

# Sistema Doble Umbral para el Incremento de la Directividad en un Sensor Ultrasónico

## Double Threshold System for Increase of Directivity in a Ultrasonic Sensor

Jovani A. Jiménez Builes PhD., Juan J. González España Ing  
GIDIA: Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial  
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín, Colombia  
jjjimen1@unal.edu.co; juanj85e@yahoo.com

Recibido para revisión 27 de Febrero de 2008, Aceptado 19 de Mayo de 2008, Versión final 23 de Mayo de 2008

**Resumen**—Este artículo expone la técnica de medición de distancias por medio de ultrasonidos y el Tiempo de Vuelo de la Señal (ToF) usando el método de Doble Umbral desarrollado.

**Palabras Claves:** Tiempo de Vuelo (ToF), Doble Umbral, Ultrasonido, Cross-Talk, Eco-Pulso

**Abstract**—This article illustrates the distance measured with an ultrasonic sensor. It is based on the signal's Time of Flight (ToF) using the developed method: Double Threshold.

**Keywords:** Time of Flight (ToF), Double Threshold, Ultrasound, Cross-Talk, Echo-Pulse.

### I. INTRODUCCIÓN

La automatización y monitoreo de procesos industriales, la investigación robótica, y mucho otros campos, necesitan de elementos que permitan al sistema de procesamiento obtener información del entorno, a estos dispositivos se llama transductores.

Uno de los transductores más usados es el ultrasónico, debido a su bajo coste, robustez, y sencillez circuital, los cuales permiten medición de distancia, creación de radares, mapeo de entornos, ecografías, entre otras aplicaciones.

Una señal ultrasónica es una onda sonora que esta en el rango de frecuencias (20kHz, 100MHz) el cual no es audible para ciertos seres vivientes como el hombre. [1], [3].

Como onda sonora que es su velocidad es dependiente de la temperatura del medio:

$$V_s = V_0 \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (1)$$

Donde  $V_0$  es la velocidad del sonido en el medio a una temperatura de  $0^\circ\text{C}$  y  $T$  es la temperatura actual. En el aire a una temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$  y tomando  $V_0$  de 331m/s la velocidad del sonido es entonces 343m/s. [7]

### II. Medición de Distancia con Ultrasonidos

Como se mencionó, las señales ultrasónicas son usadas para extraer información del entorno, uno de estos casos es la distancia a un objeto. Comúnmente se usa una topología con 2 transductores ultrasónicos, un transmisor (Tx) que emite la señal al medio y un receptor (Rx) que recibe el eco proveniente de los obstáculos dentro del haz de medición [6][8].

La manera como se genera la onda transmitida, y el posterior procesamiento del eco (Figura 1), puede ser realizado mediante varios métodos que se clasifican en dos grupos: Generación de Ondas Continuas o Generación de Ondas en Forma de Pulso. El primero mide la diferencia de fase o frecuencia en una señal modulada en amplitud o frecuencia respectivamente. El segundo grupo se basa en la medición del Tiempo de Vuelo de la Señal (Time of Fly ToF), es decir el tiempo que tarda un pulso de onda en recorrer la distancia entre el sensor y el objetivo. Este último es el más comúnmente usado en la literatura estudiada. [5], [7]

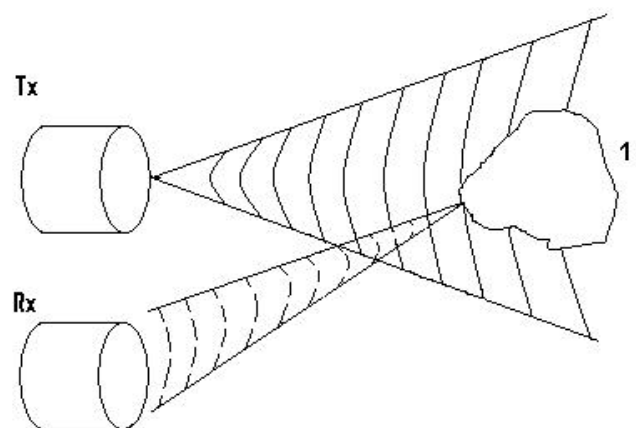


Figura 1. Emisión de una señal ultrasónica y recepción del eco proveniente del objeto 1

### A. Métodos de Medición por ToF

La ecuación que define el método de ToF es:

$$X = V_s * \frac{t_v}{2} \quad (2)$$

Donde:

$V_s$ : es la velocidad del sonido en el entorno.

