

SÍNTESIS TOPOLÓGICA DE MECANISMOS METAMÓRFICOS

Martín A. Pucheta and Alberto Cardona

*Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC) INTEC
(Universidad Nacional del Litoral-CONICET), Güemes 3450, S3000GLN, Santa Fe, Argentina,
{mpucheta,acardona}@intec.unl.edu.ar, <http://www.cimec.org.ar>*

Palabras Clave: Mecanismos de eslabonamientos, mecanismos metamórficos, síntesis topológica, Teoría de Grafos, máquinas de estado finito.

Resumen. Un mecanismo metamórfico tiene la capacidad de cambiar de topología y configuración bajo las diferentes condiciones de operación. En el ámbito de los mecanismos de eslabonamientos estos cambios en la configuración topológica y/o en los grados de libertad pueden consistir de transformaciones en la conectividad de los eslabones y de transformaciones en las propiedades de las uniones cinemáticas. Las propiedades metamórficas de un mecanismo se diseñan para minimizar el número de actuadores, el número de cuerpos, facilitar el ensamble de piezas durante la manufactura, y para reducir el costo del mecanismo. Si bien estas propiedades dependen de las dimensiones específicas de las partes, se pueden deducir muchas propiedades discretas sólo relativas a la topología que tienen influencia en el funcionamiento metamórfico. En este trabajo, se revisan y combinan representaciones metamórficas que se pueden encontrar en la literatura, basadas en Teoría de Grafos y Máquinas de Estado Finito, y se presenta su aplicación computacional para el diseño de interruptores de circuitos de bajo voltaje que son utilizados para seccionar instalaciones eléctricas y proteger seres humanos.

1 INTRODUCCION

Un mecanismo metamórfico (MM), también llamado mecanismo reconfigurable (Zhang y Dai, 2009) o mecanismo con topología variable (Yan y Kuo, 2006), tiene la capacidad de cambiar de topología y de configuración bajo las diferentes condiciones de operación. Las transformaciones de eslabones y/o de uniones cinemáticas producen cambios sobre la movilidad de uno o más miembros preservando o cambiando los grados de libertad del mecanismo. Para el ámbito de los mecanismos de eslabonamientos, las transformaciones de conectividad en eslabones pueden obtenerse colapsando cuerpos, ya sea manteniéndolos en contacto o bien liberándolos de un contacto, de este modo un eslabón puede pasar de ser binario a ternario, o bien la unión puede cambiar de posición. Los eslabones pueden, además, cambiar de función, por ejemplo, de poseer movimiento de entrada pasar a ser pasivos o fijos. Las transformaciones de uniones cinemáticas pueden consistir de cambios de tipo (por ejemplo, de tipo leva a tipo rotoidal), o de cambios en una característica de la unión, por ejemplo, la orientación del eje de la unión puede pasar de estar en el plano a estar saliente del plano como es el caso de una unión prismática que se transforma a deslizador (Kuo, 2004; Yan y Kang, 2009).

Entre los objetivos que justifican el incorporar propiedades metamórficas en los diseños de mecanismos y dispositivos mecánicos pueden destacarse: (i) obtener un mínimo número de actuadores (reducir la electrónica, hidráulica y neumática redundante), (ii) obtener un mínimo número de cuerpos y uniones cinemáticas, (iii) facilitar el ensamble de piezas durante la manufactura, (iv) realizar múltiples operaciones, y (v) reducir el costo del mecanismo. Se pueden agregar otras ventajas cuando se incorporan elementos elásticos combinando la geometría de los cuerpos con estados energéticos deseados (estables, inestables, neutros o indiferentes, etc.); véase, por ejemplo, la Figura 1.

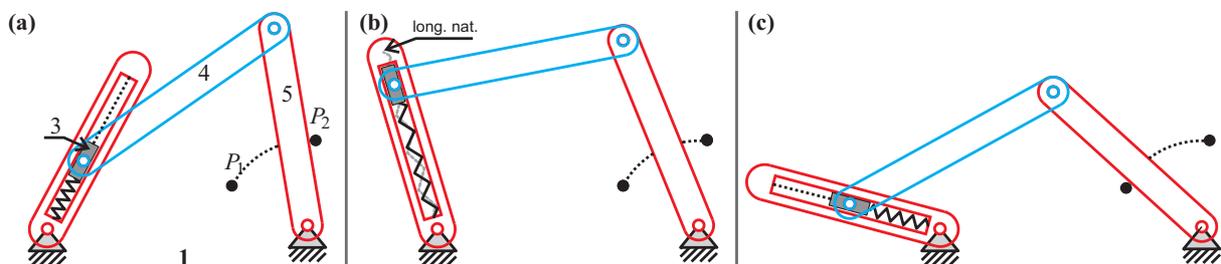


Figura 1: Mecanismo metamórfico con flexibilidad; adaptado de Lan y Du (2008); Pucheta et al. (2011)

Las aplicaciones actuales de estos mecanismos son muy variadas. Inicialmente, se propusieron modelos matemáticos para el plegado automático de cartón para empaquetado artístico e industrial (Dai y Rees Jones, 2005; Li et al., 2010), para mecanismos de cerraduras y llaves con claves mecánicas (Kuo, 2004; Yan y Kuo, 2006), y recientemente, para robots reconfigurables (Martins y Simoni, 2009). Además, son clásicos para el área de los libros de cuento despletables y muy atractivos en juguetes de dos estados (por ejemplo, son utilizados en Transformers® y Bakugan Balls®).

El diseño conceptual partiendo desde las partes a mover se denomina síntesis topológica o estructural y consiste en obtener la topología adecuada para requerimientos dados. Las propiedades metamórficas deseadas deben tenerse en cuenta desde esta etapa inicial de diseño, caracterizada principalmente por la multiplicidad de soluciones y por ser, en general, un problema combinatorio complejo.

