

**REALISMO ESTRUCTURAL: CAUSALIDAD,
DISPOSICIONES, MODALIDAD**

**STRUCTURAL REALISM: CAUSALITY
DISPOSITIONS, MODALITY**

Ignacio Rojas

Resumen

El objetivo del presente artículo es explorar los alcances y posibles respuestas a las objeciones planteadas por S. Psillos (Psillos 2006) en relación a que la propuesta ontológica del realismo estructural defendida por S. French (French, 2014) debiera ser descartada, ya que las estructuras son entidades abstractas y, por lo tanto, requieren de objetos portadores de propiedades para ser instanciadas. Se argumentará, contra Psillos, que la ontología estructural no es puramente matemática y, por lo tanto, es capaz de incorporar modalidad, asociada a la simetría/anti-simetría de la función de onda, incorporar causalidad, apelando a la teoría de cantidades conservadas de P. Dowe (Dowe 2001) y que, para lograr estos objetivos, no es necesario recurrir ni a objetos ni a disposiciones como entidades metafísicas fundamentales.

Palabras clave: estructuralismo, disposiciones, causalidad, modalidad.

Abstract

The aim of this paper is to explore the scope and possible answers to the objections raised by S. Psillos (Psillos 2006) in relation to that the ontological proposal defended by S. French (French 2014) should be discarded, since the structures are abstract entities and, therefore, require objects bearing properties to be instantiated. It will be argued, against Psillos, that the structural ontology is not purely mathematical and, therefore, it is able to incorporate modality, associated to the symmetry / anti-symmetry of the wave function, to incorporate causality, appealing to the theory of conserved quantities of P. Dowe (Dowe 2001)

* Programa del Magíster en Filosofía de las Ciencias (U. de Santiago de Chile).
Miembro del Grupo de Causalidad Usach. E- mail: ignacio.rojas.h@gmail.com

and that, to achieve these objectives, it is not necessary to appeal to objects or dispositions as fundamental metaphysical entities.

Keywords: structuralism, dispositions, causality, modality.

Recibido: septiembre 2017 Aceptado: octubre 2018

I. Realismo Estructural

Aunque el debate filosófico que implica definir al estructuralismo como posición filosófica es ya un tema complejo y diverso en sí mismo, esta puede ser entendida como un movimiento filosófico heterogéneo, más que una perspectiva filosófica monolítica. Sin embargo, en un sentido amplio, el estructuralismo puede ser presentado como un cambio de ontología: abandonar los objetos, concebidos tradicionalmente como las entidades fundamentales, en pos de las estructuras, interpretadas en términos de relaciones. De este modo, afirma el estructuralista, debemos abandonar la idea de los objetos como relata que dan sustento a las relaciones y pensar más bien en estas, representadas por las estructuras, como fundamentales y a partir de las cuales, de alguna manera, se derivan los objetos.

En este sentido, es posible diferenciar formas de estructuralismo más fuertes que otras: para el estructuralismo *epistémico*, defendido, por ejemplo, por J. Worrall, existen tanto relaciones como objetos, solo que no tenemos acceso epistémico a estos últimos y sí, solamente, a las estructuras. Por el contrario, de acuerdo con estructuralismo *óptico*, defendido, entre otros, por J. Ladyman y S. French, el mundo físico descrito por las teorías científicas contemporáneas no responde al ideal clásico de un espacio-tiempo poblado por objetos microscópicos que se desplazan e interactúan entre sí por medio de colisiones, sino que puede ser mejor comprendido como el conjunto de redes de relaciones, expresadas por las leyes de la física, que se ‘mantienen unidas’ por medio de las simetrías, las que representan aquello que es invariante en dichas redes. Así, en términos ontológicos, la versión óptica propone que son las relaciones las que deben ser consideradas como fundamentales y, contrariando ciertas intuiciones metafísicas, los objetos portadores de propiedades deben ser considerados como meros ‘nodos’ o ‘intersecciones’ en las estructuras. Existe, además, una versión de estructuralismo moderada, defendida, entre otros, por M. Esfeld, que busca preservar una suerte de equilibrio

ontológico entre objetos y relaciones, sin privilegiar a ninguno por sobre el otro.

Evidentemente, la alternativa más radical de estructuralismo, la *óntica*, ha sido el blanco de innumerables críticas y objeciones, siendo una de las más fuertes la realizada por S. Psillos (Psillos 2006), quien considera que para constituirse como alternativa ontológica viable el estructuralismo óntico debe ser capaz de responder, en primer lugar, a una objeción muy simple: las estructuras son entidades de naturaleza matemática, abstracta, y, por lo tanto, no pueden sostener una ontología del mundo físico. En este sentido, Psillos argumenta que existe una distinción introducida por S. Shapiro (Shapiro 1997), muy relevante para este debate, entre estructuras *ante rem* e *in re*. El primer tipo de estructura, *ante rem*, es, por definición, una entidad abstracta, que existe independientemente de si es ejemplificada o no y, por lo tanto, debe ser desechada como alternativa ontológica para un realista. En el segundo tipo de estructura, *in re*, son los sistemas, entendidos como colección de objetos poseedores de propiedades y relacionados entre sí, los que poseen prioridad ontológica por sobre las estructuras, razón por la cual, debemos concluir con Psillos, el estructuralismo óntico no es sostenible como posición filosófica. Como vimos, para Psillos, las estructuras necesitan objetos, portadores de propiedades y capaces de establecer relaciones entre sí, para ser instanciadas y, por lo tanto, no pueden ser consideradas como entidades ontológicamente fundamentales. Sin embargo, un argumento en contra de la distinción taxativa entre tipos de estructuras defendida por Psillos ha sido planteada por French y Ladyman (French y Ladyman 2003) según el cual la introducción de un carácter modal, primitivo, en las relaciones del mundo físico permitiría cerrar la brecha entre los tipos de estructura *ante rem* e *in re*. Así, los autores afirman que “Existen relaciones modales objetivas entre fenómenos (posibles y actuales), pero estas relaciones no supervienen en las propiedades de objetos inobservables y sus relaciones externas, más bien esta estructura es ontológicamente básica”¹.