$t_v$ : es el tiempo de vuelo de la señal.

$X$ : la distancia a la que se encuentra el objeto.

Se divide por 2 el tiempo de vuelo, ya que este es la duración que tiene el recorrido de la onda desde el transmisor al objeto y desde el objeto al receptor.

Algunos de los métodos para la medición de distancia usando la técnica de ToF son:

#### 1) Umbral Simple.

La señal de eco recibida es amplificada y luego comparada con un nivel de voltaje o umbral, que de ser superado indica la presencia de obstáculo en el ancho de haz del sensor. Ésta topología aunque es la más sencilla también es la más susceptible a ruido y su máximo y mínimo alcance son muy limitados.

#### 2) Umbral Variable.

La señal de eco recibida es amplificada y luego comparada con un umbral variable en el tiempo. Éste método aumenta el alcance máximo, pero genera una amplia zona muerta.

#### 3) Ganancia Variable

Conforme el tiempo de vuelo es mayor la amplitud de la señal disminuye, por lo cual este método da mayor ganancia a aquellas señales que corresponden a objeto más lejanos y luego las compara con un umbral simple.

Éste último método permite la mayor precisión en las mediciones, pero posee la mayor complejidad circuital.

### B. Problemáticas Asociadas.

La precisión de la medición de distancia por ultrasonidos depende de factores como la temperatura y humedad del entorno, tamaño, posición y material del objeto sobre el que incide la onda, ecos-múltiples y cross-talk, siendo este último uno de los más críticos.

#### 1) Temperatura y humedad del entorno.

Aunque es importante conocer el valor exacto de la temperatura para el cálculo de la velocidad del sonido en el entorno, 1°C de desfase genera en la medición absoluta de distancia un error determinado por la siguiente ecuación:

$$\text{Erm}(\mathbf{R}) = \mathbf{R} * (0.0018) \quad (3)$$

Donde:

$\mathbf{R}$  = Rango de distancia

$\text{Erm}(\mathbf{R})$  = Error de imprecisión en la distancia del objetivo en metros para una imprecisión en la temperatura de 1°C cuando el rango  $\mathbf{R}$  está en metros.

Es decir en 5m, el error asociado será de 0.9cm, y el efecto producido por la humedad es aun menor, por lo cual solo en procesos de alta precisión se toman en cuenta estos factores. [2]

#### 2) Tamaño del Objeto.

Conforme se aleja la onda de su fuente generadora, su frente de onda se expande. Éste debe ser siempre 10 veces menor que los objetos sobre los que incide, para obtener una máxima amplitud de eco, por lo tanto objetos diminutos que se hallen lejos de la fuente generadora no serán detectados por el sistema, limitando así el rango de medida del ultrasonido. [2]

#### 3) Impedancia Acústica Objeto.

La impedancia acústica se define como el producto entre la presión acústica en un punto y la velocidad de vibración de la partícula situada en ese punto

$$Z = \rho * C \quad (5)$$

Donde:

$Z$  = Impedancia Acústica

$\rho$  = Densidad

$C$  = Velocidad

La importancia de la impedancia acústica en la medición de distancia con ultrasonidos, radica en que la amplitud de la onda ultrasónica reflejada depende de esta característica del objeto sobre el que incide la onda, mediante la ecuación [6] [9] [10] [11]:

$$R = \frac{Z - 1}{1 + Z} \quad (4)$$

$R$  = Índice de Reflexión de onda Plana

$Z$  = Impedancia Acústica

Siendo ambos números complejos

#### 4) Posición del Objeto.

La señal ultrasónica tiene una máxima reflexión sobre el objeto, cuando la cara sobre la que incide la onda es perpendicular al eje acústico del sensor. Si esto no sucede la onda reflejada tendrá menor amplitud y conforme el ángulo en que incida la onda se aleje de 90°, la señal tenderá a perderse y no será percibida por el receptor. [2][4][6]

#### 5) Ecos múltiples y cross-talk

En todo entorno que sean utilizados ultrasonidos estarán presentes, además del objetivo, otros obstáculos que al incidir sobre ellos la onda ultrasónica generan reflexiones que son percibidas por el receptor, este caso se ilustra en la figura 2 [6].

