:

- Níquel-Cadmio (Ni-Cd).- Están basadas en un sistema formado por hidróxido de níquel, hidróxido de potasio y cadmio metálico. Poseen ciclos de vida múltiples, presentando la desventaja de su relativamente baja tensión. Pueden ser recargadas hasta 1000 veces y alcanzan a durar decenas de años. No contienen mercurio, pero el cadmio es un metal con características tóxicas.
- Níquel Metal Hydride (Ni-Mh), presenta alta densidad de energía (o capacidad) que implica un mayor tiempo de vida (ver figura 10.4. Relaciones de potencia de Ragone). Además es menos contaminante que el Ni-Cd, ya que no tiene adiciones de Cadmio (Cd) ni plomo (Pb). Entrega cerca del 30% de mayor capacidad que una Ni-Cd de igual tamaño.
- Litio.- De tamaño compacto a comparación del resto de las baterías ( $8.5\text{cm}^3$ ), ésta producen tres veces más que las pilas alcalinas, considerando tamaños equivalentes y poseen también mayor voltaje inicial que éstas (3 volts contra 1.5 V de la mayoría de las alcalinas), pero

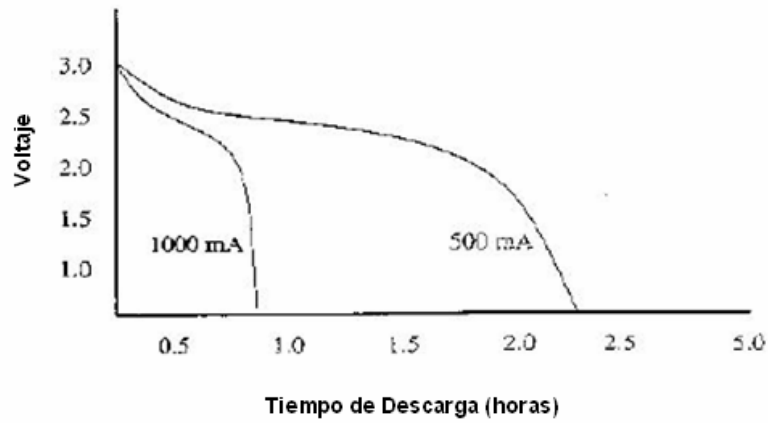
presentan un costo mayor con respecto a las alcalinas. Puede operar a temperaturas por debajo de los  $-30$  grados Celsius [HIL02].

- Litio-Ion.- Puede recargarse hasta 1000 veces. Costo de inicio más caro. (Un óxido es un compuesto químico que contiene uno o varios átomos de oxígeno, presentando el oxígeno un estado de oxidación  $-2$ , y otros elementos. Por ejemplo son óxidos el óxido nítrico,  $NO$ , o el dióxido de nitrógeno  $NO_2$ . Los óxidos son muy comunes y variados en la corteza terrestre).
- Célula de litio- dióxido de manganeso ( $LiMnO_2$ ) con  $V_{oc} = 3.0V$  y un  $V_{cut}=1.0V$ . Observamos en la Figura 9.2 una curva plana de descarga la mayor parte del tiempo y una pendiente gradual que se desarrolla a medida que el voltaje de la batería se acerca a un voltaje de corte [DUR01].



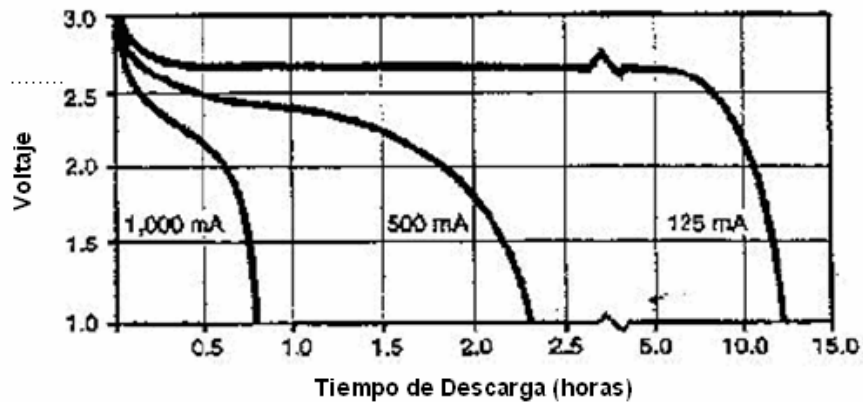
**Figura 9.2** Comportamiento de la Corriente de Descarga (Li) [DUR01].





*Figura 9.3 Comportamiento de la Corriente de Descarga (LiMnO<sub>2</sub>) [DUR01].*

De igual forma, para clarificar las definiciones arriba mencionadas, la figura 9.4 (Litio - Ion) expone el comportamiento de descarga de una batería litio-ion con un  $V_{oc} = 3.0V$  y un  $V_{cut} = 1.0 V$  [CHI01].



*Figura 9.4 Comportamiento de la Corriente de Descarga (Litio-Ion) [DUR01].*

En la siguiente sección se explican los esquemas de administración de la energía empezando por el estudio de la descarga de la batería a una corriente dada y por último, el de la calendarización de la batería de encendido/apagado.

#### **9.4.1 Descarga de la Batería por Pulso**

La corriente eléctrica obtenida de las células resulta de las reacciones electroquímicas que ocurren entre la interfase del electrodo y el electrolítico [BRU02]. A una corriente igual a cero, la concentración de material activo en la célula es uniforme.

A medida que la corriente de descarga aparezca y se vaya incrementando poco a poco, el material activo se consume en la interfase mediante reacciones químicas. Por lo consiguiente, el material activo se ve reemplazado por un nuevo material activo que se mueve de la solución electrolítica al electrodo a través de un proceso de difusión [BRU02]. Con el paso del tiempo, la desviación del promedio de la intensidad de corriente se incrementa y la concentración del material activo muestra que el voltaje de la célula se reduce.

