REFLEXIONES SOBRE ASPECTOS DIDÁCTICOS EN LA ENSEÑANZA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

JULIO J. GONZÁLEZ
Departamento de Ingeniería Electrónica y de Computación.
Escuela de Ciencia e Ingeniería.
Universidad Estatal de Nueva York (SUNY) en New Paltz, Estados Unidos
gonzalj@engr.newpaltz.edu

En este artículo, voy a considerar diferentes aspectos educativos en Ingeniería Eléctrica, basados en mi experiencia de veintiséis años como docente universitario en instituciones de Argentina, Estados Unidos, Alemania y España. Espero que mis experiencias didácticas aquí expuestas resulten de interés investigativo para aquellos que poseen una formación académica sobre psicología cognoscitiva y otras disciplinas específicas relacionadas a la adquisición del conocimiento.

Palabras claves: Adquisición de conocimiento, ingeniería eléctrica, etc.

1. Introducción

Los aspectos educativos expuestos en este artículo se refieren a las ventajas de las siguientes acciones didácticas: A) Proveer a los estudiantes un modelo del proceso cognoscitivo inherente en la asimilación de conceptos de ciencia e ingeniería, B) buscar fehacientemente (hasta encontrarlo) el método más efectivo y simple para transmitir conocimientos en un tema específico, C) integrar temas aparentemente disímiles, mediante la aplicación de ejemplos clarificadores y D) fomentar en el estudiante la necesidad de crear una "expectativa teórica" de la solución a un problema determinado, antes de efectuar simulación en el ordenador. Dichos aspectos educativos serán ilustrados a través de ejemplos derivados de mi experiencia docente

2. Un modelo del proceso cognoscitivo

Existen muy buenos artículos sobre la adquisición del conocimiento. Por ejemplo, los P. Compton y R. Jansen en [1] tratan el tema desde el punto de vista filosófico. En cambio, en el trabajo de investigación [2] por Ángel Puerta y coautores, el énfasis es sobre la presentación de mecanismos para generar métodos de resolución de problemas. En esta sección, el foco es completamente diferente: el proveer a los estudiantes con un simple modelo del proceso cognoscitivo cuya adquisición les ayude a comprender por qué no consiguen lograr un entendimiento profundo, y cómo pueden superar este obstáculo.

Muchos estudiantes se frustran porque no pueden entender conceptos de ingeniería eléctrica en forma inmediata. Siempre hago la broma a mis alumnos que el proceso de aprendizaje se compara a pelar una cebolla: "antes de llegar al núcleo del entendimiento total, debes pasar por muchas capas de aprendizaje" (Figura 1).

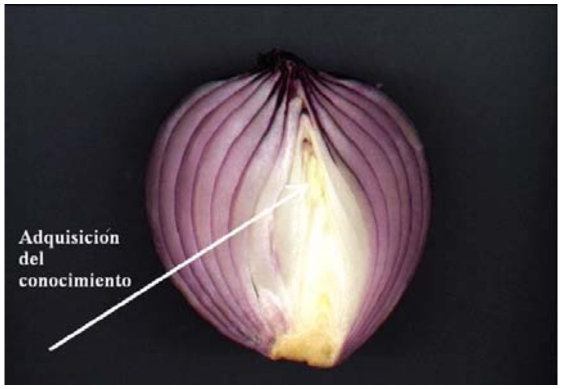

Figura 1: Las diferentes capas de una cebolla ilustran las diversas etapas del proceso cognoscitivo