En trabajos previos, se han presentado enumeraciones de mecanismos de eslabonamientos

basadas en Teoría de Grafos teniendo en cuenta, como espacio de búsqueda, topologías con diferentes tipos de eslabones y uniones cinemáticas (Pucheta y Cardona, 2007; Pucheta, 2008). Sin embargo, al incorporarse los metamorfismos se deben tener en cuenta los diferentes cambios y operaciones deseadas, con lo cual el número de posibles diseños crece considerablemente. Además, el número de diseños crece si se desean mecanismos con pares altos (levas, engranajes, deslizadores, etc.). Finalmente, el número de soluciones impacta directamente en las etapas posteriores de diseño detallado: síntesis dimensional, simulaciones multicuerpo y optimización, cualificación y selección del mecanismo óptimo.

Para sobrellevar esta explosión combinatoria inmanejable de forma manual, en las últimas décadas se han realizado diversos avances en la representación computacional de mecanismos metamórficos por medio de matrices y grafos, y en avances en la representación de las operaciones y movimientos mediante digrafos y máquinas de estado finito (Kuo, 2004; Dai y Rees Jones, 2005; Yan y Kuo, 2006; Lan y Du, 2008; Liu 2009; Li et al., 2010; Slaboch y Voglewede, 2011). Sin embargo, se puede afirmar que las metodologías de enumeración son recientes (Yan y Kang, 2009; Martins y Simoni, 2009; Pucheta et al., 2011a, 2011b).

En este trabajo se presenta, en forma resumida, una propuesta de un nuevo enfoque para la enumeración de mecanismos metamórficos (Pucheta et al. 2011a, 2011b). Se considera un espacio de búsqueda definido por eslabonamientos planos con pares bajos solamente y se incluyen restricciones metamórficas en términos de subgrafos. Los pares altos (levas, contactos, deslizadores, etc.) se representan con pares bajos según su equivalente en los grados de libertad que restringen (Yan, 1998).

Junto con la descripción de la metodología se utiliza una aplicación particular al rediseño y enumeración de mecanismos metamórficos para interruptores de circuitos, del tipo “salva vida”. Se describirá cómo se especifican los requerimientos, cómo se resuelve el problema de enumeración y se discutirán las ventajas del método propuesto junto con líneas de desarrollo a futuro.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE PRUEBA

Un mecanismo de interruptor de circuito de bajo voltaje, en adelante, mecanismo LVCB (del inglés, “Low Voltage Circuit Breaker mechanism”), es un dispositivo mecánico complejo ampliamente difundido por su uso en hogar, oficina, comercio e industria. En estos mecanismos, la falla eléctrica es sensada por un bimetálico y/o termomagnético o relay que actúa sobre el mecanismo para generar un cambio rápido en la topología, necesaria para el desenclavamiento instantáneo de los contactos principales y la desconexión eléctrica; véase la Figura 2. La actuación del bimetálico es lenta y protege al circuito de valores corriente por encima del estipulado por diseño mientras que el accionamiento magnético o diferencial es rápido y protege al humano de una descarga a tierra a través del mismo.

El desenclavamiento debe producirse con un tiempo y velocidad prescrita, aún con la manija manual bloqueada; además, se limita la fuerza que debe hacer el usuario y se prescribe la fuerza que deben realizar los contactos en su cierre. Para resolver la parte topológica de este problema, la metodología disponible (Pucheta y Cardona, 2007; Pucheta, 2008) se adaptó con el agregado de una prescripción especial: se define “a priori” qué par de cuerpos se desengancharán o sufrirán un cambio metamórfico ante un desperfecto eléctrico; quedando como incógnita a determinar cómo deben agregarse nuevos cuerpos a los ya existentes (manija y contactos) para satisfacer otros requerimientos funcionales más complejos. Entonces, el problema a resolver consiste en enumerar mecanismos que contienen ciertas partes de entrada y salida, y satisfacer además un conjunto de operaciones o transiciones que

se describen en las secciones siguientes. En esta etapa inicial de enumeración, se ignoran los resortes y miembros capaces de almacenar energía pero se describirán sus funciones.

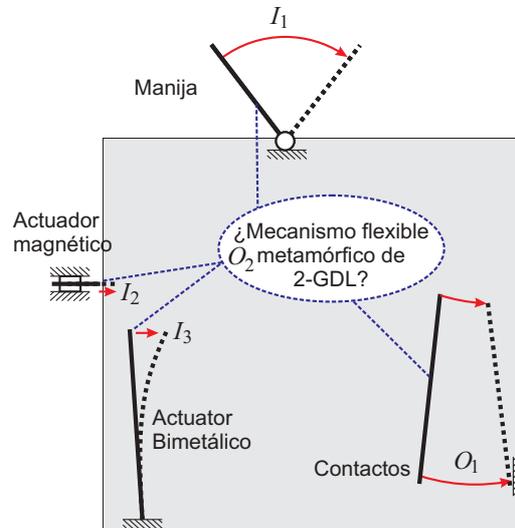


Figura 2: Partes a mover de entrada y de salida

2.1 Descripción funcional de las partes del mecanismo LVCB

La salida principal del mecanismo, O_1 , es el carro de contactos, CC (en inglés, “contact carrier”). Este carro contiene a los contactos metálicos que cierran el circuito eléctrico y además los aísla del resto de las partes. El CC solamente se cierra cuando se cierra la manija (actuada manualmente o mediante accesorios que la mueven en forma remota). Bajo condiciones de falla eléctrica, las entradas internas deben abrir los contactos *aún cuando la manija se encuentre bloqueada intencionalmente*; la configuración de las partes restantes del mecanismo también se puede considerar como una salida deseada O_2 . El mecanismo tiene dos tipos de entradas: una manija, denotada como I_1 en la Figura 2, y una o más partes de entrada que son internas mostradas como I_2 e I_3 , cuyos movimientos son producidos por fuerzas de origen térmico (bimetal) o magnético (núcleo de electroimán o relé). Estas fuerzas actúan sobre una pieza o palanca de desenclavamiento DL (del inglés: “de-latching lever”) que se engancha con la palanca de enclavamiento LL (del inglés: “latching lever”).