Más allá, del valor del umbral, referido como corriente límite, el fenómeno de difusión no es capaz de compensar el agotamiento del material activo. La relación entre el tiempo de descarga  $t_1$  y la corriente de descarga  $I$  (asumiendo que sea constante), esta dada por la fórmula de Peukert [BRU02].

$$t_1 = KI^{-h} \quad (\text{Ec. 9.1})$$

donde,

$I$  = corriente de descarga.

$t_1$  = tiempo de descarga.

$K$  = es una constante cuyo rango es de 10-100 (depende del diseño de la célula).

$h$  = es una constante cuyo rango varía de 1.0-1.5 (depende de la química de la batería).

Con  $V_a$ , denotando como el valor promedio del voltaje de la célula durante el lapso de descarga, la potencia específica esta dado por:

$$E = V_a * I * t_1 = V_a * KI^{1-h} \quad (\text{Ec. 9.2})$$

donde,

$V_a$  = valor promedio del voltaje durante la descarga

$I$  = corriente de descarga.

$t_1$  = tiempo de descarga.

$K$  = es una constante cuyo rango es de 10-100 (depende del diseño de la célula).

$h$  = es una constante cuyo rango varía de 1.0-1.5 (depende de la química de la batería).

(Considerando el valor promedio del voltaje de la célula durante la descarga, la potencia específica es proporcional a la capacidad específica de la célula.)

La relación entre la potencia específica y la energía específica de diferentes baterías se puede observar en la figura 9.5 [LAF95].

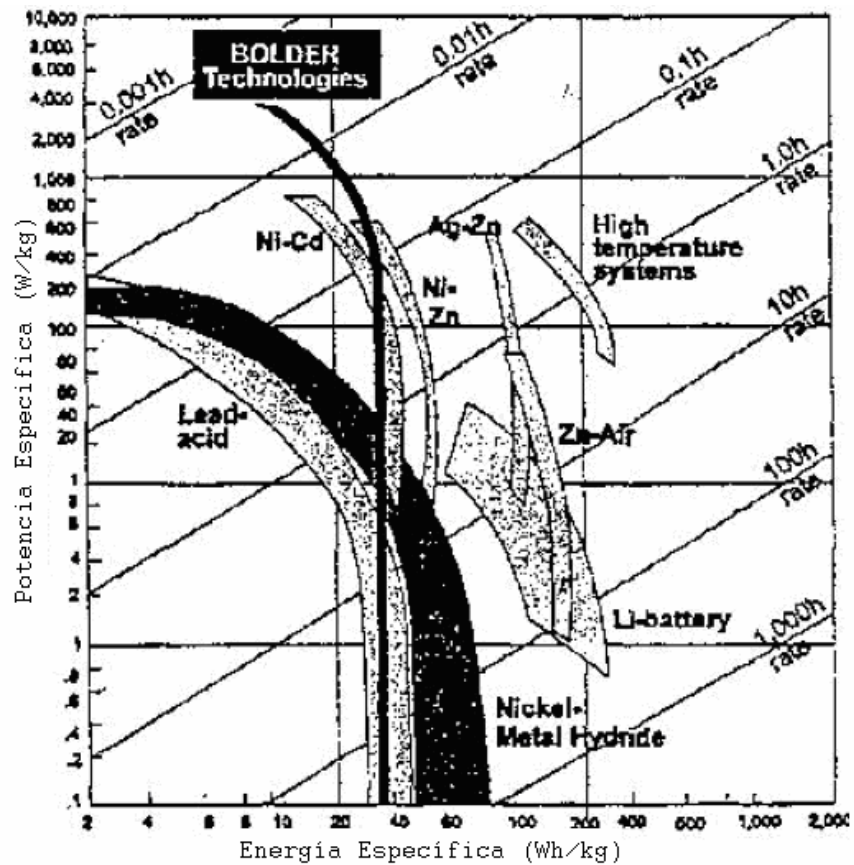


Figura 9.5 Relaciones de Potencia de Ragone

Esto, mediante estudios de parámetros de capacidad de la batería y el nivel de corriente de descarga. Si adoptamos que la corriente de descarga, sea pulsada, encontraremos que podemos extender la cantidad de energía por absorber.

### **9.4.2 Calendarización de la Batería**

Si tan sólo, los nodos consumieran la energía en intervalos de tiempo, se podría lograr que cuando los nodos se encuentren inactivos la batería recobre parcialmente su energía entregada.

Como se mencionó con anterioridad, cuando una batería es sujeta a una descarga por una corriente constante, es posible poner la batería inactivamente en intervalos de tiempo para que extienda su vida dado el efecto de recuperación. Si incrementamos el tiempo de inactividad, la capacidad teórica podría ser completamente utilizada. La probabilidad de recuperación de una carga esta dado por [JAY03]:

$$P(n_i, c_i) = \begin{cases} e^{-g(N - n_i) - \phi(c_i)} & \text{Si } 1 \leq n_i \leq N, 1 \leq c_i \leq C \\ 0 & \text{delocontrario} \end{cases} \quad (\text{Ec. 9.3})$$

donde,

$n_i$  = es la carga que todavía queda.

$c_i$  = la capacidad restante en la célula.

$g$  = es un valor constante

$\phi(c_i)$  = es una función constante del número de unidades de carga entregada dado las propiedades específicas de una célula.

$N$  = es el número de estado

$C$  = es la unidad de carga restante

Así, la cantidad total de carga entregada por una batería yace entre  $N$  y  $C$  unidades. Podemos describir el comportamiento de la carga de la batería como un proceso estocástico [JAY03].

