FUNCIONES DE VARIABLE COMPLEJA: UN ENFOQUE HEURÍSTICO ORIENTADO AL DISEÑO MEDIANTE QFT

Patricia N. Baldini [1,2], Guillermo Calandrini[2] y Pedro Doñate[2]
(1) Departamento de Electrónica – FRBB – Universidad Tecnológica Nacional –Buenos Aires. Argentina
(2) Dto. Ingeniería Eléctrica y de Computadoras – UNS - Buenos Aires. Argentina
pnbaldi@frbb.utn.edu.ar, calandri@criba.edu.ar

Área Temática: Aplicaciones de la Teoría de Funciones de Variable Compleja.

Palabras claves: aprendizaje heurístico, variable compleja, QFT, software libre, proyecto transdisciplinario, respuesta en frecuencia.

RESUMEN

La teoría de Funciones de Variable Compleja forma parte esencial de la currícula de Ingeniería Electrónica ya que sustenta formal y conceptualmente las herramientas empleadas para el análisis y diseño de circuitos y sistemas electrónicos. En este trabajo se presenta una experiencia transdisciplinaria de aprendizaje basada en un problema de control cuantitativo, que permite no solo superar el alto nivel de abstracción de la temática de variable compleja sino, principalmente, desarrollar las habilidades fundamentales asociadas al perfil actual del ingeniero. La metodología propuesta se orienta a la aplicación de la matemática como base para el modelado de sistemas con incertidumbre e incluye diseño mediante el uso de una herramienta *freeware* de CAD interactivo.

1. INTRODUCCIÓN

Las principales metodologías y herramientas empleadas para el estudio de sistemas en electrónica se basan en la Teoría de Funciones de Variable Compleja (TFVC). De modo que los planes de estudio de esta carrera incluyen la temática como una materia en sí misma o como parte integral de otra asignatura más orientada a la especialidad como es, en nuestro caso, Análisis de Señales y Sistemas. De todos modos, el nivel de abstracción asociado tiene como consecuencia la pérdida de motivación de los alumnos que, habiendo superado las matemáticas del primer año, están ávidos de empezar con contenidos específicos y se encuentran con conceptos tales como analiticidad, singularidades, residuos y transformaciones, que se presentan como fundamentales para su capacitación, pero de difícil asimilación. En consecuencia, los docentes de estas asignaturas nos encontramos ante el desafío de lograr un equilibrio entre una sólida formación teórico-conceptual y un enfoque orientado a las aplicaciones, sin perder el objetivo formativo. En el primer caso, el planteo netamente matemático provoca falta de interés debido a que las aplicaciones se reducen a ejemplos básicos, poco atractivos o realistas. Por otro lado, si prima la perspectiva orientada a las aplicaciones, el riesgo es el de proveer una serie de técnicas de uso mecánico, con escaso sustento teórico, que poco aportan al desarrollo de las competencias previstas en la materia.

En este trabajo se plantea una experiencia didáctica en la que, mediante un proyecto final transdisciplinario que incluye aprendizaje heurístico y colaborativo, se contextualiza la TFVC dentro de la especialidad, permitiendo resignificarla frente al alumno. La metodología adoptada complementa al desarrollo del pensamiento analítico, crítico y reflexivo, con el trabajo en equipo y la investigación, procurando que los estudiantes desarrollen habilidades, actitudes y valores indispensables tanto para el ejercicio profesional como en el ámbito científico. Se logra, además, mejorar el desempeño en materias posteriores que requieren el uso adecuado de las metodologías y conceptos de variable compleja permitiendo asociarles un sentido práctico, al orientarse desde el principio a la resolución de un problema real propio de la carrera.

Se describe cómo la TFVC, mediante la transformada de Laplace y los conceptos de Función Transferencia, polos-ceros y Respuesta en Frecuencia, se constituye en la base sobre la cual construir el proceso de análisis y diseño de un sistema de control de posición. Conocimientos previos de física permiten el planteo del modelo del sistema considerado como lineal. Las nociones de incertidumbre paramétrica y la Teoría de Realimentación Cuantitativa (QFT) necesarias para el diseño, deben ser investigadas por cada grupo de trabajo contando con la guía de los docentes.

El proceso de diseño, que se desarrolla mediante el empleo de una herramienta de CAD interactiva de uso libre (SISO-QFTIT [3]), se interpreta como la modificación de la Respuesta en Frecuencia inicial mediante el desplazamiento de polos y ceros de la Función Transferencia. La ventaja del uso de QFT es que provee un procedimiento de diseño intuitivo, versátil y práctico. La herramienta de CAD adoptada presenta una ventana gráfica interactiva por cada etapa del proceso de diseño permitiendo la visualización inmediata de los efectos de las decisiones adoptadas, permitiendo relacionar los dominios de la variable compleja con la real (transformada y antitransformada de Laplace).