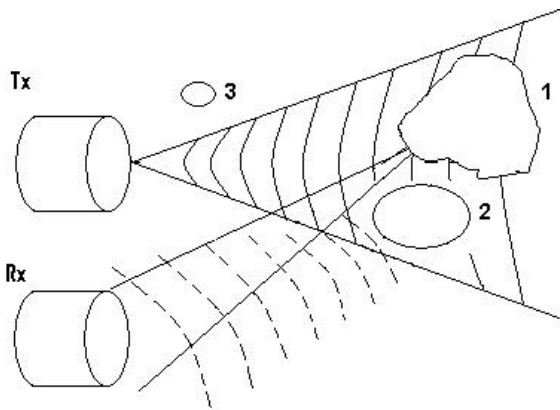


Figura 2. Múltiples obstáculos en un entorno. 1. Objeto 2. Obstáculo dentro del haz 3. Obstáculo fuera del Haz

En esta figura el objeto 1 es el objetivo, el 2 y el 3 son obstáculos adicionales, y la distancia medida por el sistema será la correspondiente al objeto 2, este error se debe a que el objeto 2 está dentro del haz de radiación y su eco es percibido por el receptor, y aunque el eco del objeto 1 también es recibido, el objeto 2 se encuentra más cercano. [8],

Asimismo un haz de radiación inadecuado genera cross-talk por solapamiento de lóbulos, donde el haz de radiación interfiere con el haz de recepción, indicando al sistema que hay un objeto a una distancia cercana. Esta interferencia es de las más importantes, porque el máximo alcance conseguido depende en gran manera de como sea eliminada.

También la presencia de otros obstáculos en el entorno genera múltiples choques o ecos de una señal, que al llegar al receptor engañan al sistema indicando erróneamente la presencia de un obstáculo.

### III. SISTEMA DESARROLLADO

#### A. Primer Prototipo

Se desarrolló un primer prototipo usando en la etapa de emisión un oscilador Colpitts con cristal de baja distorsión armónica, sintonizado a la frecuencia de los transductores: 40KHz. La etapa de recepción consta de un amplificador diferencial y un sistema de umbral simple que permitió un rango de medición entre 3 y 110 cm, con error asociado de . El control del sistema está a cargo del microcontrolador MC68HC908GP32. Las principales causas de este corto alcance se deben a los siguientes factores:

##### 1) Cross-talk.

La amplitud del eco proveniente de objetos que se hallen más allá de 110 cm, tendrán una amplitud inferior a la señal de ruido Cross-talk, producida por el solapamiento del lóbulo de recepción y de radiación. Cuando en este rango de distancias se amplifica la señal de eco para ser detectada, indirectamente se está haciendo lo mismo con el ruido, y el sistema es engañado, por lo cual la ganancia debe ser graduada de tal manera que el ruido pueda ser ignorado. Esto limita el alcance máximo a 110cm.

#### 2) Entorno

Las pruebas de este sonar se hicieron dentro de un laboratorio con varios obstáculos cercanos como mesas, sillas, osciloscopios, entre otros, que generan ecos de amplitud superior a los ecos recibidos de objetivos a distancias superiores de 110cm.

Para este primer sensor de distancia desarrollado, en la figura 3 se exhibe el comportamiento del error en función de la distancia, donde se puede notar que la fiabilidad del sistema está garantizada solo hasta 110cm.

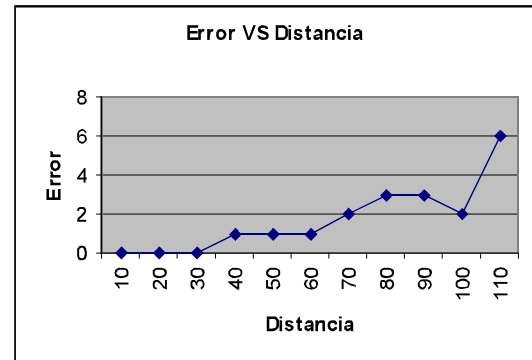


Figura 3. Error en función de la distancia para el sistema de umbral simple desarrollado.

