

Capítulo I

Introducción.

Cuando se realiza la automatización de una planta industrial, nos encontramos por lo general con efectos no-lineales, los cuales están presentes en el modelo del sistema, en la etapa sensora y en la actuadora. Para elaborar el análisis y diseño del control, en base al modelo matemático no-lineal de la planta, se puede optar por métodos lineales, que hacen necesario efectuar la linealización del modelo alrededor de un punto de operación, o por una segunda opción generada a partir de métodos no-lineales, que analizan y diseñan el sistema de control, en base al modelo no-lineal. Las ventajas de este último, entre otras cosas son: mayor rango de operación con el control resultante; robustez respecto a las incertidumbres paramétricas y no paramétricas. Y en forma general, se observa un mejor desempeño con respecto a métodos desarrollados sobre la base del modelo lineal.

Existen diversos puntos de vista y solución al problema del análisis y diseño del control en base al modelo no-lineal, por ejemplo: Mediante el *análisis de fase*, se obtiene una estrategia de solución a partir del trazado de trayectorias para distintas condiciones iniciales, sin embargo existe la limitación de aplicarse sólo a sistemas de segundo orden. Otra opción de solución es por medio del método directo e indirecto, estrategias de solución desarrolladas en base a la teoría de *estabilidad de Lyapunov*. El análisis y diseño también puede llevarse a cabo mediante la *función descriptiva*; estrategia de solución mediante sistemas compuestos por submódulos lineales y no-lineales; la parte lineal está caracterizada por su respuesta frecuencial, mientras que la parte no-lineal, por una extensión de la respuesta en frecuencia denominada función descriptiva. Existe el *Control de modo deslizante*, estrategia de solución basada en la inducción de discontinuidades alrededor de una cierta superficie de deslizamiento que garantiza un comportamiento deseado cuando el estado evoluciona sobre ella; esquema que resulta en un control robusto de la planta, que se sobrepone a las incertidumbres estructuradas ó paramétricas así como a las incertidumbres dinámicas despreciadas. El denominado *Control Adaptable*, técnica que en contraste con el control robusto, donde se diseña un controlador que tolera incertidumbres, este se adapta o “aprende” a través de la estimación en línea los parámetros desconocidos del modelo, a partir de las respuestas dinámicas de la planta. Otra opción es el *Enfoque Geométrico*, estrategia que se plantea en el contexto de la linealización parcial ó total del sistema en base a su estructura más íntima; sus desarrollos han representado un avance de la técnica de los sistemas no-lineales cuya exposición se

encuentra a profundidad en el texto de Isidori (1989), y así como el de Nijmeijer & Van der Shaft(1990).

Modelo bilineal general.

En el gran grupo de modelos dinámicos no-lineales se define una subclase, denominada sistemas bilineales, y que estan determinados por la siguiente estructura general:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A_0 + \sum_i^m A_i u_i) x + Bu, \quad x \in R^n, \quad u \in \{0, 1\} \\ y &= Cx + Du \quad y \in R \end{aligned}$$

forma analítica que determina una ecuación con el lado derecho discontinuo [34], y que a su vez representa el modelo matemático para la topología general de los circuitos electrónicos regulados por conmutadores. En el presente trabajo se enfatizará su estudio, en el contexto del análisis y diseño de algoritmos de control para los convertidores de corriente continua también llamados convertidores DC-DC, aportando nuevos resultados teóricos dentro de esta área de aplicación.

Circuitos Convertidores.

Actualmente, los circuitos convertidores de corriente continua (o convertidores DC-DC), constituyen un medio común de regulación automática de voltaje constante, y son de gran importancia en aplicaciones prácticas, principalmente dentro de áreas como telecomunicaciones, bioingeniería, sistemas de procesamiento de datos, fuentes portátiles de energía, fuentes de potencia ininterrumpidas, etc.

Aplicaciones tecnológicas de la electrónica moderna que ha generado la necesidad de construir equipos que ocupen menos volumen y tengan menor peso, así como poseer la característica de minimizar los efectos eléctricos de la llamada "generación intrínseca del tercer armónico", nos ha llevado a plantear como línea de investigación la búsqueda de nuevas estrategias teóricas de análisis y diseño de algoritmos de control para estos convertidores.

Los circuitos más frecuentemente utilizados en la conversión de corriente continua, son los denominados Buck, Boost y Buck-Boost, también conocidos como convertidor atenuador, convertidor amplificador y convertidor atenuador/amplificador, respectivamente. En la figura 1.1, se muestran todos estos circuitos. Versiones simplificadas de estos convertidores pueden obtenerse a partir de la eliminación del capacitor de almacenamiento, y son conocidos generalmente como convertidores *derivados*, ó "choppers" [3], los cuales también forman parte de nuestro estudio.