La primera capa se atraviesa muy fácilmente (sobre todo si el instructor es ameno y explica claramente), con el sólo hecho de asistir a clase. Esto en efecto produce una sensación engañosa en el estudiante, quien a menudo manifiesta: "Ya lo he comprendido todo perfectamente". Esa sensación queda desarmada cuando el estudiante intenta infructuosamente resolver un problema por sí mismo. Cuando finalmente tiene éxito, expresará algo así como: "Había un detalle que no comprendía perfectamente, pero ahora todo está claro". En realidad, no está para nada claro, pues el estudiante arribó a la respuesta correcta después de un largo tiempo de tratar diferentes soluciones. Por lo tanto la mente se encuentra en un estado de confusión. Éste sería el momento apropiado para reconsiderar las diferentes soluciones y entender el porqué la presente solución es la correcta, y así ahondar aún más en el conocimiento. Pero muy pocos estudiantes, tal vez un 5%, se detendrán a analizar las diferencias entre la solución correcta y las incorrectas. La mayoría, un 95%, estarán satisfechos y pensarán erróneamente que han alcanzado un nivel de conocimiento profundo. Su ilusión quedará frustrada cuando se enfrenten a un problema similar en un examen, pues no podrán recordar (o les llevará mucho tiempo) cuál era la solución correcta, y (lo más importante), por qué era la correcta.

El diagrama en la Figura 2 trata de explicar la concepción del autor sobre el proceso cognoscitivo, como un mecanismo de retroalimentación con sus típicas señales y elementos.

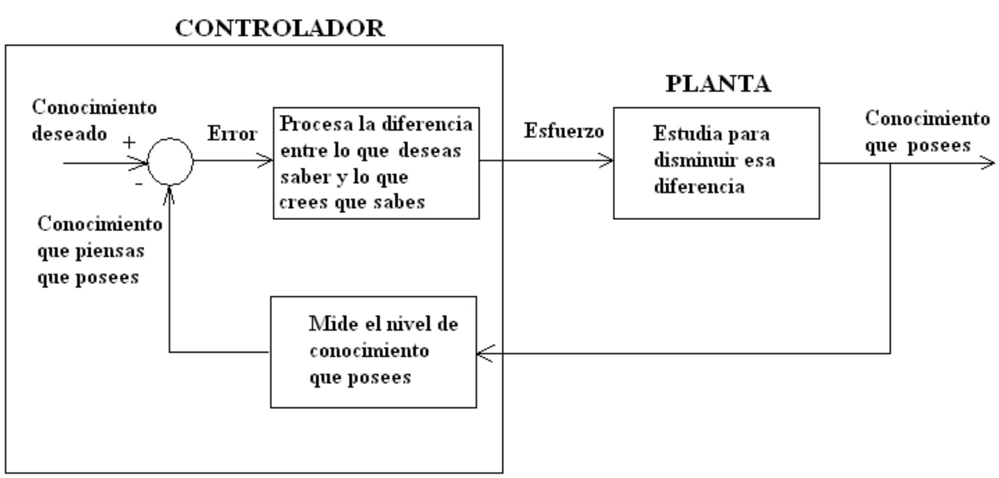

Figura 2: Modelo del proceso cognoscitivo como un mecanismo de retroalimentación

Como se muestra en la Figura 2, las señales son: de entrada, de salida, de salida percibida, de error y de control. Los elementos son el controlador (compuesto del perceptor, el comparador, y el procesador) y la planta. La señal de entrada o referencia es el conocimiento deseado, el cual es comparado con el conocimiento que pensamos que poseemos (conocimiento percibido obtenido por el perceptor). Esta comparación genera un error, el cual es procesado por la unidad denominada procesador. Note que las tres unidades que componen el controlador (perceptor, comparador y procesador) residen en el cerebro del estudiante. El controlador le comunica a la planta (que es el estudiante en sí mismo) la necesidad de producir el esfuerzo de estudiar más para disminuir el error.

La siguiente observación surge inmediatamente: En una máquina automática (sin participación del ser humano), el controlador y la planta son unidades perfectamente separadas. En cambio en el sistema cognoscitivo descripto, dichos elementos son partes de la misma entidad (el estudiante). Consecuentemente, el problema que ocurre es la falta de objetividad, como se explica a continuación: En cualquier mecanismo de retroalimentación, el elemento más crítico es el perceptor; si el perceptor no funciona correctamente, el mecanismo completo falla. El sistema cognoscitivo descripto no es la excepción a esta regla. Si el estudiante percibe un nivel de conocimiento más alto del que realmente posee, el comparador detectará un error nulo ó muy pequeño y dejará de indicar la necesidad de estudiar. Consecuentemente, el proceso de aprendizaje se interrumpirá cuando todavía quedan muchas "capas de la cebolla por pelar" antes de llegar al núcleo de entendimiento total.