2.2 Estados, operaciones (o transiciones) y requerimientos de energía

Yan y Kuo (2004, 2006) han propuesto la representación de las operaciones de los mecanismos mediante Máquinas de Estado Finito (FSM); del inglés, “finite-state machine” (Rosen, 2007), que admiten representación tabular o en forma de digrafo. Una máquina de estado finito es una estructura algebraica, que se puede expresar como $M = (\mathcal{S}, \mathcal{I}, f, s_0, \mathcal{O})$, y consiste de un conjunto finito de estados \mathcal{S} , un alfabeto finito de entradas \mathcal{I} , una función de transición f que asigna el próximo estado a cada dupla de estado y entrada ($f: \mathcal{S} \times \mathcal{I} \rightarrow \mathcal{S}$), un estado inicial s_0 , y un subconjunto \mathcal{O} de \mathcal{S} consistiendo de estados finales o de salida. En el contexto de los mecanismos metamórficos y desde el punto de vista topológico, los estados pueden corresponder a configuraciones con diferentes grados de libertad (GDL), incluyendo: mecanismos con estructuras parcialmente bloqueadas ($GDL > 0$), estructuras ($GDL = 0$) y mecanismos sobre restringidos ($GDL < 0$).

Una FSM permite representar las maniobras comunes a todos los mecanismos LVCB en forma gráfica como se muestra en la [Figura 3](#) o en forma tabular (Apéndice A). El significado de los estados es el siguiente:

- s_0 : Contactos abiertos o en estado off, mecanismo enclavado o con submecanismo de desenclavamiento armado; en adelante, simplemente se lo llamará *armado* y a su estado como *armed*.
- s_1 : Contactos cerrados o en estado on, mecanismo en estado *armed*.
- s_2 : Contactos aún cerrados en estado on, mecanismo desarmado mediante el movimiento del actuador magnético o bimetal (falla eléctrica).
- s_3 : Contactos en estado off, mecanismo de enclavamiento desarmado en configuración segura (los contactos abiertos y no pueden cerrarse).

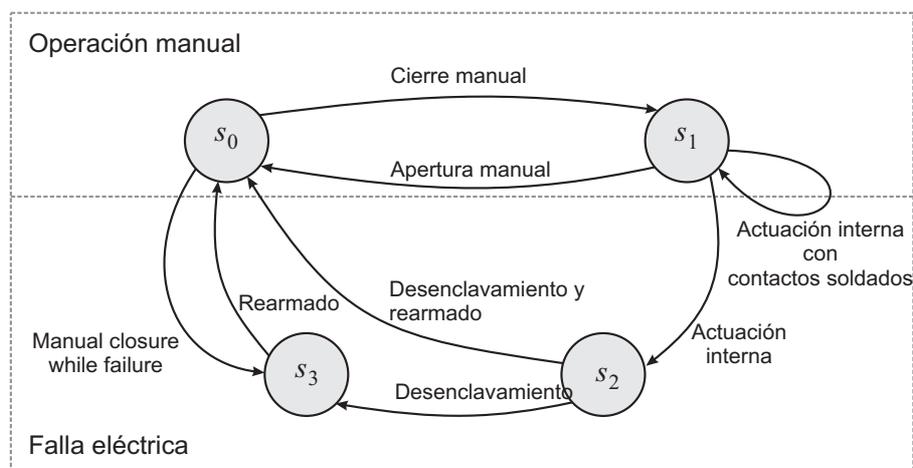


Figura 3: Digrafo de operaciones requeridas y estados.

En la [Figura 3](#), también se pueden ver las operaciones o transiciones representadas mediante flechas.

- En *operación normal*:
 s_0 a s_1 : Cierre manual con submecanismo de desenclavamiento armado.
 s_1 a s_0 : Apertura manual con submecanismo de desenclavamiento armado.
- En *operación bajo falla* (autónoma):
 s_1 a s_2 : Desarmado electromecánico por medio de actuación interna (la palanca de desenclavamiento DL desliza sobre la palanca de enclavamiento LL).
 s_2 a s_0 : Desenclavamiento mecánico y rearmado simultáneo con manija libre (desbloqueada).
 s_2 a s_3 : Desenclavamiento mecánico con manija bloqueada.
 s_3 a s_0 : Rearmado mecánico automático por medio del resorte de la manija.
 s_0 a s_3 : Cierre manual con submecanismo de desenclavamiento desarmado (alguna entrada interna permanece aún activada).
 s_1 a s_1 : Falla con contactos soldados; esta situación no deseada se puede producir por varias razones, por ejemplo, debido a una falla de sensado en los actuadores internos.

Los requerimientos de energía de cada estado pueden ser muy variados (ver [Figura 4](#)) y se pueden asociar fácilmente a la representación FSM. Desde la misma, se pueden identificar los requerimientos de multiestabilidad que debe cumplir el mecanismo. Para el ejemplo, s_0 , s_1 y s_3 son estados estables, mientras que s_2 es un estado estable cercano a uno altamente inestable; ver estado G en la [Figura 4](#). Por lo tanto, el mecanismo tiene un comportamiento biestable o

triestable dependiendo de que la manija se encuentre libre o bloqueada, respectivamente. Las operaciones de apertura y cierre manual actúan entre dos estados estables muy diferentes en valor. Debido a que la apertura bajo falla debe realizarse autónomamente en un período muy corto de tiempo, necesariamente, se debe almacenar una cantidad importante de energía cuando el mecanismo es cerrado manualmente. Dicha energía es almacenada en uno o más resortes directamente conectados al carro de contactos y su valor depende de la geometría de la manija, la fuerza manual realizada por el operador humano y de la amplificación del mecanismo.

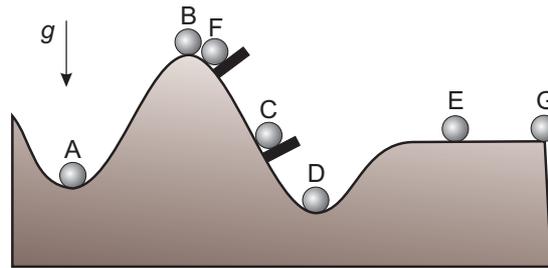


Figura 4: Estados de energía posibles. (A) y (D) estables; (B) inestable; (C,F) estables con restricción externa; (E) neutralmente estable; (G) neutralmente estable cercano de transición altamente inestable.