2. FUNDAMENTACIÓN

Si bien es cierto que se ha trabajado mucho en el perfeccionamiento de la enseñanza de la matemática en carreras de ingeniería y se han desarrollado muy buenas experiencias, falta mucho por hacer en materia de integración. El sistema educativo está conformado en los primeros años por una estructura curricular de disciplinas básicas que no llegan a interrelacionarse de manera efectiva con temáticas y problemas propios de la especialidad [4,8]. Desde nuestra óptica, la matemática debe presentarse en su papel de disciplina metodológica fundamental,

orientada a la formación específica de los alumnos a los que va dirigida y con el objetivo de lograr su mejor desempeño profesional [7].
Las experiencias didácticas que surgen de este enfoque deben garantizar que la matemática se presente no solo como medio para lograr el desarrollo de la capacidad de razonamiento y del pensamiento lógico sino fundamentalmente, como herramienta de cálculo, indispensable para modelar y resolver problemas propios de la orientación y como lenguaje universal capaz contribuir al desarrollo del conocimiento en áreas afines al perfil determinado por la carrera [4,5,6].
En particular, el nivel de abstracción que requieren los conceptos involucrados en la TFVC dificulta su asimilación por parte de los estudiantes cuando se los considera fuera del marco de las aplicaciones en diferentes áreas de la electrónica. Su empleo para modelar sistemas lineales puede considerarse argumento suficiente para aumentar la motivación, pero resulta indispensable contemplar experiencias de aprendizaje metacognitivas que propendan al desarrollo de las principales habilidades asociadas con el ejercicio de la profesión como ser: diagnóstico, diseño y trabajo en equipo [8,9,10]
En este sentido, se plantea la introducción de la TFVC en la carrera de Ingeniería Electrónica asociada a un problema concreto que incluye modelado, mediante el uso de la transformada de Laplace unilateral y la noción de Función Transferencia, y diseño en base a especificaciones que pueden expresarse como restricciones sobre el módulo de funciones de variable compleja asociadas al sistema (Figura 3 b)).
La función transferencia $P(s)$ de un sistema lineal es una función racional, por lo tanto analítica, excepto en una cantidad finita de puntos singulares del tipo polo. Por el principio de identidad y prolongación analítica [1], toda función analítica queda unívocamente determinada por los valores que toma sobre un arco. Este resultado teórico fundamental de TFVC garantiza, en la teoría de señales y sistemas, que todo sistema lineal puede ser completamente caracterizado por su respuesta en frecuencia. Es decir, basta conocer los valores que toma la función $P(s)$ sobre el eje imaginario, $s = j\omega$, aunque sería suficiente considerar solo un intervalo. La elección de este eje para representar una función y con ella a un sistema, tiene importancia desde el punto de vista práctico y en muchos casos es posible realizarlo experimentalmente.
Un sistema representado por su función transferencia, con todas las singularidades de tipo polo con parte real negativa, es decir estable, al ser excitado por una señal sinusoidal de amplitud unitaria y frecuencia angular ω, $X(s) = \omega/(s^2 + \omega^2)$, produce una salida que puede expresarse como

$$Y(s) = P(s)X(s) = \frac{N(s)}{D(s)}X(s) = \frac{n(s)}{D(s)} + \frac{Res(Y(s),-j\omega)}{s+j\omega} + \frac{Res(Y(s),j\omega)}{s-j\omega}$$

donde $Res(Y(s),s_o)$ es el residuo de $Y(s)$ en el polo simple , s_o , $Res(Y(s),s_o) = \lim_{s \to s_0} Y(s)(s - s_0)$

Realizando la expansión en fracciones simples del primer término del miembro de la derecha, los términos asociados se corresponden a transformadas de Laplace de funciones que tienden a cero cuando la variable real, el tiempo, crece. Por lo que se puede expresar Y (s) como la suma de una parte transitoria y otra de régimen permanente Yss(s), definida como:

$$y_{ss}(t) = TL^{-1}\{Yss(s)\} = \frac{1}{2j}\left(P(j\omega)e^{j\omega t} - P(-j\omega)e^{-j\omega t} \right) = |P(j\omega)|\, sen\left(\omega t + \angle P(j\omega) \right).$$