Características motivantes en los convertidores.

El modelo dinámico que representa a cada uno de los anteriores circuitos convertidores exhiben características especiales, las cuales hacen nada tradicional, el análisis y diseño del **regulador discontinuo**.

- La planta a ser regulada pertenece a la clase de sistemas no-lineales denominada: Sistemas bilineales sujetas a variaciones en su estructura a través de la

acción del control, generando, en realidad, un "sistema lineal a tramos"

- La clase de modelos considerados corresponden a sistemas dinámicos con parámetros inciertos, lo cual hace necesaria la aplicación de técnicas de control adaptable [11]
- Los convertidores Boost y Buck-Boost pertenecen a la clase de sistemas conocidos como "*sistema de fase no-mínima*". Este fenómeno se presenta al considerar al voltaje de salida en el capacitor como la variable de salida del sistema. Este hecho conduce a controladores inestables, en especial cuando se requiere de una inversión de la relación entrada-salida en el proceso de cálculo de la estrategia de control.
- En los circuitos derivados o choppers, al utilizar una discretización exacta del modelo del sistema basada en los instantes de muestreo inherentes a la Modulación de Anchura de Pulso, la representación de los modelos promedio de estos sistemas discretizados resulta ser no-kalmaniana [5].
- La presencia de oscilaciones en la fuente de alimentación externa esta ligada al proceso y tiene una influencia importante sobre la acción de control. Este hecho demanda estrategias de control suficientemente robustas como para contrarrestar la influencia aleatoria de estas señales de perturbación.

Las características y problemas típicos de los convertidores DC-DC, permiten plantear una línea de investigación de gran interés práctico, en el área de proponer estrategias de control realimentado para la regulación de esta clase de sistemas electrónicos. La metodología utilizada fué la de adecuar resultados generales del control no-lineal a los modelos bilineales de los convertidores DC-DC, bien en sus versiones promedio o bien en su naturaleza discontinua de característica discreta, dejando abierta la implantación práctica de las estrategias para futuros trabajos de investigación.

A continuación se adicionan tres puntos a esta introducción de la memoria del trabajo de tesis. En primera instancia se describe el planteamiento de la misma, al proporcionar la definición y antecedentes que nos llevan a detectar la necesidad de realizar estrategias que nos permitan el análisis y diseño del controlador para solventar las características intrínsecas de los convertidores de corriente continua. Posteriormente se formaliza el trabajo mediante la descripción del objetivo y por último se desglosa el plan de trabajo para satisfacer las necesidades planteadas.

□ □ □

1 Planteamiento.

Los circuitos convertidores están constituidos en su topología general, por su alimentación externa, mediante fuentes de voltaje constante, capacitor de almacenamiento, resistencia de carga, inductor de entrada y por último el elemento conmutador, el cual es un dispositivo semiconductor (thyristor ó arreglo de diodos y

transistores), operando en alta frecuencia [1]. Este elemento conmutador es considerado como la variable de control que toma valores discretos, o en su defecto la consideración de la *relación de trabajo* como tal variable de control en modelos promedio basados en muestreos de frecuencia infinita.

En la literatura especializada sobre los convertidores de corriente continua, el problema del control para la regulación del voltaje, está asociado con la estabilización de la variable de salida del sistema, definida en la ecuación descriptiva del modelo, hacia algún valor constante deseado (preespecificada factible). Esta política es de naturaleza discontinua, mediante el uso del dispositivo conmutador, y es realizada en forma secuencial periódica con anchos de pulsos variables hasta alcanzar el punto de equilibrio predeterminado.

Política de control.

Tradicionalmente, la regulación realimentada en los convertidores, para la estabilización o seguimiento, se realiza mediante algunas de las siguientes estrategias relacionadas al comportamiento del conmutador del circuito: modulación de anchura de pulso (PWM), ver *Sira-Ramírez 1989* [24], *1991* [26] y *Sira-Ramírez y Lischinsky-Arenas 1991* [13]; Inducción apropiada de regímenes deslizantes, ver *Utkin, 1978* [28], Venkataramanan y Sabanovic, 1985 [27] *Sira-Ramírez y Ríos Bolívar 1994* [25] y Modulación de Frecuencia de Pulsos.