(NOTA: Un proceso estocástico se define como un conjunto de variables aleatorias  $X(t)$  cuya distribución varía de acuerdo a un parámetro, generalmente el tiempo.

Asumiendo un proceso estocástico de  $N(x_0, \dots, x_N)$  estados, tenemos que cada estado  $i$  se denota con dos parámetros  $(n_i, c_i)$ , donde  $n_i$  es la carga que todavía queda y  $c_i$  la capacidad restante en la célula. Así, el estado inicial está dado por  $(N, C)$ . Cuando la batería entrega  $q$  unidades de carga, el estado se mueve de  $(n_i, c_i)$  a  $(n_i - q, c_i - q)$ . Mientras que si la batería permanece inactiva por una unidad de carga, el estado es  $(n_i + 1, c_i)$ . Si la batería se acaba, tanto  $c_i$  o  $n_i$  es cero. Con respecto a  $g$ , es un valor constante  $\phi(c_i)$  es una función constante del número de unidades de carga entregada dado las propiedades específicas de una célula.

En resumen, se puede minimizar la energía mediante técnicas que exploten las características inherentes de las baterías [CHI01, CHI99, LAF95, BRU02]:

- Descarga por Pulso
- Calendarización de la Batería

## **9.5 Soluciones a Nivel Capa de Enlace de Datos**

Por otra parte, existen técnicas de control a nivel capa de enlace que tiene como objetivo resolver el conflicto de la eficiencia en energía mediante protocolos que usen el efecto de recuperación de carga.

A otros estratos como en la capa de enlace de datos, también se toman en cuenta las características de la batería para el diseño de protocolos:

### **9.5.1 BAMAC (*Battery-Aware MAC protocol*)**

Es un protocolo de calendarización de nodo basado en eficiencia de energía [JAY03]. El protocolo trata de incrementar el tiempo de vida de los nodos mediante la explotación del efecto de recuperación de la batería. Como se

mencionó con anterioridad, cuando una batería es sujeta a una descarga por una corriente constante, es posible poner la batería inactivamente en intervalos de tiempo para que extienda su vida dado el efecto de recuperación. Si incrementamos el tiempo de inactividad, la capacidad teórica podría ser completamente utilizada. La probabilidad de recuperación de una carga esta dado por la ecuación (Ec. 9.3).

$$P(n_i, c_i) = \begin{cases} e^{-g(N - n_i) - \phi(c_i)} & \text{Si } 1 \leq n_i \leq N, 1 \leq c_i \leq C \\ 0 & \text{delocontrario} \end{cases} \quad (\text{Ec. 9.3})$$

donde,

$n_i$  = es la carga que todavía queda.

$c_i$  = la capacidad restante en la célula.

$g$  = es un valor constante

$\phi(c_i)$  = es una función constante del número de unidades de carga

entregada dado las propiedades específicas de una célula.

$N$  = es el número de estado

$C$  = es la unidad de carga restante

El protocolo brinda suficiente tiempo de inactividad para los nodos por mediante la calendarización de forma apropiada y distribuida [JAY03]. En sí, trata de proveer una descarga uniforme a las baterías de los nodos de la red que contiene por el medio común de transmisión. El caso es que cada nodo



mantenga una tabla de batería que contenga información referente al nivel de carga restante de cada uno de sus vecinos que se encuentre a un enlace directo de él (a un solo salto). Dando así, descargas uniformes a las baterías de los nodos que se encuentran están tratando de transmitir. También garantiza periodos de transmisión y de inactividad alternados para que existan momentos de descarga y recuperación de batería como se ilustra en la figura 9.5. Durante cualquier periodo en el caso de que un nodo gane el acceso para transmitir, se aumenta su promedio de inactividad de  $(N-1)xm$ ,  $N$  donde es el número total de nodos que contienen por el canal común y  $m$  es el promedio del tiempo que toma a un nodo hacer una transmisión exitosa.

### **9.5.2 BAMAC (K)**

De forma diferente al protocolo anterior, en el protocolo BAMAC (K) propone, que  $K$  paquetes sean transmitidos consecutivamente por el nodo que tenga el acceso al canal de transmisión en vez de solo un paquete de información como en el anterior caso [JAY03]. Esto dará, tiempos de descarga de  $K * m$  y un tiempo promedio de recuperación a los nodos de  $(N-1) * m * K$ . Siendo  $N$  el número total de nodos que desean transmitir y  $m$  es el tiempo promedio que le toma a un nodo transmitir un paquete. Teniendo un valor de  $K$  grande los resultados en un mayor tiempo de recuperación incrementa el tiempo de recarga de la batería. En contraparte, la recuperación sería muy pequeña y no se optimizaría el desempeño del protocolo. En este protocolo, cada vez que un nodo

desea ganar el canal para transmitir, este debe esperar un tiempo de duración DIFS (Distributed Coordination Function- Interframe Space) antes de transmitir el primer paquete. El DIFS es el encargado de verificar que el enlace de radio está libre antes de transmitir e indica el momento inmediato para comenzar con la transmisión o abortar. Para la transmisión de cada uno de los siguientes  $K - 1$  paquetes, el nodo espera un tiempo de duración SIFS (Short Interframe Space.- empleado para indicar una prioridad alta en la transmisión, habilita a los nodos con este tipo de información de acceder al enlace antes que los demás nodos). Esto asegura que ninguno de los nodos vecinos gane el acceso al canal hasta que el nodo activo en transmisión complete la transmisión de  $K$  paquetes. El protocolo pretende dar equidad en las transmisiones en base al grado de importancia con respecto a la información que manejan. Sin embargo, no se tiene una equidad por flujo de información ya que existen nodos que tienen un menor índice de manejo de información y por ende, su vida útil es mayor.