Mi experiencia es que a los estudiantes les resulta extremadamente útil escuchar esta concepción sobre el proceso cognoscitivo. Les alerta a no confiar en su propio juicio y les incita a juzgar su nivel de conocimiento lo más objetivamente posible. Por supuesto que el aceptar esta explicación les ocasiona el "inconveniente" de incrementar muchísimo el tiempo requerido de estudio, pero obtienen su recompensa en el placer producido por un entendimiento más profundo, y en la consecuente mejora en las notas obtenidas en sus exámenes.

3. Explicando conceptos complicados en forma sencilla:

Siempre me asombró la disparidad que existe entre el genio creativo y la capacidad de explicar algo complicado en forma sencilla. Por ejemplo, Albert Einstein fue un genio creativo, quien no vaciló en objetar los conceptos por todos admitidos sobre espacio y tiempo, para descubrir nuevas y asombrosas ideas. Sin embargo, no fue capaz de explicar estas ideas en forma sencilla. Por otra parte, educadores como nosotros, quienes no podremos nunca igualar el genio creativo de Einstein, podemos no obstante encontrar métodos poderosos de transmitir conceptos difíciles en forma sencilla.

Como ejemplo de lo dicho, considere la teoría de la relatividad especial, y específicamente, los conceptos de dilatación del tiempo y contracción del espacio. Estos conceptos, que son difíciles de asimilar pues van contra nuestra intuición, se pueden explicar sencillamente utilizando una herramienta matemática tan simple como el Teorema de Pitágoras:

Considere dos observadores O' y O que pueden moverse a velocidad relativa constante *v*. Por simplicidad, supongamos que el observador O' está en reposo con respecto a nosotros, y que el observador O puede subirse a un tren imaginario que se mueve en línea recta de izquierda a derecha (que hacemos coincidir con el eje *x*) a velocidad constante *v*. Todas las variables medidas por el observador O' serán denotadas con el superíndice ' (por ejemplo, los tiempos serán $t';t_1^{'}$, etc.), mientras que las variables medidas por el observador O serán denotadas sin ningún superíndice (por ejemplo, los tiempos serán $t;t_1$, etc.). Realizaremos ahora dos "experimentos mentales", similares en muchos aspectos a los “gedankenexperiments” que realizaba Einstein, pero diferentes en su objetivo: mientras que los gedankenexperiments tenían como meta cuestionar y crear, nuestros experimentos mentales tienen como meta entender y explicar.

3.1. Experimento mental 1: Ambos observadores se ponen de acuerdo con respecto a la distancia medida (Figura 3)

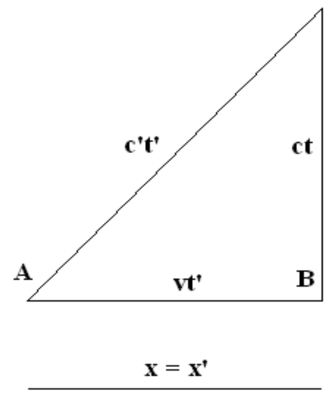

Figura 3: Experimento mental que permite observar la dilatación del tiempo

Para asegurarse de que coincidirán en su medición de distancia, antes de que el observador O se suba al tren, ambos observadores marcan los puntos A y B sobre la vía, los cuales están separados por una distancia $x = x'$.Después de efectuar lo dicho, el observador O se sube al tren, el cual pasará por los puntos A y B a una velocidad constante v.