#### B. Sistema Doble Umbral

Como las condiciones del proyecto exigían un sistema robusto, sencillo circuitalmente, económico y con un alcance máximo de 3m, el resultado obtenido hasta ese punto no había cumplido con las especificaciones. Debido a esto se hizo necesario un estudio a mayor profundidad de las señales ultrasónicas y que al final permitió el desarrollo de un sistema innovador, según la literatura encontrada, que cumplía con estos requisitos y al cual se llama: Doble Umbral.

El Sistema Doble Umbral discrimina entre la interferencia generada por el cross-talk, y el eco proveniente del objetivo, y a su vez este del eco producido por los obstáculos del entorno. El principio básico de funcionamiento del Doble Umbral consiste en dividir en dos grupos los ecos asociados a los diferentes puntos del espacio y asignar a cada grupo de ellos un nivel de amplitud mínimo abajo del cual se tomara como ruido de cross-talk, o interferencia de obstáculos cercanos. El primer grupo está en el rango de [3cm, 110cm], y el segundo en (110cm, 400cm]. El cross-talk y los más significativos ecos debido a obstáculos diferentes al objetivo se encuentran en el rango de [3cm, 110cm].

La señal ultrasónica recibida se amplifica mediante los amplificadores G1 y G2, para luego ser comparada en A1 y A2, con los umbrales U1 (0.756 V) y U2 (3.27 V). La señal comparada con U1, habrá sido amplificada por G1, y la señal comparada con U2, por G1 y G2. Esto se puede ver en la figura 4, donde A1 y A2, que sus salidas son las que van al microcontrolador MC68HC908GP32, son los circuitos comparadores, con sus respectivos umbrales U1 y U2. G1 y

G2 son los circuitos amplificadores. El microcontrolador, en éste caso es el encargado de analizar la información recibida, y repetir todo el proceso de medición durante 9 veces más, para luego tomar un promedio sobre ellos, e incrementar así la fiabilidad de la medición.

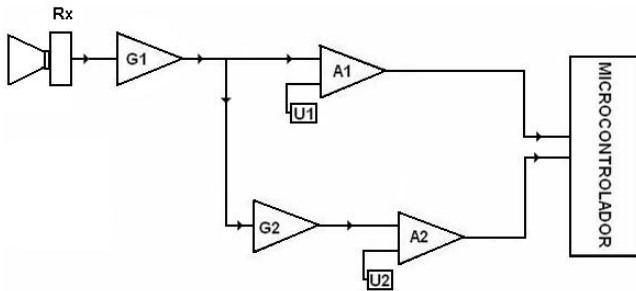


Figura 4. Esquema simplificado del sistema Doble Umbral

1) Grupo 1

Si la señal recibida en el rango de [3cm, 110cm] supera U1 y U2 es debido a la presencia de un eco procedente del objetivo, en caso contrario es un ruido de Cross-talk o de otros obstáculos en el entorno, información que se resume en la tabla 1, donde 0 y 1 significan que el umbral del comparador ha sido superado o no, respectivamente.

Tabla 1. Tabla lógica del sistema doble umbral en el rango de [3cm, 110cm] \*Es una condición imposible ya que toda señal que sobrepase U1, después de haber sido amplificada, sobrepasa U2.

A1	A2	RESPUESTA
1	1	NO SEÑAL
1	0	CROSS-TALK
0	1	IMPOSIBLE*
0	0	ECO-OBJETIVO

2) Grupo 2

Si en el rango de (110cm, 400cm] el umbral 2 es superado indica la presencia de eco proveniente del objetivo, en caso contrario no hay señal o es un evento imposible, esta información se resume en la tabla 2.

Tabla 2. Tabla lógica del sistema doble umbral en el rango de (110cm, 400cm]

\*\*En el grupo 1 la condición de salida de A1=0 y A2=0, indicaba presencia de señal, mas aquí es un estado imposible, porque la amplitud de todas las señales en este rango es inferior a el umbral U1.

A1	A1	RESPUESTA
1	1	NO SEÑAL
1	0	SEÑAL
0	1	IMPOSIBLE
0	0	IMPOSIBLE**

En los dos grupos el Umbral 2 se activara siempre que se reciba señal ultrasónica, ya sea proveniente de eco o de cross-talk, lo cual es el comportamiento del sistema de umbral simple, pero cuando en el Grupo 1 no se activa el Umbral 1 la señal es proveniente de los ruidos mencionados, por lo tanto el Umbral 2 permite detectar la presencia de señal ultrasónica y el Umbral 1 se encarga de discriminar su procedencia.