La respuesta en frecuencia tiene una visualización muy clara y cómoda para el diseño de filtros y compensadores a través del gráfico de Nichols. Se construye a partir de la curva imagen que se obtiene al aplicarle, a un segmento del eje imaginario, $s = j\omega$, $\omega_1 \le \omega \le \omega_2$, la transformación logarítmica:

$$\mathrm{Log}\left(P(j\omega) \right) = \log\left(|P(j\omega)| \right) + j\angle P(j\omega),$$

donde $P(j\omega) = |P(j\omega)|\, e^{j\angle P(j\omega)}$. Los valores resultantes para cada valor del parámetro ω, se grafican en un plano complejo denominado carta de Nichols. En este plano, el eje real es vertical y está asociado al logaritmo del módulo, escalado de modo que queda expresado en decibeles (dB). El eje horizontal se corresponde con el imaginario, relacionado al argumento o fase en grados. El origen de los ejes se ubica en el punto de 0dB y -180° debido a su importancia en cuanto a la estabilidad del sistema. En este plano las especificaciones de comportamiento se incluyen como regiones admisibles a cada frecuencia.
Sin embargo, este resultado teórico de TFVC presenta algunas limitaciones prácticas. Siempre existe un error debido a incertidumbres en parámetros, causado por mediciones, precisión numérica o por las aproximaciones asintóticas que generalmente se utilizan en frecuencia (Bode). De modo que la correspondencia uno a uno queda restringida a condiciones ideales. Por ello es necesario trabajar con intervalos de frecuencia apropiados para las

especificaciones particulares de cada problema e incluir conceptos de robustez. Esto conduce a que el modelo deba abarcar una familia de curvas.

3. PLANTEO METODOLÓGICO

La resolución de problemas de Control Automático constituye un estímulo para sustentar la significación y funcionalidad de las herramientas matemáticas asociadas a TFVC, interrelacionando los lenguajes específicos de cada uno.

El aprendizaje de Control Automático puede interpretarse como la aplicación de la TFVC al estudio de la dinámica de sistemas. Las etapas típicas del diseño incluyen modelado matemático, identificación de parámetros, análisis y simulación computacional, finalizando con la síntesis del controlador que permite satisfacer la performance deseada.

Se trabaja simultáneamente en dos dominios diferentes pero complementarios siendo el nexo entre ambos la Transformada de Laplace unilateral. Las propiedades de seguimiento y regulación relacionadas con el comportamiento transitorio o estacionario, y las limitaciones en la señal de control para evitar saturación de los actuadores, se especifican y analizan de forma inmediata en el dominio de la variable real (tiempo). Mientras que conceptos tales como márgenes de estabilidad, rechazo de ruido u otros parámetro de robustez se traducen en restricciones en el dominio de la variable compleja (frecuencia) del tipo indicado en la Figura 3 b).

La interrelación entre ambos dominios se hace frecuentemente en ingeniería, mediante el uso de reglas empíricas. La validez de estas reglas de vinculación se puede poner de manifiesto tanto analíticamente como mediante el uso de herramientas de simulación que contemplen el aprendizaje interactivo.

Con la finalidad de articular de modo sencillo los conceptos la TFVC y de control robusto, generando una estrategia didáctica que incentive a los alumnos a la elaboración autónoma de los conocimientos asociados con robustez, se propone la realización de un proyecto adicional al final del cursado.

