

# Consideraciones técnicas para la sintonización de los controladores de un D-STATCOM real a partir de un modelo simulado

## Technical considerations for tuning the controllers of a real D-STATCOM by means of a simulated model

Santiago Benavides Córdoba<sup>1</sup>, José R. Ortiz C.<sup>2</sup>, Juan B Cano Q.<sup>3</sup>, Nicolás Muñoz G.<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, [santi.100319@gmail.com](mailto:santi.100319@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, [jrobinson.ortiz@udea.edu.co](mailto:jrobinson.ortiz@udea.edu.co)

<sup>3</sup>Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, [bernardo.cano@udea.edu.co](mailto:bernardo.cano@udea.edu.co)

<sup>4</sup>Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, [nicolas.munoz@udea.edu.co](mailto:nicolas.munoz@udea.edu.co)

Fecha de recepción: 07/13/2018 Fecha de aceptación: 12/07/2018



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4738>

**Como citar:** Benavides Córdoba, S., Ortiz C., J.R., Cano Q, J. B. & Nicolás Muñoz G. (2018). Consideraciones técnicas para la sintonización de los controladores de un D-STATCOM real a partir de un modelo simulado. *AVANCES: INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA*, 15 (1), 256-270. DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4737>

## Resumen

Este artículo presenta una herramienta técnica para determinar la primera acción de control de los controladores PI de un Distribution STATic COMPensator (D-STATCOM) real a partir de valores teóricos; además, se muestra la sintonización final de los controladores y un método para cargar el bus DC al voltaje requerido. La topología del D-STATCOM que se utiliza consiste en dos capacitores conectados como bus DC de un Voltage Source Converter (VSC) conectado a la red a través de inductancias. Los valores iniciales se determinan con la teoría de intercambio de energía entre dos fuentes. Este método fue implementado en hardware real basado en un modelo teórico que fue controlado en simulación; sin embargo, el ajuste de los controladores no fue óptimo en el D-STATCOM real. Debido a variables no conocidas como las pérdidas. La mayoría de artículos encontrados en la literatura describen modelos y estrategias de control del D-STATCOM donde asumen el problema de la carga del bus DC resuelto y no explican cómo realizarlo.

**Palabras clave:** Control PI, D-STATCOM, eficiencia energética, sintonización, VSC.

## Abstract

This paper presents a technical tool to determine the first control action of PI controllers for a real D-STATCOM by means of theoretical design; moreover, the final tune of controllers and a method to charge DC bus until required-voltage are shown. The used topology consists of two capacitors like DC bus of SVC which is connected to the grid through inductors. Initial values determination of controller is done with rules based on energy interchange between two sources. This method was implemented in a real hardware base on a theoretical simulated control model; however, the controllers from simulation were not optimums in the real D-STATCOM. These phenomena occur because there are unknow variables like losses. The losses do not provide exactly by fabricator. Most found papers in the literature describes models and control strategies of D-STATCOM where it is supposed DC problem solved, nevertheless, these papers do not explain how to charge DC bus.

**Keywords:** D-STATCOM, energy efficiency, inverter PI control, VSC.

## Introducción

Un D-STATCOM es un dispositivo de electrónica de potencia perteneciente a los Flexible AC Transmission System (FACTS) [1]–[3]. El D-STATCOM tiene la capacidad de comportarse como inductor o capacitor con variación continua de amplitud de corriente; por lo tanto, este dispositivo es utilizado para compensar el factor de potencia en sistemas que tienen presencia de energía reactiva. Este dispositivo es importante porque soluciona directamente el problema asociado con la energía reactiva que está siendo penalizado en Colombia (consumo de energía reactiva artículo 25 de la CREG 108 de 1997). La topología del D-STATCOM estudiado utiliza un VSC [4]–[6]. El D-STATCOM consume energía activa y reactiva de la red; la energía reactiva es utilizada para compensar el factor de potencia asociado a elementos con componente inductiva o capacitiva

conectados a la red; la energía activa es utilizada para cargar los capacitores, suministrar energía asociada a pérdidas por resistencias parasitas, por conmutación y térmicas para mantener el bus DC estable.

Los D-STATCOM han sido modelados [7]–[9] y controlados con diferentes estrategias de control [10]–[13]; estos artículos se enfocan en el modelo y el desarrollo, presentando herramientas matemáticas elaboradas para el funcionamiento, sin embargo, no presentan la precarga del bus DC y existe poca información sobre la implementación de un D-STATCOM real.

Un trabajo anterior del Grupo de Investigación en el Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL) modeló y proporciono los parámetros de control PI utilizando lazo de control en cascada [10] para un D-STATCOM. El trabajo teórico

proporcionó un D-STATCOM funcionando en simulación; sin embargo, al implementar el D-STATCOM de la simulación en un prototipo real, la determinación de los parámetros asociados a resistencias de los inductores y capacitores, pérdidas térmicas y pérdidas por conmutación requiere tiempo extra para su determinación y dispositivos de medida costosos; este problema hace que la sintonización teórica de los controladores no sea la mejor en un sistema real ya que se desconocen esos parámetros, pero los valores PI proporcionados son la base para llegar a los definitivos; además, la simulación asumía que los capacitores tenían una precarga antes de iniciar el control los controladores reales no tienen la capacidad de estabilizar el bus DC cuando está alejado de su valor nominal.

La sintonización de los controladores en un D-STATCOM real y la precarga del bus DC presentada en este artículo, se obtiene trabajando en la caracterización del dispositivo, utilizando el concepto de intercambio de energía entre dos fuentes. Inicialmente se trabaja con el D-STATCOM en lazo abierto para proporcionar un estado inicial de la modulación Sine Pulse Width Modulation (SPWM). Este estado sirve para obtener los valores iniciales de los controladores del D-STATCOM; además, puede utilizarse como método de control cuando no se cuenta con más herramientas. Este artículo presenta una visión del D-STATCOM que permite operar el dispositivo en lazo abierto sin implicar riesgos humanos y costos económicos.

Este trabajo se compone de introducción, una metodología dividida en subsecciones que describe el funcionamiento de un D-STATCOM, la descripción de la topología y el control en cascada, un método para la carga del bus DC, explica como aumentar los niveles del bus DC, un algoritmo para determinar los parámetros del primer valor de control y los pasos para sintonizar el control PI a partir de los controladores obtenidos del modelo simulado; se presentan resultados de los algoritmos propuestos en un D-STATCOM real de laboratorio; y las conclusiones.

