



# **CREACIÓN DE PROTOTIPOS VIRTUALES MULTINIVEL DEL SISTEMA DE ACTUACIÓN ELECTROMECAÁNICA PARA AVIONES ELÉCTRICOS**

**Dany Leonardo Rey Rojas**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Villavicencio, Colombia  
2021



# **CREACIÓN DE PROTOTIPOS VIRTUALES MULTINIVEL DEL SISTEMA DE ACTUACIÓN ELECTROMECAÁNICA PARA AVIONES ELÉCTRICOS**

**Dany Leonardo Rey Rojas**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Electromecánico**

Director (a):

ING. Jhonattan Bulla Espinoza

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Villavicencio, Colombia



## **Agradecimientos**

Agradecer a Dios por permitirme alcanzar esta meta de llegar hasta este punto de culminar mi carrera, a nuestras familias por el apoyo incondicional, comprensión y compañía en esas duras jornadas de estudio. Agradecer a cada uno de los profesores que me formaron y me acompañaron durante este camino académico, por su paciencia y disponibilidad.



## Resumen

Los actuadores electromecánicos (AEM) se están volviendo cada vez más atractivos en el campo de las aeronaves más eléctricas debido a sus excepcionales beneficios, que incluyen un menor consumo de combustible y costos de mantenimiento, una mayor flexibilidad del sistema y una mejor gestión de la detección y el aislamiento de fallas. Sin embargo, la activación electromecánica plantea problemas específicos cuando se utiliza para aplicaciones aeroespaciales críticas para la seguridad, como los controles de vuelo: gran inercia reflejada en la carga, falla de tipo interferencia y aumento del juego con el servicio debido al desgaste y la disipación local de pérdidas de calor para el equilibrio térmico. Este estudio propone un enfoque incremental para la creación de prototipos virtuales de EMA. Está impulsado por un proceso de ingeniería de sistemas basado en modelos para permitir el diseño asistido por simulación.

Se sugieren las mejores prácticas respaldadas por el formalismo de gráficos de Bond para desarrollar la estructura de un modelo de manera eficiente y hacer que el modelo esté listo para su uso (o extensión) al abordar los problemas mencionados anteriormente. Los efectos físicos se introducen progresivamente y el realismo de los modelos de parámetros agrupados aumenta paso a paso. En particular, los modelos de componentes de varios niveles están diseñados para garantizar la continuidad entre las actividades de ingeniería. Los modelos se implementan en el entorno de simulación AMESim y se dan respuestas de simulación para ilustrar cómo se pueden usar para dimensionamiento preliminar, diseño de control, verificación de balance térmico y análisis de fallas a fallas. Las mejores prácticas propuestas tienen como objetivo proporcionar a los ingenieros medios rápidos, reutilizables y eficientes para evaluar el rendimiento de forma virtual y mejorar la madurez, el rendimiento y la solidez.

**Palabras clave: (actuadores, prototipo, virtual).**

## Abstract

Electromechanical actuators (EMA) are becoming increasingly attractive in the field of more electric aircraft due to their exceptional benefits, which include lower fuel consumption and maintenance costs, increased system flexibility, and improved fault detection and isolation management. However, electromechanical actuation poses specific problems when used for safety-critical aerospace applications such as flight controls: large load-reflected inertia, interference-type failure, and increased backlash with service due to wear and local heat loss dissipation for thermal equilibrium. This study proposes an incremental approach to AEM virtual prototyping. It is driven by a model-based systems engineering process to enable simulation-aided design.

Best practices supported by Bond graph formalism are suggested to develop the structure of a model efficiently and make the model ready for use (or extension) in addressing the above problems. Physical effects are introduced progressively and the realism of the lumped parameter models increases step by step. In particular, multi-level component models are designed to ensure continuity between engineering activities. The models are implemented in the AMESim simulation environment and simulation answers are given to illustrate how they can be used for preliminary sizing, control design, heat balance verification and fault-to-fault analysis. The proposed best practices aim to provide engineers with fast, reusable and efficient means to evaluate performance virtually and improve maturity, performance and robustness.

Keywords: (actuators, prototype, virtual).



**Contenido**

<b>1. Descripción del sistema EHA</b> .....	<b>7</b>
1.1. Procedimiento de modelado.....	9
1.2. Efectos multidisciplinarios.....	10
1.3. Requisitos de desempeño.....	11
1.4. Arquitectura de modelos.....	11
<b>2. Modelado multinivel</b> .....	<b>13</b>
2.1. Modelado PDE y EM.....	13
2.1.1. Niveles de modelado.....	14
2.1.2. Modelos de gráficos de enlaces del PDE y el EM.....	14
2.2. Modelado MPT.....	23
2.2.1. Descomposición de topología.....	24
2.2.2. Modelos de gráficos de enlaces de MPT.....	25
<b>2.3. Implementación de modelos</b> .....	<b>31</b>
2.3.1. Modelo de síntesis de control preliminar.....	32
2.3.2. Desarrollo del modelo PDE.....	32
2.3.3. Desarrollo del modelo EM.....	34
2.3.4. Desarrollo del modelo MPT.....	35
<b>2.4. Investigación y análisis numérico</b> .....	<b>37</b>
2.4.1. Interés por el diseño de controles.....	40
2.4.2. Interés de la dinámica de conmutación PWM.....	42
2.4.3. Interés del análisis del consumo de energía.....	44
2.4.4. Interés por el desgaste / envejecimiento y precarga.....	45
2.4.5. Interés por las faltas al fracaso.....	46
<b>3. Conclusiones</b> .....	<b>49</b>

## Lista de figuras

Figura 1 Mapeo de la distribución de energía en MEA.....	3
Figura 2 Proceso y propósito de modelado a nivel de sistema.....	8
Figura 3 Estructura esquemática de un sistema de actuación EMA.....	9
Figura 4 Acoplamiento de dominios multidisciplinares en una EMA.....	10
Figura 5 Matriz de una arquitectura modelo que considera los requisitos y efectos de ingeniería.....	12
Figura 6 Estructura de paquete de un PDE y un EM.....	14
Figura 7 Niveles de modelado de complejidad de un PDE y un EM.....	15
Figura 8 Modelos de gráficos de enlaces multinivel de un PDE combinado con un EM. ...	20
Figura 9 Ejemplos de curvas B / H con pérdida por histéresis.....	21
Figura 10 Esquema de MPT (tuerca-tornillo tipo rodillo).....	24
Figura 11 Descomposición mecánica y del balance energético para MPT.....	25
Figura 12 Modelo gráfico de enlaces multinivel para MPT.....	28
Figura 13 Áreas de implementación del modelo en el sistema de actuación EMA.....	31
Figura 14 Modelo para síntesis de control preliminar.....	32
Figura 15 Implementación del modelo avanzado que considera el lazo de corriente trifásico y el controlador.....	33
Figura 16 Implementación del modelo de inversor avanzado para pérdida de potencia y dinámica de conmutación.....	34
Figura 17 Diagrama de bloques del modelo avanzado que considera el lazo de corriente trifásico y el controlador.....	35
Figura 18 Diagrama de bloques del modelo MPT avanzado.....	35

---

Figura 19 Implementación del modelo MPT conductual en AMESim.....	36
Figura 20 Comparación de actuaciones dinámicas. ....	41
Figura 21 Comparación de flujo de potencia de fuentes de par. ....	42
Figura 22 Comparación de la tensión de fase A en un PMSM estándar. ....	43
Figura 23 Comparación de la corriente de fase A en un PMSM estándar.....	43
Figura 24 Comparación de la corriente del eje d / q mediante control FOC. ....	44
Figura 25 Perfil de misión para análisis de consumo de energía. ....	44
Figura 26 Análisis de consumo y pérdida de energía. ....	45
Figura 27 Varias respuestas de reacción en el modelo de comportamiento. ....	46
Figura 28 Respuestas de desgaste / envejecimiento por reacción o precarga.....	46
Figura 29 Fallos a fallos causados por reacción violenta.....	47
Figura 30 Fallos a fallos causados por casos de atasco.....	48
Figura 31 Respuestas de par con / sin atasco.....	48

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Controlador AEM y parámetros de carga equivalentes.....	37
Tabla 2 Parámetros de los modelos PDE y EM.....	38
Tabla 3 Parámetros del modelo MPT.....	40

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
$B$	<i>densidad de flujo</i>
$C$	<i>torque</i>
$E$	<i>fuerza magneto motriz</i>
$F$	<i>fuerza</i>
$f$	<i>frecuencia</i>
$H$	<i>flujo coercitivo</i>
$I, i$	<i>corriente</i>
$L$	<i>plomo</i>
$J$	<i>momento de inercia</i>
$K, k$	<i>constante / parámetro</i>
$L$	<i>inductancia</i>
$M$	<i>masa</i>
$n$	<i>número</i>
$U$	<i>Fuente de voltaje</i>
$V$	<i>PWM voltaje</i>
$v$	<i>velocidad</i>
$R$	<i>resistencia</i>
$P$	<i>poder</i>
$S$	<i>flujo de entropía</i>
$T$	<i>temperatura</i>
$X, x$	<i>posición traslacional</i>

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término
$\alpha$	<i>señal de ciclo de trabajo</i>
$\beta$	<i>parámetro de giro del motor</i>
$\delta$	<i>ángulo de par del motor</i>
$\varepsilon$	<i>factor de temperatura</i>
$\theta$	<i>posición angular</i>
$\eta$	<i>eficiencia electrónica del accionamiento de potencia</i>
$\rho$	<i>ciclo de trabajo de "encendido-apagado"</i>
$\lambda$	<i>factor de engranaje</i>
$\omega$	<i>velocidad angular</i>
$\psi$	<i>flujo magnético</i>

## Subíndices

<b>Subíndice</b>	<b>Término</b>
0, 1	inicial, operativo/realista
A, B, C	Tres fases del motor
c	contacto
cd	conducción
cg	engranaje
co	cobre
d	corriente directa del eje del motor
dd	caída de CC
de	accionamiento de potencia voltaje modulado electrónico
dm	amortiguamiento
e	elasticidad
ed	corriente de Foucault
ex	externa
em	electromagnetico
f, ff, fm	fricción, falta de fricción y fricción de motor
fp	paso libre
h	alojamiento
hy	histérisis
is	almacenamiento de inductancia
j	inercia
jm	interferencia
k	rigidez o cumplimiento
L	carga
lim	limitación
m	motor
n	nominal
nr	tuerca tornillo relativo
ns	tornillo de tuerca
on	estado encendido
off	estado apagado
p	polo de motor
q	eje de cuadratura
ir	acero
R	componente eléctrico de resistencia
r	relativa
s	suministro
sc	tornillo
sw	traspuesta
t	vara
th	umbral
vc	coeficiente de viscosidad
w	devanado
$\eta$	efficiency

---

# Introducción

Las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera han aumentado considerablemente en la aviación civil dado el rápido crecimiento del mercado del tráfico aéreo en los últimos años. La industria aeronáutica se ha enfrentado a problemas económicos y medioambientales. Recientemente, más aviones eléctricos (MEA) y todos los aviones eléctricos han recibido un interés significativo por desarrollar tecnologías más seguras, de menor costo y más ecológicas para el transporte aéreo de próxima generación. (Colorado, 2020)

Con la inversión constante en aviación, la tecnología poder por línea (PbW) elimina las tuberías hidráulicas pesadas y voluminosas y el problema de la vibración de la tubería. Por lo tanto, las redes hidráulicas, neumáticas y mecánicas centralizadas convencionales serán reemplazadas casi exclusivamente por una red de energía eléctrica, que puede proporcionar ventajas significativas en la facilidad de gestión, integración y mantenimiento de la energía, así como reducciones de la contaminación ambiental y el consumo de combustible. El PbW se introduce paso a paso en los controles de vuelo, trenes de aterrizaje y motores como la contribución clave a MEA, donde la señal y la potencia se transmiten por cables eléctricos.

Sin embargo, la madurez de la tecnología PbW está rezagada. De hecho, el verdadero desafío en la implementación de PbW en MEA es desarrollar actuadores compactos, confiables y accionados eléctricamente con la misma función para reemplazar los servoactuadores hidráulicos (HSA) convencionales. Hasta la fecha, solo se han desarrollado dos categorías de actuadores PbW, a saber, actuadores electrohidrostáticos (EHA) y actuadores electromecánicos (EMA).

Estos actuadores pueden presentar cambios arquitectónicos, por ejemplo, un actuador hidráulico de respaldo eléctrico (EBHA) y un actuador mecánico de respaldo eléctrico (EBMA). Los actuadores PbW ya han entrado en servicio en los últimos programas de aviones comerciales. En Airbus A380 / A400M / A350, un EHA sirve como actuador de respaldo para los controles de vuelo primarios y secundarios. En Boeing B787, un AEM se coloca parcialmente en la línea del frente para los controles de vuelo secundarios y el frenado del tren de aterrizaje.

En comparación con un EHA, un AEM elimina por completo el uso de circuitos hidráulicos, aumentando así sus ventajas económicas, competitivas y medioambientales. Las mejoras significativas en el rendimiento y la madurez de los motores eléctricos (EM), así como su electrónica de accionamiento de potencia (PDE) y su control, hacen que los AEM sean cada vez más atractivos.

Sin embargo, una AEM madura para aplicaciones críticas de seguridad extensivas, particularmente para el control de vuelo primario, aún carece de una base de datos histórica y requiere un esfuerzo considerable. En respuesta a estas necesidades, la industria aeroespacial está buscando una innovación (incremental o disruptiva) en los sistemas de actuación de EMA.

En particular, es imposible conectar el rotor del motor directamente a la carga cuando las restricciones de masa son severas. La masa de un EM resulta principalmente de su capacidad para desarrollar par.





retroceso. capacidad de conducción, amortiguación y amortiguación, reducción de masa y ahorro de costes.

En tal situación, se debe diseñar y desarrollar un modelo virtual para los sistemas MEA y sus componentes. Varios trabajos anteriores se han centrado principalmente en los análisis fundamentales y teóricos de un AEM y sus componentes, tales como pruebas dinámicas, modelado de distribución de carga, análisis de eficiencia de transmisión y cinemática de tuerca-tornillo, análisis de cumplimiento elástico no lineal y desarrollo de modelos de falla para un EM. Sin embargo, recientemente se han realizado estudios más prácticos y experimentales. Fu y col. desarrolló un modelo completo para la posición de contacto y el análisis de holgura de tornillos de rodillos planetarios estándar.

(Venkataraman et al., 2015) publicaron sus investigaciones sobre el análisis termo-mecánico de una EMA. Consideraron la distribución de carga como un modelo de calor por fricción que se desarrolló utilizando un método de elementos finitos 3D para estudiar los parámetros de la estructura, las condiciones de operación y el rendimiento de enfriamiento de los refrigerantes.

Los estudios mencionados analizaron el comportamiento de una AEM en función del nivel de componente. Sin embargo, los diseñadores y fabricantes deben considerar meticulosamente los efectos parásitos que resultan de las imperfecciones de la tecnología desde una perspectiva a nivel de sistema. Estos efectos incluyen resistencia, inductancia, fricción, reacción, cumplimiento y temperatura. Las consideraciones antes mencionadas son particularmente ciertas para evaluar los cambios en los pasos del diseño, los vínculos cruzados entre el apego de tecnología avanzada y la reducción del tiempo de comercialización, que son requisitos de ingeniería altamente vinculados con los siguientes propósitos:

(P1) Multiescala: diseño 3D a 1D (simplificación / linealización del modelo) y diseño 1D a 3D (para actividades de dimensionamiento);

(P2) Multinivel: continuidad entre modelos para proveedores de fuselajes, sistemas, equipos y componentes;

(P3) Multifísica: eléctrica (señal y potencia), electrónica, electromagnética, mecánica (par y fuerza), mecánica sólida, térmica (transferencia de calor) y fluida (lubricación);

(P4) Actividades de ingeniería de sistemas múltiples: requisitos, arquitectura (funcional, avanzada y comportamiento), dimensionamiento (potencia y configuración), verificación y validación de la integración, resolución de problemas y capacitación;

(P5) Varios temas: dinámica, equilibrio térmico / mecánico, potencia eléctrica máxima / media, estabilidad y contaminación de la red de energía eléctrica, consumo de energía / potencia, redundancia y fallas en el monitoreo de fallas / salud, análisis de no linealidad e identificación de incertidumbre de parámetros, desempeño de vibraciones y forzar la lucha / sincronización de movimiento.

Por lo tanto, esta deficiencia debe compensarse recurriendo a un enfoque de ingeniería de sistemas basada en modelos (MBSE). El requisito, la función, el elemento de solución lógica y el elemento físico se pueden considerar fácilmente a través de un intercambio de modelo estandarizado o un proceso abierto de co-simulación arquitectónica. Aunque el software de simulación comercial está ampliamente disponible, es evidente que faltan metodologías para la arquitectura de modelos. Tal deficiencia eventualmente afectará la continuidad entre las actividades de ingeniería, la capitalización del conocimiento y la naturaleza multifísica de los sistemas de actuación. Mientras tanto, los ingenieros generalmente no aplican las mejores prácticas para aprovechar al máximo esta nueva tecnología cuando abordan los vínculos cruzados en términos de desarrollo de modelos, uso compartido, integración y capitalización. En consecuencia, este estudio ilustra las mejores prácticas mediante el uso del formalismo de gráficos Bond como lenguaje de modelado para desarrollar modelos AEM que se pueden utilizar ampliamente en MEA. (HUANG & PETERS, 2017)

El resto de este análisis se organiza como sigue. La Sección 2 presenta la metodología de creación de prototipos virtuales a nivel de sistema para EMA. Se

presentan los flujos de energía y las disciplinas multidominio, y se abordan las actividades y los requisitos de ingeniería actuales. En la Sección 3, se desarrollan modelos de componentes reemplazables (PDE, EM y MPT) con niveles progresivos de representatividad. Las imperfecciones de las tecnologías se introducen progresivamente como efectos parásitos en modelos avanzados y de comportamiento partiendo de un modelo funcional que considera solo efectos físicos combinados para realizar una función.

La sección 4 ilustra los procesos de implementación de los modelos propuestos en un entorno de simulación causal proporcionando un ejemplo de un sistema de actuador de alerones. Luego, se realiza un análisis numérico en la Sección 5 para resaltar el interés de varias actividades de ingeniería. Finalmente, las conclusiones resumen los principales logros de este estudio y ofrecen perspectivas para trabajos futuros.

# 1.Descripción del sistema EHA

Este estudio trata sobre un AEM lineal de accionamiento directo típico, donde la tuerca giratoria de MPT está directamente integrada como parte del rotor EM. La eliminación de la caja de cambios intermedia confiere al mencionado AEM un diseño compacto. Este AEM "en línea" es más atractivo que un AEM adaptado para aplicaciones aeroespaciales debido a la reducción de peso y la fácil integración geométrica en la estructura del avión. El esquema de este AEM se presenta en la Figura 3. Este AEM se puede desarrollar para aplicaciones de control de vuelo y activación del tren de aterrizaje. Cuando se aplica al control de vuelo, la carga se considera como la superficie, que se maneja de acuerdo con los comandos del piloto / piloto automático y sufre perturbaciones aerodinámicas.