A la vez que se presentan soluciones a nivel capa de enlace de datos, se encontraron soluciones viables con protocolos enfocados a un bajo consumo de energía a nivel capa de red.

## **9.6 Soluciones a Nivel Capa de Red**

Por otra parte, si el tiempo de vida de una red de sensores Ad hoc se dice termina cuando el primer nodo se queda sin batería, es necesario que se dé, a

nivel capa de red soluciones que se enfoque a protocolos de ruteo con bajo costo de energía:

### **9.6.1 Algoritmo de Modelado**

En el se introduce las ranura de retraso en el proceso de descarga de batería [CHI01]. Se hace definiendo el umbral, el cual expresa se expresa en términos de cantidad de carga. El modelo usado para este algoritmo consiste de una batería con una capacidad nominal de  $N$ , una tasa de solicitud de carga con una capacidad teórica de  $T$  y un umbral de  $B$  (estado de carga). Cada vez que el estado de la batería llegue por debajo de  $B$ , se permite que se recupere en un estado de inactividad. La información o solicitud que llegue al sistema será puesta en espera (cola) en la memoria de almacenamiento de información, cuyo tamaño es  $L$  garantizando una probabilidad de cero pérdidas de información. A medida que la batería recupere su carga, se entra a un estado  $B+1$  y se empieza a dar servicio a las solicitudes puesta en cola. Aplicando este modelo de modelado de descargas en un batería, la ganancia obtenida está dada por  $G = T/N$ . Un valor grande de  $M$ , el cual sea igual a  $N - B$ , es favorable, dado que resulta en un mejor aumento en las tasa de servicio para aumentar la utilidad de la pila y menores retrasos promedios para las solicitudes de descarga. El desempeño mejora a medida que el valor de  $M$  aumenta.

Además, de las soluciones planteadas previamente, es elemental analizar la cantidad de energía que se consume por la transmisión de información en una red de Sensores Ad Hoc.

## **9.7 Ajuste de la Potencia de Transmisión**

Una de las cosas que consume mucha energía en una red Ad hoc es la transmisión de información. Con una selección óptima de potencia, el consumo de energía se reduciría considerablemente.

Para comenzar, sabemos que la potencia de transmisión influye en la capacidad de alcance de un cierto número de nodos y el rango de cobertura [AGA00]. Una forma de realizar dicho ajuste de potencia, es mediante control en las capas de enlace de datos y de red [KAW01]. La solución a nivel capa de enlace de datos encontrada fue el ajuste dinámico de potencia.

### ***9.7.1 Ajuste Dinámico en Base a la Afinidad del Enlace***

Las redes de Sensores, siempre se encuentran expuesta a fallas constantes en los enlaces de comunicación dado que los nodos que conforman la red tienen la libertad de moverse. En consecuencia, se presenta una inestabilidad para el ruteo de la información en esos casos. Este ajuste dinámico es un protocolo que funciona en base a la afinidad de los enlaces [AGA00]. En sí, el

protocolo, selecciona la ruta en base a una baja probabilidad de que el enlace falle. Un parámetro que se denomina *afinidad* decide la estabilidad del enlace.

A una muestra  $m$  de un conjunto de señales de un nodo  $n$  se le calcula la afinidad ( $a_{nm}$ ) de la siguiente manera [AGA00]:

$$a = \begin{cases} \textit{Alta} & : \textit{si } \delta S_{nm(\textit{promedio})} > 0 \\ (S_{\textit{umbral}} - S_{nm(\textit{potencia})}) / \delta S_{nm(\textit{promedio})} & : \textit{delocontrario} \end{cases} \quad (\text{Ec. 9.4})$$

donde,

$S_{\textit{umbral}}$  = potencia de señal de umbral.

$S_{nm(\textit{potencia})}$  = potencia de la señal que se envía de uno nodo a otro.

$\delta S_{nm(\textit{promedio})}$  = promedio la tasa de cambio de la potencia de la señal con respecto a las últimas señales muestreadas.

Se asume que el enlace está desconectado (falla no existe como tal) entre el nodo  $n$  y  $m$  siendo la muestra de un conjunto de señales.

Si la potencia de la señal que se envía de uno nodo a otro  $S_{nm(\textit{potencia})}$  es por debajo de la potencia de señal de umbral ( $S_{\textit{umbral}}$ ). Mientras que  $\delta S_{nm(\textit{promedio})}$  es el promedio la tasa de cambio de la potencia de la señal con respecto a las últimas señales muestreadas.

Cada nodo transmite paquetes *Hola* a sus nodos vecinos periódicamente con una potencia constante. Tanto pronto como el receptor escuche este paquete *Hola*, él estima la potencia de la señal del transmisor ( $S_{t,t+\tau}$ ) usando la especificación que se explican más adelante en esta misma sección. Si el intervalo de tiempo de llega del paquete *Hola* se representa con  $\tau$ , tenemos [AGA00]:

$$(S_{t,t+\tau}) = \begin{cases} S_H - [((S_H - S_{UmbraI}) / (a)) * \tau] & \text{si } \textit{lejano} \text{ y } \tau < a \\ S_H & \text{si } \textit{cercano} \text{ y } \tau < a \\ S_{UmbraI} & \textit{delocontrario} \end{cases} \quad (\text{Ec. 9.5})$$

donde,

$S_{umbraI}$  = potencia de señal de umbral.

$S_H$  es la potencia de la señal del paquete *Hola* recibido

$\tau$  = es el periodo de tiempo entre dos paquetes sucesivos *Hola*.

$a$  = es la afinidad del enlace un nodo y su nodo vecino.