2. Causalidad y disposiciones

Indudablemente, la respuesta de Psillos profundiza en lo planteado en el primer argumento, ya que otro de los problemas que debe confrontar el estructuralista óntico es el problema de la causalidad. De acuerdo con Psillos, tradicionalmente en filosofía los relata causales

1 French y Ladyman 2003, p. 46.

han sido caracterizados como hechos o eventos, siendo estos últimos particulares instanciados en el espacio y el tiempo (*in re*) por lo que los relata causales no pueden ser estructuras abstractas (*ante rem*). Por el contrario, sostiene Psillos, las relaciones causales dependen de los objetos y las propiedades físicas de las que son portadores. Así, la idea planteada por los defensores del estructuralismo óptico de incorporar modalidad en las estructuras como una manera de acortar la distancia entre las estructuras abstractas, *ante rem*, y las concretas, *in re*, plantea Psillos, se desmorona al constatar que “[l]as características modales del mundo no son puramente estructurales. Ni la causalidad puede ser ‘el cemento del universo’ si estructura es todo lo que hay. Peor, no podemos darle sentido a la causalidad si estructura es todo lo que hay”².

Como una primera tentativa de repuesta a esta afirmación de Psillos, en la que el estructuralista sería incapaz de incorporar a la causalidad en su descripción del mundo y, por lo tanto, sería imposible dotar de un carácter concreto, no abstracto, a las estructuras, analizaremos la que ha ofrecido Esfeld (Esfeld 2009) quien, desde un realismo estructural moderado, ha planteado que “[...] las estructuras físicas son redes de relaciones físicas cualitativas, concretas entre objetos, y estos no son nada más que lo que establece esas relaciones, esto es, no poseen una identidad intrínseca además de las relaciones en las que están”³. De este modo, plantea Esfeld, y contrariamente a lo defendido por el estructuralismo óptico, si se mantienen a los objetos como relata de las relaciones representadas por las estructuras, es posible responder a las objeciones planteadas por Psillos: las estructuras son relaciones concretas, físicas entre objetos y, además, acudiendo a un enfoque disposicionalista de la causación, es posible incorporar causalidad en una posición estructuralista.

De acuerdo con Esfeld, la fortaleza de esta posición radica en que, en el marco del debate filosófico sobre la naturaleza de las propiedades que son instanciadas por los objetos, donde se distinguen a las propiedades entre categoriales y causales, podemos entender que las propiedades físicas son, justamente, las de tipo causal, y estas debiesen ser entendidas, a su vez, como disposiciones: “[...] las propiedades son disposiciones en el sentido de poderes: son la disposición (poder) de producir ciertos efectos”⁴. Siguiendo a Esfeld, el estructuralista debiese además, para ser consistente en su posición ontológica, adoptar un

2 Psillos 2006, p. 570.

3 Psillos 2006, p. 570.

4 Op. cit., p. 4.

enfoque disposicionalista como el que ha defendido S. Mumford, quien considera que las propiedades físicas fundamentales son disposiciones sin una base de propiedades categóricas y, por lo tanto, irreducibles a ellas. Además, Esfeld afirma que la naturaleza misma de las propiedades instanciadas por los objetos es producir ciertos efectos, por lo que la conexión entre causa y efecto es de carácter necesario. Así, reforzando la idea que al incluir modalidad en las estructuras se refuerza el carácter no abstracto de estas últimas, Esfeld plantea que las leyes físicas mismas son metafísicamente necesarias ya que se derivan de la naturaleza disposicional de las propiedades.