La energía eléctrica es suministrada por la red eléctrica de la aeronave. La potencia entregada a la carga impulsada es medida por el PDE de acuerdo con la señal de comando del controlador del actuador. La energía eléctrica se transforma en energía mecánica a través de un EM giratorio, y luego, la energía mecánica se transfiere a la superficie de control a través de un MPT de tuerca-tornillo. El control de tal AEM se basa típicamente en tres dispositivos electrónicos principales como sigue.

- a) Una computadora de control de vuelo (FCC) asegura que la posición de la superficie corresponde a los comandos de la ley de vuelo. Con fines de supervisión, la FCC completa la gestión de la supervisión de fallos desde el actuador.
- b) El controlador de actuador AEM recibe la orden de posición AEM de la FCC y la información del sensor de la EMA; luego procesa un bucle de control asociado. En general, el control AEM implica una posición de varilla (bucle exterior), un bucle de velocidad (bucle medio) y un bucle interno de corriente / par del motor, para cumplir con los requisitos de rendimiento y estabilidad. La electrónica de control del actuador (ACE) genera internamente el comando de

modulación de ancho de pulso (PWM) para el PDE como una imagen de la referencia de par.

c) El PDE está integrado cerca del EM en el EMA. La energía eléctrica modulada forma la red de aviones en un EM.

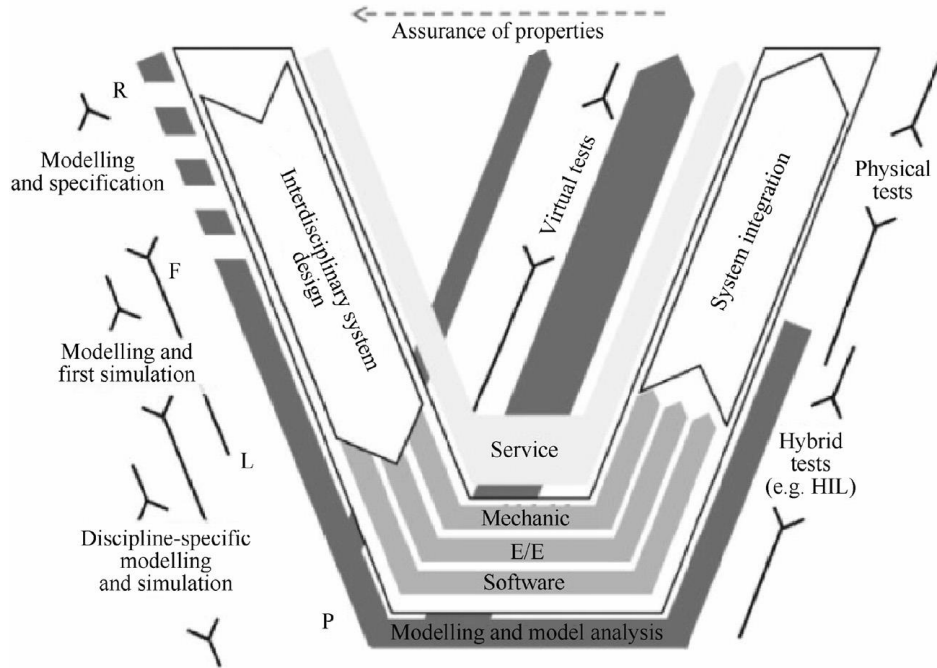


Figura 2 Proceso y propósito de modelado a nivel de sistema

La creación de prototipos virtuales debe considerarse solo como un punto de apoyo a la ingeniería, no como un objetivo final. Un modelo no es universal ni único. Está desarrollado para un propósito determinado con un nivel de complejidad adecuado. Un modelo es un objeto vivo que evoluciona contra la necesidad y la retroalimentación de la experiencia en la medida en que se escribe con mayúscula. Idealmente, un modelo debería estar dissociado de su implementación numérica. En muchos casos, sin embargo, esta condición no se puede lograr para dispositivos tecnológicos con comportamientos que exhiben fuertes no linealidades y discontinuidades, que impactan seriamente la implementación del modelo. (Trejos Grisales & Alzate Gómez, 2013)

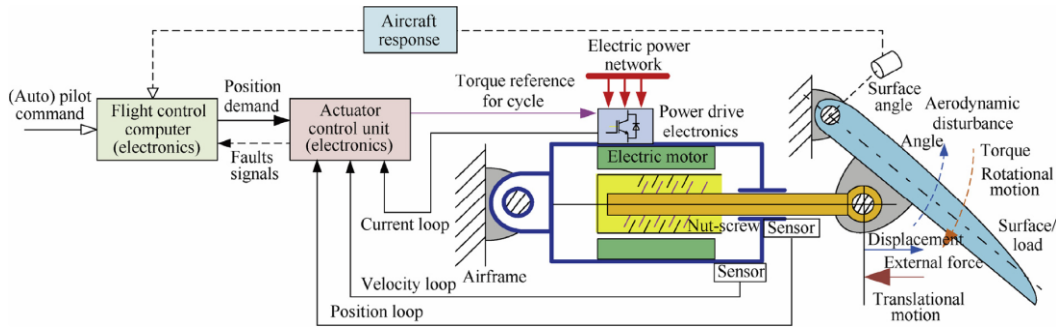


Figura 3 Estructura esquemática de un sistema de actuación EMA.

## 1.1. Procedimiento de modelado

Las siguientes preguntas se plantearon en base a más de tres décadas de experiencia en la creación de prototipos virtuales a nivel de sistema para proyectos industriales:

- 1) ¿Qué forma de ingeniería debe ser compatible con la simulación de un modelo? De esta manera, la actividad de modelado abordará un sistema apropiado con un nivel de complejidad adecuado.
- 2) ¿Cuáles serán los efectos de la función en estudio? Generalmente, un producto se diseña combinando efectos físicos para lograr una función deseada.
- 3) ¿Qué imperfecciones pueden alterar significativamente el desempeño abordado? El rendimiento de un producto se evalúa considerando los efectos parásitos que nunca pueden evitarse por completo (por ejemplo, fricción, inercia y resistencia del devanado).
- 4) Desde un punto de vista industrial, el mejor modelo nunca es el más complejo. En consecuencia, solo deben considerarse los efectos parasitarios que afecten significativamente al rendimiento.
- 5) ¿Cómo se modelan los efectos parasitarios funcionales y principales? Los modelos de conocimiento (de la ciencia) o los modelos de representación (de pruebas reales o virtuales) se combinan para modelar efectos parásitos funcionales y dominantes.
- 6) ¿Cómo se implementa un modelo en una herramienta de simulación (generalmente impuesta)? El modelo debe adaptarse al solucionador del entorno de simulación. Siempre que sea posible, se debe proporcionar una opción para reutilizar modelos / submodelos de bibliotecas de software porque estos modelos

/ submodelos generalmente están bien documentados, probados y numéricamente sólidos.

## 1.2. Efectos multidisciplinares

La creación de prototipos virtuales de un sistema AEM requiere enfoques multidisciplinares para el dimensionamiento de potencia preliminar y la evaluación del rendimiento, incluida una estimación de la masa y consideraciones de la envolvente geométrica y el comportamiento térmico.

El calor en una AEM se genera por diferentes tipos de pérdida de energía (por ejemplo, conducción, conmutación, cobre, hierro y fricción), que se disipan en exceso hacia el entorno local.

A diferencia de un sistema HSA donde la energía fluida también exhibe un efecto de enfriamiento, un sistema AEM es un sistema de circuito cerrado térmicamente. Los efectos físicos antes mencionados son siempre reticulados de múltiples dominios. Los modelos deben estar equilibrados (energética y mecánicamente) para evaluar los efectos acoplados. En consecuencia, el uso del formalismo de gráficos de Bond es particularmente interesante para la arquitectura de modelos. Las disciplinas involucradas en un estudio de AEM en dominios múltiples reticulados se muestran en la Figura 4.

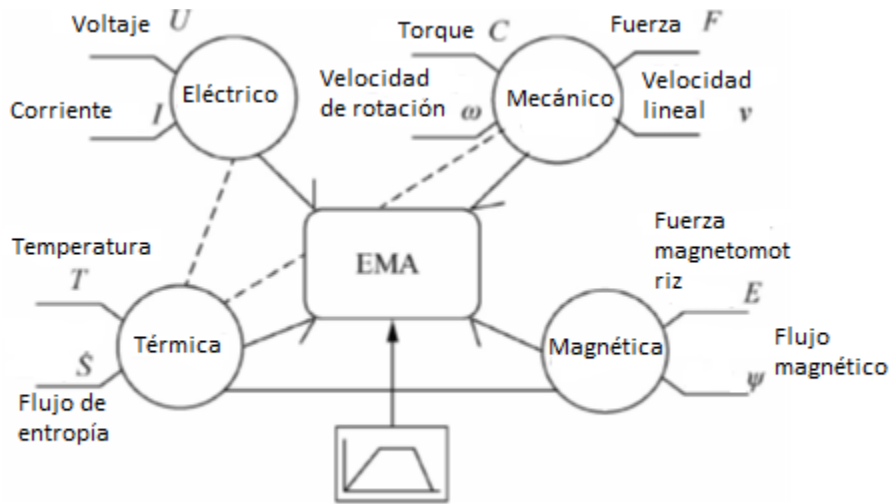


Figura 4 Acoplamiento de dominios multidisciplinares en una EMA.



### 1.3. Requisitos de desempeño

Para aumentar la eficiencia del desarrollo basado en modelos, la creación de prototipos virtuales de una AEM debe satisfacer los siguientes requisitos:

(R1) Preliminar: El modelo permitirá el desempeño dinámico / estático del diseño de control EMA, incluso para el tamaño de los componentes;

(R2) Generalidad: el modelo constará de submodelos genéricos que se pueden reutilizar para otros fines de modelado;

(R3) Realismo: El modelo deberá considerar los efectos físicos clave, que afectan significativamente el desempeño, desde una perspectiva a nivel de sistema;

(R4) Equilibrio: El modelo deberá estar equilibrado energéticamente. La eficiencia y la potencia de salida se pueden calcular introduciendo efectos de pérdida de potencia;

(R5) Reemplazabilidad: El modelo deberá tener interfaces estándar para asegurar su reemplazabilidad en el modelado multinivel;

(R6) Fallos: El modelo se considerará como la respuesta a los fallos;

(R7) Causalidad: El modelo se desarrollará para admitir varias causalidades que sean consistentes con entornos de simulación causal y causal.

### 1.4. Arquitectura de modelos

De acuerdo con los requisitos de rendimiento anteriores, la creación de prototipos virtuales a nivel de sistema de un AEM seguirá el proceso de ingeniería del sistema, y se deben considerar las mejores prácticas y recomendaciones. Para facilitar la implementación numérica y evitar no linealidades fuertes y efectos discontinuos, en algunos casos se descuidan los efectos parásitos que afectan de manera insignificante el desempeño. Como se muestra en la Figura 5, es importante considerar los efectos físicos para seleccionar el nivel apropiado de complejidad del modelo para la arquitectura de modelos. La creación virtual de prototipos de realismo a efectos físicos se ha convertido en una práctica para trabajar hacia una multiplicidad de requisitos de ingeniería, como el análisis dinámico natural, el equilibrio térmico, la pérdida de energía, el rendimiento controlado de circuito cerrado, el tamaño de los componentes, la reducción de peso / costo y la respuesta a fallas. Sin embargo, estas formas de ingeniería requieren

diferentes niveles de precisión. La complejidad del modelo (es decir, el número de parámetros / variables) afecta la rapidez y solidez de las simulaciones.

Model architecting	Engineering requirements									Effects			
	Functional (no parasitic effect)	Power sizing	Thermal balance	Natural dynamics	Closed loop (stability/accuracy)	Consumed energy	Response to failure	Load propagation	Reliability	Numbers of parameters	Number of state variables	Duration of simulation time	Typical dynamics
<b>Power drive Electrics (PDE)</b>													
1. Perfect power transformer	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			S	
2. Basic model (efficiency)				✓	✓					S	S	S	1 μs
3. Advanced model (conduction, switching losses)		✓	✓			✓				M	M	M	100 μs
4. Behavioral model (heat, faults, etc)		✓	✓			✓	✓		✓	L	L	L	1 s
<b>Electric motor (EM)</b>													
1. Perfect power converter	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			S	
2. Basic model (resistance, inductance, inertia)				✓	✓					S	S	S	10 μs
3. Advanced model (iron, friction losses, cogging torque)		✓	✓	✓	✓	✓		✓		M	M	M	10 ms
4. Behavioral model (heat, faults, etc)		✓	✓		✓	✓	✓		✓	L	L	M	1 s
<b>Mechanical power transmission (MPT)</b>													
1. Perfect power transformer	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			S	
2. Basic model (efficiency, inertia/mass, linear friction)				✓	✓					S	S	S	10 μs
3. Advanced model (real friction, compliance/backlash, etc)		✓	✓	✓	✓	✓		✓		M	M	M	100 ms
4. Behavioral model (heat, fault, bearings and joints, etc)		✓	✓		✓	✓	✓		✓	L	L	L	1 s
✓ = Yes										L	Large	L	Long
✓ = Possible (but depending on relative level)										M	Medium	M	Medium
= Not applicable ( N/A)										S	Small	S	Short

Figura 5 Matriz de una arquitectura modelo que considera los requisitos y efectos de ingeniería

## **2. Modelado multinivel**

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

### **2.1. Modelado PDE y EM**

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.

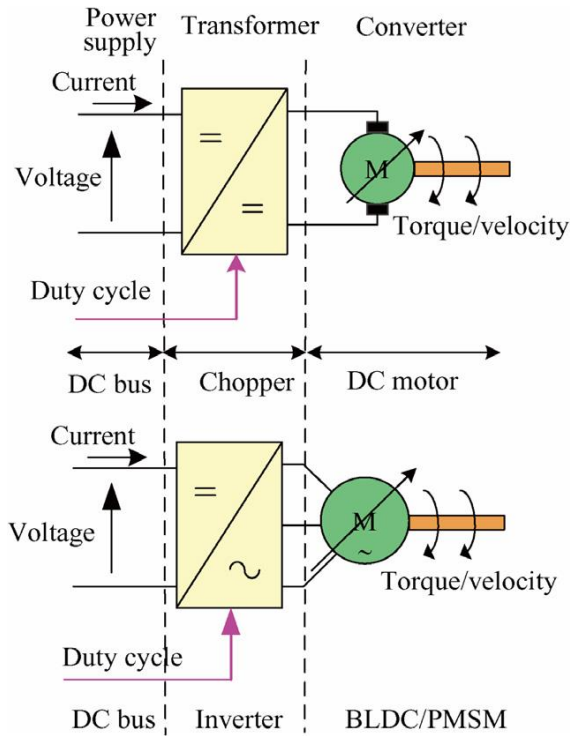


Figura 6 Estructura de paquete de un PDE y un EM.

### 2.1.1. Niveles de modelado

Se utiliza un enfoque de modelado incremental para analizar progresivamente los efectos físicos del PDE y el EM. Para la arquitectura de modelos, se sugieren diferentes niveles de modelado en función de los requisitos de ingeniería. Se pueden definir cuatro niveles genéricos de paquete de modelos (el PDE y el EM) de acuerdo con las diferentes complejidades de los efectos físicos (Figura 7). Los niveles están organizados desde el más simple al más complejo, con los impactos asociados en la precisión y el costo del tiempo de simulación.

La señal de par de referencia es  $C^*$ , se presenta el bucle de corriente y el elemento gráfico de enlace  $D_f$  detecta la corriente.

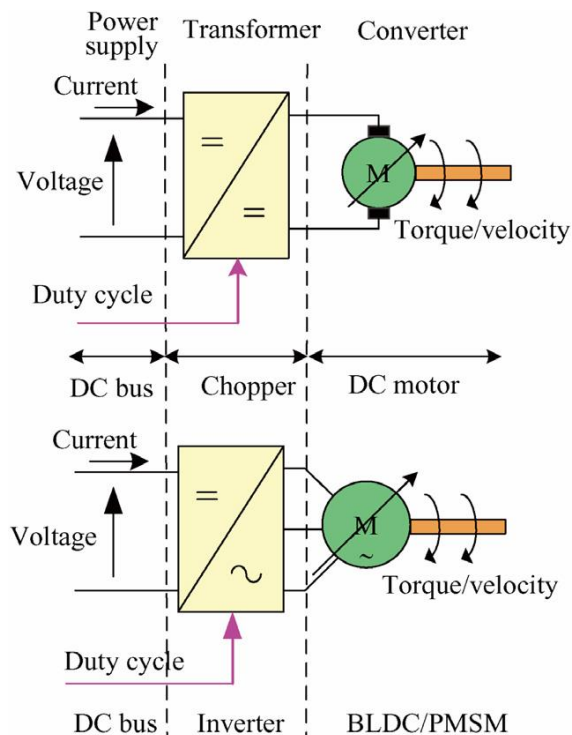
### 2.1.2. Modelos de gráficos de enlaces del PDE y el EM

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



incluyen eléctricos, magnéticos, mecánicos y térmicos. Las imperfecciones tecnológicas (por ejemplo, pérdidas de potencia e inercia del rotor) influyen significativamente en el rendimiento.

En la mayoría de los circuitos de puente inversor o chopper del PDE, la celda de conmutación básica implica un interruptor de estado sólido, por ejemplo, un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) y un diodo que proporciona una marcha libre a través de una estructura antiparalela.

Los desarrollos recientes en semiconductores de banda ancha y motores de alta eficiencia reducirán las pérdidas. Sin embargo, aunque las pérdidas de energía son mínimas, aún afectan significativamente el tamaño de la PDE en el aspecto térmico. La temperatura afecta el rendimiento dinámico, la vida útil y la confiabilidad del PDE y el EM. También provoca un efecto de bola de nieve.

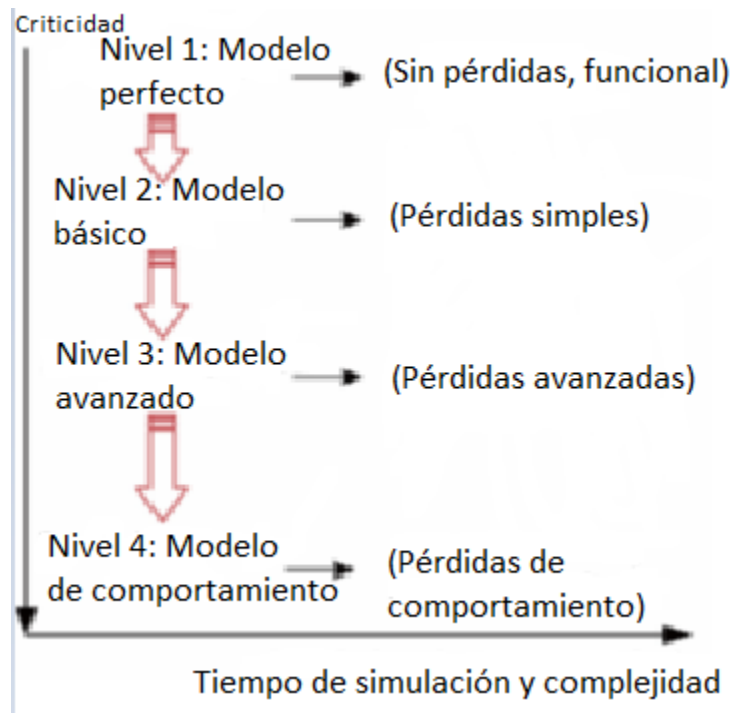


Figura 7 Niveles de modelado de complejidad de un PDE y un EM.