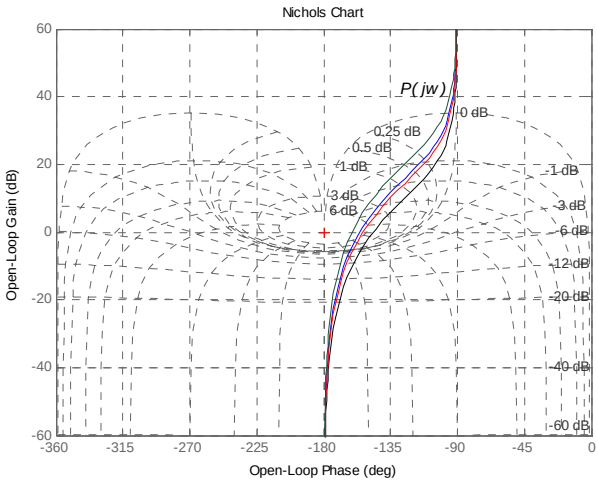


Figura 1. Gráfico de Nichols de algunos elementos de la familia *P*

En la experiencia programada, se realiza el planteo del modelo del sistema de control de posición que se muestra en la Figura 2, constituido básicamente por un motor DC, un sevoamplificador y potenciómetros. El modelo matemático adoptado es lineal y de segundo orden, $P(s) = K_T / (\tau s^2 + s)$. La determinación del valor de los parámetros (identificación) se realiza en base a registros de datos experimentales. Los valores obtenidos por cada grupo de trabajo, presentan una notable dispersión debido a las limitaciones del modelo utilizado. La integración en un trabajo colaborativo de los modelos identificados conduce a definir una familia de plantas posibles que se incorpora al modelo como incertidumbre estructurada, de tipo paramétrica. La función transferencia con un polo típico en el origen, resulta dependiente de dos parámetros inciertos: la ganancia, K_T, que adopta valores en un rango aproximado entre 16.5 y 45, y una constante de tiempo (polo real) , τ , con valores posibles entre 0.125 y 0.2.

$$P = \left\{ P_i(s) : \tau \in \left[\frac{1}{8}, \frac{1}{5} \right] y \; K_T \in [16.5, 45] \right\}$$

Surge entonces, la necesidad de introducir una metodología de diseño potente que permita cumplir con las restricciones de comportamiento cualquiera sea la función transferencia dentro de la familia determinada.

La *Teoría de Realimentación Cuantitativa* (QFT) aporta el marco teórico pertinente [11,12,13,14] y resulta accesible a partir de los conocimientos adquiridos en la materia. Los resultados obtenidos se verifican mediante simulación y deben ser justificados conceptualmente en el marco de la TFVC [1,2] e interpretados en relación al sistema tratado.

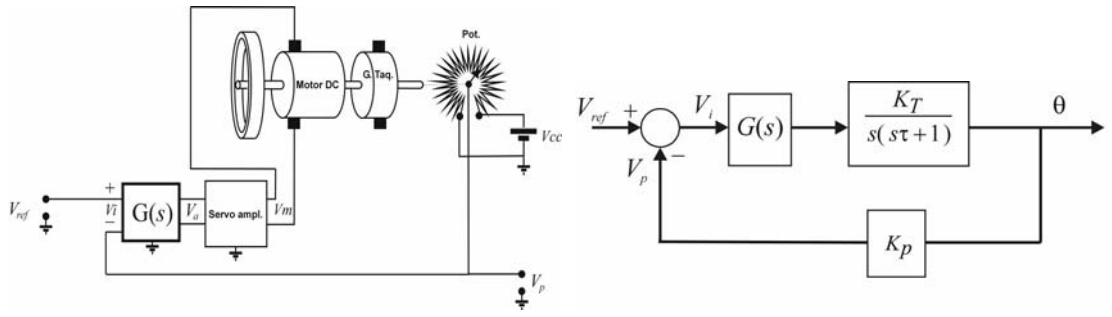


Figura 2. Esquema y diagrama en bloques del sistema de control de posición

4. INTERPRETACIÓN DE QFT EN TÉRMINOS DE LA TFVC.

La Teoría de Realimentación Cuantitativa [12,13] representa una técnica de diseño basada en el modelo de función transferencia del sistema, que contempla el hecho de que los parámetros de la misma no pueden determinarse en forma precisa. De modo que ganancia, polos y ceros pueden variar dentro de rangos finitos conocidos y esto conduce a definir una familia de Funciones Transferencia. Una conveniente se adopta como la nominal, $L_0(j\omega) = G(j\omega)\, P_0(j\omega)$ que será la base para del diseño.

El objetivo de QFT es la determinación de la función $G(s)$ (*síntesis del controlador*) lo mas simple posible, es decir, con menor número de polos y ceros, que permita cumplir las especificaciones, cualquiera sea la función $P(s)$ (*planta*) dentro del conjunto posible determinado por la incertidumbre (concepto de *robustez*).

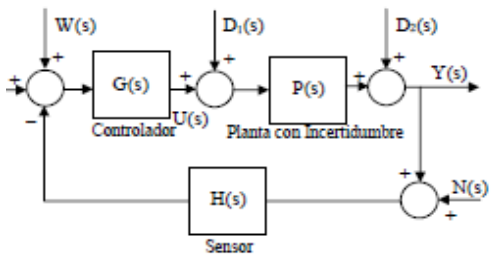
Típicamente, la configuración del sistema de control QFT considera el sistema representado esquemáticamente en la Figura 3. Para la Función Transferencia de la planta $P(s)$, su *template* es definido como el conjunto de respuestas en frecuencia posibles asociadas a la variación de parámetros dentro de los rangos establecidos.