Resulta interesante la inclusión que hace Esfeld de las disposiciones como una forma de entender la naturaleza de la causalidad, ya que, de acuerdo con M. Dorato (Dorato 2003), existe una historia de concepciones disposicionalistas de la causalidad en Mecánica Cuántica. Uno de los primeros autores que sugirió comprender la naturaleza causal de las partículas cuánticas en términos disposicionales fue H. Margeneau quien, en su artículo de 1954, distingue entre propiedades latentes y propiedades definidas como una forma de interpretar el colapso de la función de onda en un proceso de medición cuántica. En esta misma línea, la concepción de W. Heisenberg (Heisenberg 1958) se emparenta a las tesis disposicionalistas en el sentido de que la función de onda de un sistema cuántico contiene, de acuerdo con el autor, enunciados sobre posibilidades o, mejor dicho, sobre tendencias, las que debiesen ser interpretadas como '*potentiae*' aristotélicas. Asimismo, K. Popper (Popper, 1982) ha defendido una interpretación de las probabilidades cuánticas, considerándolas como objetivas y no meramente epistémicas, como propensiones o tendencias de las partículas a comportarse, dentro de un contexto experimental determinado, de cierta manera. Tomando como base esta línea interpretativa, Dorato afirma que en Mecánica Cuántica es posible entender que cuando se realiza una medición experimental, y surge el así llamado 'problema de la medición', lo que se observa es justamente el pasaje de lo disposicional a lo no-disposicional, en el sentido de que antes de llevar a cabo una medición el estado cuántico es caracterizado por propiedades indefinidas (o '*fuzzy*'), pero cuando es sometido a un proceso de interacción con el aparato experimental estas propiedades adquieren un carácter definido (o '*eigenstate*' del observable sometido a medición). Este proceso es lo que en la interpretación ortodoxa de la Mecánica Cuántica corresponde al postulado del colapso de la función de onda, que es considerado usualmente como inanalizable, incontrolable e irreversible.

Dentro de esta misma perspectiva disposicionalista, A. Chakravartty (Chakravartty 2007) comprende que las propiedades físicas que poseen los objetos, tales como masa, cargas, aceleraciones, volúmenes y temperaturas, confieren a estos ciertas habilidades o capacidades, de modo que “[e]stas capacidades son disposiciones a comportarse de ciertas maneras ante la presencia o ausencia de otros particulares y sus propiedades”⁵. Este planteamiento da sustento, a su vez, a la Tesis de Identidad Disposicional: la identidad de las propiedades está dada por las disposiciones que confieren⁶. De esta manera, la causalidad puede ser articulada como concepto, en el marco de la Mecánica Cuántica, como derivado de las disposiciones irreducibles conferidas a los objetos por las propiedades que son instanciadas por estos. Asimismo, el teórico los poderes causales y de las disposiciones, G. Molnar, ha afirmado que “[e]n el Modelo Estándar las magnitudes físicas fundamentales están representadas como unas cuya plena naturaleza esta dada por su disposicionalidad: es decir, solo su disposicionalidad entra en su definición [...]. Lo que esas propiedades son se define por lo que ellas tienen como potencial para hacer, tanto cuando lo están haciendo como cuando no”⁷.

Sin embargo, y a pesar de lo auspicioso e intuitivo que pueda parecer el enfoque disposicionalista antes detallado para comprender la causalidad en el contexto de la Mecánica Cuántica, algunos autores han planteado que esta alternativa metafísica tiene como desafío responder al problema de incorporar las simetrías y leyes de conservación que aparecen, justamente, como rasgo fundamental del Modelo Estándar de partículas elementales. En la vasta literatura sobre la Mecánica Cuántica de Campos, en general, y sobre el Modelo Estándar de partículas, en particular, un rol fundamental lo juegan las simetrías de esta teoría. Así, por ejemplo, M. Schwartz (Schwartz 2014) afirma que en el Modelo Estándar, las partículas elementales corresponden a representaciones unitarias irreducibles del grupo de Poincaré. Sin embargo, McCabe (McCabe 2007) afirma que aunque el grupo de Poincaré es el grupo de simetría del espacio-tiempo de Minkowski, para especificar las representaciones irreducibles que corresponden a las partículas elementales, es necesario tener en cuenta que comúnmente estas son idealizadas como partículas libres, es decir, sin interacción, por lo que resulta más conveniente

5 Chakravartty 2007, p. 41.

6 Op. Cit., p. 123.

7 Molnar 2003, p. 135.

adoptar otro enfoque y partir ‘marcha atrás’: partir de la simetría espacio-temporal de sistemas en interacción, la que corresponde a un subgrupo del grupo de Poincaré y no al grupo de Poincaré mismo. En el caso del espacio-tiempo de Minkowski, el grupo de simetría correspondiente es el grupo de Poincaré, $O(3,1) \times \mathbb{R}^{3t}$, el semiproducto de las transformaciones de Lorentz con las traslaciones del espacio-tiempo de Minkowski (la signatura (3,1) expresa las tres dimensiones espaciales y la dimensión temporal única). De acuerdo con McCabe, debido a que en 1956 se observó experimentalmente que las interacciones entre partículas en las que interviene la fuerza nuclear débil, aquella que es intermediada por los bosones W^+ , W^- , Z_0 , la simetría de reflexión espacial es violada, la así llamada ‘paridad’, y que en 1964 se observó que el decaimiento del mesón K^0 violaba la inversión temporal, el espacio-tiempo parece poseer tanto una orientación temporal como una orientación espacial.