## 2. Metodología

En esta sección se analiza un D-STATCOM, se plantea el control en cascada, se propone un algoritmo para la precarga del bus DC y la sintonización de los controladores del D-STATCOM a partir de los resultados teóricos y simulados.

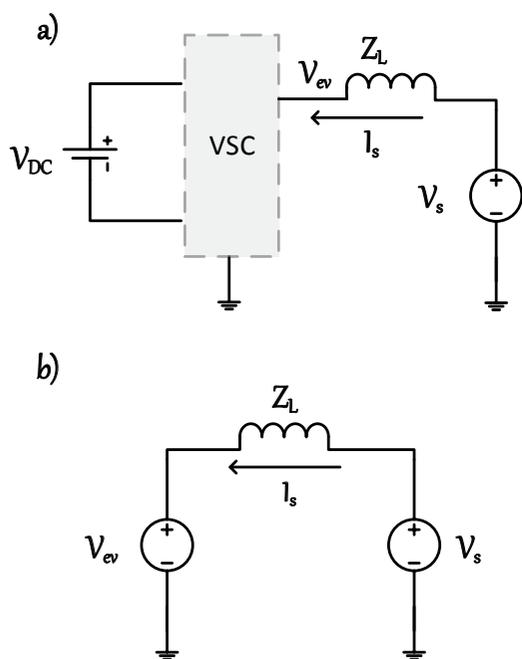
### 2.1 Funcionamiento de un D-STATCOM a partir del intercambio de energía

La Figura 1 a) muestra el principio de funcionamiento del D-STATCOM con el que se trabaja en este artículo. En esta topología se utiliza una fuente de voltaje DC que estabiliza un bus DC, un VSC y unas inductancias que sirven como elementos de acople a la red ( $V_s$ ) y filtro de armónicos. El VSC realiza la inversión DC/AC utilizando la modulación SPWM, la cual tiene la capacidad de imponer la magnitud y la fase del voltaje.

La Figura 1b) se usa para explicar el intercambio de energía bajo un modelo simplificado. En esta figura se tiene  $V_s$  y el voltaje en los bornes del D-STATCOM ( $V_{ev}$ ) conectados a través de una inductancia. La corriente que entrega la fuente de voltaje esta dada (1).

$$I_s = \frac{V_s \angle 0 - V_{ev} \angle \alpha_e}{j\omega L} \quad (1)$$

En la Ec. (1),  $I_s$  representa la magnitud y fase de la corriente resultante del intercambio de energía entre las dos fuentes;  $V_s$  tiene ángulo cero porque es la referencia; y  $V_{ev}$  tiene el ángulo de desfase entre la fuente  $V_s$  y el D-STATCOM. La magnitud y fase de la corriente  $I_s$  está determinada por la diferencia entre  $V_s$  y  $V_{ev}$ ; por lo tanto, modificando  $V_{ev}$ , se tiene control sobre la corriente que entrega  $V_s$ .



**Figura 1.** a) Intercambio de energía con el D-STATCOM. b) Intercambio de energía entre fuentes.

## 2.2 Esquemático del D-STATCOM implementado y control en cascada

En la Figura 1 a) se muestra una topología de un D-STATCOM que utiliza una fuente de voltaje DC para explicar cómo se controla la corriente por medio del intercambio de energía. Sin embargo, en este artículo se utiliza la topología de la Figura 2. Esta topología utiliza dos capacitores para estabilizar el bus DC en vez de una fuente de voltaje DC que es el caso de un D-STATCOM real. En esta figura se muestran las tres fases que tiene el D-STATCOM, las inductancias de acople a la red y relés de conexión del equipo con la fuente. En esta topología se debe utilizar energía activa de  $V_s$  para soportar las pérdidas presentes en el equipo y mantener el bus DC estable.

El D-STATCOM utiliza un control en cascada (ver Figura 3 a) para mantener estable el bus DC, y determinar la energía activa que necesita; además, posee un lazo de control simple (ver Figura 3 b)) para controlar la energía reactiva requerida y así compensar el factor de potencia de la red. Las acciones de control de ambos controladores actúan sobre la modulación SPWM, por lo tanto, el índice de modulación  $M$  se representa utilizando la transformada de Park como  $M_d$  y  $M_q$  (ver Figura 3).  $M_d$  tiene efecto sobre la energía activa para mantener estable el bus DC y  $M_d$  actúa sobre la compensación de energía reactiva.

La Figura 3 a) muestra el esquema de control en cascada utilizado para

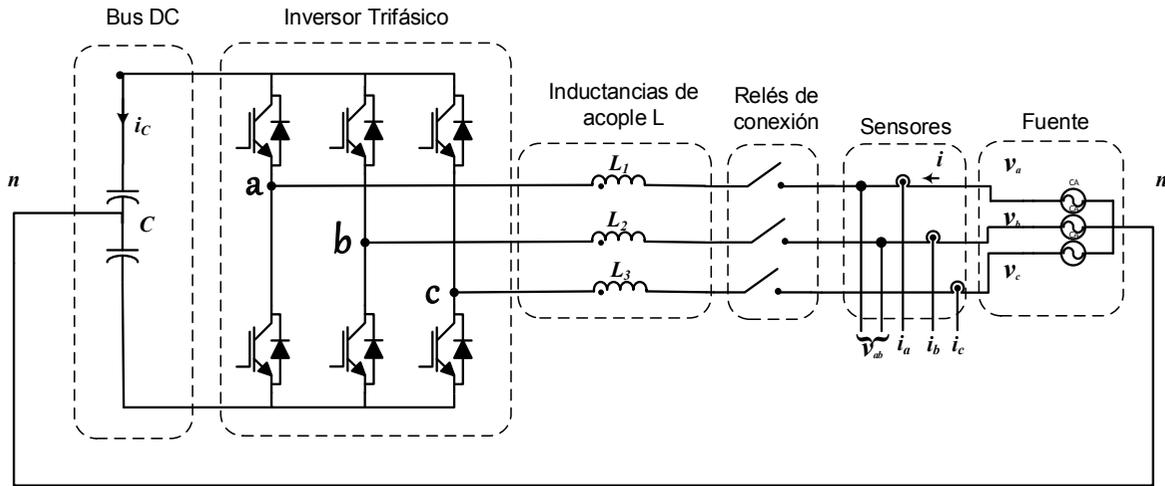


Figura 2. Esquemático del D-STATCOM.