Después de calcular la potencia de la señal, el nodo ajusta su potencia de transmisión ( $P_T$ ) respectivamente y el nuevo ajuste de la potencia de transmisión ( $P_{t,t+\tau}$ ) está dado por [AGA00]:

$$(P_{t,t+\tau}) = P_T * \frac{S_{UmbraI}}{S_{t,t+\tau}} \quad (\text{Ec. 9.6})$$

donde,

$S_{umbral}$  = es la potencia de señal de umbral.

$P_T$  = es la potencia de transmisión.

$(S_{t,t+\tau})$  = es la potencia de señal del transmisor.

Por ello, cada nodo transmite con una potencia mínima que es requerida para poder alcanzar al nodo que se desea reciba el paquete de información.

Así, el ajuste dinámico de potencia puede ser hecho de manera distribuida, mostrando de un 3% a un 5% en el ahorro de energía mediante este esquema [AGA00].

Adelante, se expone un algoritmo, el cual emplea un mecanismo de control distribuido de potencia [WAT01].

### **9.7.2 Mecanismo de Control Distribuido de Topología**

Este algoritmo, determina que cada nodo de la red, lleva acabo de manera independiente un algoritmo de localización y determina el nivel de potencia apropiado que permita una buena comunicación de los nodos dentro de la red.

Los nodos incrementaran la direccionalidad en base a la potencia hasta que encuentre los nodos vecinos en diversas direcciones. Inmediatamente, una vez que conoce la distancia a la que los nodos vecinos se encuentran, se podrá

ajustar la potencia con respecto a cada nodo para asegurar que la información a tal nodo llegue. De forma tal, que la potencia de transmisión será la justa dependiendo del nodo que se desea alcanzar, garantizando conectividad y un mayor tiempo de funcionamiento para el nodo.

El principio detrás de este algoritmo es una topología tipo cono en una superficie de dos dimensiones [SAN99].

El modelo asume un conjunto  $V$  de nodos  $n$  en un plano. Cada nodo consiste de una unidad de potencia, una memoria y un procesador que hace cálculos simples. Cualquier nodo  $n$  puede mandar mensajes con un rango variado de potencia que va de  $0 \leq p_{MINIMA}(p) \leq P_{MAXIMA}$ . De manera irrelevante, de cualquier parte que el nodo  $n$  inicie una transmisión de mensaje, todos los nodos que reciben el mensaje (conjunto  $N$ ) responden con un reconocimiento (ACK-Acknowledgement). Así el nodo  $n$ , descubre el conjunto de nodos  $N$ . Cuando cualquiera de los nodos  $u$  o  $v$  se intercambian mensajes y reconocimientos entre sí, ellos se percatan de la dirección que se encuentran uno con respecto al otro con una separación de un grado  $\pi$ . Por lo tanto, los nodos  $u$  y  $v$  transmiten con un potencia  $p$  y  $p + \pi$ , respectivamente.

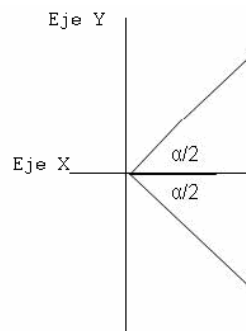
Parámetros como el ángulo de llegada del mensaje (AOA - Angle of Arrival), se calcula para determinar la dirección de un nodo.

El algoritmo inicia el proceso de descubrimiento de nodos en la red. Esto es, que en cada nodo se ejecuta un algoritmo distribuido a través de toda la red.

Iniciando con un valor de potencia de transmisión pequeño, cada nodo manda un mensaje. Cualquier nodo lo recibe y manda un reconocimiento de vuelta



al que envió el mensaje. El nodo que envía el mensaje, guarda los registros de todos los reconocimientos que le llegaron poniendo atención a la dirección en la cual recibió cada uno de los reconocimientos. El nodo que envía determina entonces si existe la presencia de algún nodo vecino por lo menos a cada grado  $\alpha$ . Cada nodo  $u$  comienza con un valor inicial de potencia  $p$ . Si el nodo  $u$  descubre a cualquier vecino  $v$ , le añade al conjunto de nodos vecinos  $N(u)$ . El nodo sigue incrementando la potencia hasta que un nodo es encontrado en cada cono o hasta que la potencia  $p$  alcanza su valor  $P_{MAXIMA}$ . Esta condición se determina de manera matemática como se formula en la figura 9.6. Esto es, cada nodo en el conjunto  $N(u)$  cubre un cono para cualquier nodo  $u$ . Si la unión de todos los conos forma un ángulo mayor a  $2\pi$ , el algoritmo. Lo que se hace al principio es inferir que si hay un nodo  $v$  en el cono cuando se manda a una potencia máxima de transmisión  $P$ , entonces siempre habrá otro nodo  $v'$  en el cono con una potencia mínima  $p(u)$ , por lo que el algoritmo es simétrico.



**Figura 9.6** Determinación de Cobertura [SAN99].

Posteriormente, los bordes del cono se remueven sin afectar la conectividad de los nodos y sin que el enlace con una mínima potencia de transmisión se pierda. Si dos nodos  $v$  y  $w$  existen en el mismo cono para un nodo  $u$ , con  $v, w \in N(u)$  y  $w \in N(v)$ , entonces el nodo  $w$  se remueve de  $N(u)$  si satisface la siguiente condición,

$$P_{MAXIMA}(u, v) + p_{MINIMA}(v, w) \leq q * p_{MINIMA}(u, w) \quad (\text{Ec. 9.7})$$

donde,

$P_{MAXIMA}(u, v)$  = máxima potencia de transmisión de  $u - v$ .

$p_{MINIMA}(v, w)$  = mínima potencia de  $v - w$ .

$q$  = Potencia promedio de enlace de  $u - w$ .

$q * p_{MINIMA}(u, w)$  = valor que define en parte la remoción de  $N(u)$ .

Para valores de  $P_{MAXIMA}$  menores que  $2\pi/3$ , el algoritmo garantiza el máximo conjunto de nodos conectados.