PWM

En el presente trabajo la mayor parte de los desarrollos, se centrarán sobre políticas de control retroalimentado basados en la técnica de Modulación de Anchura de Pulso. Metodología que consiste en determinar una función denominada relación de trabajo, representada por μ , como una *ley de control realimentado* en función del vector de estado $x(t)$ [ver capítulo II, página 12].

La idealización anterior tiene la ventaja fundamental de reducir el problema del cálculo de la relación de trabajo, a un problema estandar de diseño del control realimentado no-lineal, cuya función actúa como la entrada de control externa. Los controladores realimentados resultantes se caracterizan por su robustez e insensibilidad con respecto a diversas entradas de perturbación externas y variaciones paramétricas acotadas que afectan la planta controlada.

Antecedentes y planteamiento del problema

• En la literatura actual el diseño de los controladores realimentados no-lineales, para la estabilización del voltaje de salida en los convertidores DC-DC, y sus algoritmos asociados en general, están hechos en base a una linealización nominalmente exacta del modelo promedio, y la cual requiere de un conocimiento perfecto de todos los parámetros (ver *Sira-Ramírez, Zribi y Ahmad* [9]). Sin embargo, en la práctica, los parámetros son desconocidos y/o presentan la característica de tener discrepancias inciertas ó tolerancias alrededor de valores nominales constantes.

Por lo tanto en la elaboración de este trabajo de tesis, **se hace necesario efectuar el desarrollo y evaluación del comportamiento de metodologías**

para el análisis y diseño del control que incluya esquemas de adaptación en línea para satisfacer el ajuste de los parámetros desconocidos de los convertidores DC-DC. Esquemas que permitirán efectuar un aporte sobre la base de trabajos de investigación elaborados en este campo por parte de *Sastry e Isidori* [6], *Kanellakopoulous* [22] y la linealización nominalmente exacta propuesta por *Fliess y sus colaboradores*.

- Un segundo punto crítico esta en los trabajos involucrados actualmente con la regulación de los convertidores DC-DC, los cuales sólo contemplan un control del tipo indirecto para la estabilización del voltaje de salida. Regulación denominada indirecta que se presenta, al seleccionar como salida del sistema la corriente de entrada en el inductor. Esta forma indirecta de regulación tiene la desventaja de reflejar características no deseadas de la corriente del inductor en el voltaje de salida, que por el efecto de la linealización del sistema, son difíciles o complejas de evaluar de antemano, debido a las no-linealidades involucradas.

Debido a las características intrínsecas inestables de los modelos bilineales que presentan los convertidores DC-DC del tipo boost y buck-boost, **al efectuar una regulación en forma directa sobre el voltaje de salida, se hace necesario en los reguladores discontinuos resultantes, establecer una metodología de análisis y diseño de un algoritmo de control que permita resolver el problema inherente asociado a la existencia de una salida de fase no-mínima a ser regulada** [14]. Esta acción permitirá efectuar por lo tanto un control directo sobre el voltaje de salida en el capacitor y/o resistencia del circuito y aporta el hecho de efectuar el control sobre una salida de fase no-mínima.

- En la regulación realimentada de los convertidores DC-DC para la estabilización del voltaje de salida, en la etapa de análisis y diseño del control, son frecuentemente empleados los *modelos promedios de frecuencia infinita* (vea *Middlebrook y Cúk* [4]), con el objetivo claro de obtener una versión suave de la relación de trabajo (vea los trabajos de *Sira-Ramírez y colaboradores*). Sin embargo, *no se puede justificar por completo el uso de los modelos promedios para los convertidores derivados*. Primero debido a la sencillez de los modelos dinámicos, quienes no parecen requerir una simplificación para una aproximación suave, y segundo, existe la posibilidad de efectuar una discretización exacta.

Por lo tanto, en la siguiente parte del trabajo propuesto, se complementara con el **análisis y diseño de controladores basados en un modelo exactamente discretizado para los convertidores derivados DC-DC**. Proceso que se hará más complejo, cuando se extienda a las versiones tradicionales de tales convertidores. Como aporte en esta parte del trabajo se logrará evitar problemas relativos a la magnitud finita de la frecuencia de muestreo, usada en la práctica por el modulador de Ancho de Pulso.

□ □ □

2 Objetivo.

El presente trabajo de tesis tiene por objetivo: Primero, establecer una metodología que permita generar estrategias para el análisis y diseño del control en la estabilización del voltaje de salida de los convertidores DC-DC, atendiendo a sus características intrínsecas planteadas, y a su vez establecer estrategias de control adaptable en línea para el ajuste de los parámetros inciertos en el diseño del controlador. Segundo, realizar el análisis y diseño de la regulación en los modelos discretizados exactamente de los convertidores “derivados”, sobre la base de estrategias de Modulación de Anchura de Pulsos y Modulación de Frecuencia de Pulsos.