Esto implica que el grupo de simetría de nuestro universo corresponde más bien a un subgrupo del grupo de Poincaré, el grupo de Poincaré restringido, $SO_0(3,1) \times \mathbb{R}^{3t}$, el que preserva, por separado, la orientación temporal y la espacial. Sin embargo, el experimento llevado a cabo en 1922 por Stern y Gerlach, en el que se puso de manifiesto por primera vez el spin de las partículas cuánticas, hipótesis teórica propuesta por Goudsmit y Uhlenbeck en 1925 sin hacer referencia al experimento de 1922, implica que el subgrupo de Lorentz $SO_0(3,1)$ no es el más apropiado para la clasificación de las partículas elementales, por lo que este debe ser reemplazado por el grupo lineal especial $SL(2, \mathbb{C})$, de manera que “[...] uno especifica la ontología de partículas elementales de nuestro universo por medio de las representaciones irreducibles, ordinarias, unitarias de $SL(2, \mathbb{C}) \times \mathbb{R}^{3,1}$ ”⁸. Esto es justamente lo que hizo E. Wigner en su trabajo de 1939, pionero en la introducción de la teoría de grupos en Mecánica Cuántica, donde las representaciones irreducibles estaban parametrizadas por un parámetro continuo, la masa m , y uno discontinuo, el spin s .

Históricamente, la construcción del Modelo Estándar se ha guiado por principios de simetría que, por medio del uso de la teoría de grupos, han permitido descubrir una profunda conexión entre estos y la leyes de la física, siendo la de mayor trascendencia la establecida por el conocido teorema de Noether (1915), según el cual “[...] para toda simetría continua de la Naturaleza existe una ley de conservación correspondiente”⁹. Por

8 McCabe 2007, p. 16.

9 Cottingham y Greenwood 2007, p. 3.

ejemplo, la simetría de las ecuaciones bajo una traslación temporal implica la ley de conservación de la energía, ya que estas son independientes de la variable temporal; además, la simetría bajo la traslación espacial implica la ley de conservación del momento lineal. En este sentido, para que las ecuaciones conserven la misma forma independientemente del sistema de referencia, el Modelo Estándar se configura bajo la exigencia que el Lagrangiano que lo describe conserve su forma bajo la acción de una transformación de Lorentz, por lo que estas son llamadas *transformaciones simétricas*. Del mismo modo, en el Modelo Estándar las fuerzas a través de las cuales se producen las interacciones físicas son caracterizadas por un grupo de transformaciones determinado, de manera que la invariancia bajo cada grupo de transformación permite derivar la forma de las ecuaciones para cada campo de fuerzas específico.

A partir de este breve análisis es posible percibir el rol preponderante que juegan tanto las simetrías como la leyes de conservación en la formulación del Modelo Estándar. Ahora, si consideramos la aseveración planteada anteriormente por Molnar en el sentido que las magnitudes físicas representadas por el Modelo Estándar son de naturaleza disposicional, entonces esta concepción debe hacer frente a la objeción planteada, por ejemplo, por S. French (French 2014), quien afirma que “[e]s poco claro cómo el disposicionalismo puede capturar las simetrías y leyes de conservación”¹⁰. En este sentido, una respuesta explícita a este problema la ha planteado A. Bird (Bird 2007), quien, junto con reconocer lo desafiante que resulta para un disposicionalista capturar las simetrías de, por ejemplo, el Modelo Estándar, ha afirmado que “[e]s difícil ver por qué, por ejemplo, cuando dos objetos cargados interactúan, sea la manifestación de una esencia disposicional que la carga total deba permanecer constante”¹¹. Sin embargo, Bird sugiere que una posible respuesta al problema sea insistir en la idea de que las leyes de la naturaleza, de carácter necesario y uno de cuyos rasgos parecen ser las simetrías, supervienen en las disposiciones conferidas por las propiedades poseídas por los objetos y, por lo tanto, considerar que las leyes de conservación y las simetrías son solo ‘pseudo-leyes’, de manera que estas corresponderían más bien a características de la manera actual de representar estas leyes, derivadas de la técnica matemática utilizada en su formulación quizás, que a rasgos del mundo que deban ser incorporados en nuestra metafísica. Otra respuesta, más radical tal vez,

10 French 2014, p. 231.

11 Bird 2007, p. 213.

es la que ofrece S. Mumford, quien, al defender que las regularidades del mundo están determinadas por las propiedades, ontológicamente fundamentales y entendidas como poderes disposicionales, considera que las leyes no constituyen entidades metafísicas sustantivas y, por lo tanto, junto con las leyes de conservación y las simetrías, pueden ser eliminadas.

Sin embargo, ambas estrategias argumentativas pueden ser consideradas como deficientes, construidas ad-hoc y que, finalmente, no responden realmente al problema planteado. Como vimos anteriormente, y considerando el importante rol que juegan tanto las simetrías como las leyes de conservación en la formulación de las teorías físicas contemporáneas, aún sin considerar las así llamadas ‘teorías de gauge’, donde las simetrías juegan un rol aún más relevante, podemos afirmar con French que la defensa disposicionalista podría tomarse “[...] como una forma de *reductio* de todo el proyecto esencialista disposicional”¹². De esta forma, al ser imposible para el disposicionalista incorporar las simetrías en un cuadro metafísico robusto, la idea planteada por Esfeld de incorporar disposiciones en un marco estructuralista debiese ser revisada con mayor detención y, finalmente, desechada, justamente porque el estructuralismo considera que uno de los rasgos distintivos que se debiera conservar en una metafísica consistente con la práctica y la teoría científica contemporánea, es la incorporación de las simetrías y las leyes de conservación asociadas en un nivel fundamental.