Independientemente de la posición de la manija, la actuación del submecanismo de desenclavamiento debe ser capaz de abrir los contactos. Por lo tanto, la topología del mecanismo debe tener al menos 2 grados de libertad y submecanismo de desenclavamiento siempre debe tener precedencia.

3 CAMBIOS METAMORFICOS Y SU REPRESENTACIÓN MEDIANTE GRAFOS

Los recursos de diseño empleados en mecanismos metamórficos pueden clasificarse y representarse como sigue:

- Topología variable: La topología se representa por su cadena cinemática, ya sea mediante su grafo o matriz de adyacencia, con símbolos adicionales para eslabones y uniones. Los cambios de estado se pueden expresar como una secuencia de grafos (uno para estado o configuración) o como un único grafo con una secuencia de transformaciones en las uniones, denominado grafo unificado (Kuo, 2004). Para el mecanismo de la Figura 1, estas dos representaciones se muestran respectivamente en la Figura 5(a,b,c) y en la Figura 5(d).
- Cuerpos o eslabones metamórficos: Los cuerpos que se unen o colapsan, se representan mediante un cuerpo principal seguidos por los cuerpos que se unen al mismo entre paréntesis, por ejemplo, 1(5) significa que el cuerpo B_5 está unido a la fundación B_1 ; observar etiquetas de vértices en la Figura 5.
- Uniones metamórficas: Una unión metamórfica puede cambiar básicamente su:
 - Tipo: Los cambios pueden realizarse entre tipos del mismo orden o en distinto orden (es decir, de par cinemático bajo a par cinemático alto o viceversa). Además, en el cambio, una unión puede perder o ganar movilidad; por ejemplo, una junta esférica de 3 GDL se puede convertir en una rotoidal de 1 GDL mediante el bloqueo de 2 de sus ejes.
 - Característica: cambio de orientación del eje de la unión, denotado como x, y, z , o como v si su dirección se hace arbitraria.

En general, es de interés que los cambios se produzcan en forma autónoma al combinar la configuración, diferentes condiciones cinético estáticas (la magnitud y dirección de las

fuerzas de reacción en uniones metamórficas son claves) y la actuación externa. En los eslabonamientos de mecanismos LVCB, se emplean las configuraciones singulares (por ejemplo, alineamiento de barras) para bloquear los mecanismos en posiciones estables con alto valor de energía almacenada; luego, la actuación externa remueve la singularidad.

Existen diversas representaciones de mecanismos metamórficos, pocas de ellas fueron aplicadas concretamente en la enumeración. Pucheta et al. (2011a) proponen el uso de la equivalencia entre pares altos y pares bajos, para resolver el problema de enumeración de los mecanismos LVCB.

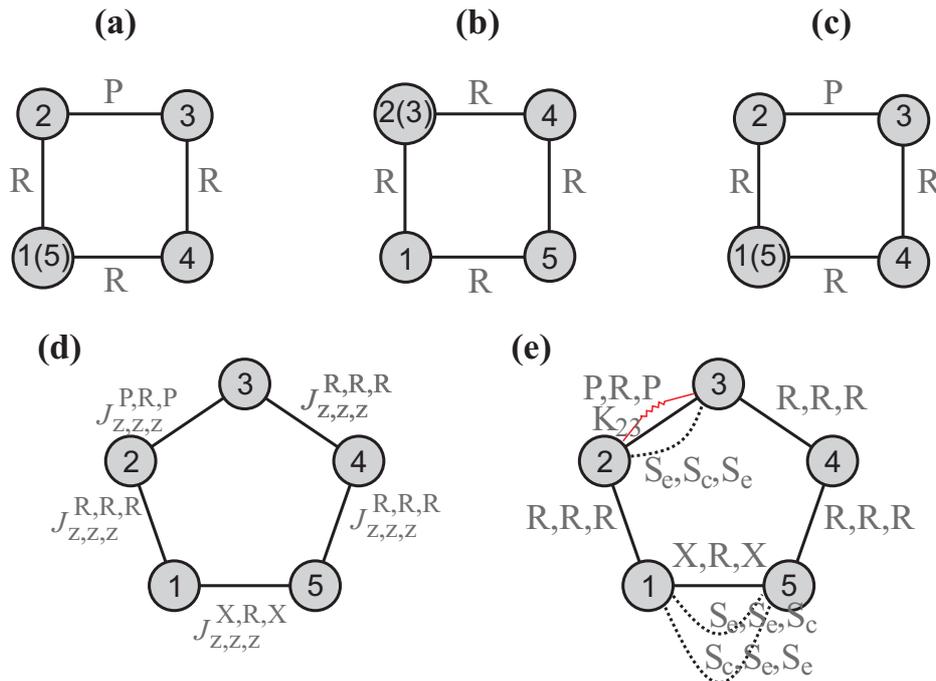


Figura 5: Grafos de los estados del mecanismo mostrado en la Figura 1 (a, b, c); su grafo unificado (d) y su grafo unificado completo (e).

3.1 Representación simplificada utilizando pares bajos

La representación de mecanismos metamórficos es de interés vigente. La representación de mecanismos con grafos es adecuada para modelar la topología de las partes a mover e imponer en las mismas restricciones topológicas (Pucheta y Cardona, 2007; Pucheta, 2008). Esta técnica está bien definida para mecanismos con uniones simples: los cuerpos son representados por los vértices del grafo y las uniones cinemáticas entre dos cuerpos son representados por las aristas conectando los respectivos vértices en el grafo (Tsai, 2001).

La representación mediante pares bajos o simples fue denominada *eslabonamiento asociado* (Tsai, 2001) o *eslabonamiento generalizado* (Yan, 1998). Los mecanismos con uniones múltiples (con ejes coincidentes) también se pueden convertir a una representación equivalente con juntas simples como lo describe Yan (pp. 107-108, 1998). Además, Yan, (pp. 99-106, 1998) presentó las representaciones equivalentes en pares bajos de la mayoría de los cuerpos y uniones utilizados en modelos multicuerpos y las denominó uniones y miembros generalizados, respectivamente. Esta representación simplificada permite la enumeración sistemática de nuevos mecanismos.