Ambos observadores comienzan a medir el tiempo cuando el tren pasa por el punto A, e interrumpen la medición cuando el tren pasa por el punto B. Para medir el tiempo, el observador O dispara una bala de luz (un fotón) perpendicular al eje x cuando el tren pasa por el punto A. Ambos observadores obtienen información del tiempo transcurrido midiendo la distancia recorrida por el fotón desde el instante que el tren pasa por el punto A hasta el instante en que pasa por el punto B. Para el observador O, el fotón recorre una distancia ct, mientras para el observador O’, el mismo fotón recorre una distancia $c't'$. Evidentemente, $c't' > ct$.

Las dos posibilidades más sencillas de esta inigualdad son:

a) $t = t'$, consecuentemente debe ser $c' > c$
b) $c = c'$, consecuentemente debe ser $t' > t$

Dado que las ecuaciones de Maxwell y el experimento de Michelson-Morley indican que c es una constante independiente del sistema de medición, debemos admitir que la opción b) es la correcta. Es importante recalcar la potencia didáctica de este experimento mental: el hecho de que la velocidad de la luz es constante produce la conclusión ineludible de que el tiempo debe depender del sistema de referencia.

Una vez admitida la opción b), la simple aplicación del Teorema de Pitágoras permite calcular el tiempo t' en términos del tiempo t. En efecto:

$$(ct')^2 = (vt')^2 + (ct)^2 \Rightarrow t' = \frac{t}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \qquad (1)$$

Esta es la ecuación conocida como dilatación del tiempo.

3.2. Experimento mental 2: Ambos observadores se ponen de acuerdo con respecto al tiempo medido (Figura 4)

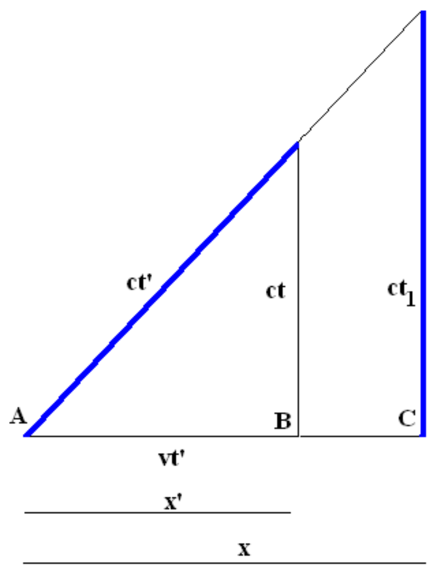

Figura 4: Experimento mental que permite observar la contracción del espacio

Después de realizar el experimento 1), ambos observadores coinciden en que si consideráramos un punto más lejano que el punto B, tal como el punto C, el tiempo *t*' medido por observador O', y el tiempo t_1 medido por el observador O serían iguales (En efecto, las distancias ct_1 y *ct*' recorridas por la luz son iguales). Pero debemos admitir que la única forma de lograr una igualdad de tiempos medidos es que ¡las distancias medidas por los observadores O' y O (*x*' *y x* respectivamente), sean distintas! En efecto, debe ocurrir que $x > x'$.

La relación entre *x*' y *x* se encuentra fácilmente por triángulos semejantes:

$$\frac{x'}{x} = \frac{ct}{ct_1} = \frac{ct}{ct'} = \frac{t}{t'}$$

Usando la ecuación (1),

$$x' = x\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \qquad (2)$$

Esta es la ecuación conocida como contracción del espacio.

El tema presentado es un ejemplo rotundo del poder didáctico de ciertos ejemplos de aprendizaje. Consecuentemente el instructor debe buscar fehacientemente dichos ejemplos hasta encontrarlos.

4. Relacionando temas aparentemente desconectados

Muchos estudiantes asimilan conocimiento en forma dispersa, pero no reconocen la necesidad de integrarlo. Como ejemplo de esta aserción, considere el siguiente problema, que sólo unos pocos estudiantes serán capaces de resolver.