3. Causalidad y modalidad

Una vez desestimada la alternativa disposicionalista como una forma de incorporar causalidad en una visión estructuralista, debemos buscar una alternativa para poder responder al desafío planteado originalmente por Psillos. En este sentido, a nuestro juicio, la mejor alternativa para un estructuralista es la teoría de los procesos causales formulada por P. Dowe (Dowe 2001). De acuerdo con este autor, un proceso es un línea de mundo de un objeto; un proceso causal es aquel en el que el objeto posee una cantidad conservada (masa, momento, carga, etc.) gobernada por una ley de conservación; entonces, una interacción causal será definida como la intersección de las líneas de mundo de procesos causales en la que una cantidad conservada es intercambiada. Debido al rol preponderante que juegan las leyes de conservación en la definición de un proceso

¹² French 2014, p. 249.

como causal, la teoría de procesos causales resulta muy atractiva para el estructuralismo. De este modo, sería posible reconceptualizar los procesos causales como aquellos procesos asociados con leyes de conservación y reconcebir la noción de proceso como línea de mundo en términos estructurales, la que dependerá de la definición estructural de espacio-tiempo que se adopte. Además, la teoría causal de cantidades conservadas permite resolver uno de los puntos planteados por Psillos, en el sentido de que son justamente las cantidades regidas por leyes de conservación las que persisten en un proceso causal.

Así, el estructuralista puede adoptar la definición de causalidad ofrecida por los procesos causales, resaltando que el rol primordial que juegan tanto las simetrías como las leyes de conservación en la definición misma de un proceso como causal son las relevantes y los objetos se considerarán solo como entidades derivadas, de mero valor pragmático. Un aspecto a favor de esta perspectiva lo ofrece una de las críticas más sustanciales que se le han formulado a la teoría de los procesos causales de Dowe: las leyes de conservación globales no se sostienen, en general, en algunos modelos de espacio-tiempo descritos por la Teoría General de la Relatividad. De este modo, es posible concluir que si se clasifica a un proceso como causal, o no, dependerá de la estructura del espacio-tiempo en el que se despliega dicho proceso, y –contra lo que sostiene Dowe– no de una característica intrínseca de este, por lo que podemos afirmar, con French, que “[...] ‘ser un proceso causal’, o no, depende de la estructura del mundo, dado que bajo ciertas condiciones como cuando las simetrías relevantes son pertinentes, los procesos relevantes pueden ser caracterizados como causales [...]”¹³. Sin embargo, la respuesta de French a la crítica de Psillos va más allá de explicitar cómo sería posible hacer compatible la concepción de causalidad procesualista con el estructuralismo realista, ya que para French el concepto mismo de causalidad, al estar íntimamente relacionado con leyes de conservación y estructura espacio-temporal, es solo ‘una sombra’ del concepto que intuitivamente creemos que es, y esta noción ‘delgada’ de causalidad es la única compatible con la física contemporánea. Metafísicamente hablando, en un nivel fundamental las dependencias representadas por, o manifestadas en, las leyes son las que permiten articular de mejor manera, en una ontología estructural, lo que pretende capturar el concepto de causalidad. De este modo, French abraza una concepción causal emparentada con la defendida por E. Cassirer, de acuerdo con

13 French 2014, p. 224.

la cual el aspecto esencial de la causalidad es la dependencia funcional estricta, en el sentido que “[...] los enunciados legaliformes expresan la red de relaciones, ‘mantenida unida’ por principios de simetría que representan lo que es invariante en la red”¹⁴.

De este modo, podemos concluir que el proyecto estructuralista formulado por el Realismo Estructural Óntico (REO) es más robusto y consistente de lo que a primera vista podría constituir solo una variante de platonismo más, siendo capaz de responder a las objeciones planteadas por Psillos. Además, es posible articular una respuesta a estas objeciones sin la necesidad de dar marcha atrás y reincorporar objetos como entidades ontológicamente fundamentales, tal como propone Esfeld, ni tampoco es necesario recurrir a tesis disposicionalistas para darle un carácter más concreto a las estructuras, de manera que estas sean capaces de asumir importe causal y, de ese modo, constituirse como estructuras físicas. Como vimos anteriormente, el REO es capaz de articular una respuesta a la supuesta naturaleza abstracta de las estructuras y las simetrías apoyándose en la práctica y teorías físicas actuales, tal como el Modelo Estándar, donde las entidades fundamentales están lejos de corresponder a una noción clásica de objeto portador de propiedades instanciadas en el espacio-tiempo y, al mismo tiempo, incorporar conceptos como causalidad, en términos de cantidades conservadas, leyes de conservación y, por lo tanto, simetrías, aunque haciendo notar que el concepto de causación que mejor compatibiliza con la física contemporánea es solo una ‘delgada sombra’ del concepto tradicional de causalidad.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, el REO defendido por French y Ladyman incorpora rasgos de modalidad primitiva en su formulación, de manera que las relaciones objetivas entre fenómenos, concebidas modalmente en el sentido que capturan la concepción de relaciones tanto actuales como posibles, son ontológicamente fundamentales y no supervienen ni dependen de las propiedades instanciadas por objetos. En este sentido, de acuerdo con French, el estructuralista considerará que el conjunto de propiedades que conforman lo que comúnmente identificamos como un objeto dependen tanto de las leyes como de las simetrías, de manera que, por ejemplo, en el Modelo Estándar de partículas, las simetrías asociadas a subgrupos específicos del grupo de Poincaré permiten derivar propiedades como la masa, la carga y el espín. Así, bajo esta óptica estructural debemos revisar

14 Op. cit., p. 264.

la visión de acuerdo a la cual se le otorga a estas propiedades el estatus metafísico de ‘intrínsecas’. Sin embargo, y sin entrar en mayores detalles sobre la concepción estructuralista sobre las propiedades que podrá ser abordada en un futuro trabajo, debemos investigar otra dimensión de lo modal que permite al REO articular la modalidad primitiva de las estructuras.