3) Algoritmo del Sistema Doble Umbral

El algoritmo del Sistema Doble Umbral en el proceso de medición de distancia, se activa cuando se genera una interrupción por la recepción de una señal ultrasónica que supera el nivel de umbral 2. Después de haber detectado las señal ultrasónica se determina si la distancia a la que hace referencia el eco es superior a 110 cm, de ser así la distancia medida corresponde a un eco del objetivo, en caso contrario se sigue a observar el estado de umbral 1, que de estar en '0' indica la presencia de eco del objetivo, en caso contrario se debe a cross-talk, o a otros obstáculos diferentes del objetivo. Esta información se resume en el diagrama de flujo en la figura 5.

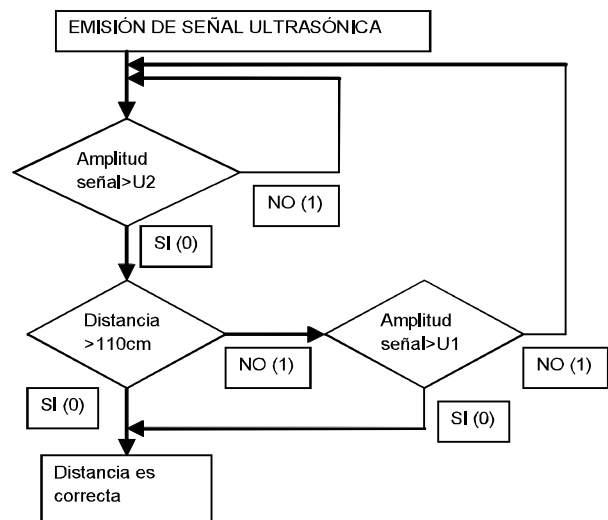


Figura 5. Algoritmo usado para el sistema doble Umbral

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

El sistema final desarrollado opera a , con un consumo de 13mA, se paso de un alcance máximo de 110cm en el primer diseño "Umbral Simple", y se incremento a 400cm manteniendo un error promedio de , y con un alcance mínimo de 3cm. La interferencia de cross-talk se logro eliminar, y los objetos en el entorno adicionales al objetivo no interfirieron en la medida. Por medio del osciloscopio se logro ver que aun cuando el suelo, mesas de laboratorio, sillas y otros objetos eran percibidos por el sonar, el sistema doble umbral elimina su interferencia, lo cual se traduce en una mejora de la directividad del sonar, midiendo solo los objetos que se hallen dentro de un angosto haz de radiación. La complejidad circuital y costos asociados son relativamente bajos en comparación con otras topologías, además su rechazo al ruido endógeno y del entorno es alta.

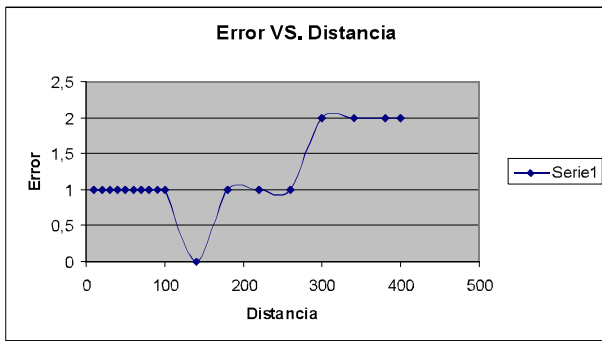


Figura 6. Error en función de la distancia para el sistema de Doble Umbral desarrollado.

## V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El sistema doble umbral corrigió exitosamente el cross-talk e incremento el alcance máximo del sensor en 4 veces aproximadamente, además se logró eliminar ruido proveniente de múltiples choques de la señal en el entorno. El segundo umbral aunque cumple exitosamente su labor, se logró detectar que un análisis más profundo de la señal que se halla en ese punto podría llevar a obtener el tipo de material del objeto sobre el que incide o el ángulo que tiene el plano del objetivo con respecto al eje acústico del sonar. También trabajos futuros consistirán en reemplazar el primer umbral por un sistema de procesamiento que permita no solo medir grandes distancias en materiales con alta impedancia acústica, sino también de baja como lo son: icopor, poliuretano, entre otros materiales porosos. También se deberá hacer pruebas del sonar en ambientes con variables extremas de temperatura, o humedad para determinar las mejoras pertinentes a fin de tener un sistema más robusto a cualquier tipo de ambiente.