La Figura 6 muestra algunas uniones usadas en mecanismos LVCB y también muestra su representación de grafo de pares altos con su equivalente en pares bajos. Las aristas se

dibujan en “puntos”, “trazos”, “sólida”, y “doble”, en correspondencia con una reducción de 0, 1, 2, 3 grados de libertad. Debe remarcarse que en Pucheta et al. (2011a, 2011b) se incorpora una nueva descripción de los mecanismos con un nivel de detalle adicional en cuanto a los cuerpos que se encuentran en contacto (S_c) o que están separados (S_e) y que entrarán en contacto en otra configuración. En términos de Teoría de Grafos, la representación del mecanismo pasa a ser un multigrafo como se muestra en la Figura 5 (e) para el mecanismo de la Figura 1. Con el agregado de los resortes, esta representación fue útil para describir cerca de 26 mecanismos LVCB existentes en el mercado.

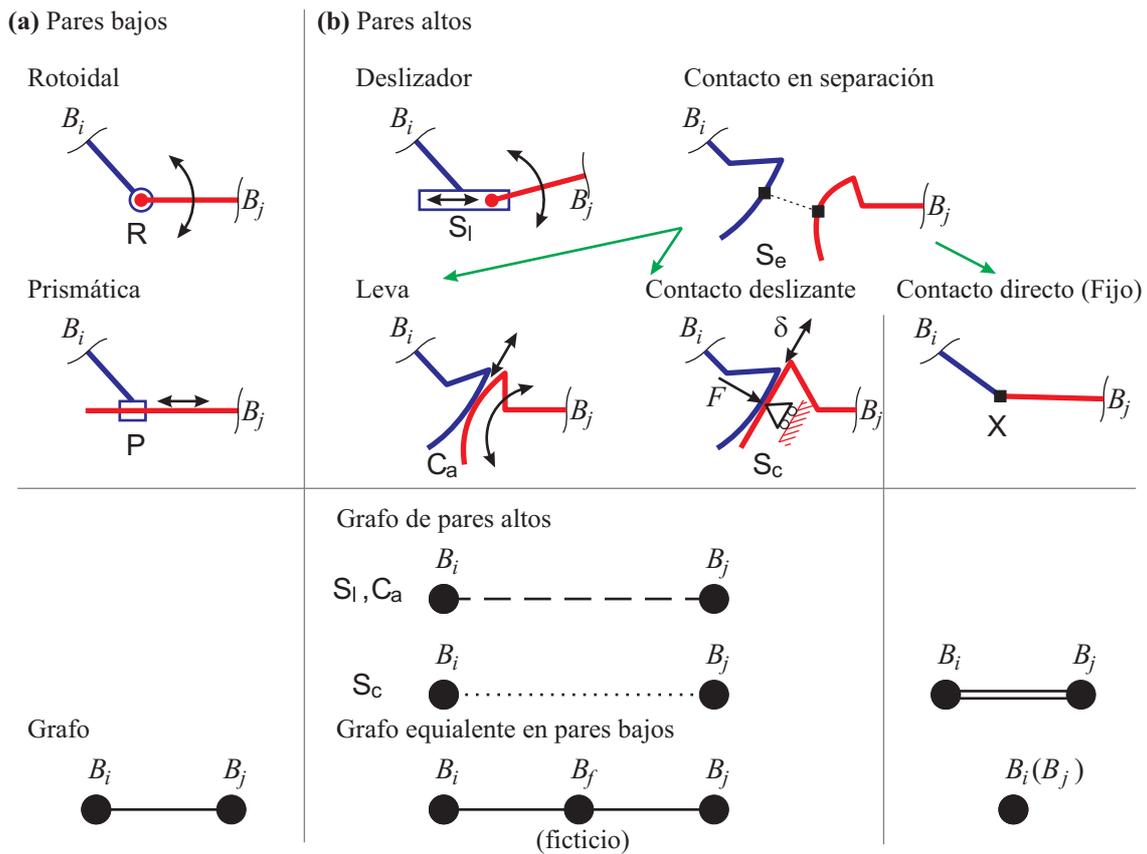


Figura 6: Tipos de uniones y sus representaciones en pares bajos

4 METODOLOGÍA DE ENUMERACION

Los mecanismos existentes se llevaron a una representación equivalente en pares bajos para ser adaptada al resolvidor de síntesis topológica disponible (Pucheta y Cardona, 2007; Pucheta, 2008). La base de conocimiento extraída de los diseños existentes se utilizó para crear restricciones topológicas para la enumeración y luego de la misma, para validar los resultados.

El espacio de diseño está almacenado como una base de datos o atlas de mecanismos. En este espacio el resolvidor realiza la búsqueda de las partes a mover, sin repeticiones y satisfaciendo las restricciones impuestas. La descripción de las partes a mover y el atlas están representados en términos de pares bajos.

Para el problema de diseño de los mecanismos LVCB se utilizó una base de datos compuesta de 232 mecanismos diferentes, obtenidas mediante la asignación de la fundación a 39 cadenas cinemáticas de 2 GDL (Tsai, 2000, app. D, tabs. D7 to D14). Para dar una idea de

la complejidad de estas cadenas cinemáticas podemos mencionar que 1 de estas cadenas posee 5 eslabones y 5 uniones; 3 de ellas poseen 7 eslabones y 8 uniones, y 35 poseen 9 eslabones y 11 uniones.

Las propiedades utilizadas en la enumeración también son útiles para clasificar los resultados y para facilitar la selección de los diseños más prometedores.

4.1 Ejemplo de grafo inicial y restricciones topológicas para el mecanismo LVCB

Las partes a mover se representan mediante el grafo mostrado en la [Figura 7](#).