4. Estadísticas cuánticas

Un buen ejemplo para comprender esta dimensión, es estudiar el carácter modal de las estructuras en el contexto de las estadísticas cuánticas, donde la definición misma del tipo de partícula, ya sea bosón o fermión, responde a la clasificación de la función de onda que las determina en términos de simétricas o anti-simétricas. La interpretación habitual de los resultados de las estadísticas cuánticas, tanto la de Bose-Einstein como la de Fermi-Dirac, al asumir el Principio de Indistinguibilidad, es decir, que a partir de la permutación de dos partículas no resulta un nuevo estado físico, implica que las partículas cuánticas pierden, de alguna forma, su individualidad. Más allá de la dificultad de articular lo que significa que una partícula no posea individualidad, reflexión que por lo general se encuentra ausente en los textos de mecánica cuántica, existe una forma de interpretar los resultados obtenidos en estadística cuántica sin desechar la individualidad de las partículas. De acuerdo con French y Rickles (French y Rickles 2003), el comportamiento estadístico de un conjunto de partículas idénticas, invariante bajo la permutación de las partículas, corresponde a una simetría llamada simetría por permutación, la que constituye una simetría discreta, esto es, se basa en un grupo con un número discreto de elementos. Comúnmente, esta simetría se identifica con el Principio de Indistinguibilidad enunciado por Greenberg y Messiah en 1964, que establece que “Si se aplica una permutación de partículas en todo ket para una asamblea de partículas, entonces no existe manera de distinguir por algún medio de observación en un instante determinado el ket permutado del original sin permutación”¹⁵. Sin embargo, French y Rickles prefieren llamarla Invariancia por Permutación (IpP) para explicitar aún más su contenido. Justamente, es este principio el que sustenta y explica la naturaleza de las estadísticas cuánticas, por lo que resulta inevitable para nosotros

15 Citado en S. French y D. Krause, 2006, p. 142. El término ‘ket’ se refiere, evidentemente, a la notación introducida por Dirac.

estudiarlo en profundidad, considerando sus implicancias para el problema de la individualidad/no-individualidad de las partículas. La simetría por permutación es sustentada por el grupo de permutación $Perm(x)$ de mapas biyectivos, es decir, los operadores de permutación \hat{P} de un conjunto x sobre sí mismo. Que el conjunto $Perm(x)$ posea la estructura de grupo quiere decir que

1. Es posible combinar dos elementos cualquiera en el conjunto, $\hat{P}_1, \hat{P}_2 = \hat{P}_3 \in Perm(x)$, para obtener otro elemento, $\hat{P}_1 \cdot \hat{P}_2 = \hat{P}_3$, del mismo conjunto $Perm(x)$.
2. Cada elemento $\hat{P} \in Perm(x)$ posee un inverso $\hat{P}^{-1} \in Perm(x)$ ¹⁶.

Si el conjunto x es de dimensión finita, $Perm(x)$ es definido como el grupo simétrico S_n , donde n se refiere a la dimensión del grupo. Para ejemplificar el análisis, los autores recurren a una moneda de dos caras: cara (C) y sello (S). En este caso, entonces $x = \{C, S\}$ y es un grupo de orden 2, S_2 , constituido por dos elementos:

- a. El operador Identidad \hat{P}_{id} que mapea $C \rightarrow C$ y $S \rightarrow S$, y
- b. El operador Intercambio \hat{P}_{cs} que mapea $C \rightarrow S$ y $S \rightarrow C$ ¹⁷.

Debido a que los estados posibles de la moneda, C y S , son distinguibles, es decir, existe una diferencia observable entre ellos, el conjunto no es invariante bajo la permutación de sus estados y, por lo tanto, no satisface la IpP. En el caso de la Mecánica Cuántica, los estados cuánticos para dos partículas son representados en un espacio de Hilbert \mathcal{H} por el producto tensorial de ambas partículas

$$\mathcal{H}_{total} = \mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2$$

donde los subíndices corresponden a las partículas 1 y 2. Si estas partículas se encuentran en los estados puros ϕ y ψ , respectivamente, entonces el sistema compuesto por ellas estará en el estado puro $\Psi = \phi \otimes \psi$. Los operadores de permutación actúan sobre el estado Ψ de la siguiente manera:

¹⁶ Ver S. French y D. Rickles, 2003, p. 213.

¹⁷ Op. cit., p. 214.