Problema: A un sistema se le aplica una señal sinusoidal de amplitud constante de 1 V y frecuencia variable, que "barre" desde una frecuencia de alrededor de 1 radian/s hasta una frecuencia de más de 1000 radianes/s. Como resultado, se obtiene una señal de salida que, al ser la entrada unitaria, representa también la ganancia del sistema. Esta ganancia está representada gráficamente por el diagrama asintótico de Bode mostrado en la Figura 5. Utilizando esta información, se desea encontrar la respuesta impulsiva del sistema.

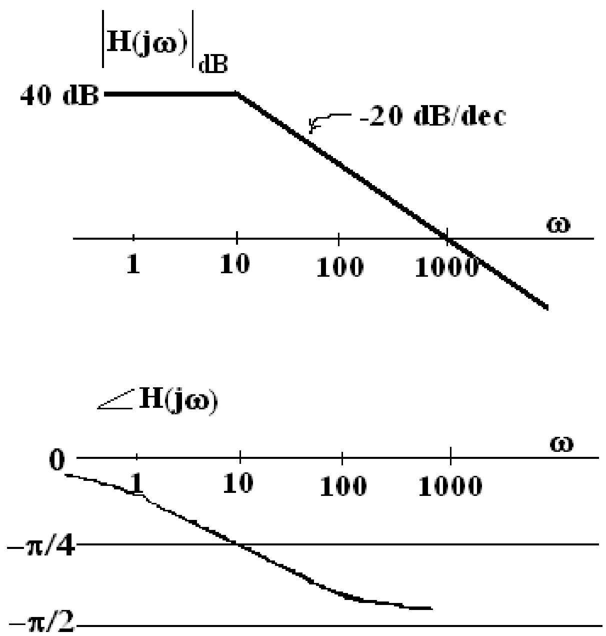

Figura 5: Diagrama asintótico de Bode representando la ganancia de un sistema

Solución: Del diagrama de Bode podemos ver que la ganancia del sistema es:

$$H(j\omega) = \frac{100}{1 + \dfrac{j\omega}{10}}$$

De aquí, haciendo $s = j\omega$, la función de transferencia está dada por:

$$H(s) = \frac{1000}{s + 10}$$

Recordemos que la función de transferencia no es sino la respuesta impulsiva expresada en el dominio complejo de Laplace. Consecuentemente, para encontrar la respuesta impulsiva en el dominio del tiempo, sólo necesitamos hallar la transformada inversa de Laplace de $H(s)$, que está dada por:

$$h(t) = L^{-1}\{H(s)\} = 1000e^{-10t}u(t)$$

El problema es matemáticamente muy sencillo. Sin embargo, la mayoría de los estudiantes no pueden resolverlo porque no son capaces de ver la relación que existe entre los conceptos de: respuesta en frecuencia, función de transferencia y respuesta impulsiva (esta relación esta delineada matemáticamente en el Apéndice 7.1). A pesar de que conocen todos estos temas por separado, no intentaron relacionarlos, y por lo tanto, nunca obtuvieron un conocimiento integral. Conectar temas aparentemente disímiles es una tarea del instructor que invariablemente generará una mejora notable en el nivel de conocimiento del estudiante.

5. Importancia de generar una expectativa teórica del resultado de simulación

La tecnología puede complementar y reforzar el poder de abstracción, pero nunca podrá substituirlo. Específicamente hablando, antes de correr una simulación en el ordenador, el estudiante debe tratar hasta lograr, generar una expectativa teórica del resultado de la simulación. En otras palabras, debe ser capaz de producir una imagen visual que anticipe el resultado que la simulación va a producir. De otro modo, cualquier resultado de simulación que obtenga le satisfará, ¡sea el correcto o el equivocado! El siguiente ejemplo, tomado de [3], ilustra esta idea:

Diseño de un circuito RC: Considere el circuito RC de la Figura 6, donde el voltaje de entrada $v_s(t)$ es una onda cuadrada con un ciclo útil de 50% de amplitud y un período de 100 segundos. Los valores de las resistencias son $R_1 = R_2 = 2$ [KΩ].