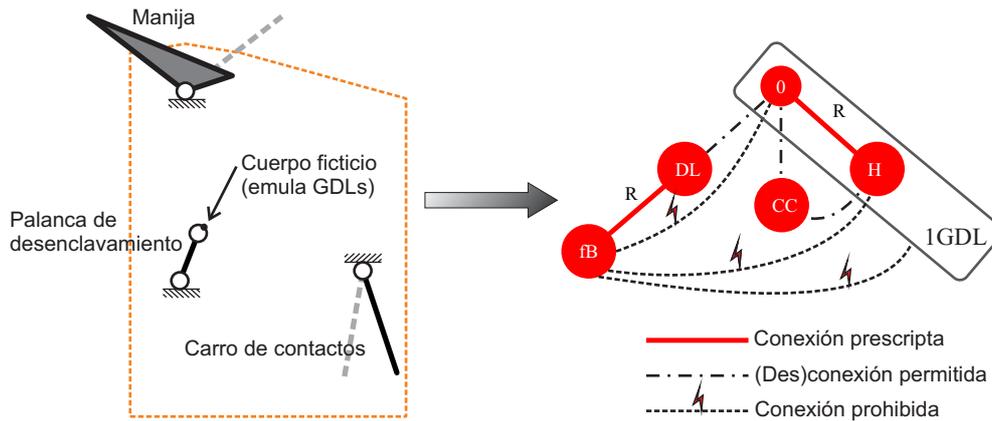


Figura 7: Configuraciones topológicas deseadas sobre las partes a mover

Se asignan etiquetas a cada parte y utilizando las mismas se expresan las restricciones basadas en los requerimientos de funcionamiento.

- Cuerpos requeridos:
 - [B1] Deben existir al menos 5 cuerpos con etiquetas: 0 (fundación), H (manija), CC (carro de contactos), DL (palanca de desenclavamiento), y fB (cuerpo ficticio que emula los GDLs del contacto con la palanca de enclavamiento).
- Restricciones de conectividad:
 - [C1] H está conectado a 0.
 - [C2] DL está conectado al cuerpo ficticio fB.
 - [C3] fB nunca debe estar conectado a 0;
 - [C4] fB nunca debe estar conectado a H;
 - [C5] fB nunca debe estar conectado a un subgrafo de 1 GDL conteniendo 0 y H.
 - [C6] DL puede estar conectado a 0 o ser un eslabón flotante (en adelante, “flotante” significa que no está conectado directamente a la fundación);
 - [C7] CC puede estar conectado a 0 o ser un eslabón flotante.
 - [C8] Si CC es un eslabón flotante, el mismo no puede estar conectado a H.
- Restricciones de grado de conectividad de los cuerpos (el grado de un vértice o cuerpo es el número de cuerpo que se conectan al mismo):
 - [D1] H: es binario (sólo se conecta a otros dos cuerpos);
 - [D2] DL: es binario;
 - [D3] fB: es binario.
- Restricciones metamórficas relacionadas a cambios permitidos o prohibidos:
 - [T1] No debe haber un subgrafo de 1 GDL conteniendo: 0, H, CC;
 - [T2] No debe haber un subgrafo de 1 GDL conteniendo: 0, DL, fB, H;
 - [T3] No debe haber un subgrafo de 1 GDL conteniendo: 0, DL, fB, CC.

Las restricciones C5, T1, T2, y T3 están expresadas en términos de subgrafos con ciertos GDL. Para validarlas, el algoritmo de búsqueda debe abrir un segundo atlas de mecanismos de 1GDL. Si la manija H y el carro de contactos CC pertenecieran a un submecanismo de 1 GDL (incluyendo la fundación), al bloquear la manija se bloquearían los contactos. Estas topologías indeseadas son eliminadas al imponer la restricción T1. De modo similar, las restricciones T2 y T3 aseguran que el mecanismo pueda, también, ser desenclavado con la manija fija.

Para satisfacer restricciones del tipo C6 y C7, el problema es subdividido en cuatro casos mutuamente exclusivos denotados por Ia, Ib, IIa, y IIb en la Figura 8.

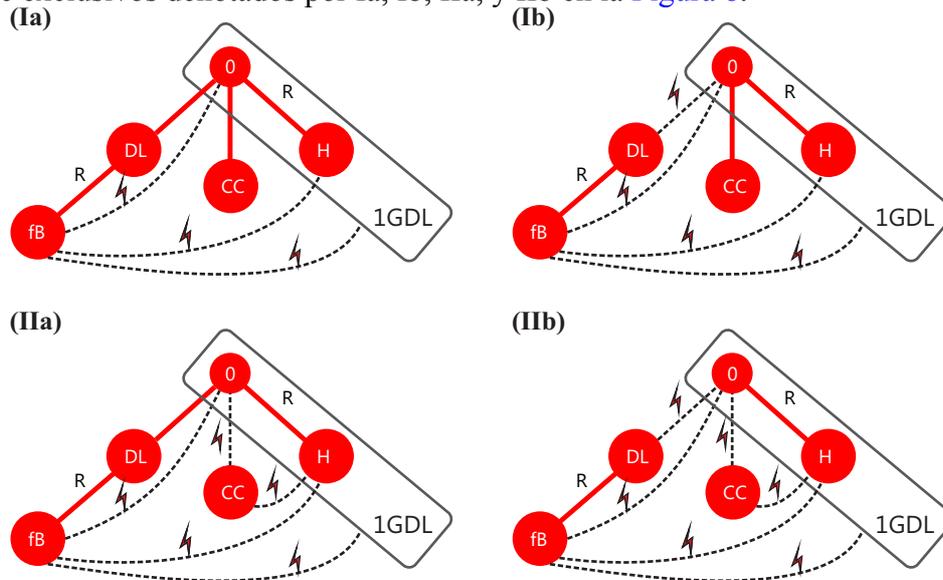


Figura 8: Subdivisión del problema: (Ia) DL y CC conectados a la fundación; (Ib) DL flotante y CC conectado a la fundación; (IIa) DL conectado a la fundación y CC flotante; (IIb) DL y CC flotantes.