- I. $\hat{P}_{id}(\psi) = (\phi \otimes \psi)$
 II. $\hat{P}_{\phi\psi}(\psi) = (\psi \otimes \phi).$

Además, el Hamiltoniano del sistema compuesto por las dos partículas, $\hat{H}_\psi = \hat{H}(\phi \otimes \psi)$, es simétrico con respecto a ϕ y ψ y por lo que es invariante bajo la acción del grupo de permutación que intercambia los subíndices de las partículas. Formalmente, $[\hat{H}, \hat{P}] = 0$, lo que quiere decir que el Hamiltoniano conmuta con el operador de permutación. Una derivación del resultado anterior es que cuando se afirma que el estado de la asamblea de partículas es invariante bajo la acción del grupo de permutación implica que todo observable \hat{O} conmuta con el operador de permutación \hat{P} , es decir, $[\hat{O}, \hat{P}] = 0$. La interpretación física de este resultado es que “[...] no existe medición que podríamos realizar que pueda resultar en una diferencia discernible entre estados permutados (final) y no-permutados (inicial)”¹⁸. Formalmente, para todo estado ψ , todo operador hermítico \hat{O} (observable) y todo operador de permutación \hat{P} .

$$\langle \psi | \hat{O} | \psi \rangle = \langle \hat{P}\psi | \hat{O} | \hat{P}\psi \rangle = \langle \psi | \hat{P}^{-1} \hat{O} \hat{P} | \psi \rangle$$

lo que implica que el valor expectante de los estados permutados son iguales al valor expectante para los estados no-permutados. Evidentemente, este resultado constituye una forma más refinada de definir el Postulado de Indistinguibilidad.

Con el propósito de articular con máxima precisión su posición, French y Rickles recurren al concepto de ‘representación irreducible’, introducido históricamente por E. Wigner, ya que, de acuerdo con Castellani (Castellani 1995), “[d]esde el trabajo de Wigner, se ha vuelto muy usual clasificar las así llamadas ‘partículas elementales’ en base a sus propiedades de simetría (para ser más precisos, las simetrías de la teoría que describe su comportamiento). En esta visión, cada ‘partícula elemental’ es asociada con una representación irreducible del grupo de simetría espacio-temporal”¹⁹. Justamente, es esta posibilidad lo que constituye el núcleo de la aproximación desde la teoría de grupos al problema de los objetos cuánticos, fundamental para entender la propuesta de una ontología estructural. “Una representación ρ de un

18 Op. cit., p. 217.

19 Castellani 1995, p. 4.

grupo G en un espacio lineal V es simplemente un mapa que asigna a cada elemento del grupo $g \in G$ un operador lineal $\hat{O}(V)$ en dicho espacio”²⁰. Si este espacio es un espacio de Hilbert \mathcal{H} generado por los estados de dos partículas idénticas $\{\phi \otimes \phi, \phi \otimes \psi, \psi \otimes \phi, \psi \otimes \psi\}$ y el grupo $G = Perm(x)$, entonces la representación ρ asociará a cada operador de permutación $\hat{P} \in Perm(x)$ un operador unitario que actuará sobre \mathcal{H} . En términos de matrices, es posible sintetizar este punto del siguiente modo:

1. $\hat{P}_{\phi\psi} \Psi \Rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \Psi \Rightarrow$ ‘intercambio de partículas’
2. $\hat{P}_{id} \Psi \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \Psi \Rightarrow$ ‘no hacer nada’.

Ambas matrices constituyen una representación unitaria del grupo $Perm(x)$ en el espacio de Hilbert \mathcal{H} . Lo interesante de este resultado es que estas matrices solo conmutan con la matriz identidad o algún múltiplo escalar de ella, por lo que son llamadas representaciones irreducibles. La importancia de estas representaciones reside en que “[...] cada una de dichas representaciones es ‘sostenida’ por un subespacio irreducible del espacio de Hilbert, donde cada uno de dichos subespacios es invariante bajo la acción de los operadores de permutación”²¹. Más explícitamente aun, “[...] los subespacios representan sectores de simetría correspondientes a los posibles tipos de simetría por permutación poseídas por las partículas cuyos vectores de estado se encuentran en ese subespacio”²². En el caso del espacio de Hilbert \mathcal{H} generado por ϕ y ψ , este es dividido en dos subespacios invariantes bajo la acción del grupo de permutación:

1. el subespacio simétrico $\{\phi \otimes \phi, \psi \otimes \phi, \phi \otimes \psi + \psi \otimes \phi\}$
2. el subespacio anti-simétrico $\{\phi \otimes \psi - \psi \otimes \phi\}$

El subespacio simétrico es de tres dimensiones, lo que implica que es reducible, pero los tres subespacios que lo generan no lo son porque no poseen subespacios propios invariantes por permutación, por lo que French y Rickles concluyen que “[...] las representaciones irreducibles

20 French y Rickles 2003, p. 217.

21 Op. cit., p. 218.

22 Op. cit., p. 218.

corresponden a clases de partículas”²³. Un aspecto interesante de este enfoque, y que se relaciona con la modalidad de las estructuras, es que en el caso de N partículas surgen nuevos tipos de simetrías, originando representaciones irreducibles que corresponderían a nuevos tipos o clases de partículas, las que obedecerían leyes estadísticas diferentes, razón por la cual han sido llamadas ‘para-estadísticas’.