#### (1) Modelo perfecto

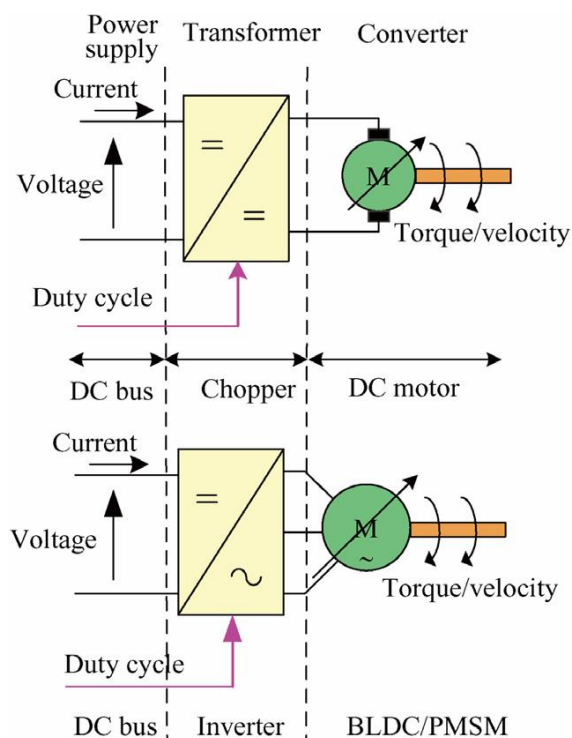
Como se muestra en la Figura 8 (a), el PDE opera funcionalmente como un transformador de potencia perfecto y modulado (MTF) entre el suministro de CC y el EM, que es

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



(a) como sigue:

$$U_{de} = \alpha U_s$$

$$I_{de} = I_s / \alpha$$

El EM permite una transformación de potencia perfecta entre los dominios mecánico eléctrico y de rotación. El par del eje del motor ( $C_m$ ) es igual al par electromagnético del motor ( $C_{em}$ ). Un girador de potencia (GY) con un parámetro de la constante de par del motor ( $K_m$ ) es el siguiente:

$$C_{em} = I_m K_m$$

$$\omega_m = U_m / K_m$$

(2) Modelo básico

Como se muestra en la Figura 8 (b), una consideración simplificada de la pérdida de potencia en el PDE, típicamente el parámetro de eficiencia ( $\eta$ ), está disponible en la hoja de datos del proveedor del producto. Se puede usar un efecto de resistencia  $R_{dd}$  para expresar el efecto físico que hace que el voltaje caiga ( $U_{dd}$ ) en el suministro del motor como

$$U_{dd} = \eta U_{de}$$

$$I_{dd} = I_{de}$$

La principal fuente de pérdidas de potencia en el dominio eléctrico del EM es la pérdida de cobre (también llamada pérdida de Joule), que puede modelarse mediante el elemento R en un gráfico de Bond. La pérdida de potencia se puede definir como una caída de voltaje ( $U_{co}$ ) debido a la resistencia del devanado ( $R_w$ ) a la corriente. La inductancia del devanado ( $L_w$ ) produce un efecto de almacenamiento eléctrico ( $U_{is}$ ) de la siguiente manera:

$$U_{co} = R_w I_m$$

$$U_{is} = L_w \frac{dI_m}{dt}$$

Cuando se considera el efecto del dominio eléctrico, el suministro de voltaje a nivel del motor se da de la siguiente manera:

$$U_m = \eta \alpha U_s - U_{is} - U_{co}$$

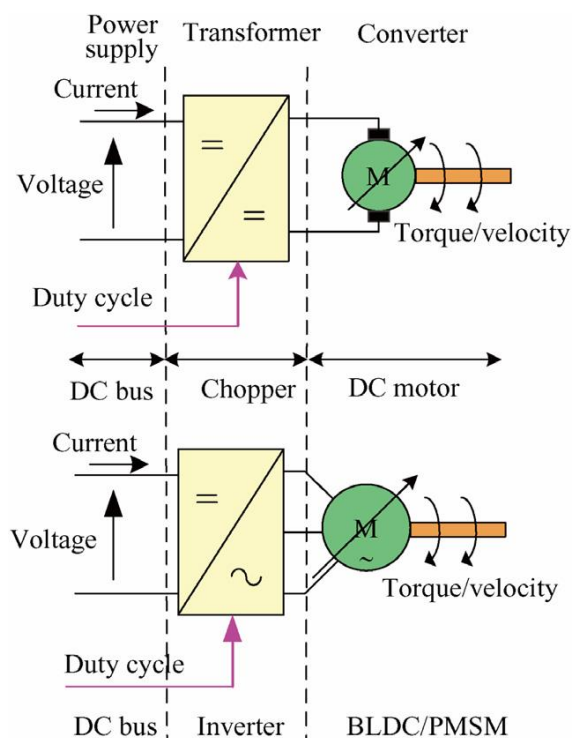


El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



propagación del par electromagnético a la salida del eje del motor. El equilibrio de par se ve afectado por el par de inercia del rotor parásito y el par de fricción ( $C_{fm}$ ). Esta condición se expresa a través de la dinámica del eje del motor de la siguiente manera:

$$C_m = C_{em} - J_m \frac{d\omega_m}{dt} - C_{fm}$$

### (3) Modelo avanzado

Como se muestra en la Figura 8 (c), detalles adicionales y realistas

Los efectos se consideran en el PDE y el EM basados en el formalismo de gráficos de Bond. En primer lugar, las pérdidas de potencia en el PDE se pueden dividir en tres tipos: conducción en estado activado, bloqueo en estado desactivado (fuga) y pérdidas de conmutación de encendido / apagado. En la práctica, las corrientes de fuga generadas en la energía fuera del estado son menores y pueden despreciarse.

Las pérdidas de conducción ocurren durante el modo de estado activado cuando un IGBT o un diodo comienza a conducir y genera una caída de voltaje  $U_{cd}$ , que es una función no lineal de la corriente de operación (relacionada con la corriente de carga) y la corriente nominal del IGBT o diodo. En el PDE de un EMA, los IGBT o diodos siempre operan en el rango de baja corriente, que es una región bastante "lineal" de su característica de transferencia y, por lo tanto, se puede utilizar una aproximación lineal para expresar el "estado activado". resistencia  $R_{on}$ . Entonces  $U_{cd}$  por pérdidas de conducción se puede expresar por el voltaje de umbral directo de corriente cero  $U_{th}$  más la caída de voltaje de  $R_{on}$  como:

$$U_{cd} = U_{th} + R_{on} I_{cd}$$

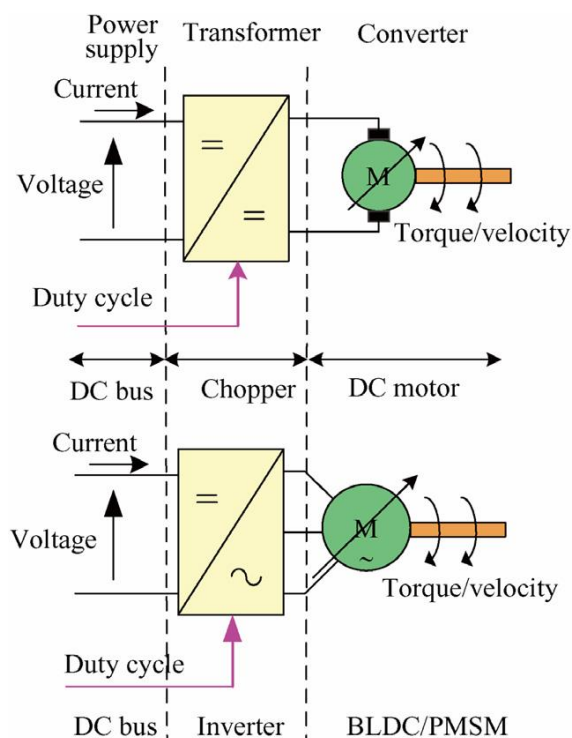
Una pérdida de conmutación generalmente contribuye a una proporción significativa de la pérdida total de energía. Ocurre durante un "encendido" / "apagado" transitorio porque un IGBT o un diodo no pueden cambiar instantáneamente. Durante la conmutación, se produce un desfase entre la corriente y la tensión. Las pérdidas de potencia de la conmutación no se pueden despreciar cuando la frecuencia de conmutación es alta (normalmente 10 kHz para AEM aeroespaciales). En la práctica, la pérdida de conmutación se considera una fuga de corriente que es directamente proporcional a la frecuencia de conmutación ( $f_{sw}$ ) como:

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



La pérdida de hierro en el EM es otro efecto físico importante. La variación de la densidad de flujo en el circuito magnético de un motor provoca una pérdida de hierro. El campo magnético en el rotor del motor gira con el rotor a la misma velocidad. Entonces, la variación mínima del flujo magnético no genera casi ninguna pérdida de hierro en el rotor. Por tanto, la pérdida de hierro se produce principalmente en el estator del motor y normalmente se puede dividir en pérdidas por corrientes parásitas y pérdidas por histéresis.

La corriente de Foucault se genera invirtiendo el campo magnético del hierro. Este campo induce un voltaje que produce corrientes parásitas debido a la resistencia eléctrica del hierro. No se puede acceder a las cantidades magnéticas durante las mediciones; por lo tanto, el efecto de las corrientes parásitas se expresa comúnmente como una pérdida de potencia equivalente que se refleja en el dominio mecánico. El par de corriente parásita ( $C_{ed}$ ) puede modelarse mediante el primer miembro de la ecuación de Steinmetz55 como una función de la constante de corriente parásita  $k_{ed}$ , es decir, la densidad de flujo magnético ( $B_m$ ) y la velocidad angular ( $\omega_m$ ) de la siguiente manera:

$$C_{ed} = B_m^2 k_{ed} \omega_m$$

La histéresis magnética ocurre dentro de los materiales ferromagnéticos. El efecto de histéresis ocurre entre la densidad de flujo de remanencia  $B$  y la coercitividad  $H$  (curvas típicas  $B / H$ ), como se muestra en la Figura 9. El área de dominios de histéresis representa el trabajo realizado (por unidad de volumen de material), es decir:

$$C_{hy} = B_m^2 k_{hy}$$

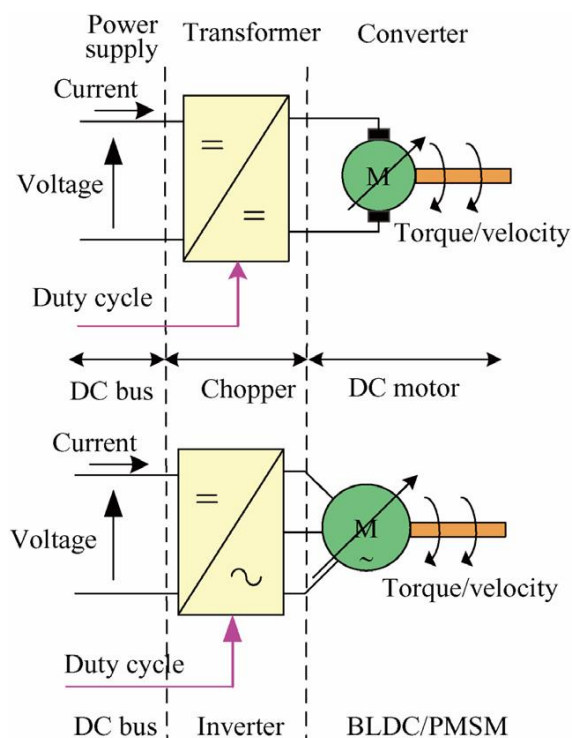
Otro efecto físico en la EM es el par dentado ( $C_{cg}$ ), que se produce en el dominio magnético. La variación en la permeabilidad del entrehierro de los dientes del estator y las ranuras por encima de los imanes durante la rotación del rotor genera una ondulación de par, que también se conoce como par de retención. El par dentado se puede describir como una función de signo puro de un efecto de resorte no lineal. Se puede usar el elemento AC en el gráfico de Bond, como se muestra en la Figura 8 (c). Se puede expresar un modelo de representación a nivel de sistema para  $C_{cg}$  frente al ángulo relativo  $h$  del rotor / estator. Este modelo está parametrizado por el número  $n_p$  de pares de polos del motor y el factor de cogging  $\lambda$  que se aplica al par nominal  $C_n$ , que viene dado por:

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



Modelar el efecto de engranaje puede ser importante por dos razones. En primer lugar, el par dentado se puede utilizar como efecto funcional en determinadas aplicaciones de actuación para evitar la conducción hacia atrás. En segundo lugar, el engranaje genera una ondulación de par durante el funcionamiento, cuya frecuencia depende de la velocidad relativa del rotor / estator. Esta condición puede excitar la dinámica natural de la AEM y su entorno mecánico, lo que podría provocar vibraciones y emisión de ruido.

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.

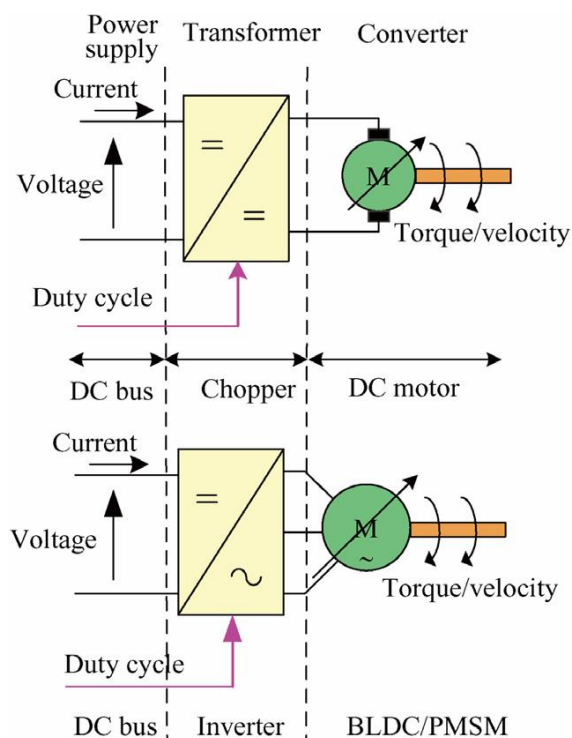


Figura 8 Modelos de gráficos de enlaces multinivel de un PDE combinado con un EM.

Las pérdidas de potencia del PDE y el EM generan calor y aumentan la temperatura en un volumen cerrado. La resistencia eléctrica es sensible a la temperatura de funcionamiento, por ejemplo, las características de resistencia en estado de los IGBT y los diodos en el PDE y la resistencia del devanado en el EM. Esta condición provocará un efecto de bola de nieve de las pérdidas de energía. Sin embargo, el efecto de la temperatura sobre la resistencia eléctrica no es lineal y está mal documentado en las hojas de datos. En ausencia de datos precisos, se supone una dependencia lineal para cada tipo de resistencia, relacionada con la temperatura inicial ( $T_0$ ) y la temperatura de funcionamiento ( $T_1$ ) como:

$$R_1 = R_0\{1 + \xi_r(T_1 - T_0)\}$$

Además, un aumento de temperatura puede disminuir el rendimiento de los imanes en el EM, lo que reduce la constante de par del motor ( $K_m$ ). Se utiliza un elemento de gráfico de enlace (De) para modular el parámetro ( $K_m$ ) del generador (MGY) en el modelo de gráfico de enlace que se muestra en la figura 8 (c). Similar a la resistencia eléctrica, este elemento también puede modelarse como una dependencia lineal a la temperatura de la siguiente manera:

$$K_{m1} = K_{m0}\{1 + \xi_r(T_1 - T_0)\}$$

La fricción del motor depende en gran medida de la temperatura. El modelado de este efecto a nivel del sistema se ha abordado en nuestro trabajo anterior. El efecto de la temperatura sobre la fricción está mal documentado en las hojas de datos de los proveedores.

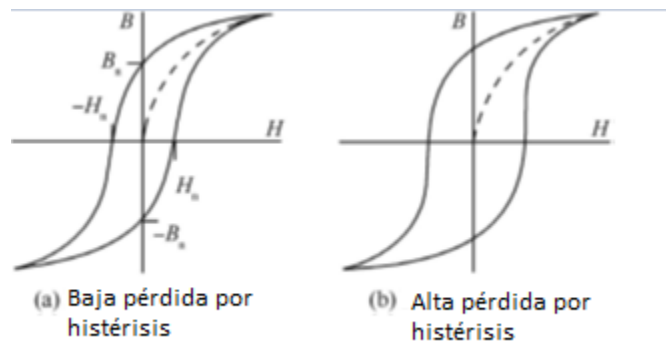


Figura 9 Ejemplos de curvas B / H con pérdida por histéresis.

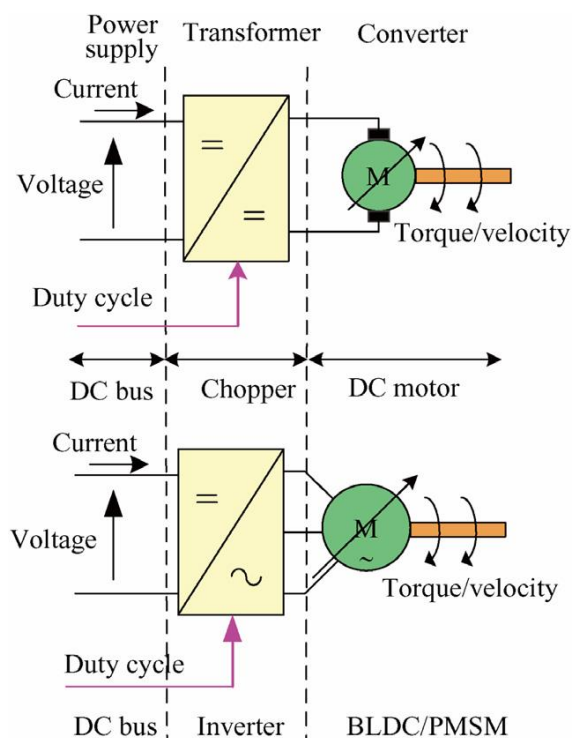


El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



A medida que la densidad de flujo cae por debajo del punto de saturación, la relación entre la corriente y el flujo magnético en los materiales ferromagnéticos deja de ser lineal; una corriente dada genera menos flujo magnético de lo esperado. La constante de par EM es una función del flujo magnético ( $w$ ), y el método de la tabla de consulta se puede utilizar para identificar la relación de la siguiente manera:

$$K_m = f(\psi)$$

Además, la inductancia de los devanados del motor ( $L_m$ ) se ve afectada por la saturación magnética. Por tanto, como se muestra en la figura 8 (d), la constante de par EM se modula por  $w$  y la temperatura de funcionamiento, y la inductancia del devanado también se modula por  $w$ .