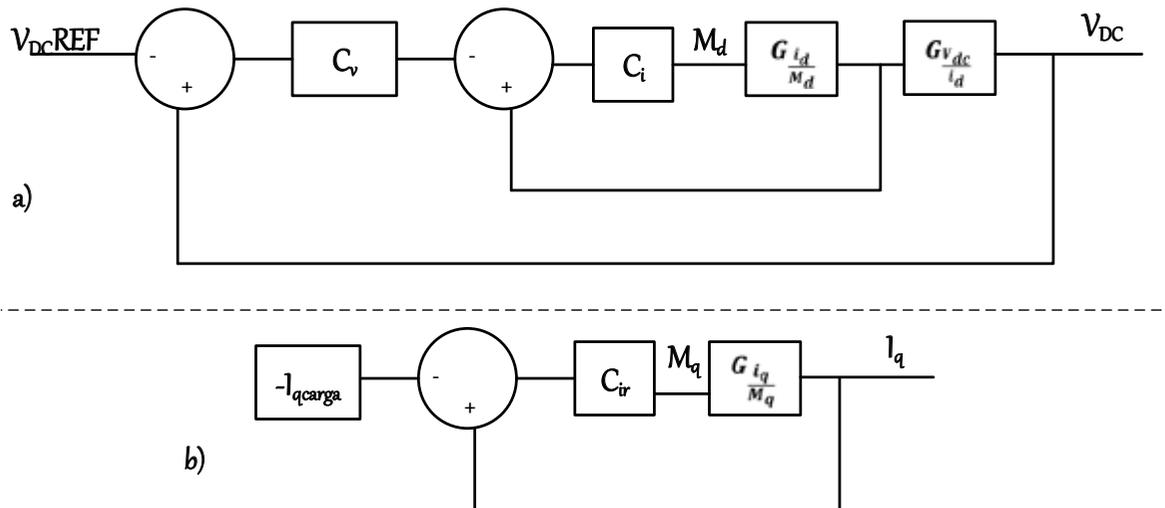


Figura 3. Estrategia de control en cascada para el voltaje del D-STATCOM.

estabilizar el voltaje  $V_{DC}$  en los capacitores del bus DC. El control en cascada requiere dos controladores: un controlador para estabilizar el bus DC ( $C_v$ ) cuyo resultado es la referencia del controlador. El controlador  $C_i$  realiza la acción de control  $M_d$  que actúa sobre la planta  $G_{id/M_d}$  para establecer la corriente activa que necesita el dispositivo; la salida de esta planta pasa por la planta  $G_{V_{dc}/id}$

la referencia del controlador  $C_v$  es el voltaje de operación que se requiere en el bus DC ( $V_{DC}REF$ ) y la acción de control de  $C_v$  es la referencia de corriente activa para cargar el bus DC (ver Figura 3a)). La referencia para control del factor de potencia  $C_{ir}$  mostrado en la Figura 3b) es el negativo de la corriente reactiva de la carga, la acción de este controlador es  $M_q$  que actúa sobre la planta  $G_{i_q/M_q}$ .

## 2.3 Fenómenos de carga del bus DC y de corriente reactiva

### 2.3.1 Primera carga del bus DC

El bus DC necesita una precarga ya que el modelo de control utilizado para el D-STATCOM no tiene la capacidad de cargar el bus DC desde cero a los valores requeridos. El voltaje DC de los capacitores debe ser mayor que el voltaje pico de la fuente de energía para tener control del voltaje y realizar el intercambio de energía deseado.

El primer nivel de voltaje de los capacitores se obtiene sin realizar modulación, dejando los interruptores abiertos y permitiendo que los únicos elementos que se activen sean los diodos comportándose como un rectificador (ver Figura 4). La Figura 4 muestra una topología con conexión de neutro, por lo tanto, el voltaje de cada uno de los capacitores es el voltaje pico de la red y el voltaje total es el doble del voltaje pico de la red. La carga de los capacitores demanda corriente alta

de arranque, por lo tanto, es necesario que en el tiempo de carga de los capacitores se utilicen resistencias para disipar la energía y evitar daños en el equipo; luego de que se lleva el D-STATCOM a las condiciones iniciales de operación, las resistencias deben ser aisladas para su correcto funcionamiento.

Luego de tener el bus DC cargado con los valores de la red, los interruptores se modulan con índice ( $M < \alpha$ ) igual a uno y un desfase  $\alpha$  de cero respecto a la red. Al realizar esta acción se tiene un voltaje  $V_{ev}$  (ver Figura 1 b) con la amplitud del doble del voltaje pico de la red  $V_s$  y con desfase cero. Esta última condición muestra que el intercambio de energía con la red es cero (Ec. 1) debido a que la red y el D-STATCOM tienen el mismo voltaje.

### 2.3.2 Carga de capacitores a un voltaje mayor

La primera parte importante consiste en tener el bus DC cargado y el VSC modulando como se muestra en la