## REFERENCIAS

- [1] American Society for Nondestructive Testing, Nondestructive Testing Handbook, Volume 7, Ultrasonic Testing (ASNT, 1991)
- [2] D. Massa. Choosing an Ultrasonic Sensor for Proximity or Distance Measurement. Parte 1: Acoustic considerations. Sensors. Vol. 16, Nº 2. February 1999.
- [3] Gosálbez, J.; Salazar, A.; Miralles, R.; Bosch, I.; Vergara, I. (2004) Mejora de la Detección y Caracterización de Materiales con un Sistema Automático de Ultrasonidos. Departamento de Comunicaciones Universidad Politécnica de Valencia.
- [4] Gunarathne, G.; Christidis, K. (2000) Material Characterization In-Situ using Ultrasound Measurements. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC 2000. Proceedings of the 17th IEEE. Volume 1, Issue , 2000 Page(s):483 - 488 vol.1.
- [5] Jiménez, J.; Acosta, G.; González, J.; Flórez C.; Bonilla, J.; Gutierrez, A.; SONAR Multi-zona de Doble Umbral con Reducción de Zona Muerta. En: Memorias Sexta Conferencia Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática CISCI2007. USA.
- [6] NASA (2007). Ultrasonic Testing of Aerospace Materials. URL: [klabs.org/DEI/References/design\\_guidelines/test\\_series/1422msfc.pdf](http://klabs.org/DEI/References/design_guidelines/test_series/1422msfc.pdf) Fecha de acceso: Marzo 27 de 2008.
- [7] Navarro, D.; Ríos, L.; Parra, H. (2004) Sensores de Ultrasonido usados en Robótica Móvil para la Medición de Distancias. En: Scientia et Technica Año X, No 25. Pags 35-40.

- [8] P. Shirley : An introduction to ultrasonic sensing. Sensors, Vol. 6, Nº 11, 1989.
- [9] Pérez A; Tejada F.; Machimbarrena M<sup>a</sup>; Herráez M.; González J. Medida "In-Situ" De La Impedancia Acústica De Materiales Con Técnicas Intensimétricas. Tecnicacústica - Madrid 2000
- [10] Wang H., Ritter T., Cao W., Shung K.. Passive Materials for High Frequency Ultrasound Transducers. SPIE Conference Proceedings. 1999
- [11] J. Stepanić, H. Wüstenberg, V. Krstelj, H. Mrsek: Contribution to classification of buried objects based on acoustic impedance matching, Ultrasonics, 41(2), pp. 115-123, 2003,

**Jovani Alberto Jiménez Builes** - PhD Licenciado en Sistemas e Informática, Universidad de Medellín. Magíster en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia. Doctor en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Profesor Asociado y Coordinador del GIDIA: Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial de la Universidad Nacional de Colombia.

**Juan José González España** - Ing. Ingeniero Electrónico de la Universidad de San Buenaventura seccional Medellín.

## Cisco Academy Training Center - National University of Colombia

[Presentation and history]

### IT Essentials

IT Essentials I: PC Hardware and Software  
IT Essentials II: Network Operating Systems

### Cisco Certified Network Associate

CCNA 1: Network Fundamentals  
CCNA 2: Routing Protocols and Concepts  
CCNA 3: LAN Switching and Wireless  
CCNA 4: Accessing the WAN

### Cisco Certified Network Professional

CCNP Building Scalable Internetworks  
CCNP Implementing Secure Converged Wide Area Networks  
CCNP Building Multilayer Switched Networks  
CCNP Optimizing Converged Networks

### Network Security

### Fundamentals of Wireless LANs

### Telephony over IP

### Voice over IP



### Contact

Faculty of Minas. Carrera 80 65-223 BI M3-211  
Web site: <http://cnap.unalmed.edu.co>  
E-mail: [catc@unalmed.edu.co](mailto:catc@unalmed.edu.co)  
Phone: +574 4255268  
Fax: +574 2341002  
Medellin, Colombia