Los modelos anteriores simplificaron el EM como un modelo de CC equivalente, que es impulsado por un PDE tipo chopper. Este modelo considera un motor PMSM trifásico realista, que actualmente está ampliamente implementado en la industria aeroespacial. En la figura 6 se muestra una estructura típica cuando un PMSM trifásico se asocia con un PDE inversor de tres ramales (rama A, rama B, rama C). Las tres ramas del PDE son controladas por un control orientado al campo (FOC) estrategia para generar la tensión PWM (V1 a V6) aplicada a las fases del motor. Los modelos de gráfico Bond del inversor PDE y el PMSM trifásico se presentan en la Figura 8 (d). Las señales impulsadas se elaboran mediante transformaciones de Park directas e inversas, que vinculan los vectores espaciales asociados con las fases del motor en un marco de motor fijo (trifásico A, B, C) a un marco giratorio (transformación de cuadratura directa dq) unido a la posición relativa rotor / estator ( $h$ ). Las señales de control se transforman en estados on / off, que recurren al PWM, para accionar los interruptores de estado sólido de las piernas.

Cuando se utilizan las coordenadas de restricción de potencia constante, la transformación de estacionamiento (MTF), la corriente del motor trifásico real a la corriente de la coordenada d-q y los parámetros de MTF son modulados por Teta, que proporciona

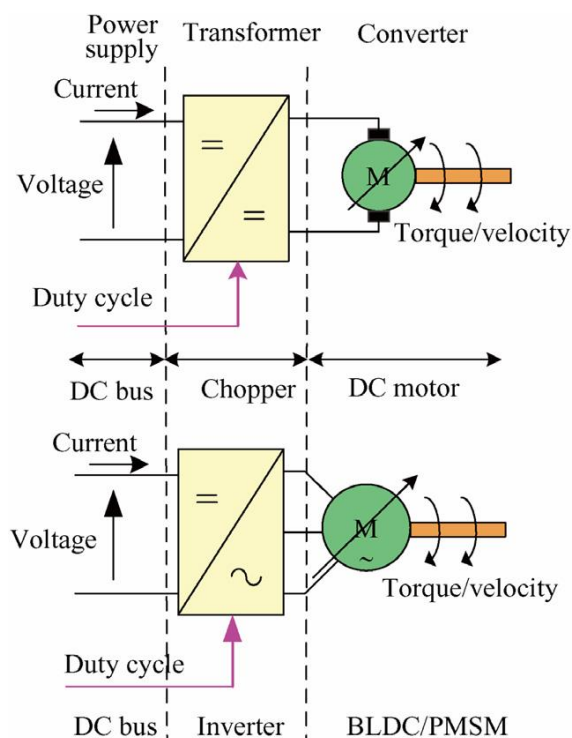
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



B, C del estator se reemplazan por la tensión d-q para dar lo siguiente:

$$U_d = i_d R_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_m L_q i_q$$

$$U_q = i_q R_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_m L_d i_d + \omega_m \psi$$

La inductancia cíclica del estator y la resistencia del eje d-q se pueden definir fácilmente en el gráfico de Bond. En un AEM de accionamiento directo, cuando se integra un PMSM de tipo montaje en superficie, y la relación entre la inductancia y la resistencia del eje d / q es la siguiente:

$$L_d = L_q = L_m$$

$$R_d = R_q = R_m$$

Por lo tanto, en el modelo de gráfico de Bond que se muestra en la Figura8 (d), el parámetro de giro modular (b) del eje d / q del motor se puede expresar como

$$\beta = L_m \omega_m$$

La corriente del estator del motor se da como

$$I_m = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$$

Para reducir la pérdida de cobre en el motor, el ángulo de par (d) no cambia a 90 y la corriente directa del eje es cero. Esta estrategia se usa más comúnmente para el control PMSM de superficie. Solo deja el par o la corriente del eje de cuadratura en su lugar. Por lo tanto, esta estrategia tiene enlaces de flujo de eje directo constantes ( $w$ ) para producir un par de motor constante, que viene dado por:

$$C_{em} = K_m i_q = n_p \sqrt{\frac{3}{2}} \psi i_q$$

## 2.2. Modelado MPT

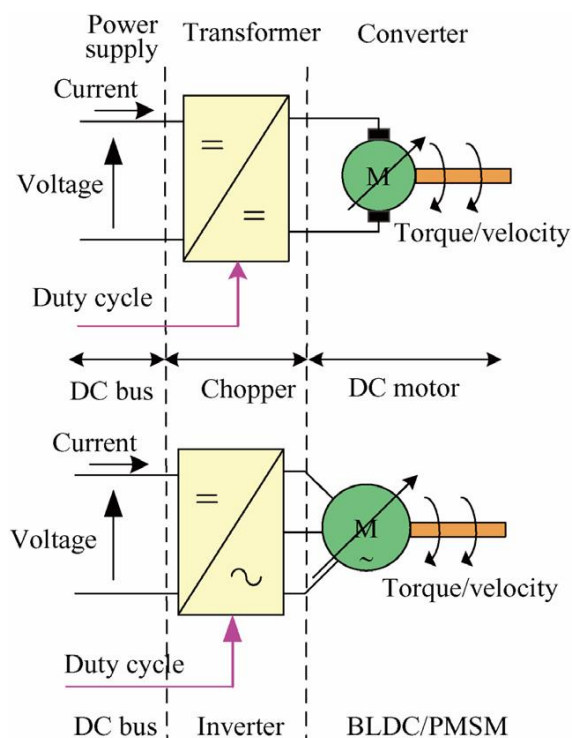
MPT es un componente clave en la creación de prototipos virtuales de una EMA. Se logra una transformación de potencia de rotación a lineal mediante un mecanismo de tuerca-tornillo. Esta transformación tiene como objetivo convertir el par y la velocidad de

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



vuelo, como se muestra en la Figura10.

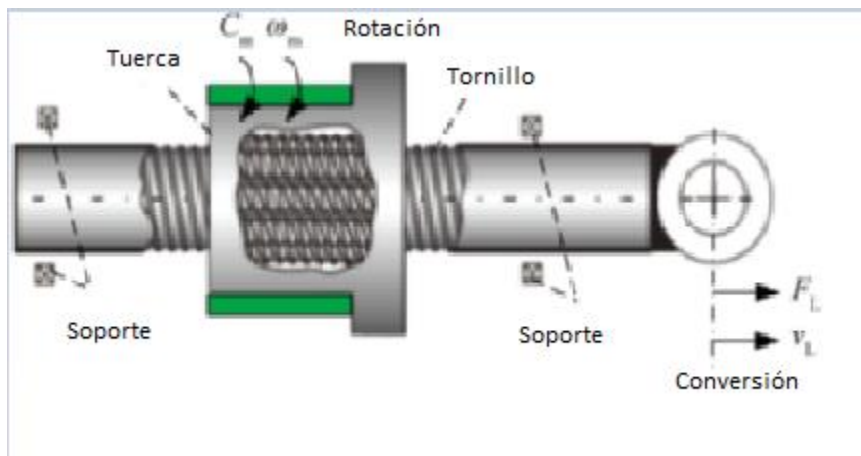


Figura 10 Esquema de MPT (tuerca-tornillo tipo rodillo).

### 2.2.1. Descomposición de topología

MPT se puede desarrollar como un modelo integrado en el que la tuerca-tornillo, los cojinetes (pares de cilindros), las juntas (bisagras), el eje y el tope final se consideran en su ruta de potencia. Para la función de comportamiento, se puede considerar que MPT tiene dos tipos funcionales de movimiento en el mismo eje: rotación desde el rotor EM y traslación a la varilla. Los movimientos de la PDE y la EM pueden ignorarse y simplemente estudiarse. Se proponen modelos de topología con la misma vista en sección de la disposición geométrica del producto, como se muestra en la Figura 11 (izquierda). Esta figura ilustra la arquitectura propuesta de dos grados de libertad (2-DOF) y el correspondiente flujo de potencia funcional a través del modelo MPT basado en el formalismo gráfico de Bond.

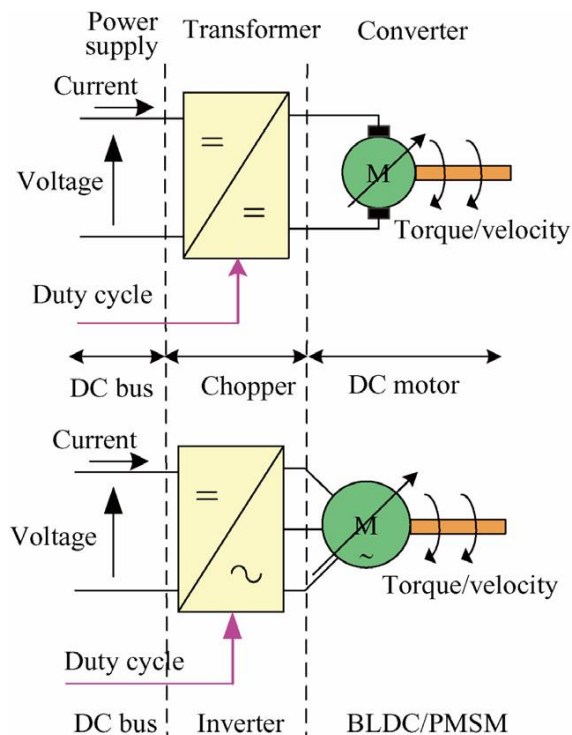
Como se ilustra en la Figura 11 (derecha), se sugiere utilizar el componente genérico con cuatro puertos (① a ④) para conectar dos cuerpos diferentes. El submodelo genérico es capaz de modelar las interacciones entre los cuatro enlaces de poder asociados con el cuerpo 1 y el cuerpo 2, para movimientos de rotación y traslación. Para garantizar el equilibrio energético y la conservación de la energía, ya que representan el intercambio de energía entre subsistemas, se agrega un quinto puerto térmico (⑤) para introducir la generación de calor. En este concepto de MPT, es interesante modelar el equilibrio térmico y las funciones de la varilla antirrotación y el cojinete de empuje axial del rotor. Además, para un estudio simplificado del comportamiento térmico, la carcasa y la varilla

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



pérdidas de potencia del subsistema EM y MPT y lo intercambian con el entorno.

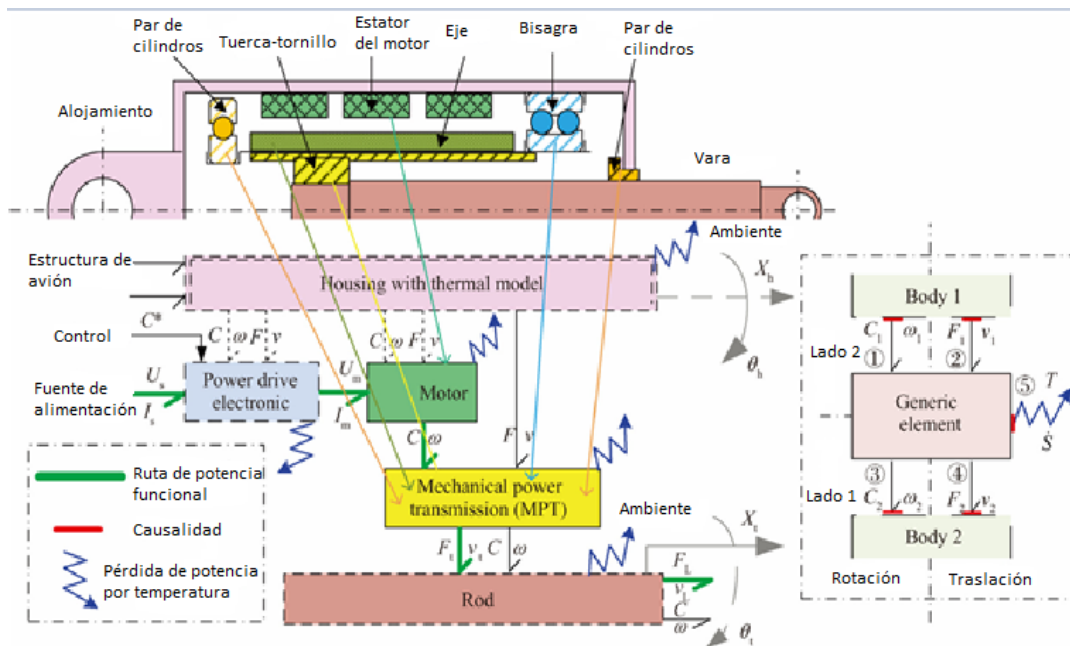


Figura 11 Descomposición mecánica y del balance energético para MPT.

### 2.2.2. Modelos de gráficos de enlaces de MPT

Cuando se consideran las ubicaciones candidatas de los efectos genéricos en MPT, el modelo real implica una serie de cuatro efectos desde el motor a la superficie: inercia / masa global, tuerca-tornillo perfecta, pérdida por fricción y efectos de cumplimiento (que pueden representar una reacción, precarga o cumplimiento puro). En la arquitectura MPT propuesta, la pérdida por fricción y los efectos de cumplimiento son los más significativos y pueden modelarse en diferentes niveles de complejidad (lineal / no lineal y continuo / discontinuo).

Los efectos de inercia y masa en MPT pueden despreciarse o modelarse según los órdenes del rotor EM y los rotores de superficie. Los efectos de los cojinetes, las articulaciones y el tope final no se modelarán explícitamente, pero se pueden considerar como parte del modelo MPT. En consecuencia, el modelo MPT genérico propuesto incluye cuatro puertos de alimentación mecánicos (rotación y traslación de la tuerca y el tornillo).

(1) Modelo perfecto

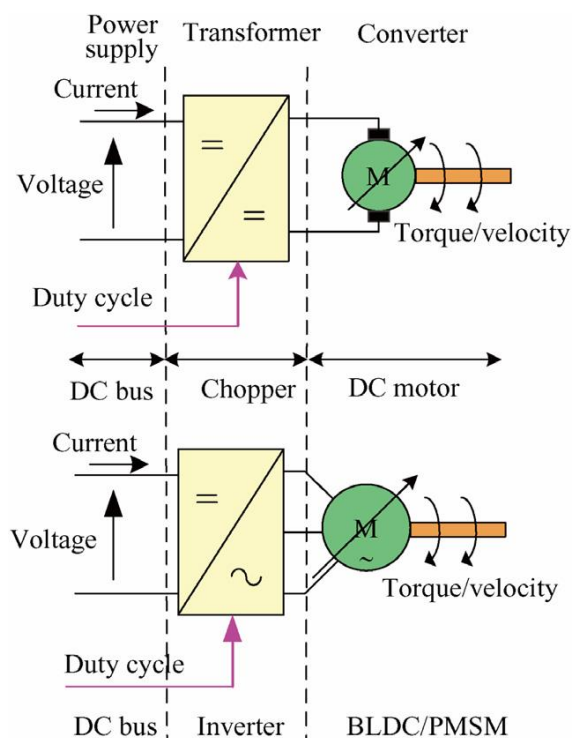


El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



Se ignoran la fricción, el cumplimiento, la inercia y el movimiento relativo. En la figura 12 (a) se muestra un elemento TF con causalidad en el gráfico de Bond. En la causalidad propuesta, la tuerca-tornillo recibe el par ( $C_m$ ) del EM y transfiere la cantidad de fuerza ( $F_s$ ) como salida para impulsar la superficie. Un modelo perfecto de tuerca-tornillo logra una relación de transformación de potencia pura ( $2p / l$ ) de la siguiente manera:

$$F_s = 2\pi C_m / l$$

$$v_s = l\omega_m / 2\pi$$

donde  $l$  es el paso del tornillo o el paso.

## (2) Modelo básico

El principal interés de un modelo básico radica en su linealidad, que es útil para el diseño de control preliminar basado en una teoría de control lineal. En este nivel, se introducen tres parásitos principales: inercia tuerca-tornillo ( $J_{ns}$ ), pérdida por fricción viscosa ( $f_v$ ) y efecto de distensibilidad básica que incluye la fuerza elástica de contacto ( $F_e$ ) y la fuerza de amortiguación ( $F_{dm}$ ). El modelo de gráfico de Bond correspondiente se muestra en la Figura 12 (b), en la que las causalidades propuestas utilizan las mismas interfaces de los puertos de potencia y señal que las del modelo funcional anterior.

El efecto de inercia genera un par de inercia de la siguiente manera:

$$C_j = J_{ns} \frac{d\omega_{nr}}{dt}$$

El efecto de fricción genera una fuerza de fricción. Desde el punto de vista de un ingeniero de control, la explicación más simple es describir la pérdida por fricción como proporcional a la velocidad de operación, que se ve afectada por un coeficiente viscoso ( $f_{vc}$ ) de la siguiente manera:

$$F_f = f_{vc} v_r$$

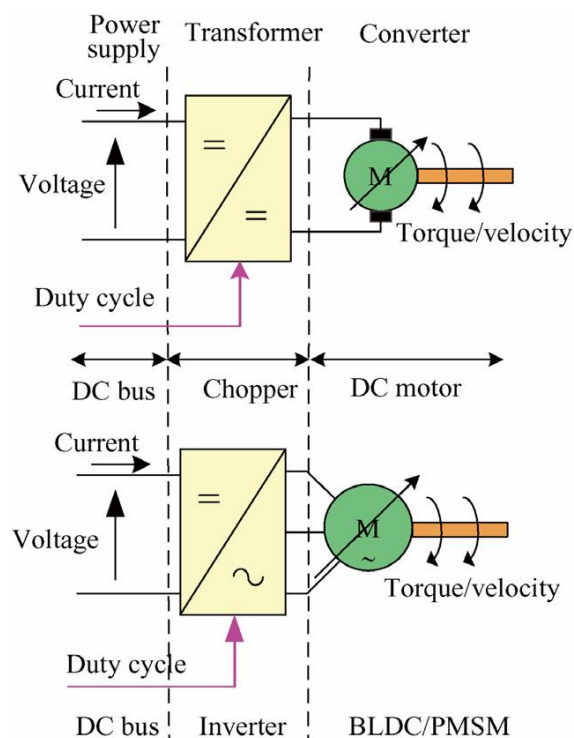
El efecto de cumplimiento hace que MPT sea compatible debido a la deformación elástica de los sólidos bajo tensión mecánica, particularmente en los lugares de contacto. Un modelo de cumplimiento simple consta de efectos puros de resorte ( $k_e$ ) y amortiguación ( $d_e$ ). La fuerza elástica de contacto ( $F_e$ ) y la fuerza de amortiguación

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



velocidad relativa ( $v_e$ ), respectivamente, de la siguiente manera:

$$F_e = k_e x_r$$

$$F_{dm} = d_e v_e$$

### (3) Modelo avanzado

En el modelado avanzado, el modelo de fricción no lineal (influencias de la velocidad, la fuerza de carga y la temperatura) se actualiza en primer lugar a un elemento de resistencia modulada (MRS) en el gráfico de Bond a medida que disipa la potencia. El modelo de cumplimiento no lineal (efectos puros de resorte, holgura y precarga) se considera un elemento de capacitancia modulada (MC). Luego, las pérdidas de potencia mecánica de fricción ( $P_f$ ) y la amortiguación de cumplimiento ( $P_d$ ) pueden introducirse a través de flujos de calor y conectarse a un puerto térmico adicional. En consecuencia, la temperatura se puede utilizar fácilmente como una entrada variable en el tiempo en los modelos de pérdida de energía. Por último, la arquitectura del modelo MPT propuesta en este nivel implica un puerto térmico que está conectado al modelo térmico EMA. La generación de calor se puede considerar como una salida para mejorar el modelo térmico de la AEM manteniendo el equilibrio energético en todo el sistema. Por lo tanto, las sensibilidades a la temperatura en los modelos de fricción y cumplimiento (dilatación) se pueden modelar utilizando una variable de temperatura del puerto térmico. La Figura 12 (c) describe el modelado gráfico de Bond del modelo MPT avanzado. Las causales se mantienen consistentes con las de los dos niveles de modelo anteriores.