5 RESULTADOS

La ejecución de los cuatro subproblemas utilizando el resolvidor para un atlas de mecanismos con 2 GDLs de hasta 9 eslabones y 11 uniones, resultó en un conjunto de 617 topologías diferentes, clasificadas en orden de complejidad creciente. Las primeras soluciones para el subproblema Ia se muestran en la Figura 9, en donde se muestra el grafo y el eslabonamiento de cada alternativa de modo de facilitarle la comprensión al diseñador.

Cada topología factible puede ser fuente de múltiples nuevos diseños mediante los siguientes pasos:

- 1) Los diseños pueden dimensionarse utilizando pares bajos hasta que se asegure su funcionamiento correcto para todas las operaciones.
- 2) Utilizando asignación manual, los diseñadores pueden realizar la transformación inversa de pares bajos a pares altos (incorporando levas, deslizadores, engranajes, etc.), o a múltiples uniones (haciendo coincidir ejes).
- 3) Agregar miembros flexibles (resortes) y topes (necesarios para limitar carreras y movimientos) para satisfacer requerimientos de energía.

Todas estas consideraciones de diseño incrementan la explosión combinatoria desde las alternativas enumeradas y su aplicación sistemática y más aún automática será el foco de nuevas investigaciones.

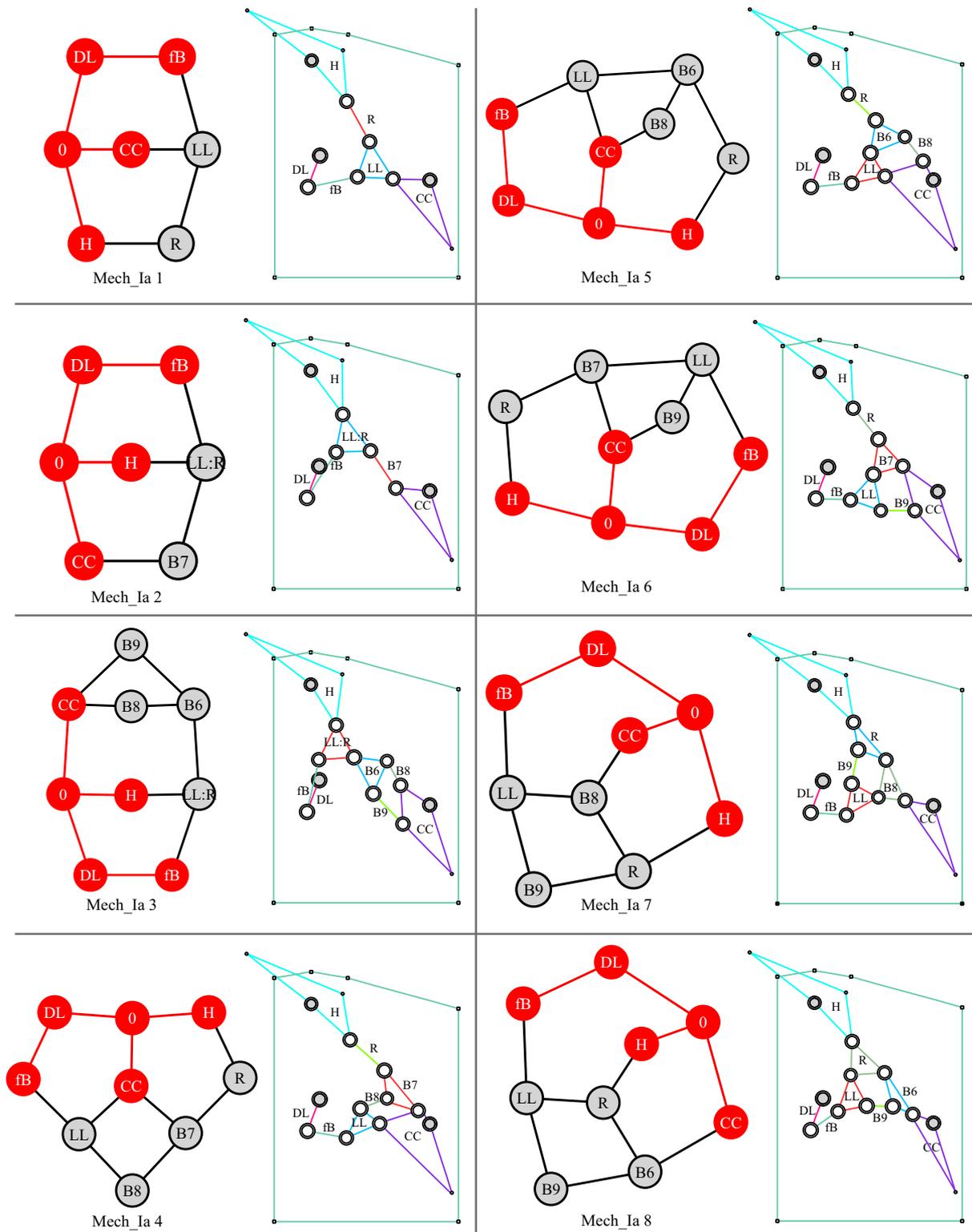


Figura 9: Mecanismos que satisfacen el grafo inicial y las restricciones del subproblema Ia

6 CONCLUSIONES

En este trabajo, se combinaron representaciones basadas en Teoría de Grafos y Máquinas de Estado Finito para describir en forma completa la topología y el funcionamiento de

mecanismos metamórficos. Se adaptó un resolovedor para síntesis topológica para enumerar mecanismos metamórficos para requerimientos metamórficos incluidos en forma de restricciones discretas involucrando subgrafos. Se presentó la aplicación del método para el rediseño de interruptores de circuitos de bajo voltaje, generando conceptos nuevos que son fuente potencial de nuevos diseños.

Con el enfoque propuesto, basado en utilizar una enumeración de mecanismos metamórficos utilizando pares bajos, se espera contribuir al estado del arte en la enumeración automática de mecanismos metamórficos y al manejo racional de la explosión combinatoria de esta clase de problemas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo recibió apoyo de ABB Switzerland Ltd., Corporate Research, contrato 2009-447-01 (SAT UNL 537362), y de la Universidad Nacional del Litoral (CAI+D 2009 PI65-330), la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT PICT-2010-1240), y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Al alumno Nicolás E. Ulrich (FICH-UNL) por su colaboración en la esquematización automática de grafos de las cadenas cinemáticas.