Las especificaciones de estabilidad y comportamiento temporal son traducidas mediante el uso de reglas empíricas sustentadas en la teoría de la Transformada de Laplace, a restricciones en el domino de la frecuencia sobre el módulo de la función transferencia de lazo abierto, $L(j\omega) = G(j\omega)\, P(j\omega)$. Éstas se traducen en inecuaciones cuadráticas sobre el módulo de $G(j\omega)$ del tipo:

$$I_{\omega[p,\theta,\delta_i,\varphi]} = a\,g^2 + b\,g + c \geq 0 \quad , \quad P(j\omega) = p(\omega)e^{j\theta(\omega)} \quad , \quad G(j\omega) = g(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

con coeficientes a, b, c que dependen de los parámetros inciertos y de los argumentos de $G(j\omega)$ y de $P(j\omega)$ [16]. A partir de éstas se hallan un conjunto de curvas o *bounds* en el diagrama de módulo vs. fase de Nichols, delimitando regiones admisibles que sirven de guía para la determinación de la función transferencia del controlador, $G(j\omega)$. El objetivo es lograr que la curva de respuesta en frecuencia nominal, $L_0(j\omega)$, se halle dentro de las regiones permitidas para cada frecuencia de interés mediante la inclusión de ceros y polos de $G(s)$ convenientemente ubicados en el plano complejo. Si esto se logra, QFT se asegura que se satisfacen las restricciones para todas las funciones transferencia de lazo dentro de la familia definida, es decir, que se satisfacen las especificaciones temporales aún cuando el modelo no haya podido ser establecido de forma unívoca.

Los métodos de Cálculo Numérico específicos de QFT son resueltos con el software mencionado y se consideran como un aspecto mecánico del problema, ajeno a las competencias que se pretende que desarrollen los alumnos.



a)

$$\left|\frac{1}{1+L(j\omega)}\right| \leq \delta_2 \,,\, \omega \in \Omega_2$$

$$\left|\frac{G(j\omega)}{1+L((j\omega)}\right| \leq \delta_1(\omega) \,,\, \omega \in \Omega_1$$

$$\delta_m(\omega) \leq \left|\frac{P(j\omega)G(j\omega)}{1+L((j\omega)}\right| \leq \delta_M(\omega) \,,\, \omega \in \Omega_1$$

con $L(j\omega) = P(j\omega)G(j\omega)H(j\omega)$.

b)

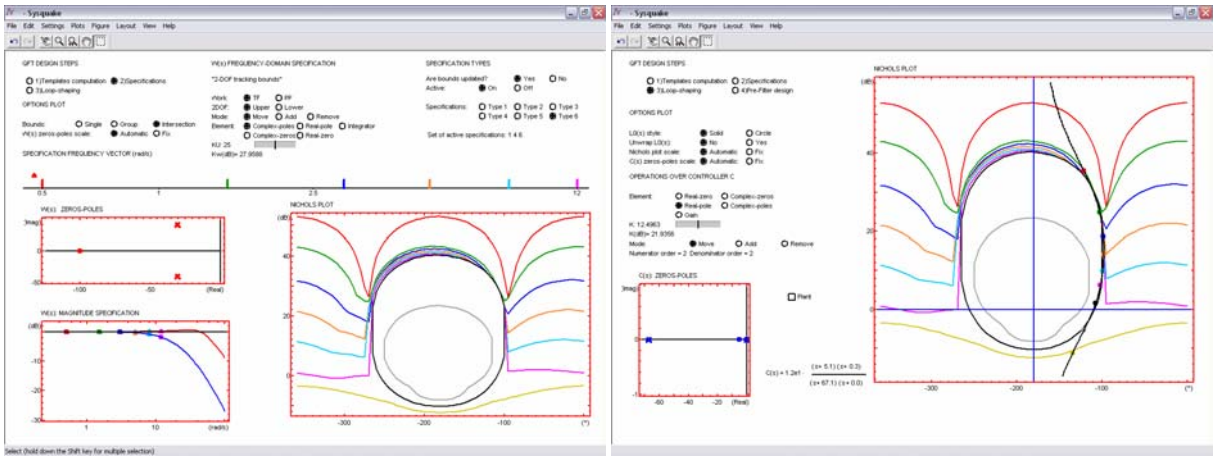
Figura 3. a) Esquema de control con un grado de libertad. b) Especificaciones en el dominio frecuencial.