A la par, tenemos a nivel de la capa de Red, diversos métodos para la reducción en el consumo de energía en la parte de comunicación y computo en los nodos dado que son sus dos mayores funciones.

## 9.8 Soluciones a Nivel Capa de Red

En la siguiente tabla 9.1 se lista la potencia consumida en la parte de comunicación durante diferentes modos de operación.

**Tabla 9.1** Potencia consumida por tarjetas de PC de Áreas Locales Inalámbricas (Lucent, Orinoco).

<b>Modo</b>	<b>Potencia consumida (Watts)</b>
Transmisión	1.4
Recepción	0.9
Inactivo (dormido)	0.05

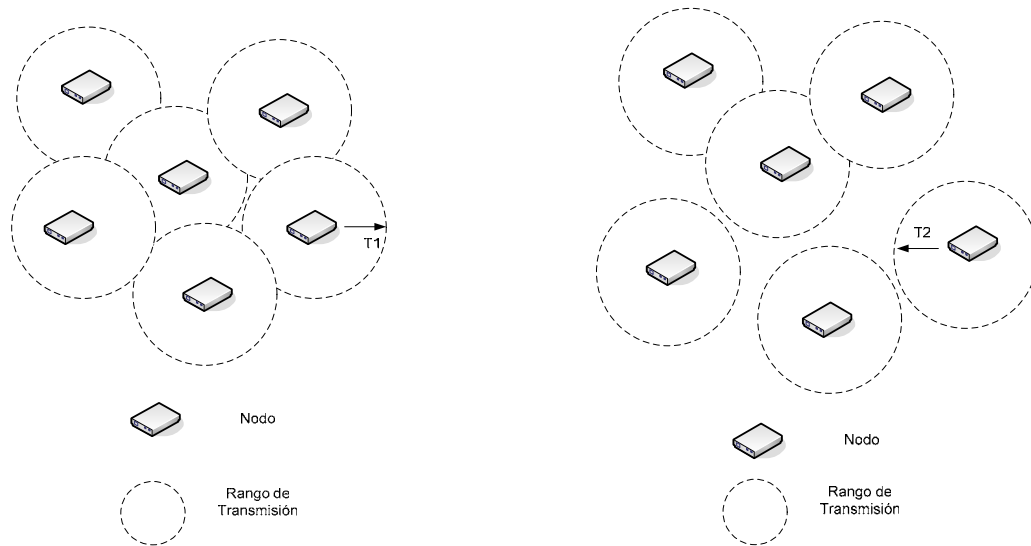
Una propuesta que intenta satisfacer tres objetivos principales como el incremento de vida de las baterías, aumento en la capacidad de manejo de tráfico en la red y un decremento en la falla de enlaces de los nodos es un protocolo de control común de potencia (COMPOW - *Common Power Control*) [KAW01].

### **9.8.1 Control Común de Potencia**

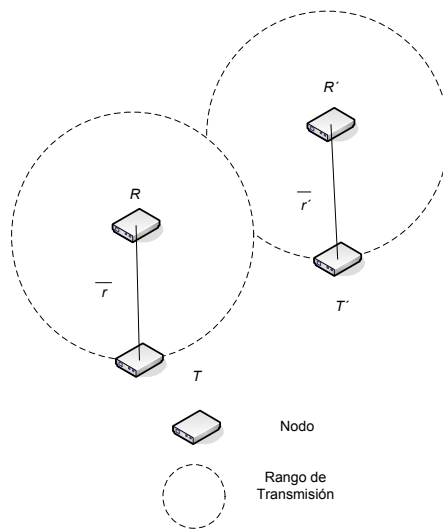
Este protocolo se sustenta de acuerdo a la necesidad de un nivel de potencia de transmisión óptimo en nodos de redes inalámbricas de Sensores, buscando que se ahorre la potencia de la batería reduciendo el rango de transmisión del nodo. Desencadenando a su vez, a la formación de una red con un mínimo de interferencias. A continuación se enuncian las razones que motivan ha adquirir un nivel de potencia común:

- ❖ Un simple mecanismo de intercambio de mensajes en donde se llevan acabo solicitud para mandar información e indica si el status en la red permite enviarlos, se tiene que a diferentes nodos se infiere un nivel de potencia de transmisión diferente para cada nodo. Esto ya que puede darse la ocasión en el que un nodo vecino al que manda el mensaje, no escuche la transmisión, y esté desee transmitir información cayendo en una colisión.
- ❖ Dado los reconocimientos en la comunicación como parte del intercambio de mensajes en la red, entre un nodo transmisor ( $T$ ) y un nodo receptor ( $R$ ). El nivel de potencia para  $R$  debe ser por lo menos igual al de  $T$  para que los reconocimientos de recepción de información entre uno y otro nodo lleguen. Si tenemos un nivel común de potencia seleccionado de alto valor, esto nos puede conducir a presenciar interferencias entre los nodos como se

muestra en la figura 9.7 (a). Por otra parte, si el valor es muy bajo, es probable que no se pueda alcanzar a todos los nodos directamente. Así, la comunicación recaerá en la retransmisión por otros nodos intermedios que transfieran el mensaje hasta llegar al nodo destino [KAW01]. Resultando en un partición de la red como se observa en la figura 9.7 (b). Para estudio consideramos una red con  $n$  nodos con una tasa de transferencia de  $W$  Bits/sec, en un área circular de  $A$  metros cuadrados. El rango común de comunicación ha ser calculado se asume como  $r$ . Una transmisión exitosa del nodo  $T$  al nodo  $R$  requiere que ninguna otra transmisión se lleve acabo alrededor de una distancia de  $(1 + \Delta)r$  con respecto a  $R$ , donde  $\Delta > 0$ . Ahora consideramos dos transmisiones simultáneas, una que va de  $T$  a  $R$  y otra que va de  $T'$  a  $R'$  separadas por una distancia de  $\bar{r}$  y  $\bar{r}'$  respectivamente, ilustrado con la figura 9.8. La figura 9.7. Niveles de potencia y rango. (a) Interferencia ocasionada por un rango transmisión en de rango amplio ( $T_1$ ). (b) Partición de la red dado un rango bajo de transmisión ( $T_2$ ).