Las expresiones matemáticas para los efectos no lineales de la fricción, el cumplimiento y la sensibilidad a la temperatura se presentaron en nuestro trabajo anterior. La confianza mejora en el nivel avanzado actual de modelado MPT, que es consistente con el punto de vista del balance energético.

### (4) Modelo de comportamiento

Para aumentar el realismo, se deben considerar estudios sobre el movimiento del soporte y las fallas de falla. Un modelo de comportamiento incluye fallas mecánicas (p. Ej., Atasco y juego libre) y movimiento parásito (p. Ej., Desplazamiento relativo debido a cojinetes y articulaciones), como se muestra en la Figura 12 (d).

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.

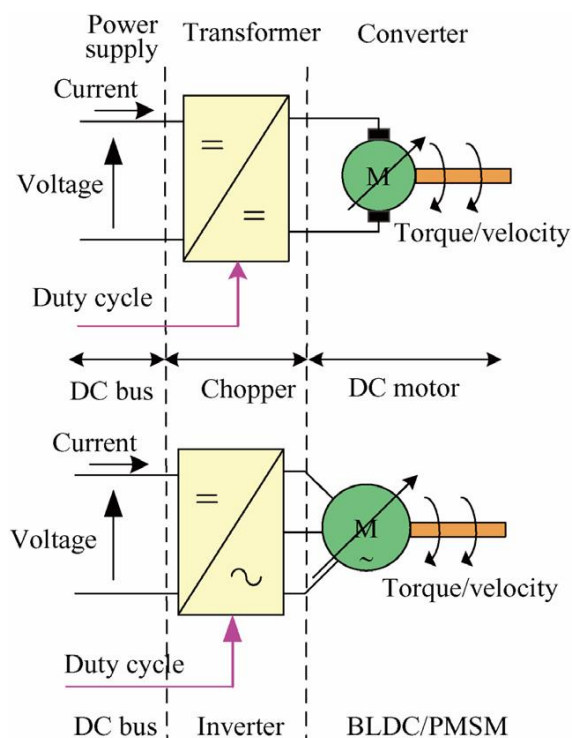


Figura 12 Modelo gráfico de enlaces multinivel para MPT.

(i) Fallos mecánicos: La simulación de fallos que pueden ocurrir en MPT es de suma importancia cuando se busca evaluar el mecanismo de falla a falla y el mecanismo de respuesta a falla de un sistema de actuación que puede involucrar MPT defectuoso. Se identifican dos fallas principales: atasco (sin movimiento posible) y juego libre (no se transmite fuerza a la carga).

Bloqueo hasta fallar: actualmente se proponen numerosos métodos para proporcionar tolerancia a AEM o resistencia al bloqueo, como en las HSA o EHA. Estos métodos aplican el concepto de redundancia, incluidas varias rutas de transmisión para establecer un modo de respaldo, o eliminan o reducen el número de mecanismos de engranajes en los EMA. El desarrollo de AEM de accionamiento directo que utilizan tornillos de rodillo es actualmente un tema candente. Sin embargo, aunque es menor en los AEM de transmisión directa, el riesgo de atascos sigue siendo una fuente importante de peligro potencial. La capacidad de evaluar la respuesta de un sistema que involucra un AEM (por ejemplo, controles de vuelo de los trenes de aterrizaje) a una falla de interferencia en el AEM a través de la simulación es importante durante el desarrollo del sistema. Las fallas de interferencia también deben simularse para evaluar las ventajas de las funciones de monitoreo del estado. En el modelo propuesto, la interferencia se puede activar como una señal de entrada para modular los parámetros del modelo de fricción (MRS) para forzar la fricción. Se prefiere este enfoque a la introducción de un freno pilotado en el modelo por las siguientes razones: un freno no existe físicamente y el aumento de la fricción es consistente con modelar la degradación progresiva de la eficiencia mecánica (por ejemplo, como resultado de la falta de lubricación). En consecuencia, la interferencia se puede modelar aumentando la fuerza en el modelo de fricción en respuesta a una señal de interferencia, que se puede calcular de la siguiente manera:

$$F_{im} = F_{jm} + F_f$$

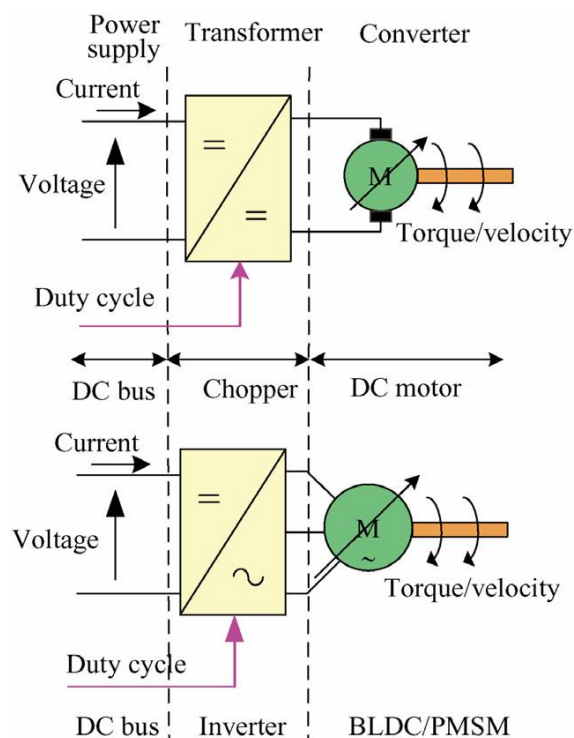
Juego libre hasta la falla: el juego libre (o movimiento libre) es otra falla causada por una ruptura mecánica (o un aumento considerable del juego). Esta falla es difícil de controlar con alta precisión en un circuito cerrado. La respuesta de un sistema que involucra un AEM al efecto del juego libre es particularmente importante para cumplir con los requisitos de seguridad. El juego libre puede provocar aleteo o vibración, mientras que un

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



ejemplo, bucle de velocidad EMA). Estos efectos desestabilizadores son indeseables en aplicaciones aeroespaciales. Muchas actividades se centran en estimar y compensar el efecto de reacción en las estrategias de control. En el modelo propuesto, el juego libre también se puede activar utilizando una entrada de señal para cambiar los parámetros de MC. La precarga se puede disminuir progresivamente, mientras que la holgura ( $x_{k0}$ ) se puede aumentar progresivamente, aumentando el parámetro de cumplimiento  $x_k$  que, en consecuencia, se modifica de acuerdo con la entrada de señal de juego libre ( $x_{fp}$ ) de la siguiente manera:

$$x_k = x_{k0} + x_{fp}$$

(ii) Movimiento parasitario: la transformación de potencia no opera únicamente entre la rotación del eje del motor y la traslación de la varilla. Estrictamente hablando, se aplica a la velocidad de rotación relativa entre la tuerca y el tornillo (o viceversa) y la velocidad de traslación relativa entre el tornillo y la tuerca (o viceversa). Este proceso se puede agregar al modelo considerando los movimientos de rotación y traslación del soporte tuerca-tornillo, es decir, la función anti-traslación de la parte giratoria MPT y la función anti-rotación de la parte traslación MPT. En consecuencia, se agregan dos interfaces de potencia (enlaces de potencia de traslación mecánica y de rotación) al modelo de gráfico de Bond. De esta manera, se pueden considerar cojinetes y uniones imperfectos (por ejemplo, reproducir su cumplimiento y fricción), y se puede acceder al par de reacción ( $Ch$ ) y la fuerza ( $Fh$ ) para realizar funciones de antirrotación y antitranslación (por ejemplo, dentro de la AEM carcasa, fuselaje o por la propia carga). Por lo tanto, se calculan la velocidad de rotación relativa ( $x_{nr}$ ) para la tuerca / rotor y la velocidad lineal relativa ( $v_{nr}$ ) para el tornillo a la superficie (representada por una unión "0" en el modelo gráfico de Bond). Rotación del soporte: la velocidad de rotación relativa entre el rotor / tuerca y los cojinetes de apoyo se pueden modelar de la siguiente manera:

$$\omega_{nr} = \omega_m = \omega_n - \omega_h$$

Traslación de soporte: la velocidad de traslación relativa entre el tornillo y los cojinetes de soporte viene dada por

$$v_{sr} = v_s - v_h$$

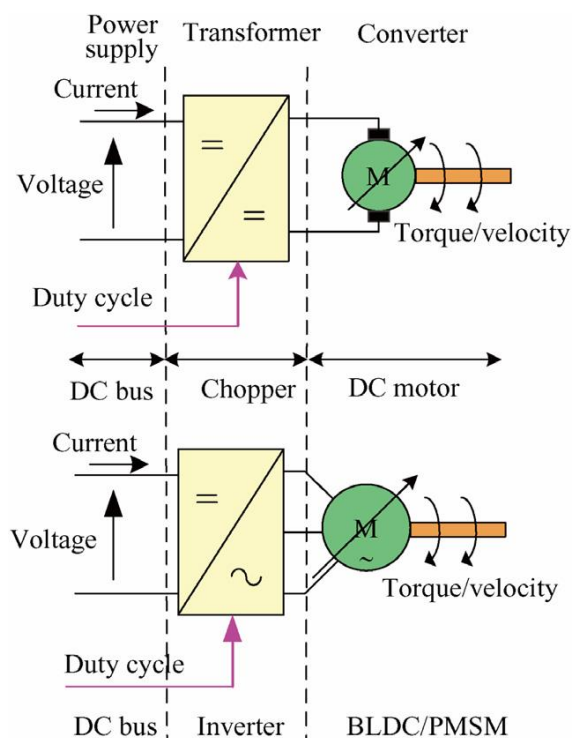


El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



balance de energía y balance mecánico. Este modelo es también el prototipo virtual preliminar de un MPT de movimiento 2-DOF que puede conectar interfaces de soporte de cojinetes y juntas.

Además, este modelo de comportamiento puede extenderse a los pronósticos y estudios de seguimiento de la salud de las EMA.

## 2.3. Implementación de modelos

La superficie de vuelo está sujeta a una acción aerodinámica para ilustrar los modelos de componentes propuestos. Los desarrollos posteriores de los modelos AEM se basan en una arquitectura de control multilazo en cascada.  $G_p$  es la función del controlador de posición y  $G_v$  es la función del controlador de velocidad.

La limitación de velocidad ( $x_{lim}$ ) y la limitación de par ( $C_{lim}$ ) se introducen por razones de seguridad, como se muestra en la Figura 13.

La carga impulsada (por ejemplo, la superficie de control de vuelo) se modela combinando su efecto inercial (masa equivalente) y el cumplimiento de la fijación al AEM y la carga externa, por ejemplo, que se origina a partir de fuerzas aerodinámicas. Como se muestra en la Figura 13, el modelo AEM propuesto se puede considerar como un paquete separado con múltiples niveles. Estos niveles son independientes y reemplazables (el mismo puerto de señal / alimentación de entrada desde el controlador y el puerto de señal / alimentación de salida a la superficie). Aunque se han hecho elecciones causales en la sección anterior, cada arquitectura se adapta a entornos de simulación causales (AMESim) y no causales (Dymola). La implementación de los diferentes niveles del modelo AEM se detalla a continuación. (Siemens, 2021) (3DS, 2018)

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.

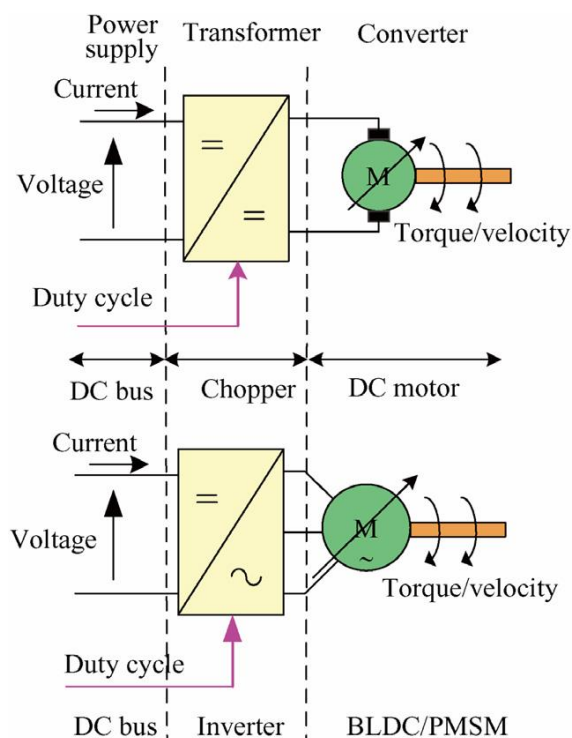


Figura 13 Áreas de implementación del modelo en el sistema de actuación EMA.

### 2.3.1. Modelo de síntesis de control preliminar

El modelo AEM debe ser simple, de bajo orden y lineal cuando se enfoca en el diseño de control preliminar del sistema o en las actividades de ingeniería de simulación funcional. Esta situación indica que se desprecian el bucle de corriente, la PDE, la parte electromagnética del EM y el efecto mecánico no lineal de MPT, como se muestra en las Figs. 9 (a) y 12 (b). En este nivel de simulación, no se consideran la dinámica detallada, los efectos térmicos y el suministro eléctrico.

La referencia de par ( $C^*$ ) generada por el controlador AEM se aplica directamente a la inercia del eje del rotor como un EM perfecto y como una fuente de par. Por el contrario, el efecto de inercia parasitaria no se descuida porque es el principal impulsor del rendimiento de circuito cerrado. La inercia EM y la inercia MPT se fusionan en una única inercia concentrada sobre la que se aplica una fricción viscosa pura. La energía EM fluye a un MPT perfecto (tornillo de tuerca) y se transmite a la carga a través de una estructura de fuselaje compatible que se considera que utiliza un modelo de amortiguador de resorte lineal. El modelo de paquete simple de PDE, EM y MPT se muestra en la Figura14.

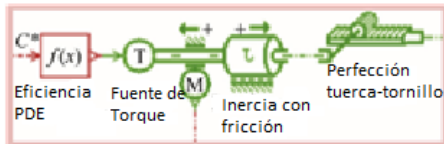


Figura 14 Modelo para síntesis de control preliminar

### 2.3.2. Desarrollo del modelo PDE

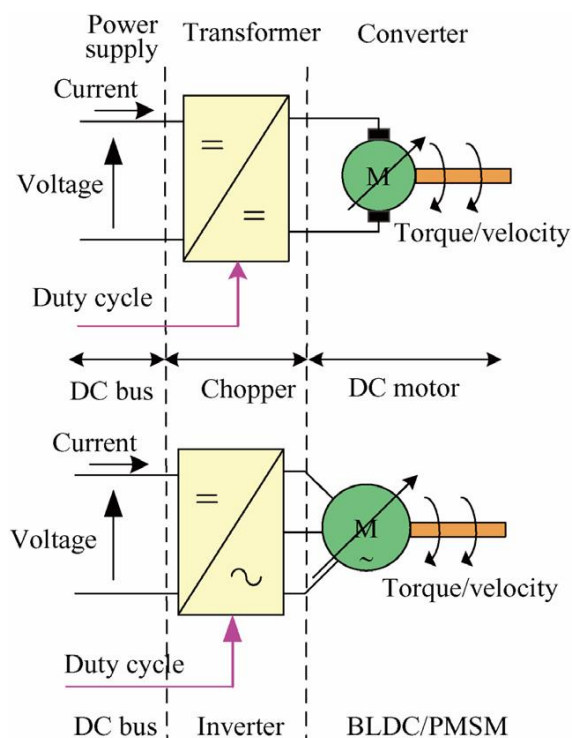
Se puede seleccionar un inversor de tres ramas perfecto y considerarlo como una fuente de energía modulada para simplificar el dimensionamiento y las actividades de aplicación de control en PDE. Este método proporciona acceso a la energía extraída de la fuente de alimentación eléctrica y desarrolla el bucle de corriente del EM trifásico. El modelo EM utiliza el modelo estándar que introduce la resistencia y la inductancia de los devanados. En este nivel, no se consideran la dinámica de PWM ni las pérdidas de potencia. Cada tramo se modela como una fuente de voltaje modulada por la salida asociada de la transformación de estacionamiento inversa; La retroalimentación de corriente se modula

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



corriente. (Martínez del Carmen, 2019) El modelo asociado se muestra en la Figura 15.

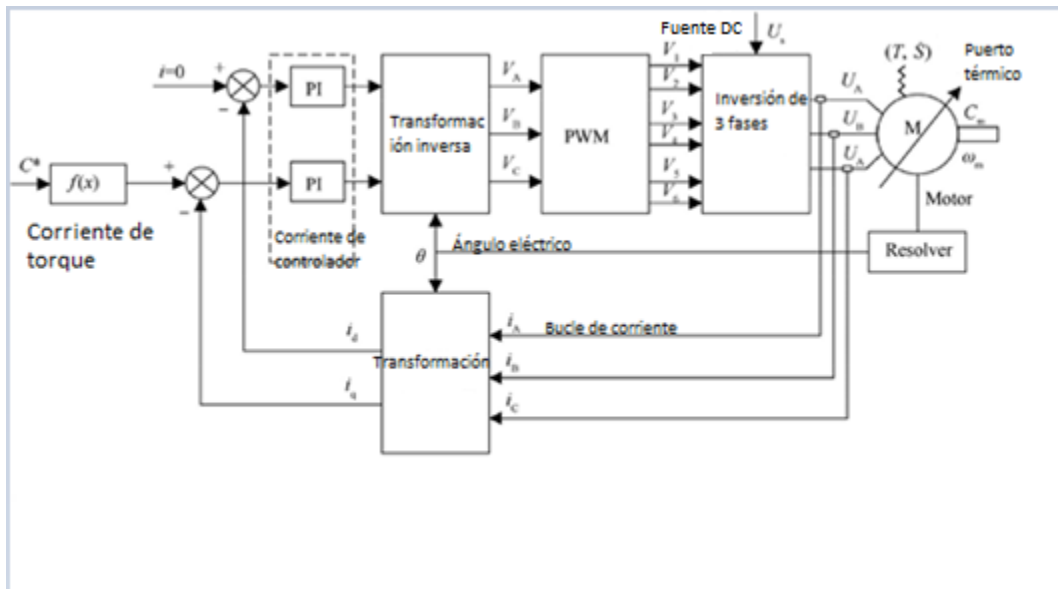


Figura 15 Implementación del modelo avanzado que considera el lazo de corriente trifásico y el controlador.