El software sugerido, SISO-QFTIT [3] (Single Input Single Output Quantitative Feedback Theory Interactive Tool) es una herramienta de CAD de distribución gratuita para el diseño de controladores robustos usando QFT. Su principal característica frente a otras opciones existentes es su mayor interactividad . La operación directa con el mouse sobre los diferentes elementos presentes en la ventana de aplicación permite modificarlos gráficamente y visualizar sus interacciones y consecuencias sobre los otros elementos.
Desarrollada en ambiente *Sysquake* [15], se presenta en forma de archivo ejecutable bajo sistema operativo Windows y Mac. Facilita tanto la comprensión de los conceptos básicos involucrados en la metodología tratada como el desarrollo de las habilidades fundamentales de diseño y el sustento para la base teórica necesaria. Los efectos de cada acción del usuario introducida por pantalla durante el proceso de diseño, se reflejan en cambios inmediatos de todos las figuras de la ventana gráfica.
El principal objetivo es involucrar al alumno de forma mas activa, aumentando la motivación y ayudando a desmistificar la matemática abstracta que complica el abordaje de la temática del control robusto.
En un plano de módulo vs. fase (*Carta de Nichols*) se grafica la función de variable compleja que representa la respuesta en frecuencia asociada al modelo con la incertidumbre paramétrica incluída (*templates*). Las restricciones impuestas en el dominio de la frecuencia por las especificaciones de comportamiento (*bounds*) definen regiones admisibles sobre ese plano.
La metodología QFT está implementada en distintas etapas:

Etapa 1: Ingreso del modelo y generación de los *templates* El usuario define la planta nominal, intervalos de incertidumbre y rango de frecuencias de trabajo. Inmediatamente se van calculando los *templates* asociados [16].

Etapa 2: Especificaciones en frecuencia. El estudiante selecciona y configura el tipo de especificaciones particulares requeridas en el diseño entre seis opciones posibles y el rango de frecuencias en que se debe cumplir cada una. En forma automática se generan los *bounds* asociados, según se observa en la Figura 4 a).

Etapa 3: Diseño (*Loop shaping*) En esta ventana (Figura 4 b)) se realiza la síntesis del controlador en base a su función transferencia $G(s)$ y en relación al efecto sobre la respuesta en frecuencia del sistema. La elección de la estructura del controlador permite reducir los efectos de la incertidumbre en la respuesta en frecuencia.



a) b)

Figura 4. Ventanas: a) intersección de *bounds* y b) diseño del controlador sobre el gráfico de Nichols

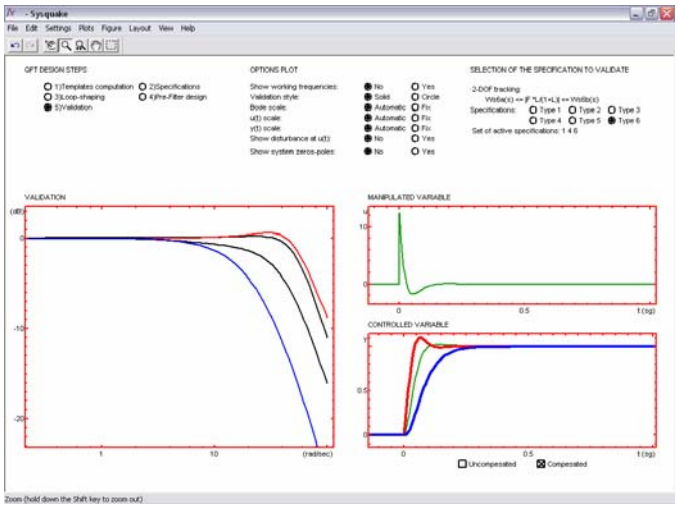


Figura 5. Verificación de especificaciones con el controlador diseñado

Etapa 4: Validación del diseño. La ventana final muestra los gráficos logrados al incluir el controlador en el lazo y el posible prefiltro. Se pone en evidencia el grado de cumplimiento de las especificaciones con las curvas de módulo de Bode en el dominio de la frecuencia, y con la evolución temporal de la señal de control y la respuesta al escalón del sistema. En cada gráfico se incluyen los peores casos resultantes teniendo en cuenta la incertidumbre paramétrica y los límites fijados por las especificaciones (Figura 5).

5. FORMULACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto está planteado para ser concretado en el plazo máximo de 30 días, al finalizar el cursado regular de la materia, con la modalidad de trabajo de investigación tutorado.

Se estructuran grupos de cuatro alumnos con asignación de roles específicos: Investigación teórica de QFT en base a la bibliografía sugerida [11,12,13,14]; definición del problema de diseño y resolución con la herramienta de CAD indicada; presentación escrita de resultados en un informe. La etapa experimental se debe realizar en forma conjunta.