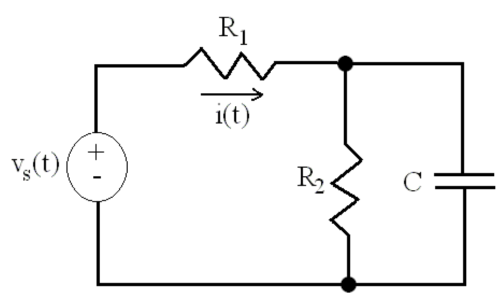

Figura 6: Circuito RC a diseñar y simular

El proyecto consiste en: I) Calcular el valor de la capacidad C tal que, para carga o descarga, la duración del tiempo transitorio (5 constantes de tiempo) sea la mitad del período de la forma de onda de entrada; II) Con el valor calculado de C, obtener las ecuaciones de carga y descarga de la corriente $i(t)$, y proveer un esbozo de la forma de onda $i(t)$, (el cual representa la expectativa teórica del estudiante); III) Entrar el valor calculado de C en el código de PSpice que se encuentra en el Apéndice 7.2, correr el programa, y verificar el grado de aproximación entre la simulación del ordenador y la expectativa teórica.

Los estudiantes que siguieron todos los pasos I-III obtuvieron: C = 0.01 [F], $i(t) = 1.25e^{-0.1t} + 1.25$ [mA], (t en [s]) para la carga, y $i(t) = -1.25e^{-0.1(t-50)}$ [mA], (t en [s]), para la descarga. Su bosquejo se parecía al obtenido por el ordenador, el cual se muestra en la Figura 7:

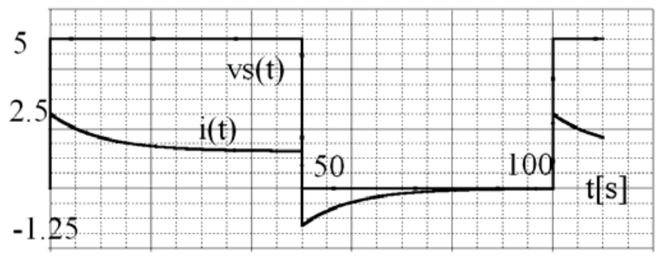

Figura 7: Simulación correcta del circuito en Figura 6

Otros estudiantes, después de hallar el valor correcto de C, decidieron saltear el paso II y procedieron directamente a efectuar la simulación (paso III). Desafortunadamente para ellos, escribieron el valor de C “0.001F” dentro del código de PSpice (Apéndice 7.2.), y obtuvieron el gráfico incorrecto mostrado en la Figura 8. La razón de su error fue agregar la letra “F” al valor “0.001”. Desafortunadamente, PSpice no interpreta esta letra como “Faradios” sino como “Femto-faradios” (¡10^{-15} Faradios!). Si no hubieran escrito ninguna letra, PSpice habría interpretado la unidad de Faradio. Sin embargo, el problema no fue la falta de suerte, sino que los estudiantes estaban completamente satisfechos con el gráfico incorrecto de la Figura 8. Esto ocurrió porque no habían generado ninguna expectativa teórica previa con la cual pudieran cotejar su resultado de simulación.

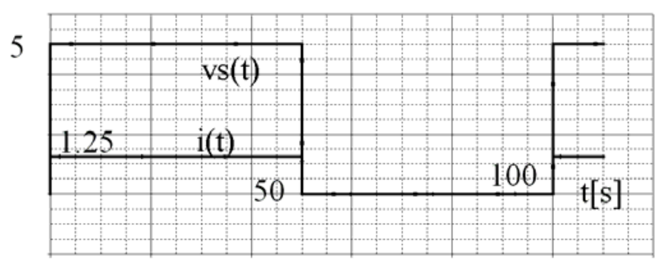

Figura 8: Simulación incorrecta del circuito en Figura 6

Cabe agregar que algunos de los estudiantes que siguieron los pasos I-III también fueron desafortunados y agregaron la letra “F” a su respuesta numérica. Sin embargo, cuando obtuvieron el gráfico de la Figura 8, inmediatamente notaron que era incorrecto, ya que no se asemejaba a su expectativa teórica. Consecuentemente, consultaron con el instructor, aprendieron acerca de la sutileza de la programación relacionada con la letra “F”, y fueron capaces de corregir el error.