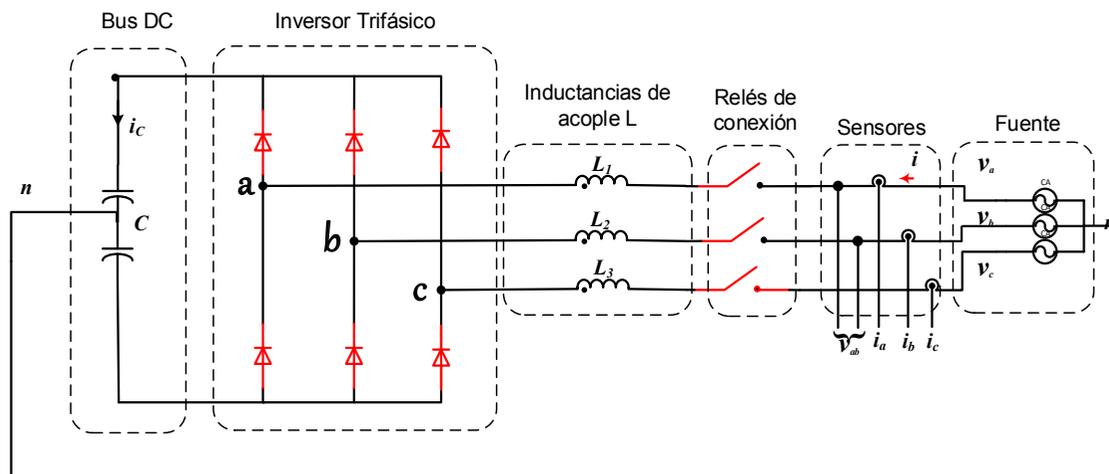
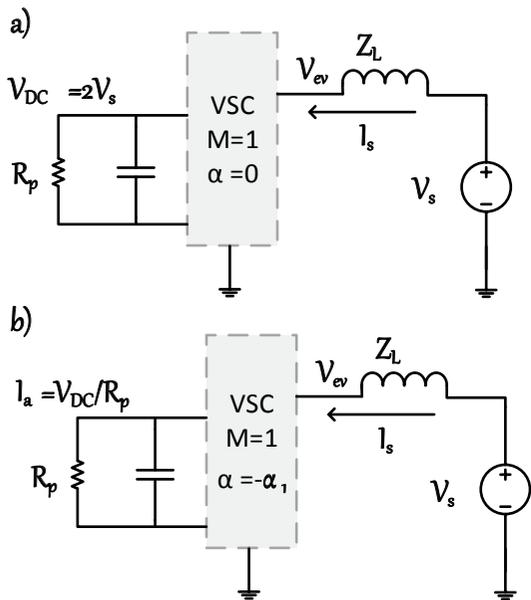


Figura 4. Primera carga del bus DC.



**Figura 5.** D-STATCOM con resistencia de pérdidas a) y b) .

Figura 5. ( $M=1$  y  $\alpha=0$ ); luego de tener el bus DC cargado inicia el proceso para elevar el voltaje variando el valor  $\alpha$ . En el momento en que el valor de crece a un valor  $-\alpha_1$  la fuente  $V_s$  empieza a entregar potencia activa al D-STATCOM (ver Figura 5 b), y como este dispositivo no consume potencia, esa corriente activa la absorbe la resistencia de pérdidas y aumenta el voltaje del bus DC hasta encontrar un equilibrio con el sistema. El hecho de que aumente el voltaje del bus DC, implica la aparición de energía reactiva para mantener el equilibrio (ley de voltajes de Kirchhoff) y una corriente reactiva capacitiva en la Ec. 1.

Es importante apuntar que cuando los cambios de son negativos el bus DC adquiere mayores magnitudes, comportándose como impedancia capacitiva, y que cuando son positivos el bus DC

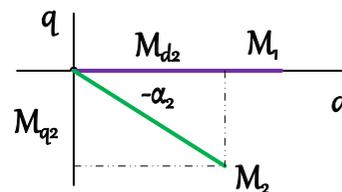
empieza a bajar hasta llegar a cero comportándose como impedancia inductiva. (se sugiere cambiar el valor de paulatinamente en magnitudes de  $-1$  grado, para evitar sobre picos que dañen el dispositivo o afecten el funcionamiento del sistema)

### 2.4 Algoritmo para cargar el bus DC y determinar los valores iniciales de la modulación SPWM

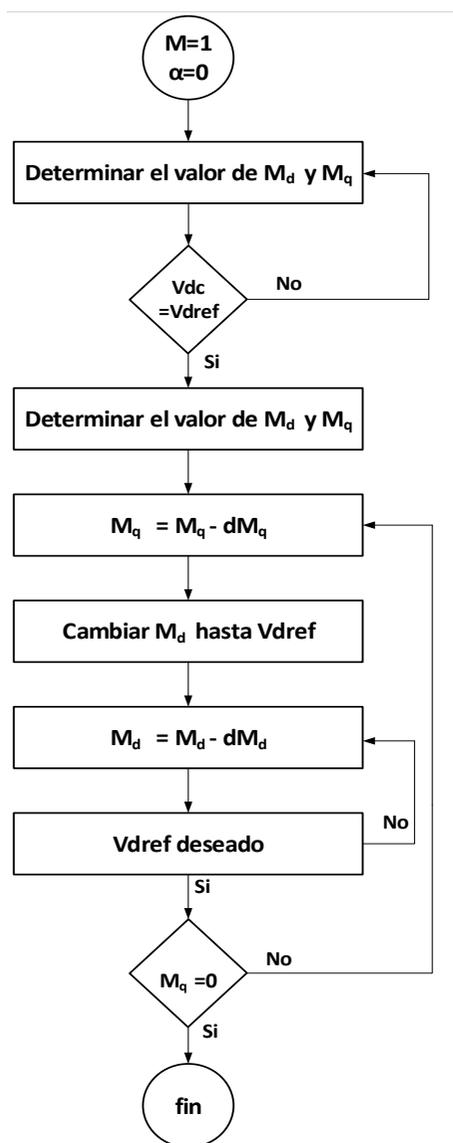
La Figura 5 muestra el índice de modulación  $M$  y un ángulo de desfase  $\alpha$  con respecto a la fuente de voltaje  $V_s$ . El control propuesto en este trabajo se realiza considerando corriente activa y reactiva de forma independiente y las acciones de control sobre los valores  $M_d$  y  $M_q$ .

La Figura 6 muestra dos valores de  $M$ :  $M_1$  y  $M_2$ ,  $M_1$  tiene ángulo de cero, por lo tanto,  $M_{1d} = M_1$  y  $M_{1q} = 0$ .  $M_2$  tiene ángulo de  $\alpha_2$ , por lo tanto,  $M_{d2} = M_2 \cos(-\alpha_2)$  y  $M_{q2} = M_2 \sin(-\alpha_2)$

La Figura 7 muestra el algoritmo para determinar los valores de  $M_d$  y  $M_q$  que llevan al bus DC al valor deseado y la corriente reactiva a cero. La condición inicial para la búsqueda de  $M_d$  y  $M_q$  es



**Figura 6.** Esquema para determinar con variaciones de .



**Figura 7.** Algoritmo para determinar  $M_d$  y  $M_q$  para cargar el bus DC.

establecer  $M=1$  y  $\alpha=0$ . En esta condición se tiene una carga inicial del bus DC; Luego se cambia  $\alpha$  hasta llegar al bus DC de referencia (los cambios de alfa iniciales deben ser pequeños 1 grado o menos, luego de conocer el sistema realiza los cambios como desee); cuando se llega al valor deseado se determina el valor de  $M_d$  y  $M_q$ . El objetivo es llevar  $M_q$

a cero y conocer el valor de  $M_d$  que estabiliza el bus DC en el valor de referencia. El algoritmo propone cambiar  $M_q$  en dos pasos para reconocer el sistema.