**Figura 9.7** Niveles de Potencia y Rango[KAW01]



**Figura 9.8** Transmisiones Simultáneas Exitosas[KAW01]

Por lo tanto la distancia entre los receptores  $R$  y  $R'$  esta dado por,

$$|R - R'| \geq (\Delta \bar{r} + \bar{r}') / 2 \quad (\text{Ec. 9.8})$$

donde,

$|R - R'|$  = es el valor absoluto de la diferencia entre la distancia a la que se encuentran los receptores uno con respecto al otro.

$\Delta$  = el área de cobertura del receptor en metros cuadrados.

$\bar{r}, \bar{r}'$  = radios del área de cobertura de los dos receptores.

Para determinar si la distancia de cualquier transmisor y receptor debe ser menor al rango común  $r$ , debemos postular que  $n$  nodos tienen un rango común  $r(n)$  el problema se define como.

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \text{Pr obabilidad}(\text{redconectada}) = 1 \quad (\text{Ec. 9.9})$$

Solo sí,

$$r(n) = \sqrt{\frac{\Delta(\log n + k(n))}{\pi n}}, \quad k(n) \rightarrow +\infty \text{ al igual que } n \rightarrow +\infty \quad (\text{Ec. 9.10})$$

donde,

$r(n)$  = rango común de  $n$  nodos.

$\Delta$  = el área de cobertura del receptor en metros cuadrados.

En [KAW01] se prueba que el protocolo de potencia común, COMPOW funciona de manera eficiente solo si en la red se tiene una distribución homogénea de los nodos y en forma de un conjunto de nodos. Aunque también con el protocolo CLUSTERPOW se puede trabajar en una red no homogénea de nodos [KAW03].

Otro campo de administración de energía además de los apartados de la capa de enlace y de red, son los esquemas que manejan técnicas que tratan de reducir el consumo de energía mediante un control de los dispositivos que pertenecen a la red, en nuestro caso los nodos de manera general.

## **9.9 Esquemas de Administración de Potencia del Sistema**

Esta sección trata con el control de la energía del procesador de los nodos en una red de Sensores. Un diseño eficiente de hardware trae consigo una reducción muy importante en el consumo de energía de cada nodo. Eso se afectado mediante la operación de modos de ahorro de energía de los nodos mediante un proceso de encendido/apagado.

Se busca mediante técnicas que el procesador reduzca el número de cálculos que requiere desempeñar. Las técnicas aplicadas a un nivel de hardware son:



- Señalización Consciente de Energía (PAMAS- del inglés Power-Aware Signaling) [SIN98].

### **9.9.1 Señalización Consciente de Energía**

Esta técnica tiene como finalidad determinar el tiempo de duración durante el cual un nodo puede ser apagado sin que la eficiencia en el funcionamiento en la red decaiga.

Este esquema sugiera que se añada un canal de señalización aparte del que se generan mediante los enlace entre los nodos en un protocolo MACA [KAR90]. Este desea crear un canal de acceso de comunicación extra entre los nodos que mediante intercambio de mensajes tales como, listo para enviar (RTS - Ready to Send) o libre para enviar (CTS - Clear to Send), por medio del cual se indique el periodo de tiempo en el que cualquier nodo deberá apagarse. El protocolo se divide en dos partes:

- Adición de un canal de señalización por separado
- Apagado del radio de los nodos.

### 9.9.1.1 Adición de un Canal de Señalización

Esto se puede explicar mediante un diagrama de estado como se ve en la figura 9.9. Un nodo puede estar en cualquiera de los seis estados representados dentro de los iconos rectangulares [SIN98].