La dinámica de alta frecuencia, la contaminación del suministro de CC y la conmutación PWM de alta frecuencia se modelarán cuando el foco esté en las pérdidas de potencia (por ejemplo, pérdida de conmutación) y el gasto de la simulación. Se aceptará la carga. El modelo propuesto reutiliza la biblioteca estándar tanto como sea posible y reemplaza la antigua fuente de energía modulada perfecta. El módulo PWM es impulsado por el bloque de transformación de estacionamiento inverso y genera seis órdenes de conmutación enviadas a los transistores de potencia. Cada modelo de transistor (IGBT) y modelo de diodo también se obtiene de la biblioteca estándar. Producen por separado pérdidas de conducción y de conmutación. Todas las pérdidas se suman para determinar las pérdidas de potencia PDE totales que se envían al puerto de comportamiento térmico. Estos cambios detallados se muestran en la Figura 16.

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.

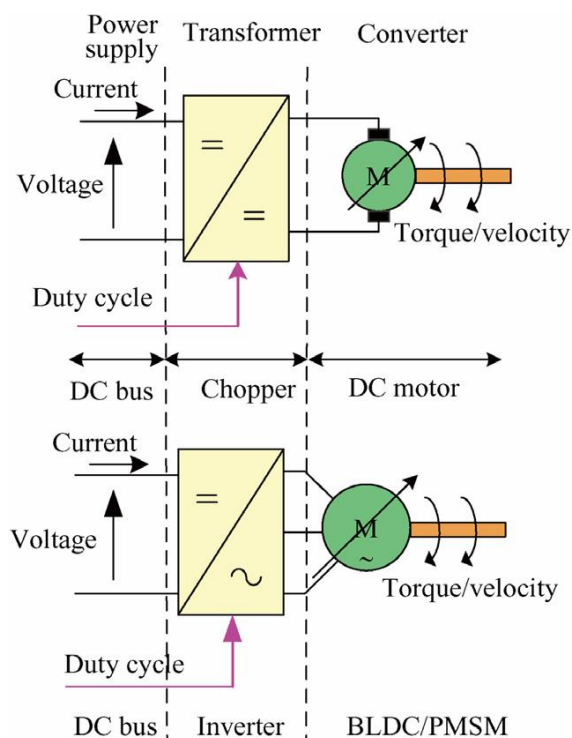


Figura 16 Implementación del modelo de inversor avanzado para pérdida de potencia y dinámica de conmutación.

### 2.3.3. Desarrollo del modelo EM

El modelo EM trifásico estándar (PMSM) siempre considera la pérdida de cobre y ya está integrado en la biblioteca de software de simulación comercial actual. Sin embargo, este modelo no incluye la pérdida de hierro, el par dentado, la saturación magnética o el efecto de histéresis. Como se muestra en la Figura 8 (d), estos efectos deben tenerse en cuenta al desarrollar un modelo EM avanzado. Así, se diseña un subcomponente EM con el mismo tipo de interfaces, pero con una precisión mejorada del modelo de motor (Figura 17), que puede reemplazar al modelo de motor estándar. Este EM implementa las Ecs. (9) - (11) usando bloques estándar de la biblioteca para señales (funciones de una variable) y para mecánica (por ejemplo, suma de par, fricción y sensores). Se crea un modelo específico para proporcionar la suma de velocidades que corresponde a la unión 0 en el gráfico de Bond.

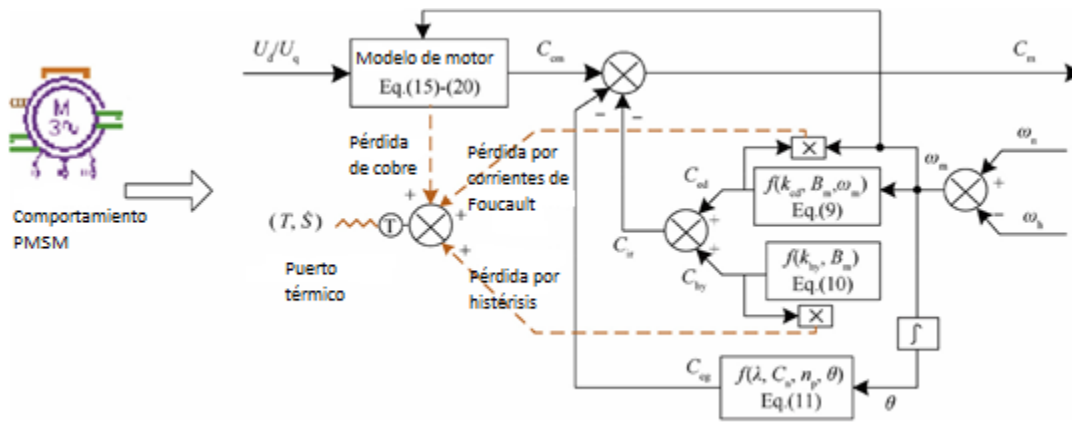


Figura 17 Diagrama de bloques del modelo avanzado que considera el lazo de corriente trifásico y el controlador.



El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.

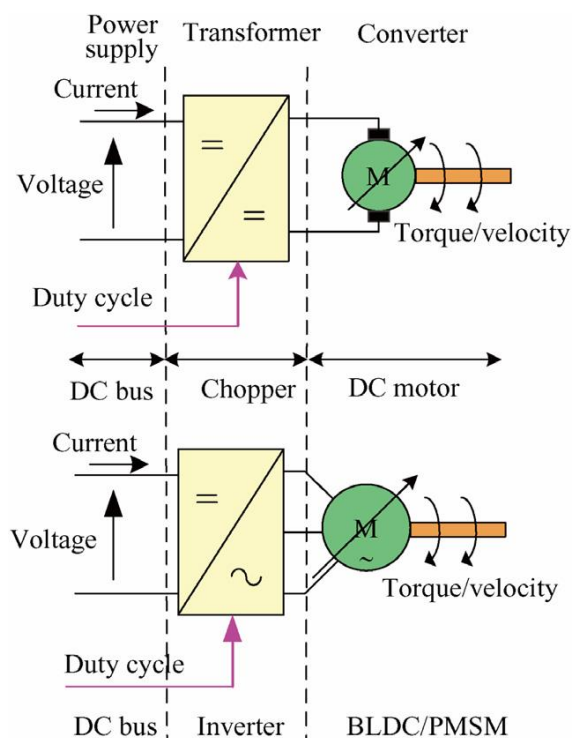


Figura 18 Diagrama de bloques del modelo MPT avanzado.

### 2.3.4. Desarrollo del modelo MPT

De acuerdo con el modelo gráfico de Bond en la Figura 8 (c), el modelo básico mostrado en la Figura 14 de una tuerca-tornillo perfecta con fricción lineal se reemplaza con el modelo avanzado presentado en la Figura 18 o el modelo de comportamiento ilustrado en la Fig 19.

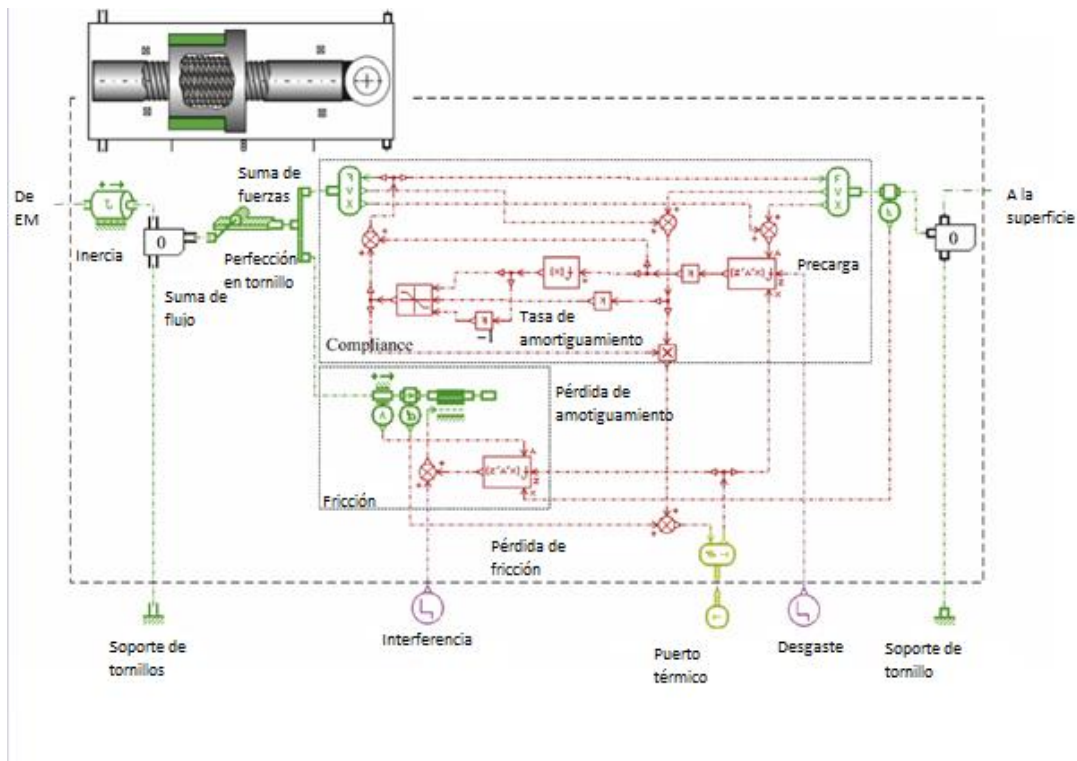


Figura 19 Implementación del modelo MPT conductual en AMESim.

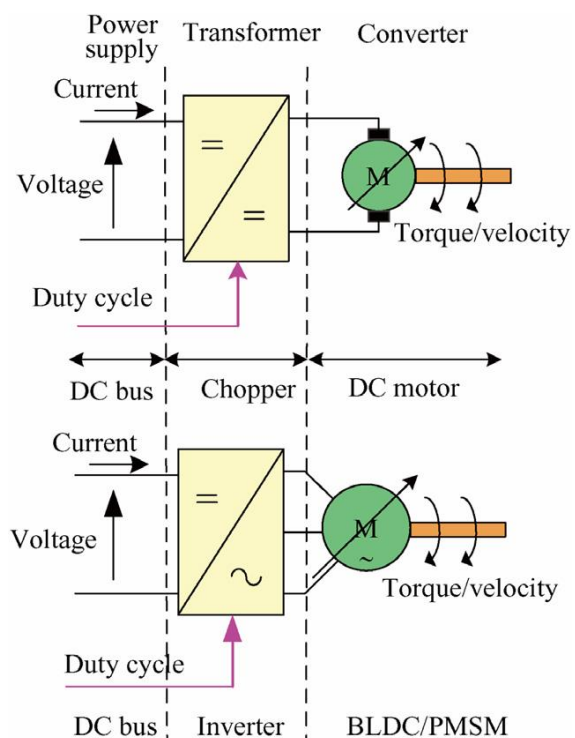
En el modelo MPT avanzado (Figura 18), el modelo de fricción propuesto se implementa haciendo que la fuerza de fricción dependa de la fuerza transmitida, la temperatura y la velocidad de deslizamiento (la fuerza y la velocidad se capturan a través de modelos de sensores). Esta dependencia se puede definir mediante funciones paramétricas o mediante tablas de consulta. El modelo de cumplimiento se implementa moviéndose al mundo de las "señales", separando así explícitamente las variables de flujo y esfuerzo a través de un modelo AMESim estándar.

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



pérdidas de potencia (modelo de fricción y amortiguación estructural del modelo de cumplimiento) e introduce la temperatura en los modelos de fricción (impacto en el factor de fricción) y cumplimiento (impacto en el juego).

El modelo de comportamiento MPT (Figura 19) se basa en el modelo de gráfico Bond de la Figura 11. Las fallas de interferencia y juego libre se introducen opcionalmente a través de señales externas que afectan los parámetros de fricción y cumplimiento, respectivamente. Además, están disponibles las posiciones relativas de rotación y traslación entre dos componentes mecánicos. Se pueden introducir explícitamente dos puertos mecánicos asociados con el alojamiento de la tuerca para anti-traslación y con alojamiento del tornillo para anti-rotación para la conexión con los rodamientos y juntas para el modelado 2-DOF para realizar un estudio detallado.

## 2.4. Investigación y análisis numérico

Las secciones anteriores han diseñado modelos de componentes de AEM utilizando el método incremental. La presente sección presenta las influencias de los modelos multinivel en las respuestas simuladas.

Tabla 1 Controlador AEM y parámetros de carga equivalentes.

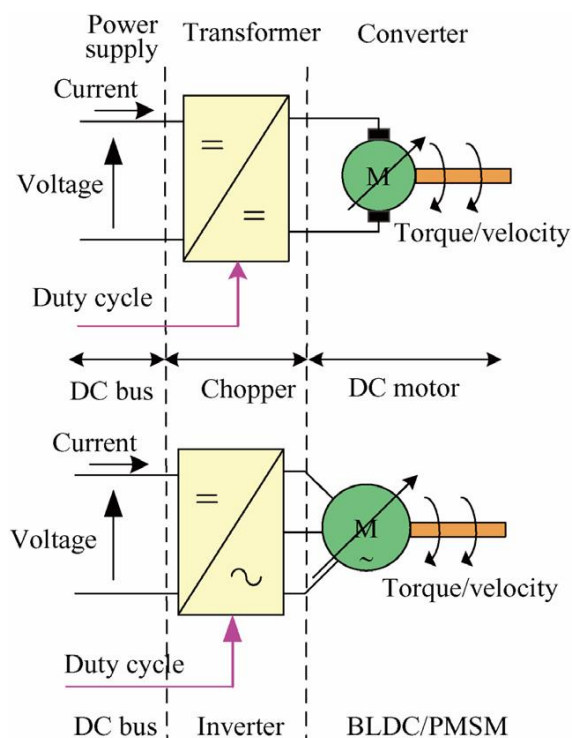
Parámetros	Símbolos	Unidades	Valores
Ganancia proporcional de posición	$K_p$	radmm <sup>1</sup> / s	45
Ganancia proporcional del control de velocidad	$K_v$	(Nms/ rad)	0.47
Limitación de velocidad	$x_{lim}$	rad/s	314
Limitación del torque	$C_{lim}$	Nm	10 67.8
Ganancia proporcional de la corriente del controlador	$K_{ip}$	V/A	

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



Amortiguación estructural	$B_s$	Ns/m	1 $10^4$
Masa de superficie de vuelo equivalente	$M_s$	kg	600

La superficie de control de vuelo se modela simplemente como una masa de traslación equivalente ( $M_s$ ) a la que se aplica la carga de aire. Además, se supone que el anclaje de la carcasa del AEM al ala y la varilla del AEM a la conexión de carga es un cumplimiento de estructura única de un resorte lineal y un amortiguador. Los parámetros de los controladores AEM y la carga accionada se enumeran en la Tabla 1. Los parámetros de la PDE y la EM se muestran en la Tabla 2, que se establecen en base a nuestro conocimiento previamente establecido. Los parámetros de MPT se proporcionan en la Tabla 3, que se puede encontrar en las hojas de datos del producto para el efecto de inercia, de nuestro estudio anterior para el efecto de fricción, o asumido a partir de la experiencia de ingeniería para el efecto de cumplimiento.

Tabla 2 Parámetros de los modelos PDE y EM.

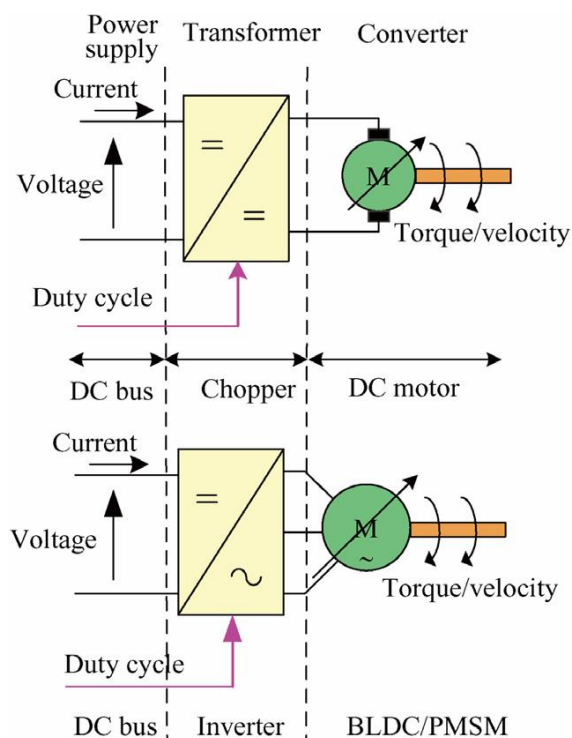
Parámetros	Símbolos	Unidades	Valores
Suministro DC	$U_s$	V	565
Frecuencia de conmutación PWM	$F_{sw}$	kHz	10
Resistencia total en estado de IGBT y diodos en cada rama	$R_{on}$	X	0.14
Voltaje de umbral directo total de IGBT y diodos en cada rama	$U_{th}$	V	1.7

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



Parámetros	Símbolos	Unidades	Valores
IGBT y diodos que apagan las pérdidas de energía	$E_{off}$	J	0.008
Pares de polos de motor	$n_p$		4
Inercia del rotor del motor incluida tuerca-tornillo	$J_m$	kg m <sup>2</sup>	0.0017
Constante de par de motor	$K_{m0}$	N m/ A	1.64
Par nominal de motor	$C_n$	N m	10
Resistencia de motor	$R_m$	X	2.26
Inductancia de motor	$L_m$	mH	18.2
Pérdida por histéresis del motor constante de Steinmetz	$K_{hy}$		5.8 $10^3$
Corriente parásita del motor constante de Steinmetz	$K_{ed}$		9.3 $10^6$
Factor de par dentado del motor	K		0.01

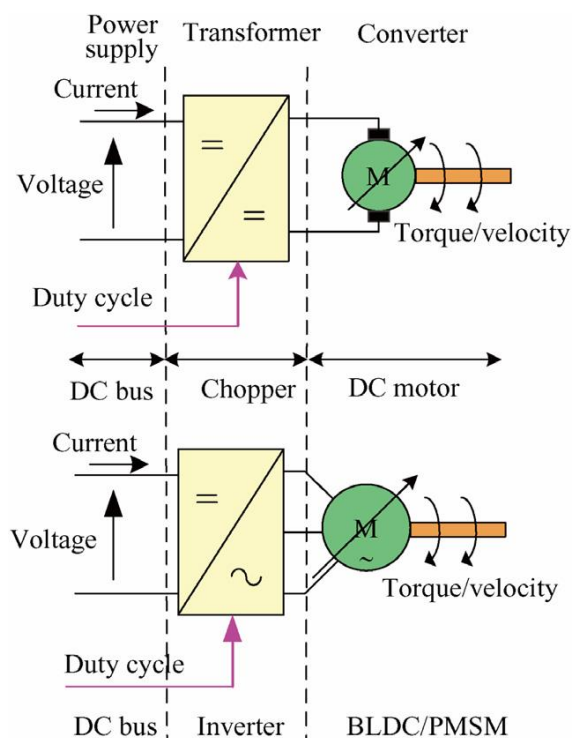


El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



los estudios de sensibilidad del rendimiento. La simulación numérica presentada en esta sección es válida para simular la AEM controlada por posición de un alerón de aeronave comercial bajo el mismo perfil de misión, en el que los modelos PDE, EM y MPT multinivel se evalúan individualmente en el dominio del tiempo con un solo simulación de circuito cerrado.