## 2.5 Sintonización de los parámetros PI de los tres controladores del D-STATCOM

El modelo del D-STATCOM fue simulado en PSIM y se mostró el dispositivo controlando con variaciones de carga; sin embargo, cuando se implementa el dispositivo real no se tiene información suficiente sobre los elementos parásitos. Este problema implica que la sintonización en el dispositivo real debe ajustarse para alcanzar el funcionamiento deseado. Los valores PI del modelo teórico (Figura 3) y el procedimiento proporcionado por la Texas Instrument para la sintonización [14], [15] son utilizados para resolver este problema y obtener los valores finales de control.

El control de este D-STATCOM tiene un control en cascada, por lo tanto, se sintoniza primero el control de voltaje DC, luego se sintoniza el control de corriente activa (ver Figura 3a); y por último se sintoniza el controlador simple de corriente reactiva.

Los pasos para sintonizar el controlador propuestos, basados en la guía de Texas Instrument son:

1. Imponga el control I en el valor simulado previamente, y utilice la ganancia P del valor simulado.

2. Varíe gradualmente la ganancia  $P$  hasta obtener un damping entre 0.4 y 0.7 [16].
3. Realice cambios pequeños en el valor de  $I$ . El parámetro  $I$  puede desestabilizar el sistema fácilmente. A medida que va incrementando el valor de  $I$ , es necesario decrementar el valor de  $P$  en pequeñas cantidades para que no afecte el sobre pico.

### 3. Resultados

Los resultados mostrados se toman del D-STATCOM en proceso de desarrollo mostrado en la Figura 8. Este D-STATCOM se conecta a la red por medio de transformadores de 12-120 V. la referencia de voltaje del bus DC es 60 voltios y controla corriente reactiva hasta 1.4 Amperios pico. La medida de corriente del dispositivo está diseñada para medir 5 amperios, por lo tanto, cuando se miden corrientes muy pequeñas, puede haber problemas de ruido. A pesar de esto, el control funciona con la sintonización propuesta.

La Tabla 1 muestra el resultado de aplicar el algoritmo de la Figura 7. En esta tabla se describe el valor de  $\alpha$ ,  $M$ ,  $M_d$ ,  $M_q$ ,  $V_{DC}$ , el valor de la corriente directa  $I_d$  y el valor de la corriente en cuadratura  $I_q$ . El algoritmo inicia el reconocimiento del sistema variando  $\alpha$  paulatinamente hasta llegar a la fila 6 donde se logra el voltaje de referencia; luego se empieza a variar  $M_d$  y  $M_q$  para tener los valores iniciales del control, que además realizan la precarga del bus DC. La fila 13 de la tabla 1 se resalta con negrilla los valores iniciales del controlador.



**Figura 8.** D-STATCOM utilizado para el diseño del control.

La Figura 9 muestra el estado del D-STATCOM cuando se llega al voltaje DC de referencia. La Figura 9 está asociada a los resultados de la fila 6 de la tabla I cuando se encuentra por primera vez el voltaje de referencia. La Figura 9 a) muestra el voltaje de la señal trifásica (fase A azul, fase B, anaranjada y fase C verde) que tiene el D-STATCOM y el voltaje DC (rojo) de referencia en 60 voltios. La Figura 9 b) muestra que las corrientes (fase A azul, fase B, anaranjada y fase C verde) en lazo abierto variando  $\alpha$  son capacitivas (la señal en fase con la red es la negra punteada) y visualmente son senoidales y la Figura 9 c) muestra la transformada de Par de la corriente mostrada en la Figura 9 b). la transformada de Park muestra que  $I_d$  (azul)  $I_d$