Se asignan 15 días para el estudio de la teoría necesaria y la estructuración de los objetivos del proyecto incluyendo un cronograma. Al cabo de ese lapso, el grupo debe hacer la presentación oral del mismo para la aprobación de esta etapa o la reformulación con un plazo de una semana, en caso de existir objeciones por parte de los docentes.

El resto del tiempo previsto se asigna a la concreción del diseño y la presentación del informe escrito.

Se propone la siguiente guía de trabajo que puntualiza los objetivos y permite focalizarse en los temas relevantes, de modo que las tareas puedan ser concretadas sin inconvenientes en los tiempos previstos:

GUÍA DE TRABAJO

Pautas para el estudio de los temas teóricos:

- Considerar distintas formas de modelos de incertidumbre en basados en la Función Transferencia.
- Analizar el tipo de sistemas que pueden ser tratados con el tipo de modelo adoptado.
- Analizar las herramientas de la TFVC involucradas en QFT y relacionar la terminología usada en cada teoría.
- Interpretar la validez en la relación entre las especificaciones temporales y su contrapartida en el dominio de la variable compleja (respuesta en frecuencia).
- Interpretar el significado de *templates, bounds, loop-shaping* en función de la TFVC
- Analizar la idea de diseño del controlador como inclusión de polos y ceros al sistema.

Pautas para el desarrollo del proyecto:

- Definir la familia de Funciones Transferencia posibles (*modelo de incertidumbre*)

- Determinar el rango de frecuencias de interés.

- Determinar la Función Transferencia nominal y generar regiones de respuestas en frecuencia posibles (*templates)* (usar SISO-QFTIT).

- Traducir las especificaciones del dominio de la variable real (tiempo) al de la variable compleja (frecuencia). Tener en cuenta las limitaciones del modelo frente a posibles comportamientos no lineales tales como saturación del servoamplificador; la presencia de fricción estática en el motor y las restricciones del potenciómetro actuando como sensor de posición.

- Analizar la necesidad de restricciones para tener en cuenta estabilidad, esfuerzo de control y rechazo de perturbaciones (Figura 3 b)1).

-Estructurar el proyecto y armar presentación

-Determinar las regiones admisibles en el plano de módulo vs. fase para la respuesta en frecuencia nominal (*bounds*) (usar SISO-QFTIT)

-Seleccionar los polos y ceros de la Función transferencia del controlador con estructura fija (PID) del lazo (loop-shaping) con el software interactivo.

-Simular los resultados en los dominios real y complejo y comparar con los especificados.

6. RESULTADOS ESPERADOS

La estrategia utilizada para sustentar la significación de la TFVC en la carrera de Ingeniería Electrónica, pretende generar una experiencia de aprendizaje metacognitiva, es decir, orientada a que el alumno se involucre de modo conciente en su propio proceso cognitivo, otorgándole sentido al nuevo conocimiento, modificando las estructuras mentales previas para inducir un nuevo proceso de aprendizaje en un contexto específico que posibilite que los estudiantes logren dominar la resolución de tareas nuevas y complejas.

Se intenta favorecer que el conocimiento procedimental o declarativo se transforme en un proceso reflexivo y conciente, en el que se autorregula tanto su uso como la forma en que se utiliza, conduciendo a un conocimiento estratégico La motivación y la autorregulación con una base de conocimientos explicitados permiten generar aprendizajes significativos .

Por otra parte, se busca establecer una relación temprana entre los lenguajes propios de la matemática y de la electrónica para evitar que estas diferencias de expresión se constituyan en barreras de asociación de conceptos. Se enfatiza la iniciativa por la investigación de aplicaciones y la utilización de la matemática como herramienta fundamental para el análisis contextualizado de sistemas reales. La realización del proyecto permite ver que a través de un modelo matemático no solo es posible analizar la dinámica de un sistema físico sino, sobre todo, determinar cómo modificarlo para mejorar su comportamiento. Por otra parte, se ponen en evidencia las limitaciones prácticas que presenta todo modelo.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se describió una propuesta didáctica orientada a lograr que la enseñanza de la TFVC contribuya a que el estudiante desarrolle una visión menos abstracta de la misma, descubriéndola como el sustento fundamental para la comprensión de los sistemas o circuitos electrónicos y trasladando las estrategias resolutivas desde el contexto teórico al de las aplicaciones.

La metodología presentada considera la realización, en un curso de Análisis de Señales y Sistemas de la carrera de Ingeniería Electrónica, de un proyecto de diseño de controladores robustos mediante QFT. La modalidad de investigación permite una mayor independencia y compromiso del alumno con su propio proceso de aprendizaje y está centrada en las competencias que debe proveer la asignatura teniendo en cuenta el perfil del profesional que se quiere formar. La TFVC sirve de base suficiente para la comprensión de QFT, haciendo viable su incorporación en tiempos razonable. El uso de un sistema sencillo y la herramienta de CAD interactivo conforman una experiencia de aprendizaje motivadora que mejora la predisposición del alumno justificando la utilidad de los nuevos conceptos en la resolución de un problema complejo.