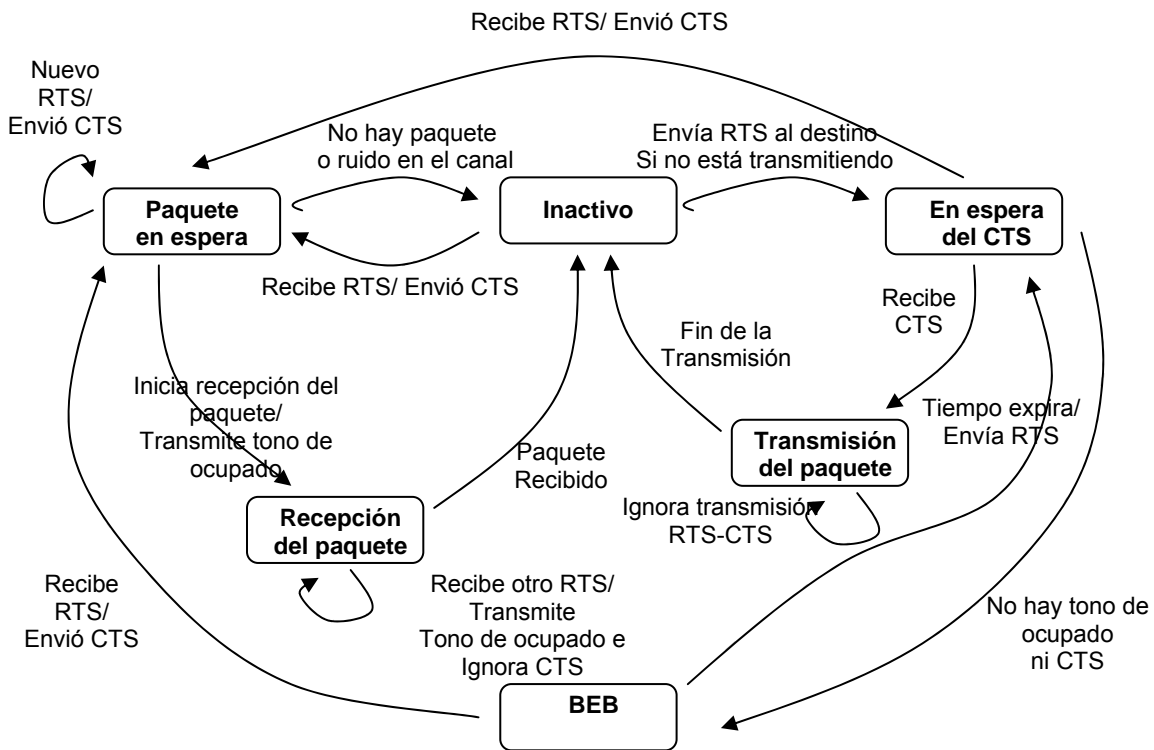


Figura 9.9 Estados de un Nodo[SIN98].

Inicialmente, cuando ningún nodo transmite o recibe paquetes de información, se encuentra en un estado de inactividad.

Cuando el nodo está activo puede experimentar dos acciones la de transmisión o recepción de paquetes.

- Transmisión: Tan pronto como el nodo adquiere un paquete para transmitir, éste envía un mensaje RTS y entra a un estado de espera CTS. Si el nodo no recibe un CTS, entra en un estado de espera binario exponencial, lo que se conoce como el BEB (Binary Exponential Back-off). El BEB es un algoritmo empleado para espaciar la retransmisiones de un trozo de la misma información. Así mismo, BEB podría calendarizar las retransmisiones cuando se suscitan colisiones en el canal de acceso, retrasando la transmisión durante un número aleatorio de ranuras de tiempo que va desde un valor 0 (retransmisión inmediata) hasta  $2^i - 1$  (i tiene un valor entero máximo de 10) [MAN03]. Por lo que el nodo que envía la información tendría que esperar 0, 1, 2, 3 o más ranuras de tiempo. Si se intenta transmitir 16 veces, el proceso se aborta dado que se entiende que la red tiene un tráfico denso. Por último, ya que el nodo recibió el CTS, entra al estado de transmisión del paquete y comienza a transmitirlo.
- Recepción: Cuando el nodo recibe un RTS, inmediatamente manda un CTS de vuelta al quien halla enviado el RTS y entra en un estado de espera de paquete. Esto solo sí no existen nodos vecinos en un estado de espera del CTS o en un estado de transmisión de paquete. Si los paquetes llegan a tiempo, el nodo entra en un estado de recepción de paquete y comienza la recepción del paquete. Si el

paquete no llega a tiempo, el nodo entra a un estado de inactividad nuevamente.

### 9.9.1.2 Apagado del Radio de los Nodos

Para ello, se tiene que definir las condiciones que determina que los radios deben de entrar a un modo de apagado [SIN98]:

- Condición 1: El nodo no tiene paquetes para transmisión
- Condición 2: El nodo vecino se encuentra transmitiendo o recibiendo paquetes, por lo que se tiene el canal ocupado.

Este protocolo se ejecuta por cada uno de los nodos, esto decidiendo la duración del tiempo que deben permanecer apagados. Cuando los nodos tienen paquetes ha ser transmitido, pero el canal esta ocupado por uno de los nodos vecino, se sabe que cuando la transmisión termine el canal estará libre para ser utilizado. Si al nodo vecino le toma  $t_1$  segundos para acabar su transmisión, por ende, el tiempo que el nodo debe permanecer apagada deberá ser  $t_1$  segundos.

Cuando un nodo se enciende de nuevo y escucha que una transmisión se lleva a cabo en ese momento por otro nodo, éste regresa a un estado de inactividad. Tan rápido como un nodo se encienda (se despierte) y tenga paquetes a transmitir, éste manda un paquete de prueba  $t_{probe}(l)$  a todos los nodos vecinos por el canal de control, donde  $l$  es la longitud máxima del paquete [SIN98]. Si una transmisión toma lugar, el nodo que transmite se estima que tiene un periodo para finalizar de  $(l/2, l)$  y éste responde con un paquete  $t_{probe\_response}(t)$ , donde  $t$  es la duración para la cual la transmisión se espera dilate. El nodo, que recibe este paquete, decide su tiempo de apagado. Los paquetes tipo  $t_{probe\_response}(t)$  puede colisionar con otros paquetes diferentes. En tales casos, el nodo que receptor, deberá escuchar el canal de transmisión durante diferentes intervalos de tiempo para que pruebe la eficiente recepción de un paquete de respuesta ( $t_{probe\_response}(t)$ ). Esto es, que el nodo receptor escucha una colisión en un intervalo de tiempo dado, debe éste apagarse por un periodo de tiempo  $t_1$ . Así, se podrá habilitar un ahorro en el consumo de energía, asegurando de igual forma que los paquetes no se pierdan.

En el momento, que un nodo tiene un paquete listo para transmitir, tan pronto como éste se encienda, él mismo manda un RTS sobre el canal de control. Todos los nodos que se encuentran en el proceso de transmisión o recepción mandan un tono de ocupado sobre el mismo canal. Si una colisión se presenta, el nodo escucha si el canal está libre para transmitir de manera anticipada. Si el canal está ocupado, el nodo permanece un periodo de tiempo mínimo apagado ( $t$ ,

r), donde  $t$  y  $r$  son los tiempos cuando el último nodo transmisor y receptor concluye su periodo de transmisión y recepción respectivamente.