Este estudio de simulación puede soportar varios requisitos de ingeniería, como diseño de control, consumo de energía o balance térmico, desempeño dinámico, contaminación de la fuente de alimentación, inyección de fallas y balance mecánico.

Parámetros	Símbolos	Unidades	Valores
Inercia tuerca-tornillo integrada con rotor	$J_n$	$\text{kgm}^2$	0.0017
Masa de varilla	$M_t$	Kg	1
Plomo de tornillo	L	Mm	2.54
Rigidez elástica de la tuerca-tornillo	$k_e$	N/m	$3 \times 10^8$
Factor de amortiguación de tuerca-tornillo	$d_e$	N s/m	$1 \times 10^4$

Tabla 3 Parámetros del modelo MPT.

### 2.4.1. Interés por el diseño de controles

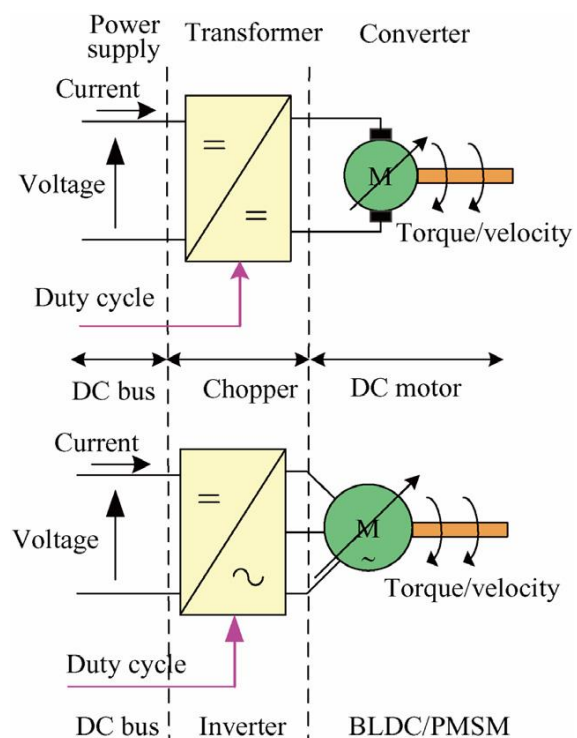
Los requisitos de rendimiento se expresan en términos de estabilidad, dinámica y precisión en bucle cerrado tanto para la búsqueda de posición como para el rechazo de carga. Una demanda de paso piloto  $X_c$  para la posición del alerón (10 mm en el tiempo  $t$

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



tiempo  $t = 1$  s, 65% de la fuerza de salida nominal) se aplican a lo siguiente simulaciones.

La fricción es un efecto parásito importante que influye en el rendimiento del sistema. La Figura 20 compara la posición de carga simulada por diferentes modelos MPT (es decir, funcional, básico y avanzado) que introducen diferentes efectos de fricción (lineal o no lineal). Ambas respuestas simuladas son estables. En primer lugar, la fricción aumenta la amortiguación del sistema AEM y afecta el rendimiento dinámico en comparación con el modelo perfecto (sin fricción). En segundo lugar, el modelo perfecto considera una rigidez infinita en MPT, mientras que los modelos básico y avanzado introducen una conformidad tuerca-tornillo realista. Los efectos del cumplimiento reflejan claramente el rendimiento de rechazo de carga al aumentar las oscilaciones de carga, particularmente en los modelos básico y avanzado.

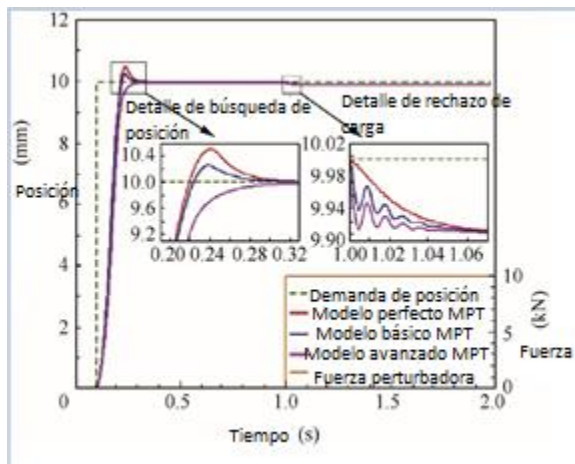


Figura 20 Comparación de actuciones dinámicas.

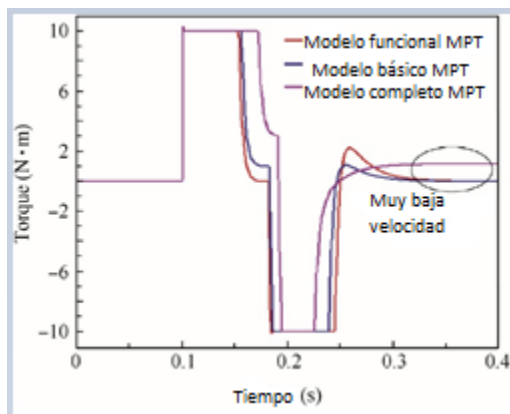


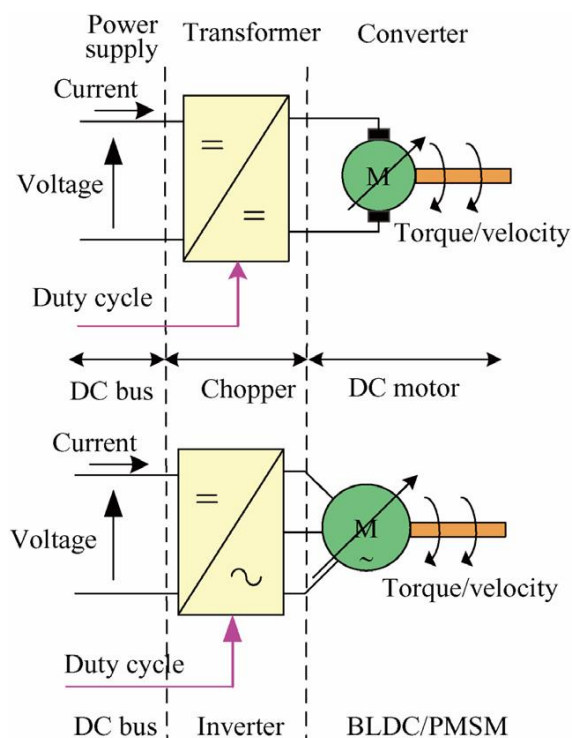
Figura 21 Comparación de flujo de potencia de fuentes de par.

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



resaltar las diferencias entre los modelos MPT. El par / corriente del motor se satura durante más tiempo cuando se considera un modelo de fricción más realista. También se producen diferencias significativas en las respuestas a velocidades extremadamente bajas.

### 2.4.2. Interés de la dinámica de conmutación PWM

PWM se modelará aumentando la carga de simulación al centrarse en la dinámica de alta frecuencia y la contaminación del suministro de CC. Las respuestas de los modelos de conmutación y no conmutación de PWM se evalúan en función de los modelos de gráficos de Bond de las Figs. 15 y 16, respectivamente.

La tensión y la corriente de fase EM calculadas por los modelos de conmutación y no conmutación se comparan en las Figs. 22 y 23, respectivamente. Los modelos sin conmutación significan que la dinámica de conmutación no se calcula y las variables son los promedios de las cantidades reales durante el período de conmutación. Los armónicos causados por la dinámica de conmutación de alta frecuencia solo se pueden simular en modelos de conmutación.

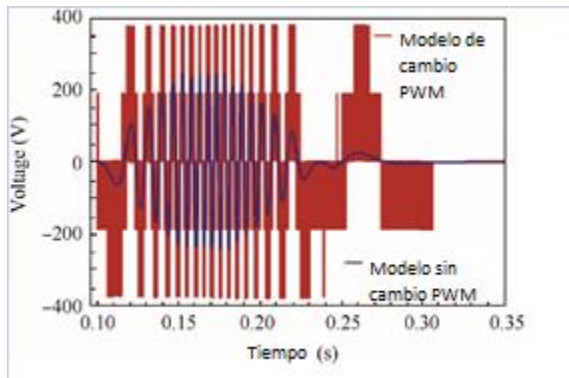


Figura 22 Comparación de la tensión de fase A en un PMSM estándar.

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.

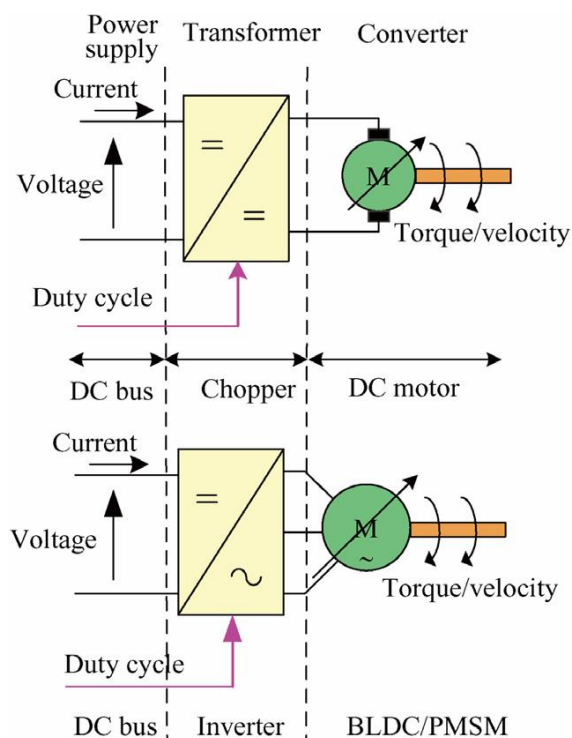


Figura 23 Comparación de la corriente de fase A en un PMSM estándar.

En la Figura 22, se simulan los voltajes de fase A del PMSM, y el modelo de conmutación cambia entre valores fijos a alta frecuencia y presenta la forma del voltaje de fase real. Con el modelo sin conmutación, solo se puede observar el valor promedio y no se ajusta exactamente al objetivo de voltaje, porque las caídas de voltaje del semiconductor provocan un efecto de distorsión. En la Figura 23, se simulan las corrientes de fase A del PMSM y la corriente del modelo de conmutación tiene ruido en la frecuencia de conmutación. El valor de la corriente del modelo sin conmutación es ligeramente superior, porque el modelo sin conmutación no tiene en cuenta el fenómeno de que el PWM introduce un retraso de la mitad del período de conmutación.

Además, se pueden estudiar las corrientes del eje  $d$  y del eje  $q$  bajo el control orientado al campo. Como se muestra en la Figura 24, para el modelo de conmutación PWM, la corriente dinámica del eje  $q$  es casi nula en el tiempo 0,24 s porque la superficie alcanza el pico de sobrepaso del desplazamiento de carga y tiene un silbato.

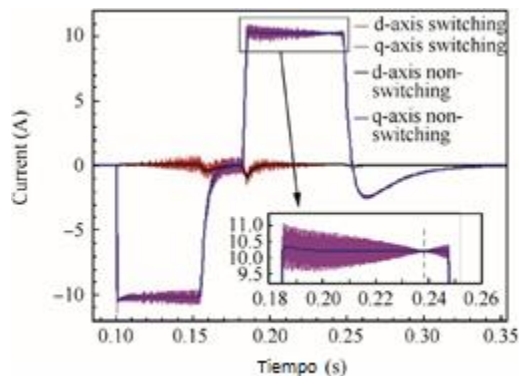


Figura 24 Comparación de la corriente del eje  $d$  /  $q$  mediante control FOC.

### 2.4.3. Interés del análisis del consumo de energía

Cuando el análisis se centra en las pérdidas de potencia y el consumo de energía de MPT en la simulación a nivel de sistema de un EMA, el modelo básico no reproduce la contribución de la fricción, mientras que el modelo avanzado propuesto para MPT permite a los diseñadores mecánicos evaluar el impacto para fines comparativos. análisis.



El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.

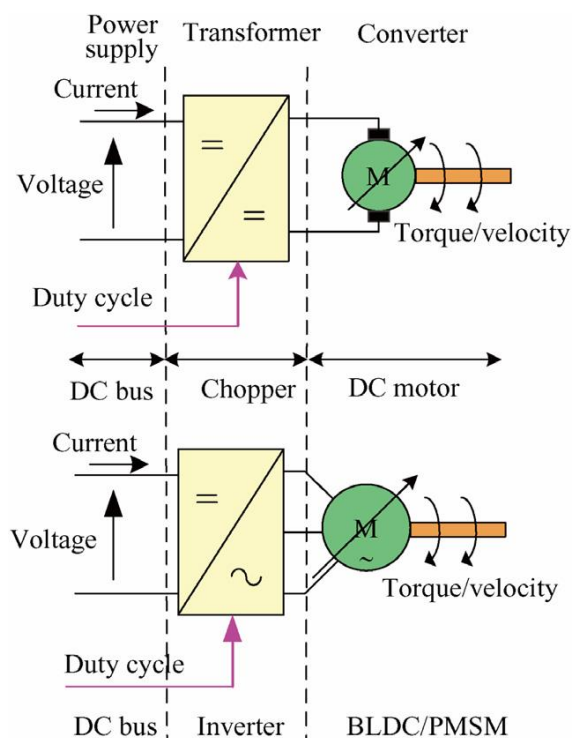


Figura 25 Perfil de misión para análisis de consumo de energía.

La Figura 25 muestra la misión específica ( $X_c$  y  $FL$ ) y la respuesta de la posición de carga ( $X_s$ ). Se requiere un perfil de posición trapezoidal a una velocidad máxima de 125 mm / s. La fuerza externa aumenta de 0 N en el tiempo 0,1 sa 15 kN en el tiempo 1 s.

Como se muestra en la Figura 26, cuando se alcanza la posición final de la superficie (sin velocidad pero con carga alta), la pérdida por fricción es nula y las cargas de alta velocidad y alta adición exhiben las pérdidas de potencia más altas. La pérdida por fricción MPT representa la fuente más alta (70%) de la pérdida total de energía, lo que destaca la importancia de desarrollar un modelo de fricción avanzado para MPT. Este resultado es consistente con las observaciones realizadas en la práctica para varios proyectos de investigación.

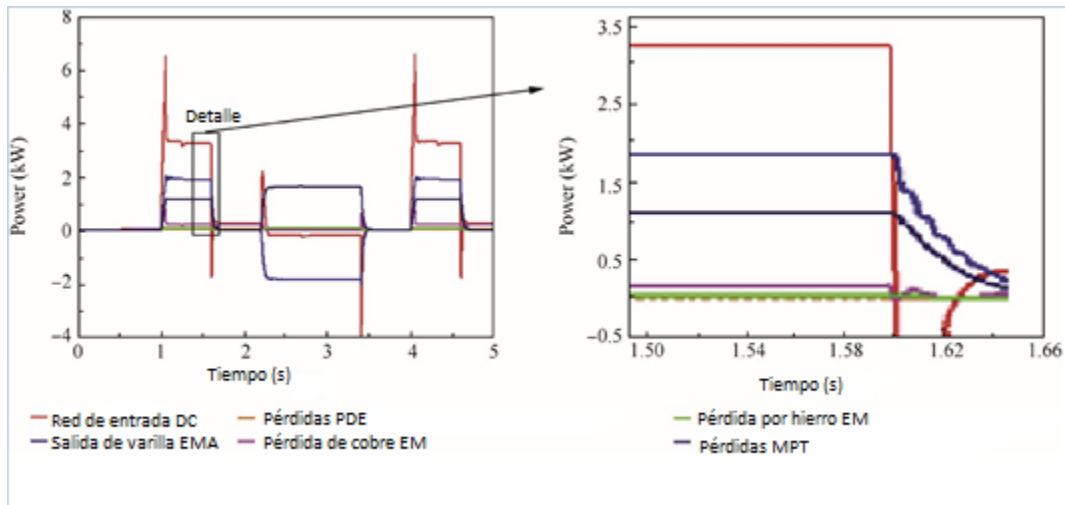


Figura 26 Análisis de consumo y pérdida de energía.

#### 2.4.4. Interés por el desgaste / envejecimiento y precarga

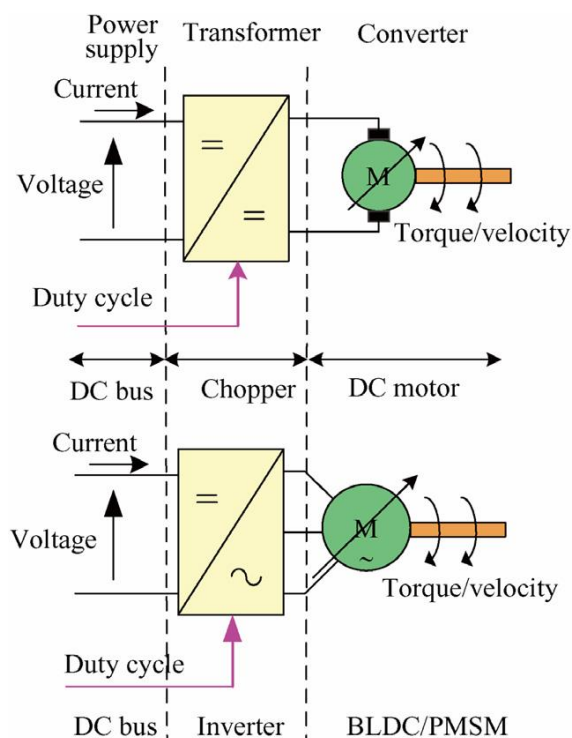
El siguiente análisis ilustra el interés de los modelos propuestos para el desgaste / envejecimiento aumentando el juego y considerando el efecto de precarga. En primer lugar, los modelos de comportamiento propuestos modifican dinámicamente el juego de la transmisión actuando sobre el parámetro  $xk_0$  para simular el efecto del desgaste frente al servicio.