**Tabla 1.** Resultados del proceso del algoritmo de la Figura 7.

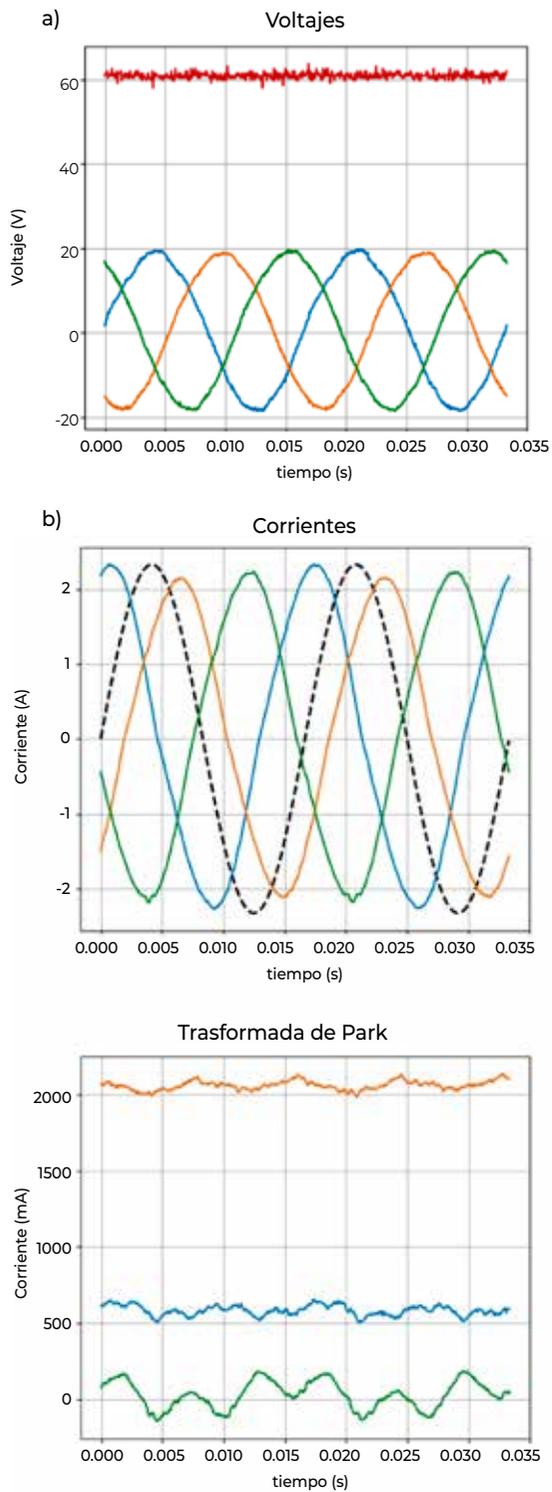
fila	$\alpha$ (grados)	$M$	$M_d$	$M_q$	$V_{DC}$ (V)	$I_d$ (A)	$I_q$ (A)
1	0	1	1	0	35.72	0	0
2	-5	1	0.996	-0.087	37.62	0.023	0.081
3	-8	1	0.990	-0.139	40.87	0.063	0.312
4	-10	1	0.984	-0.173	45.19	0.139	0.683
5	-12	1	0.978	-0.207	51.09	0.268	1.116
<b>6</b>	<b>-15</b>	<b>1</b>	<b>0.965</b>	<b>-0.258</b>	<b>63.28</b>	<b>0.602</b>	<b>2.140</b>
7	-7.6	0.97	0.965	-0.129	41.56	0.060	0.285
8	-9.1	0.81	0.800	-0.129	50.65	0.084	0.331
9	-10.4	0.71	0.700	-0.129	59.24	0.116	0.421
10	0	0.70	0.700	0	50	0.031	0
11	0	0.65	0.650	0	53.76	0.038	0
12	0	0.60	0.600	0	57.61	0.042	0
<b>13</b>	<b>0</b>	<b>0.56</b>	<b>0.560</b>	<b>0</b>	<b>61.07</b>	<b>0.047</b>	<b>0</b>

(anaranjada) se comporta como una línea recta (si fuese ideal sería una línea recta), mientras que  $I_z$  (verde) muestra que existe un desbalance. Este desbalance ocurre porque las inductancias de acople a la red no son exactamente iguales.

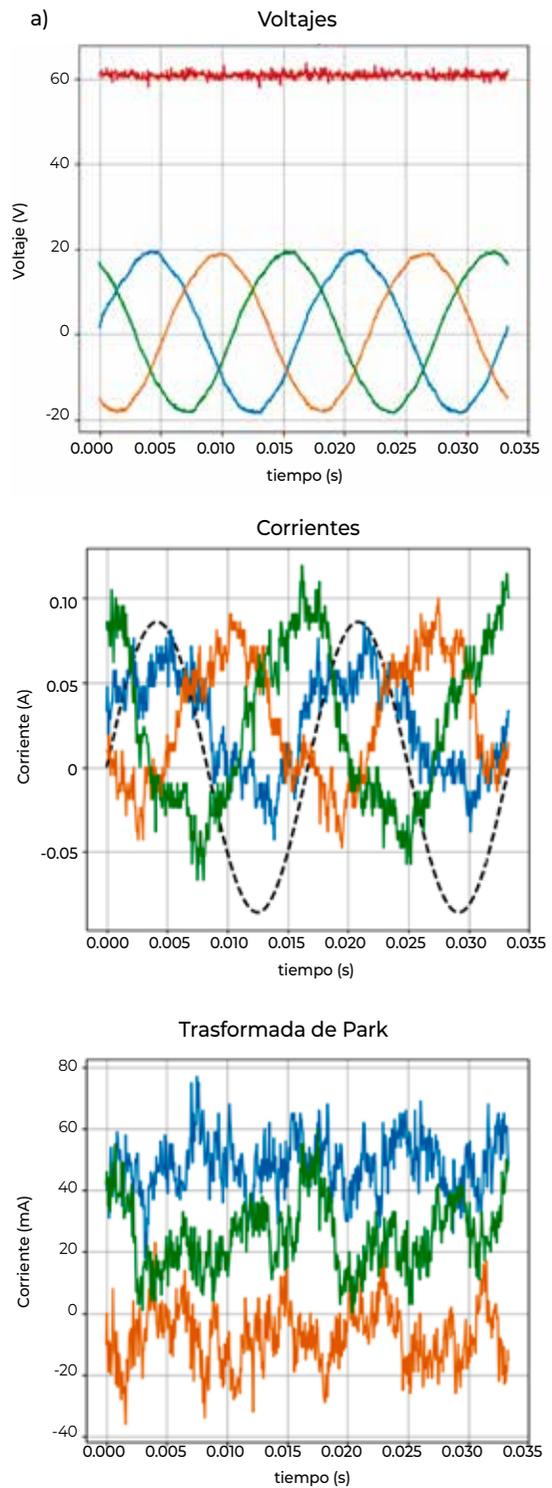
La Figura 10 muestra el estado del D-STATCOM cuando se llega al voltaje DC de referencia y se ha llevado a cero. La Figura 10 está asociada a los resultados de la fila 13 de la tabla 1 cuando se encuentra al voltaje DC de referencia; esta es la condición inicial del control en cascada. La Figura 10 a) muestra el voltaje de la señal trifásica (fase A azul, fase B, anaranjada y fase C verde) que tiene el D-STATCOM y el voltaje DC (rojo) de referencia en 60 voltios. La Figura 10 b) muestra que las corrientes (fase A azul, fase B, anaranjada y fase C verde) en lazo abierto variando  $\alpha$  son aproximadamente cero y la Figura 10 c) muestra la transformada de Park de la corriente

mostrada en la Figura 10 b), aproximadamente cero. La transformada de Park muestra que  $I_d$  (azul)  $I_d$  (anaranjada) e  $I_z$  (verde) no tienen una forma definida. Esto ocurre porque la energía que transmite la red al D-STATCOM es muy pequeña. A pesar de este fenómeno, se ve en la Figura 10 c) que  $I_d$  es mayor que las otras dos señales. Esto ocurre porque se necesita energía para alimentar las pérdidas del D-STATCOM y mantener el bus DC estable.