□ □ □

3 Contenido de la tesis.

El trabajo de tesis se ocupará de plantear, y evaluar estrategias de solución que permitan realizar el análisis y diseño del control realimentado discontinuo. Con el fin de resolver los problemas inherentes de las características intrínsecas ya planteadas para los modelos dinámicos que describen a los circuitos convertidores DC-DC, y sus versiones derivadas.

Esta tesis dividirá su contenido de estudio en cuatro partes: El control de los sistemas de fase no-mínima; la aplicación de esquemas de adaptación para ajuste de los parámetros del control nominal; el estudio del modelo dinámico utilizando la formulación de Euler-Lagrange; y finalmente para los convertidores derivados, la discretización exacta del modelo en tiempo discreto. Estudios estos englobados en el área de investigación de estrategias de regulación en la teoría de control no-lineal.

En primera Instancia en el capítulo [II], se describe y se aporta un modelo Lagrangiano para establecer los modelos promedio de los convertidores DC-DC, en base a la formulación Euler-Lagrange.

A continuación se describe la estrategia de solución para el análisis y diseño del control, que resuelve el problema inherente de tener una salida de fase no-mínima en los convertidores Boost, y Buck-Boost. Aportación que se plantea, desarrolla y evalúa en el capítulo [III].

En el capítulo [IV] se establece, en base a la publicación [59], una estrategia de análisis y diseño del regulador discontinuo, contemplando el control de tipo indirecto para la estabilización del voltaje de salida, aunado a la complicación adicional de tener parámetros constantes pero desconocidos. Aportando para su solución una nueva Forma Canónica de control que se valida mediante la introducción de la estrategia de adaptación de los parámetros con incertidumbre remanente por sobre los valores nominales.

Posteriormente en el capítulo [V] se aporta con base a la técnica de pasividad un método de control para la estabilización indirecta del voltaje promedio de salida de los convertidores [57]. Técnica aplicada al modelo promedio de los convertidores via la formulación Euler-Lagrange elaborados en el capítulo [II], y que consiste en

modificar la energía total almacenada, aunado al cambio de la estructura de disipación a través de “inyecciones de amortiguamiento” apropiadas. Estos mismos controladores, basados en estrategias de control indirecto, se extienden a su versión adaptativa [60] en el mismo capítulo. Cabe resaltar que como resultado, se obtiene una gran simplicidad en el diseño, y robustez con respecto a las incertidumbres paramétricas consideradas.

En la última parte de esta tesis, capítulo [VI], y publicación [52] nos ocuparemos de las aportaciones en el diseño de controladores basados en un modelo exactamente discretizado para los convertidores *derivados* [48]. Se propone: Primero, el análisis y diseño del controlador por Modulación de Anchura de Pulso (PWM), para la estabilización y seguimiento de señales. Segundo, el control por Modulación de Frecuencia de Pulsos (PFM), para la estabilización del voltaje de salida. En ambas aproximaciones, la estabilización se sustenta en una discretización exacta de la corriente de entrada muestreada. En el caso del seguimiento de una señal variante en el tiempo, el esquema propuesto en el diseño del sistema de control se basó en los modelos promedios exactos, que describen la dinámica de la corriente promedio de entrada en el inductor. Este enfoque permitió obtener controladores de forma explícita. Cabe aclarar que a pesar de la aparente simplicidad de los circuitos convertidores DC-DC “derivados”, existe una área no atendida en la literatura que nos obliga a obtener un modelo exactamente discretizado de tales circuitos convertidores.

□ □ □

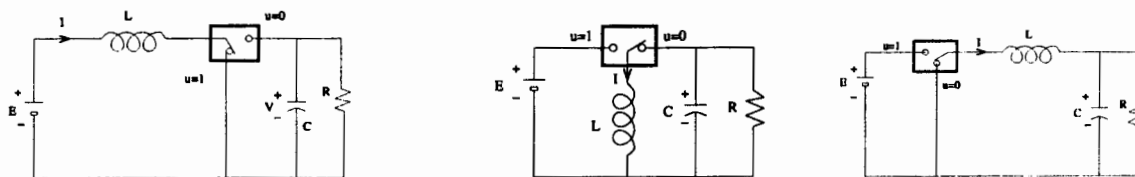


Figura 1.1: Circuito: Boost, Buck-Boost, Buck

□ □ □