Así, la distinción entre los distintos tipos de partículas se deriva como consecuencia de la IpP y las estadísticas que obedecen estos distintos tipos de partículas se derivan a su vez de la acción del grupo de permutación sobre el espacio de Hilbert, dividiéndolo en subespacios que corresponden a representaciones irreducibles del grupo anteriormente mencionado. De este modo, es posible entender que la modalidad se encuentra codificada en la IpP, a partir de la cual se derivan los distintos tipos *posibles* de partículas. No obstante lo anterior, las únicas clases de partículas que han sido observadas experimentalmente corresponden a bosones y fermiones, lo que motivó originalmente a Messiah a introducir el Postulado de Simetrización: “Los estados de un sistema que contiene N partículas idénticas son necesariamente todos simétricos o todos anti-simétricos con respecto a las permutaciones de las N partículas”²⁴. Otra forma de expresar el porqué no se han observado partículas que no sean bosones o fermiones, más directa y menos elegante que la utilizada por Messiah, es decir simplemente: “así es el mundo!”²⁵.

5. Conclusiones

Como hemos visto en este trabajo, el estructuralismo puede responder a las objeciones planteadas respecto al supuesto carácter abstracto de las estructuras, lo que las haría incapaces de soportar una ontología del mundo físico. Sin embargo, al adoptar una concepción de la causalidad en que las simetrías y las cantidades conservadas juegan un rol primordial, como en la teoría de Dowe, el estructuralismo puede dar cuenta de las relaciones causales, que conformarían un rasgo fundamental del mundo físico, aunque con una noción ‘delgada’ de dicho concepto. Además, al adoptar una noción estructural de las partículas elementales como representaciones irreducibles de un grupo de simetrías espacio-temporales, abrazando el programa de Wigner, es

23 Op. cit., p. 218.

24 Messiah 1962, p. 595.

25 French 2014, p. 268.

posible articular la modalidad primitiva de las estructuras en términos de las posibles representaciones, simétricas, anti-simétricas u otras, que se derivan de la Invariancia por Permutación. De este modo, podemos afirmar que las objeciones planteadas por Psillos, las que se enmarcan dentro de las cuatro formas de caracterizar la distinción abstracto/concreto ya planteadas por D. Lewis (Lewis, 1986), asumiendo la ‘vía negativa’, es decir, que lo que distinguiría a las entidades abstractas es que no establecen relaciones causales ni se localizan en el espacio-tiempo, son valiosas e interesantes de estudiar para el estructuralista. Sin embargo, no constituyen un obstáculo insalvable ya que, en nuestra opinión, se fundan en nociones como la causalidad y la localización espacio-temporal que sí, de alguna manera, pueden ser preservadas en un contexto estructuralista, necesariamente adquirirán nuevas e insospechadas dimensiones filosóficas.

Referencias bibliográficas

- Bird, A. (2007). *Nature's Metaphysics: Laws and Properties*. Oxford: Oxford University Press
- Castellani, E. (1995). "Quantum Mechanics, objects and objectivity", en C. Garola y A. Rossi (Eds.), *The Foundations of Quantum Mechanics*, pp. 105-114. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Chakravartty, A. (2007). *A Metaphysics for Scientific Realism: Knowing the Unobservable*. Cambridge University Press.
- Cottingham, W. N. y Greenwood, D. A. (2007). *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dowe, P. (2000). *Physical Causation*. New York: Cambridge University Press.
- Dorato, M. (2003). "Dispositions, Relational Properties and the Quantum World". http://philsci-archive.pitt.edu/967/1/Dispositions_and_QM.PDF. [Preprint]
- Esfeld, M. (2009). "The Modal Nature of Structures in Ontic Structural Realism". *International Studies in the Philosophy of Science*, 23(2): 179-194.
- French, S. (2014). *The Structure of the World: Metaphysics and Representation*. Oxford University Press.
- French, S. y Krause, D. (2006). *Identity in Physics: A Historical, Philosophical and Formal Analysis*. Oxford: Oxford University Press.

- French, S. y Ladyman, J. (2003). "Remodelling structural realism: Quantum physics and the metaphysics of structure". *Synthese* 136 (1):31-56.
- French, S. y Rickles, D. (2003). "Understanding Permutation Symmetry", en Brading, K. y Castellani, E. (eds.), *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, pp. 212-238. Cambridge: University Press.
- Heisenberg, H. (1958). *Physics and Philosophy*, Londres: Allen & Unwin Ltd.
- McCabe, G. (2007). *The Structure and Interpretation of the Standard Model* (Philosophy and Foundations of Physics: Volumen 2). Amsterdam: Elsevier.
- Messiah, A. (1962). *Quantum Mechanics*. Amsterdam: North Holland Publishing Company.
- Lewis, D. (1986). *On the Plurality of Worlds*. New York: Basil Blackwell.
- Molnar, G. (2003). *Powers: A Study in Metaphysics*. Oxford: Oxford University Press.
- Popper, K. (1982). *Quantum Theory and the Schism in Physics*. Londres: Hutchinson.
- Psillos, S. (2006). "The Structure, the Whole Structure and Nothing but the Structure?" *Philosophy of Science*, 73: 560-570.
- Shapiro, S. (1997). *Philosophy of Mathematics: Structure and Ontology*. Oxford: Oxford University Press.
- Shwartz, M. (2014). *Quantum Field Theory and the Standard Model*. Cambridge: Cambridge University Press.