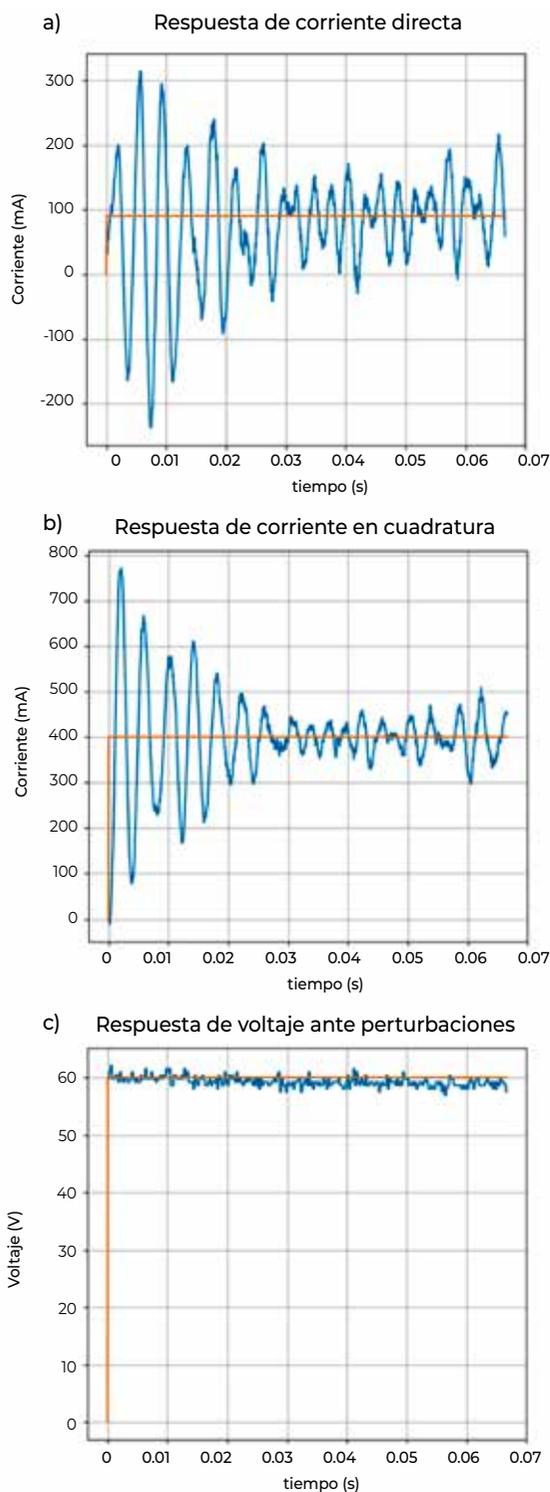
La Tabla 1 muestra que si se cambia  $M_q$  se debe modificar  $M_d$  para estabilizar el bus DC en un valor constante. Estos cambios implican que si se cambia la carga reactiva que se quiere compensar, cambia la referencia de  $M_d$  y  $M_q$  y se ve un fenómeno transitorio en el bus DC. Resumiendo, cualquier cambio en la carga que se compensa sirve como escalón para evaluar el tiempo de estabilización de los controladores y determinar el damping.



**Figura 9.** Resultados gráficos de la fila 6 de la Tabla 1.



**Figura 10.** Resultados gráficos de la fila 13 de la Tabla 1.



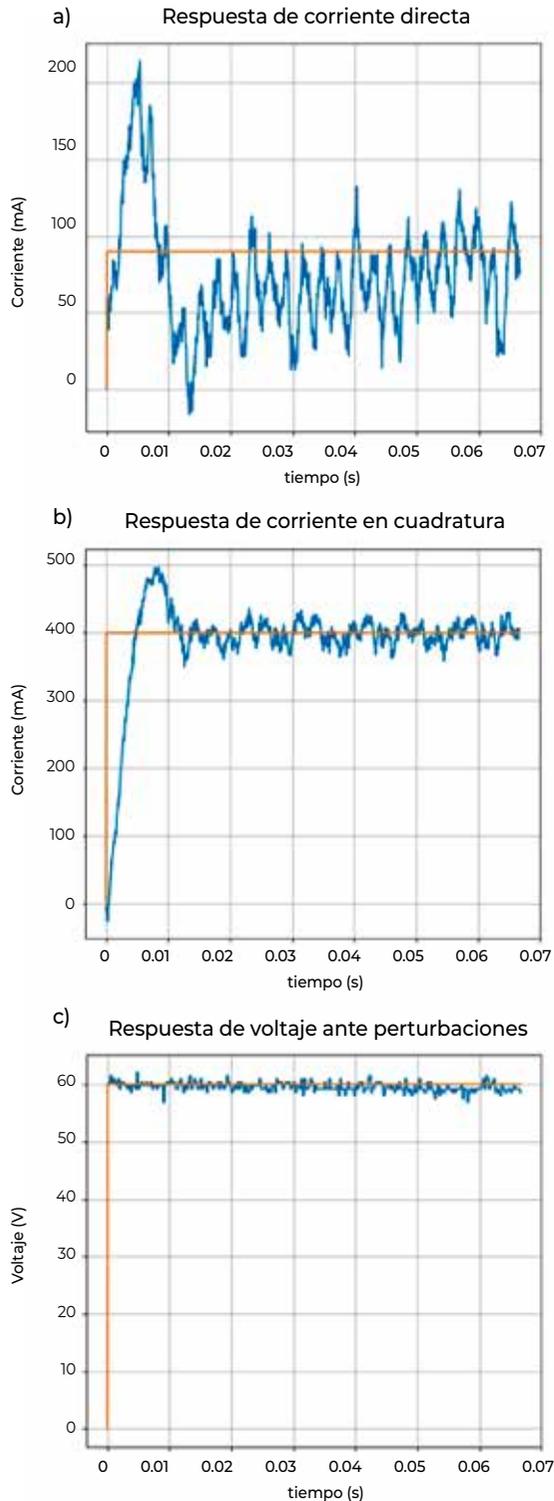
**Figura 11.** Respuesta ante el escalón con los valores PI teóricos y simulados.