6. Conclusiones

En este artículo, he presentado distintas ideas basadas en mi vasta experiencia docente como educador de ingeniería electrónica en diferentes universidades. Las ideas presentadas explican específicamente las siguientes ventajas didácticas: A) Brindar a los estudiantes un modelo del proceso cognoscitivo mediante el cual adquieren conocimiento; B) Buscar y encontrar poderosos ejemplos para explicar conceptos complicados en una forma sencilla; C) Buscar y encontrar ejemplos que integren mucho conceptos aparentemente desconectados; D) requerir del estudiante la necesidad de generar una expectativa teórica sobre el resultado de un problema antes de efectuar la correspondiente simulación en el ordenador.

No poseo una formación científica en el campo de la psicología cognoscitiva, pero tengo un vasto conocimiento empírico sobre métodos que efectivizan el aprendizaje de diversos temas de ingeniería eléctrica. El propósito de este artículo es exponer mi experiencia para que pueda ser desarrollada y profundizada por aquellos que poseen una formación científica sobre este fascinante tema que es la adquisición del conocimiento.

Referencias

[1] P. Compton y R. Jansen. *A philosophical basis for knowledge acquisition*. *Proceedings of the 3rd European Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems Workshop.* 1-17 (1989)

[2] Ángel Puerta, John Egar, Samson Tu, y Mark Musen. *A multiple-method knowledge-acquisition shell for the automatic generation of knowledge-acquisition tools. Journal of Knowledge Acquisition.* Vol. 4, Issue 2, 171-182 (1992)

[3] Julio J. González. An Interactive Teaching Approach based on Student-Teams. *Proceedings of the 38th Annual Frontiers in Education (FIE) Conference*, http://fie-conference.org/fie2008, Saratoga Springs, New York, October 22-25 (2008)

7. Apéndice

7.1. Conexión matemática de distintos conceptos

a) Las transformadas de Laplace y de Fourier se definen respectivamente:

$$X(s)=\int_0^{\infty} x(t)e^{-st}dt \quad \text{y} \quad X(j\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t}dt$$

Es evidente que ambas coinciden para señales $x(t)$ que "comienzan" en $t = 0$, y haciendo $s = j\omega$

b) Para un sistema con señal de entrada $x(t)$, señal de salida $y(t)$ y respuesta impulsiva $h(t)$, las siguientes relaciones son válidas en el dominio del tiempo y el los dominios s y $j\omega$

$$y(t)=\int_0^{\infty} x(t-\tau)h(\tau)d\tau \quad \text{y} \quad \begin{cases} Y(s)=H(s)X(s) \\ Y(j\omega)=H(j\omega)X(j\omega) \end{cases}$$

c) Si una señal de entrada co-sinusoidal $x(t)=A_x\cos(\omega_1 t)$ se aplica a un sistema que tiene una respuesta impulsiva h(t), la señal de salida resultante (en estado estacionario) está dada por:

$$y(t)=A_y\cos(\omega_1 t+\varphi) \quad \text{donde} \quad \begin{cases} A_y=|H(j\omega)| \\ \varphi=\angle H(j\omega) \end{cases}$$

7.2. Código de PSpice

```
Experimento: Un Circuito RC
*Tipo de simulación: dominio del tiempo
*Defina el eje x
.Tran 0.01 110 0 0.01
*Forma de onda de entrada
vs 1 0 pulse (0V 5V 0s 0.01s 0.01s 50s 100s)
*Resistencias
R1 1 2 2K
R2 2 0 2K
*Capacidad
C1 2 0 <Entre su valor aquí>
.probe
.end
```