REFERENCIAS

- Dai, J.-S., y Rees Jones, J., Matrix representation of topological changes in metamorphic mechanisms. *ASME Journal of Mechanical Design*, **127**(4):837–840, 2005.
- Kuo, C.-H., Structural characteristics of mechanisms with variable topologies taking into account the configuration singularity. Tesis de Master, National Chen Kung University, Tainan, Taiwan, Republic of China, 2004.
- Lan, Z., y Du, R., Representation of topological changes in metamorphic mechanisms with matrices of the same dimension. *ASME Journal of Mechanical Design*, **130**(7):074501–1 – 074501–4, 2008.
- Li, D., Zhang, Z., y McCarthy, J.M., A constraint graph representation of metamorphic linkages. *Mechanism and Machine Theory*, **46**(2):228–238, 2011.
- Liu, C.-H., The Configuration-Function Transition Digraphs of Metamorphic Mechanisms or Variable Topology Mechanisms. En *Actas de ASME/IFTToMM REMAR 2009 Conference*, páginas 110–117, Londres, Reino Unido, junio 2009.
- Martins, D., y Simoni, R., Enumeration of planar metamorphic robots configurations. En *Actas de ASME/IFTToMM REMAR 2009 Conference*, páginas 580–588, Londres, Reino Unido, junio 2009.
- Pucheta, M.A., Computational methods for design and synthesis of planar mechanisms. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, 2008.
- Pucheta, M.A., y Cardona, A. An automated method for type synthesis of planar linkages based on a constrained subgraph isomorphism detection. *Multibody System Dynamics*, **18**(2):233–258, 2007.
- Pucheta, M., Butti, A., Tamellini, V., Ghezzi, L., y Cardona, A., A methodology for the topological synthesis of metamorphic mechanisms for circuit breakers. En *Actas de Multibody Dynamics 2011, ECCOMAS Thematic Conference*, J.C. Samin, P. Fiset (eds.), páginas, 2464–2844, Bruselas, Bélgica, 4-7 julio, 2011a.
- Pucheta, M., Butti, A., Tamellini, V., Ghezzi, L., y Cardona, A., Topological synthesis of metamorphic mechanisms for low-voltage circuit breakers. En preparación, 2011b.

- Rosen, K. H., Discrete Mathematics and Its Applications. McGraw-Hill, 6^{ta} edición, 2007.
- Slaboch, B., y Voglewede, P. A., Mechanism state matrices for planar reconfigurable mechanisms, ASME Journal of Mechanisms and Robotics **3**(1):011012, 2011.
- Tsai, L.-W., Mechanism Design: Enumeration of Kinematic Structures According to Function. CRC Press, Boca Raton, USA, 2001.
- Yan, H.-S., Creative Design of Mechanical Devices. Springer-Verlag, Singapur, 1998.
- Yan, H.-S., y Kuo, C.-H., Representations and identifications of structural and motion state characteristics of mechanisms with variable topologies. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, **30**(1):19–40, 2006.
- Yan, H.-S. y Kang, C.-H., Configuration synthesis of mechanisms with variable topologies. Mechanism and Machine Theory, **44**(5):896–911, 2009.
- Zhang, L.-P., y Dai, J.-S., An overview of the development on reconfiguration of metamorphic mechanisms. En Actas de ASME/IFTOMM REMAR 2009 Conference, páginas 1–11, Londres, Reino Unido, junio 2009.

APÉNDICE

A. Funciones de transición y de salida del mecanismo LVCB

La función de transición f es un mapeo del espacio de estado al espacio de estado para las combinaciones factibles de las entradas y puede tabularse como se muestra en la [Tabla 1](#), también conocida como tabla del estado próximo ([Yan y Kuo, 2006](#); [Rosen, 2007](#)).

$f(\mathbf{S}, \mathbf{I}) \rightarrow \mathbf{S}$	Entrada			
	$I_1 = \text{on}$ $I_2 \text{ and } I_3 = \text{off}$	$I_1 = \text{off}$ $I_2 \text{ and } I_3 = \text{off}$	$I_1 = \text{on}$ $I_2 \text{ or } I_3 = \text{on}$	$I_1 = \text{free}$ $I_2 \text{ and } I_3 = \text{off}$
Estado	Salida			
s_0	s_1	-	s_3	-
s_1	-	s_0	s_2	-
s_2	s_3	-	-	s_0
s_3	-	-	-	s_0

Tabla 1: Función de transición de un mecanismo LVCB (operación normal en gris).

Para un estado actual dado y el mismo conjunto de valores de entrada que para la tabla anterior, se define la “tabla de salidas” mostrada en la [Tabla 2](#).

$g(\mathbf{S}, \mathbf{I}) \rightarrow \mathbf{O}$	Entrada			
	$I_1 = \text{on}$ $I_2 \text{ and } I_3 = \text{off}$	$I_1 = \text{off}$ $I_2 \text{ and } I_3 = \text{off}$	$I_1 = \text{on}$ $I_2 \text{ or } I_3 = \text{on}$	$I_1 = \text{free}$ $I_2 \text{ and } I_3 = \text{off}$
Estado	Salida			
s_0	$O_1 = \text{on};$ $O_2 = \text{armed}$	-	$O_1 = \text{off};$ $O_2 = \text{disarmed}$	-
s_1	-	$O_1 = \text{off};$ $O_2 = \text{armed}$	$O_1 = \text{on};$ $O_2 = \text{disarmed}$	-
s_2	$O_1 = \text{off};$ $O_2 = \text{disarmed}$	-	-	$O_1 = \text{off};$ $O_2 = \text{armed}$
s_3	-	-	-	$O_1 = \text{off};$ $O_2 = \text{armed}$

Tabla 2: Función de salida de un mecanismo LVCB (operación normal en gris).