La Figura 11 muestra las respuestas ante el cambio en la corriente de carga que se compensa utilizando los controladores teóricos simulados y la Figura 12 muestra las respuestas ante el mismo cambio utilizando los controladores obtenidos en este trabajo a partir de los controladores teóricos simulados. El cambio en la corriente que se implementa es de 0 a 400 mili amperios reactivos (se cambia en ese rango porque el primer controlador se desestabiliza cuando se le piden condiciones nominales por la sintonización)

La Figura 11 a) y 12 a) muestran la respuesta de  $I_d$  ante el cambio de carga. La Figura 11 a) tiene un sobre pico de 300 mA, mientras que la Figura 12 a) tiene un sobre pico de 200 mA. La Figura 11 a) tiene un tiempo de estabilización de 0.03 segundos, mientras que la Figura 12 a) tiene un tiempo de estabilización de 0.025 segundos.

La Figura 11 b) y 12 b) muestran la respuesta de ante el cambio de carga. La Figura 12 a) tiene un sobre pico de 750 mA, mientras que la Figura 12 b) tiene sobre pico de 500 mA. La Figura 11 b) tiene tiempo de estabilización de 0.03 segundos, mientras que la Figura 12 b) tiene tiempo de estabilización de 0.013 segundos. Y a la vista se percibe que la Figura 11 b) es más oscilante que la Figura 12 b)

La Figura 11 c) y la Figura 12 c) muestran la respuesta del bus DC. La respuesta del bus DC ante cambios de carga no es significativo porque él se mantiene igual, incluso es necesaria la precarga del bus DC para evitar inestabilidades.



**Figura 12.** Respuesta ante el escalón con los valores PI obtenidos en esta propuesta.

## 4. Conclusiones

En este artículo se propuso una interpretación del D-STATCOM explicado a partir del principio del intercambio de energía entre dos fuentes. En este caso, una fuente simulaba el D-STATCOM y la otra fuente simulaba el comportamiento de la red eléctrica a la cual estaba conectado el D-STATCOM. Esta interpretación permite el funcionamiento del D-STATCOM en lazo abierto usada para caracterizar el dispositivo y sintonizar los controladores.

En este artículo se aborda el problema de la carga inicial de los capacitores del bus DC en un D-STATCOM real dado que en la literatura actual se asume que está resuelto. Por lo tanto, se propuso un algoritmo para reconocer el D-STATCOM y un método para realizar la primera carga de los capacitores para la inicialización de los controladores.

Después de realizada la carga del bus DC se desarrolla el algoritmo propuesto para la sintonización de los controladores del D-STATCOM real a partir de la modulación SPWM. Este proceso se realiza mediante el principio de intercambio de energía entre dos fuentes modificando  $M_d$  y  $M_q$  para analizar el intercambio de energía activa y reactiva entre el D-STATCOM y la red eléctrica.

Los resultados obtenidos de la sintonización del control en cascada del D-STATCOM real fueron comparados con los resultados del controlador obtenido por simulación. Los resultados muestran un mejor desempeño del D-STATCOM con el control diseñado bajo el algoritmo

propuesto en cuanto a tiempo de estabilización, respuesta del control y valores de damping que mejoran la respuesta inicial del D-STATCOM reduciendo el sobre pico máximo.

## Agradecimientos

Se agradece a la Universidad de Antioquia, A la facultad de ingeniería que financia el proyecto mediante programáticas CODI, a la spin off ConoSer y al grupo de investigación GIMEL.

## Referencias

- [1] Singh, B., Saha, R., Chandra, A. & Al-Haddad, K. (2009). Static synchronous compensators (STATCOM): a review. *Power Electronics, IET*, 2 (4), 297–324.
- [2] Sang, Y. & Sahraei-Ardakani, M. (2017). *The link between power flow control technologies: Topology control and FACTS*. North American Power Symposium (NAPS), pp. 1–6.
- [3] Chavan, G., Acharya, S., Bhattacharya, S. & Inam, H. (2017). *Damping of power oscillations induced by photovoltaic plants using distributed series-connected FACTS devices*. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1–7.
- [4] García-González, P., & García Cerrada, A. (1999). Control system for a PWM-based STATCOM, in *1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364), vol. 2, pp. 1140–1145.
- [5] Barrera, C., E., Ugalde, L. E. C. & Ramos, B. (2009). Design of a digital control system for a PWM-based STATCOM. *IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, pp. 1–6.
- [6] Acha, E. & Kazemtabrizi, B. (2013). A New STATCOM Model for Power Flows Using the Newton Raphson Method. *IEEE Trans. Power Syst.*, 28 (3) 2455–2465.
- [7] Lidozzi, A., Calzo, G. L. & Pipolo, S. Solero, L. & Crescimbin, F. (2014). Modeling of voltage source inverter having active split DC-bus for supply of four-wire electrical utility systems. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1043–1050.
- [8] Huang, X., Liu, J. & Zhang, H. (2008). A simplified shunt APF model based on instantaneous energy equilibrium and its application in DC voltage control. *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2235–2241.
- [9] Kazemtabrizi, B. & Acha, E. (2014). An Advanced STATCOM Model for Optimal Power Flows Using Newton's Method. *IEEE Trans. Power Syst.*, 29 (2) 514–525.
- [10] Chen, Z. Luo, Y. & Chen, M. (2012). Control and Performance of a Cascaded Shunt Active Power Filter for Aircraft Electric Power System. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 59 (9), 3614–3623.
- [11] Yafang, W., Juping, G., Ruixiang, C. Ling, Q. & Juan, C. (2013). The multi-modular shunt APF based on direct

- current control and frequency doubling carrier phase - shifted SPWM. *IEEE ECCE Asia Downunder*, 867–871.
- [12] Varshney, A. and Garg, R. (2016). Comparison of different topologies of fuzzy logic controller to control D-STATCOM. *3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, 2492–2497.
- [13] Hu, J. Shang, L. He, Y. & Zhu Z. Q. (2011). Direct Active and Reactive Power Regulation of Grid-Connected DC/AC Converters Using Sliding Mode Control Approach. *IEEE Trans. Power Electron*, 26 (1), 210–222.
- [14] Texas Instrument (2012). Digital Motor Control Software Library.
- [15] Texas Instrument (2015). C2000™ Digital Controller Library User's Guide.
- [16] Shinnars, S. M. (1998). *Modern Control System Theory and Design*, 2nd Edition. New York, 1998.