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



nulo a 60  $\mu\text{m}$  y luego a 0,3 mm. La reacción tiene un efecto mínimo cuando los contactos se cargan en una sola dirección; por lo tanto, solo se traza la parte de persecución de la respuesta de la EMA. En presencia de un juego, se produce un ciclo límite no lineal alrededor de la posición exigida de la varilla, lo que da como resultado un control de posición inestable.

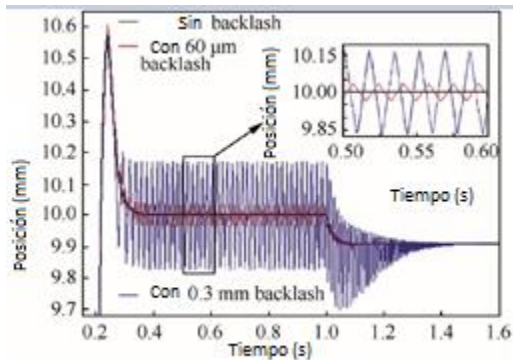


Figura 27 Varias respuestas de reacción en el modelo de comportamiento.

En segundo lugar, el efecto de precarga es simulado por el modelo de comportamiento MPT. Las respuestas se muestran en la Figura 28, que presenta las siguientes funciones: precarga nula / holgura ( $x_{k0} = 0$ ), holgura ( $x_{k0} = 0,3 \text{ mm}$ ) y luego una precarga de 3 kN ( $x_{k0} = 0,06 \text{ mm}$ ). El juego produce vibraciones en la superficie y afecta la precisión de la posición. La precarga elimina este efecto (pero aumenta la fricción) en la superficie y afecta la rapidez de la superficie.

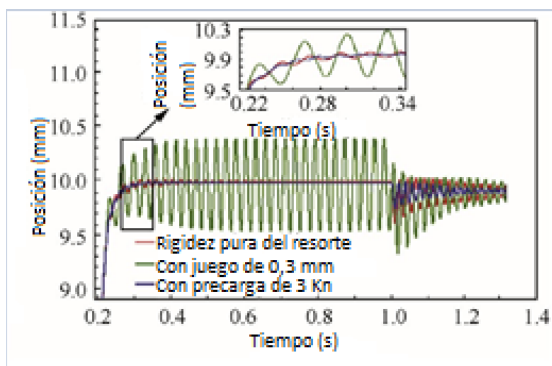


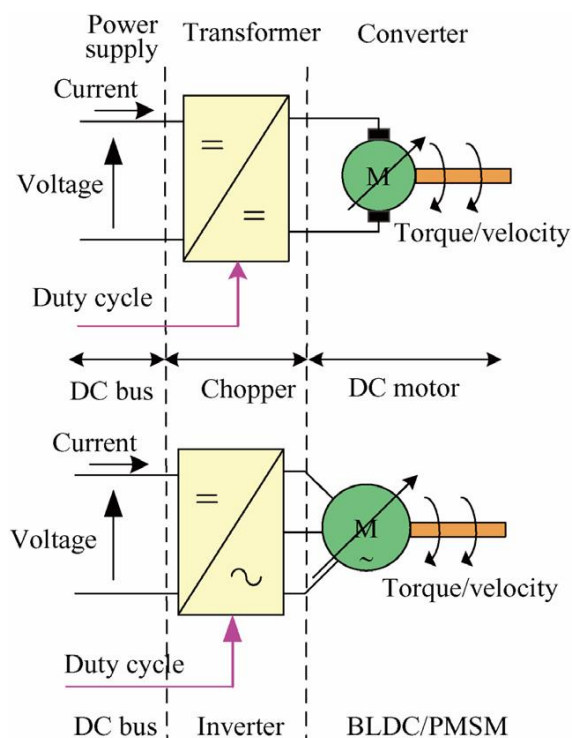
Figura 28 Respuestas de desgaste / envejecimiento por reacción o precarga.

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



La metodología de control de AEM debe validarse y verificarse en presencia de fallas debido a requisitos críticos de seguridad. Así, la simulación de fallas hasta fallas facilitará la validación real de las pruebas experimentales. Un problema de fallas a fallas en una AEM es el juego libre. La respuesta a una falla de juego libre se puede simular configurando el juego con un valor superior al doble de la carrera de la tuerca-tornillo (es decir, 150 mm).

De esta manera, el vínculo mecánico entre el rotor del motor y la carga es inexistente. En la Figura 29 se representa un ejemplo del resultado de la simulación utilizando el modelo MPT de comportamiento, en el que el juego libre se inicia en el tiempo 0,2 s cuando la velocidad está completamente establecida. La carga externa es nula en esta simulación.

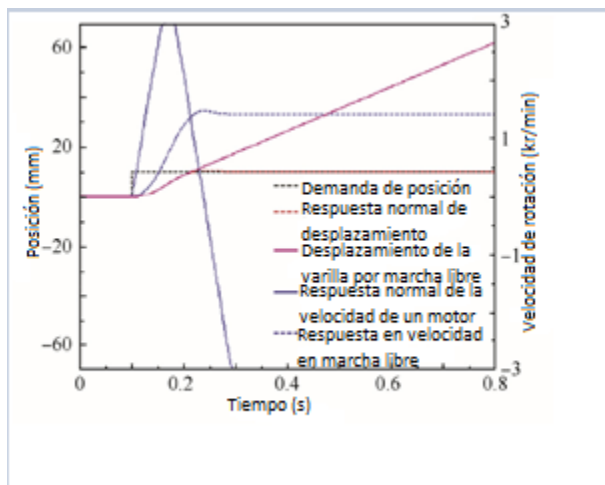


Figura 29 Fallos a fallos causados por reacción violenta

Como se muestra en la Figura 29, el desplazamiento de la varilla no puede seguir la demanda de posición y continúa moviéndose debido a la energía cinética almacenada en el rotor que se disipa en calor por los efectos de la fricción. La velocidad del motor se satura rápidamente porque el controlador aumenta el par requerido en respuesta a la posición incorrecta.

La falla de interferencia es otro tema importante en un AEM en el aspecto de la seguridad. En el modelo MPT de comportamiento propuesto, la interferencia se puede simular aumentando el parámetro de fuerza de fricción ( $F_{jm}$ ).

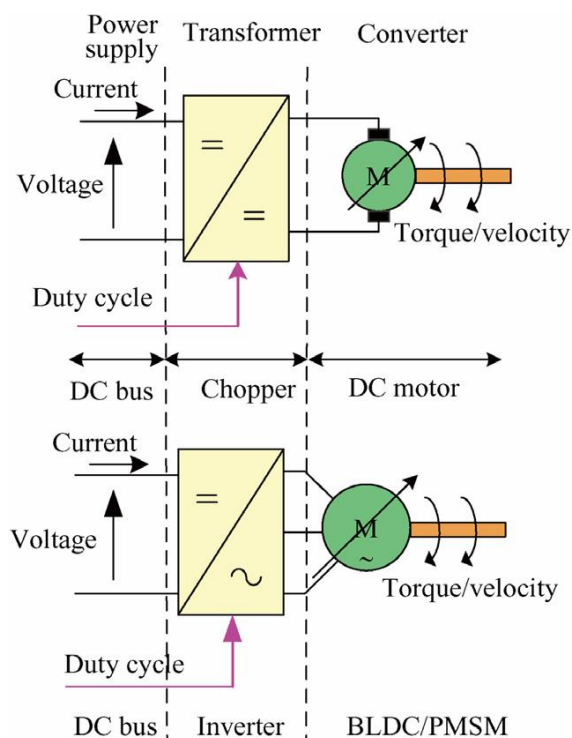
La figura 30 muestra la posición de la superficie simulada cuando se fuerza el atasco agregando una fricción de Coulomb (50 kN) a cuatro casos en los que se activa una falla

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



de sobreimpulso ( en el tiempo 0,24 s, curva roja), en una posición estable (en el tiempo 0,65 s, curva azul) y después de la aplicación de una carga aerodinámica (en el tiempo 1,15 s, curva rosa). La posición de la barra se bloquea inmediatamente como se esperaba. La Figura 31 presenta el caso de interferencia disparado en la posición ascendente (en el tiempo 0,18 s).

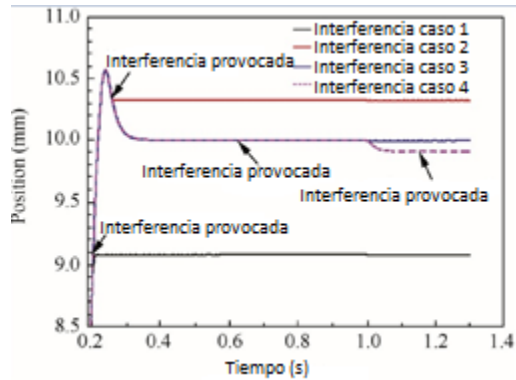


Figura 30 Fallos a fallos causados por casos de atasco.

La enorme magnitud del par transmitido a la tuerca-tornillo es 4,5 veces el par nominal debido al efecto inercial del rotor del motor. El par electromagnético permanece saturado de lado a medida que los errores de posición dejan de evolucionar.

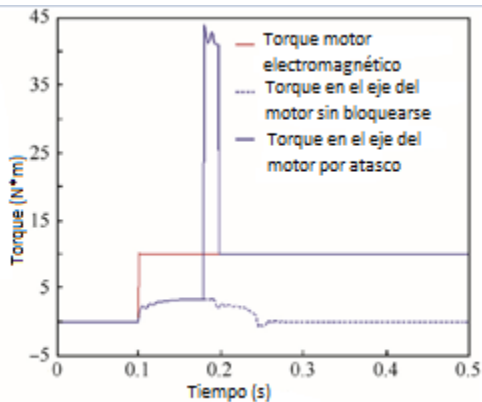


Figura 31 Respuestas de par con / sin atasco.

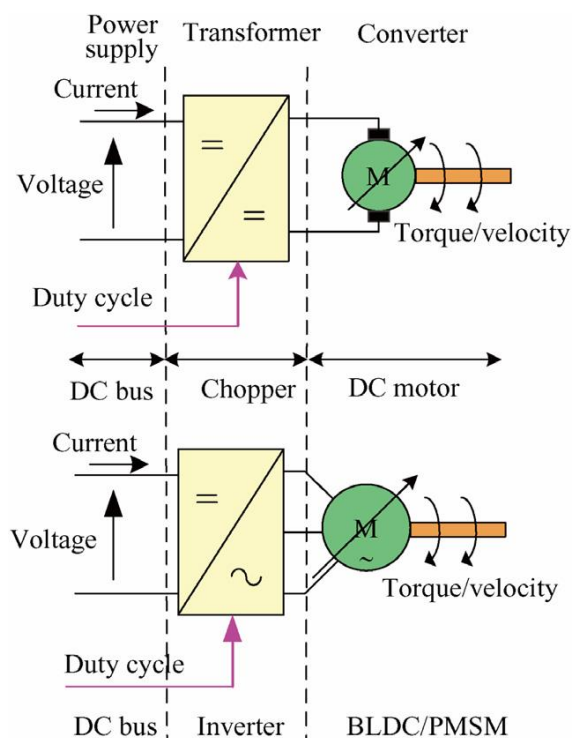


El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



Este estudio tiene como objetivo presentar las mejores prácticas en el modelado y simulación a nivel de sistema para desarrollar modelos AEM con el fin de respaldar la creación de prototipos virtuales de subsistemas MEA con una perspectiva a nivel de sistema del diseño MBSE. El enfoque propuesto se basa en el uso de un gráfico de bonos para establecer la estructura del modelo. En comparación con un enfoque de diagrama de bloques, como es habitual en el diseño de controles, la consideración de los flujos de potencia y el uso del formalismo de gráficos de Bond proporciona dos ventajas principales. En primer lugar, hace que el modelo sea más fácil de estructurar, vincular con la realidad y ampliar o detallar frente a las necesidades de diseño, especialmente cuando se consideran varios efectos físicos con detalles multinivel. En segundo lugar, anticipa posibles problemas numéricos (bucles algebraicos y derivaciones) abordando las causalidades lo antes posible. Aunque los códigos de simulación emergentes y el software comercial admiten modelos no causales, nuestra experiencia ha demostrado que abordar las causalidades con cuidado hace que un modelo sea más robusto y reduce el tiempo dedicado a solucionar problemas numéricos. Los modelos progresivos se han implementado en un entorno de simulación comercial causal utilizando bibliotecas estándar disponibles en la medida de lo posible. Las principales ventajas de los modelos AEM propuestos y sus implementaciones numéricas son las siguientes:

(1) Se distingue claramente entre efecto funcional, efectos parásitos (conmutación para electrónica de potencia, pérdidas de hierro y cobre para máquinas eléctricas, inercia, fricción y cumplimiento para transmisión mecánica) y fallas por falla (interferencia y juego libre). Se han desarrollado modelos funcionales, básicos, avanzados y de comportamiento basados en los requisitos de las tareas de ingeniería. Estos modelos pretenden utilizar elementos e interfaces orientados a objetos de bibliotecas de modelos estándar.

(2) Cada modelo de parámetros agrupados de un componente AEM puede equilibrarse, en particular los modelos MPT, tanto a nivel energético como mecánico. Las pérdidas de conducción y conmutación se han introducido progresivamente en el PDE. Las pérdidas de cobre y hierro se consideran en el EM, y los modelos MPT se reproducen mediante modelos de fricción básicos / lineales y avanzados (que consideran la sensibilidad a la fuerza transmitida, la temperatura de operación y la velocidad de movimiento). El modelo de cumplimiento avanzado considera el diseño de componentes y los problemas de servicio para ilustrar los efectos de precarga y reacción.

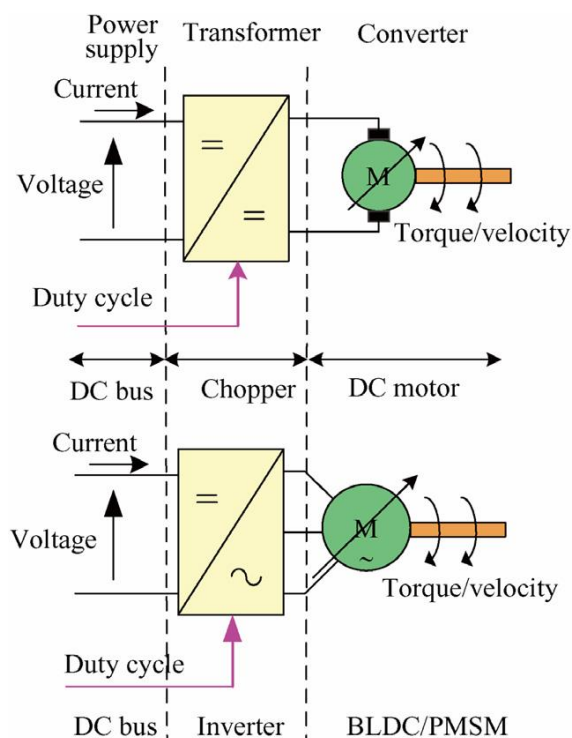
(3) Para el desarrollo de los modelos MPT se han tenido en cuenta las fallas mecánicas hasta la falla. Las características de envejecimiento / desgaste y fallas de falla (juego libre y atascos) se modelan sin aumentar la complejidad y dinámica de los modelos. Estos modelos pueden facilitar las actividades futuras relacionadas con el diseño de funciones de monitoreo de uso y salud de los sistemas completos de actuación de EMA. Las mejores prácticas propuestas han demostrado proporcionar beneficios considerables para mejorar la creación de prototipos virtuales de AEM al ahorrar tiempo y reutilizar

El desarrollo de modelos se puede estructurar utilizando un enfoque incremental de acuerdo con los requisitos. El realismo del modelo se puede incrementar en un diseño de arriba hacia abajo, y los modelos de subsistemas deben ser compatibles con las pruebas de integración virtual de abajo hacia arriba. Los modelos de componentes AEM pueden ser reemplazables y equilibrados. La complejidad aumenta progresivamente independientemente de si se considera cada efecto físico.

## 1.1. Modelado PDE y EM

El PDE y el EM son los dispositivos eléctricos clave en un EMA. El PDE modula la potencia transferida entre el bus de suministro eléctrico y el motor a través de la acción del voltaje del devanado del motor de acuerdo con las señales de conmutación enviadas a los transistores de potencia. El EM realiza conversión de potencia electromecánica. El voltaje y la corriente de entrada son funcionalmente proporcionales al par y la velocidad angular, respectivamente, en el eje del motor. Un motor síncrono de imanes permanentes de alto rendimiento (PMSM) se aplica actualmente a un AEM para reducir la complejidad del diseño de control de EMA.

La figura 6 presenta una estructura típica del circuito puente del PDE para accionar el motor. Se puede modelar un motor de CC equivalente accionado por un helicóptero que implementa el puente H. Para un modelado detallado, se puede introducir el PMSM impulsado por el inversor para proporcionar un rendimiento realista. En ambos modelos, la señal de control está adaptada para generar la señal del ciclo de trabajo.



integrarse en una AEM virtual realista.

## Bibliografía

- 3DS. (2018). *Multi-Engineering Modeling and Simulation - Dymola product line*.  
<https://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola/model-design-tools/>
- Colorado, M. (2020, November 27). *El 1 % de la población mundial produce el 50 % de las emisiones de CO2 que emite la aviación*.  
<https://www.france24.com/es/programas/medio-ambiente/20201127-emisiones-co2-aviacion-sentinel-6-mar>
- Ferranti, L., Wan, Y., & Keviczky, T. (2015). Predictive Flight Control with Active Diagnosis and Reconfiguration for Actuator Jamming. *IFAC-PapersOnLine*, 48(23), 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.278>
- HUANG, J., & PETERS, D. (2017). Real-time solution of nonlinear potential flow equations for lifting rotors. *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(3), 871–880.  
<https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.02.007>
- MARÉ, J. C., & FU, J. (2017). Review on signal-by-wire and power-by-wire actuation for more electric aircraft. *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(3), 857–870.  
<https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.03.013>
- Martínez del Carmen, F. (2019). *Diseño de un sistema elevador para vehículos*. 1–55.
- Siemens. (2021). *Simcenter Amesim | Siemens Digital Industries Software*.  
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/simcenter/simcenter-amesim.html>
- Trejos Grisales, L. A., & Alzate Gómez, A. (2013). Implementación de un inversor trifásico multinivel con fijación por diodos. *Revista Lasallista de Investigación*, 10(1), 139–151.
- Venkataraman, R., Lukátsi, M., Vanek, B., & Seiler, P. (2015). Reliability assessment of actuator architectures for unmanned aircraft. *IFAC-PapersOnLine*, 28(21), 398–403.  
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.559>