Se favorece el aprendizaje autónomo y colaborativo, fortaleciendo la habilidad para analizar y estructurar información, diseñar y defender un proyecto, apreciar la utilidad y funcionalidad de la TFVC como marco conceptual para proporcionar un modelo matemático de un sistema físico concreto, que no solo permite el análisis de su comportamiento sino la modificación en la etapa de diseño, para cumplir especificaciones. Al vincular la formación matemática a la orientación, se mejora la articulación con materias posteriores, permitiendo desde los primeros años el desarrollo de habilidades fundamentales para un ingeniero.

En las diferentes etapas del diseño el nivel de interactividad de SISO-QFTIT garantiza un mayor y más rápido nivel de entendimiento en cuanto a la asociación del modelo matemático de Función Transferencia, con el sistema real y su dinámica. La habilidad en el diseño se ve fortalecida gracias a que las consecuencias de cada acción del usuario se reflejan en la actualización inmediata y simultánea de todos los gráficos representativos mostrados en pantalla. Se pone en evidencia mediante la percepción visual la influencia de la modificación de polos y ceros en el plano de la variable compleja, en función de los objetivos en el dominio temporal o de la variable real.

Por otro lado, se crea conciencia en relación a la importancia de la existencia de software de libre distribución y su incorporación a la enseñanza, teniendo en cuenta el alto costo de los comerciales de uso frecuente, muchas veces inaccesible para la Universidad pública.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Churchill R. and Brown J., (2008) *Complex Variables and Applications*. 8va. Edición. Mc GrawHill.
2. James G., Burley D. (2002) *Matemática Avanzada para Ingeniería.* 2va. Edición. Prentice Hall
3. Díaz, J.M., Dormido, S., Aranda, J. (2004) http://ctb.dia.uned.es/asig/qftit/principal.html, UNED
4. Rehman, H.; Said R. and Al Assaf Y. (2009) An Integrated Approach for Strategic Development of Engineering Curricula: Focus on Student's Design Skill. . *IEEE Trans. Education*. V52- No 4. , 470-481
5. Mohan A.; Merle D., Jackson C., Lannin J. and Nair S. (2010) Professional Skill in The Engineering Curriculum. *IEEE Trans. Education*. V53 - No 4., 562-571.
6. Azrita A.; Ainain H.; Sahazati R. and Ahmad I. (2009) Designing learning material for engineering course using practice and application oriented approach. *Int. Conf. on Engineering Education (ICEED)*, 186-190.
7. Alonso Tapia J. (2001) Motivación y Estrategias de aprendizaje. Principios para la mejora en alumnos Universitarios. Didáctica Universitaria. La Muralla. Madrid
8. Ruiz Iglesias, Magalys (2000) El enfoque integral del currículum para la formación de profesionales competentes. Instituto Politécnico Nacional, México, pág. 187
9. Rodriguez, R. (2004) El proceso de enseñanza aprendizaje en el contexto universitario. Docencia Universitaria: Orientaciones para la formación del profesorado. ICE. Univ. Oviedo. 21-51.
10. Villasevil F., López A. y Rosado L. (2001) Cognitive and Metacognitive Model in Electronics Engineering Teaching. 31th ASEE/IEEE Frontiers in Educations Conf. F4D-5 , Reno, NV
11. Díaz, J.M., Dormido y Aranda, J., (2005) QFT Robust Control Design by Interactive Approach. *44th IEEE Conference on Decision and Control.* Sevilla. España 1301-1308.
12. García Sanz, M.(2006). Quantitative Robust Control Engineering: Theory and Applications. *Educational Notes RTO-En-SCI*-166, 1-44
13. García Sanz, M (2005) Control Robusto Cuantitativo QFT: historia de una idea. *RIAI*.**2 -3.** 25-38

14. Houpis,H., Rasmussen, S.J. y García Sanz, M., (2006), *Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications.* 2da. Ed, CRC Press, Florida
15. Piguet, Y. (1999) *Sysquake Users manual.* Versión 1. Calerga .Lausanne.
16. Gutman, P. O., Baril, C. y Neumann L. (1995) An algorithm for computing value sets of uncertain transfer functions in factored real form. *IEEE Trans. Automatic Control,* 29 (6), 1268-1273.